

一般社団法人防衛施設学会年次フォーラム 2025 論文集目次

「防災・環境」

座長：副島正睦（統合幕僚学校）

- ① PFAS を含侵したコンクリートからの再溶出防止に係る検討
國井聡、林夕紀子、森川純、芳賀直樹（前田建設工業（株））・・・1
- ② 環境水中 PFAS 対策技術
大山将、平尾壽啓（（株）鴻池組）・・・9
- ③ PFAS 汚染土壌・地下水の汚染拡大防止技術
日野良太、西川直仁、日笠山徹巳（（株）大林組）・・・17
- ④ 森林表土を利用した植生工の有効性と生産性向上に向けた遠隔操作施工
石垣幸整（日特建設（株））・・・23
- ⑤ 令和6年能登半島地震における「水」を軸とした避難生活の支援報告
～被災地での「生活用水」支援活動から得た知見～
中根圭介（ユーティリティ・ソリューションズ）、栗田恵子（コアラボ）・・・31
- ⑥ 液状化対策及び地下構造物の保護に関する D・Box の活用検討
野本太、嶋田宏、岩佐隆（メトリー技術研究所（株））・・・37

「衝撃・振動問題」

座長：宮本慎太郎（防衛大学校）

- ⑦ 飛翔体衝突によって励起される RC 構造物の衝撃振動が内部機器へ及ぼす
影響に関する研究
上村勇太、笠置昌寿、武者浩透、宇賀田健（大成建設（株））、
森広毅、別府万寿博（防衛大学校）・・・43
- ⑧ プレパックドコンクリートの耐爆性の向上に関する研究
市野宏嘉（防衛大学校）・・・49
- ⑨ SIFCON パネルと緩衝材により構成される爆発緩衝システムの RC 版への緩衝効果と
裏面補強との併用効果に関する研究
北村塔子、山口信、米田ひかり（熊本大学）、
森島慎太郎（日鉄高炉セメント（株））・・・55
- ⑩ ごく少量のナイロン繊維をあと添加したコンクリートの接触爆発に対する
耐爆性能に関する研究
米田ひかり、山口信、北村塔子（熊本大学）、
長友法樹（（株）エイオービー・アンド・ダヴィンチ・インターナショナル）・・・61
- ⑪ 鋼板製一体形タンクのバルジングに関する振動実験と FEM 解析の研究
小野泰介、杉崎吉明、橋本進（一般社団法人鋼板製一体形タンク工業会）・・・67
- ⑫ 構造形式の異なる二槽式 SUS タンクのバルジング発生時における水圧分布の検討
平井秀、平野廣和、佐藤尚次（中央大学）・・・71

「建設技術」

座長：森島慎太郎（日鉄高炉セメント（株））

- ⑬ 圧倒的な高強度で防衛施設の強靱化・最適化を実現する柱状地盤改良技術
「SST 工法」
菊地稔、飯田哲夫（（株）エスエスティー協会）・・・75
- ⑭ 回転杭工法の施工報告
時田知典、河野謙治、坂口裕司、笹祐也（JFE スチール（株））・・・81
- ⑮ 火山砂防における消波工付き透過性ブロック堰堤の適用性に関する基礎的な研究
原田紹臣、藤本将光（立命館大学）、
佐藤哲也、神野忠広（共和コンクリート（株））・・・85
- ⑯ ジオセルの地盤補強効果の解析法
宮本慎太郎、宮田喜壽、野々山栄人（防衛大学校）・・・93
- ⑰ 1km 先を照らす可視光レーザー投光技術
石川功一、丸山広太郎（岩崎電気（株））・・・97
- ⑱ コルゲートアーキテクチャー
揚原茂雄、遠藤秀平、李鍾和（近未来建築社会実装機構（株））・・・101

「基地維持・管理」

座長：小野泰介（一般社団法人鋼板製一体形タンク工業会）

- ⑲ GMS3（地中レーダ 3 次元モバイルマッピングシステム）による埋設管マッピング及び
インフラ管理技術
篠原潤（日本インフラ空間情報技術協会）・・・105
- ⑳ コンクリート構造物の自己治癒化によるメンテナンスフリーへのアプローチ
～防衛施設の基盤であるコンクリートの「超」高耐久化を実現するバイオマテリアル～
青木涼、酒井亨、黒川翔太（會澤高圧コンクリート（株））・・・111
- ㉑ AI 技術によるコンクリート構造物の診断技術
黒田一郎（防衛大学校）、櫛原弘貴（福岡大学）、
西敏臣、古賀美智恵（（株）九検）、関和彦（アイセイ（株））、
歌川紀之（佐藤工業（株））、中島道浩（八千代エンジニアリング（株））・・・117
- ㉒ 映像鮮明化技術と AI 技術を活用した外周警備システム～SOLPAK4～
横山雅俊（（株）ユニバーサルコンピュータ研究所）・・・125

「防災・環境」

PFAS を含侵したコンクリートからの再溶出防止に係る検討

Study on prevention of re-leaching of PFAS from concrete impregnated with PFAS

國井 聡*, 林 夕紀子*, 森川 純*, 芳賀 直樹*

Satoshi KUNII, Yukiko HAYASHI, Jun MORIKAWA, Naoki HAGA

*前田建設工業株式会社 ICI 総合センター(〒302-0021 茨城県取手市寺田 5270)

キーワード : PFAS, PFOS, PFOA, PFHxS, コンクリート、溶出
(PFAS, PFOS, PFOA, PFHxS, concrete, elution)

1. はじめに

駐車場を構える商業施設や庁舎等に設置される泡消火設備は、「泡消火薬剤原液タンク」、「配管」、「ポンプ設備」、泡消火薬剤原液を希釈する水を溜めおく「貯水槽」等から構成されている。¹⁾ 過去には、泡消火薬剤原液の成分の一部として PFOS や PFOA が用いられていたが、現在は、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約 (POPs 条約) の付属書 A 及び付属書 B へ掲載され、また、化学物質審査規制法の第一種特定化学物質に指定されたことから、製造・使用が制限されており、PFOS 等を含まない泡消火薬剤への置き換えが進められている。²⁾ 環境省では、日本国内に存在する PFOS 等含有泡消火薬剤の全国調査を実施したところ、令和 2 年度では 338.8 万 L であったのに対し、令和 4 年では 185.0 万 L へ約 45% 減少したことが明らかとなった。³⁾ 水質汚濁防止法において、これらの PFOS や PFOA は要監視項目に位置付けられており、暫定指針値として PFOS・PFOA の合計値 50ng/L が設定されている。⁴⁾ また、環境省の PFAS 対策専門家会議ではさらなる規制強化への議論を進め、PFOS・PFOA に関する水道水質基準として、令和 7 年 4 月を目途に PFOS と PFOA の合算値 50ng/L を基準とする案が示された。⁵⁾ 近年 PFOS・PFOA に加えて、PFHxS も要調査項目に追加されている。⁶⁾ これらの物質を含むペルフルオロアルキル化合物、及びポリフルオロアルキル化合物の総称は PFAS と呼ばれているが、本報では、PFOS・PFOA・PFHxS の 3 物質を PFAS として表記する。

上述の泡消火設備に付帯する貯水槽はコンクリート製が用いられることがある。コンクリートは内部に微細構造を有するという材質特性上、外部の液

相・気相を内部に拡散させることが知られている。⁷⁾ その結果、重金属類の汚染物質含有水を貯水したコンクリートでは、コンクリートにも重金属類の侵入が確認されている。⁸⁾ ここで、PFAS は水に対して容易に溶ける物質であり (PFOS : 370mg/L、PFOA : 9.5×10^3 mg/L、PFHxS : 6.2×10^3 mg/L)⁹⁾、液相を介して拡散する可能性がある。そのため、PFAS を含む水がコンクリート製貯水槽に長期間保管された場合、コンクリート内部へ PFAS が浸透すると考えられる。

過去には自衛隊が所有する基地内の消火用専用水水槽にて PFOS、PFOA が検出される事例が報告されており^{10,11)}、近年では自治体庁舎内で発生した泡消火薬剤の漏出事故により、コンクリート製の湧水槽に PFOS・PFOA が流入する事例も報告されている。¹²⁾ このような事例から、PFOS・PFOA が付着した履歴のあるコンクリート製水槽は、全国に数多くあることが推察される。特に、後者の事例では、コンクリート製水槽内を水による洗浄を実施したものの、再度貯水した水から高濃度の PFOS・PFOA が検出されている。これは、コンクリート製水槽の躯体表面及び内部に PFOS・PFOA が付着・浸透し、貯水された清浄な水に再溶出したと考えられる。すなわち、一度、PFAS を含む水と一定時間接触したコンクリート製水槽からは、貯水された水へ PFAS が再溶出することが懸念されるため、溶出を防止する策を講じる必要がある。海外では、消防訓練場から採取した PFAS を含浸するコンクリートサンプルに対して長期的溶出挙動に関する調査を行い、雨水等を介した周辺汚染の可能性が示唆されている。^{13,14)}

2. 目的

PFAS を含有する土壌を対象とした室内試験により、PFAS の固相から液相への溶出挙動の検討・解析を実施した事例はあるが¹⁵⁾、コンクリートを対象とした PFAS の含浸と溶出の挙動に関する報告は少ない。そこで本報は、コンクリート供試体を用いた室内試験による PFAS の含浸と溶出の挙動確認を目的とした。

また、コンクリート内部に含浸した PFAS が貯水した水に再溶出し、汚染を拡散することへの対策を講じる必要がある。溶出対策として、防食被覆工法に使用される樹脂をコンクリート表面に塗布し、コンクリート表面、及び内部に含浸された PFAS を物理的に水と遮断する方法を検討した。この防食被覆工法には、下水道等において一般的に用いられる工法を選定した。

さらに、防食被覆後のコンクリート供試体を再度 PFAS を含む水と接触させ、塗布面に付着した PFAS を、水洗浄で除去可能かを確認した。

3. 試験方法

3. 1 PFAS 含浸コンクリートの作製

水道水に各初期濃度 100,000(ng/L)となるように PFOS、PFOA、及び PFHxS 試薬を添加し、PFAS 溶液を調製した。なお、使用した水道水には PFAS が含まれていないことを予め確認した。この溶液に表-1 の配合条件にて作成したコンクリート供試体を 5 日間浸漬し、コンクリート内へ PFAS を含浸させた。

浸漬したコンクリートをバット上に取り出し、5 日間風乾した。その後、コンクリート内への PFAS 含浸量を測定するため、コンクリート供試体を破碎し、粉末状に摩砕後にメタノール抽出にて PFAS 濃度を測定した。

表-1 コンクリート供試体の配合条件

項目	記号	条件
水セメント比	W/C	47%
スランプ	S1	15.0±2.0 cm
空気量	A	1.0±1.0%
粗骨材最大寸法	G _{MAX}	15 mm
塩化物量	Cl ⁻	0.30 kg/m ³ 以下
アルカリ骨材反応の抑制対策	-	無害と判定された骨材を使用

3. 2 防食被覆供試体の作成

コンクリート供試体の表面塗布し、1 日間乾燥させた後に裏塗することで、供試体全面を樹脂により塗装した。本報では、日本下水道事業団の C 種相当の塗装膜となるように 2 回に分けて防食層を塗装し、ウェットゲージを用いて施工膜厚を確認した。実際の施工を想定し、防食層 1 層目の塗装後にピンホールが発生した場合、発生箇所補修作業を実施している。2 層目の防食層を塗装後に、防食被覆材を十分に硬化させるため、2 週間気中にて養生した。

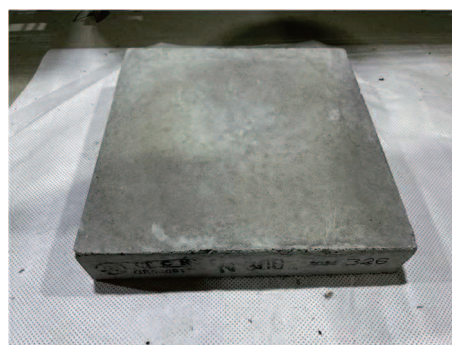


写真-1 コンクリート供試体の全景

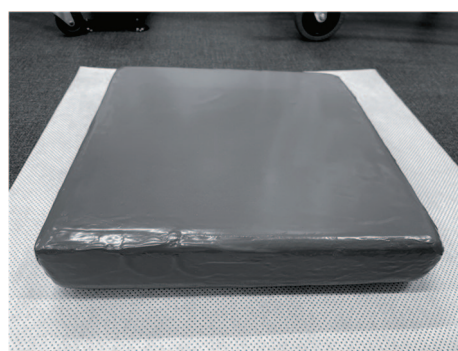


写真-2 防食被覆処理済の供試体の全景
(モノクロ写真)

3. 3 供試体からの PFAS 溶出の確認試験

PFAS 含浸コンクリート供試体（防食塗装なし）および防食被覆済の供試体を、個別の容器時準備した水道水 5L 中に 14 日間浸漬した。浸漬期間中に水相を複数回にわたって採取し、LC-MS/MS を用いて、PFAS 濃度を測定し、経時変化を確認した。

3. 4 防食被覆済供試体への PFAS 付着性の確認試験

水道水に各初期濃度 100,000(ng/L)となるように

表－2 LC-MS／MS の分析条件

1) LC条件			2) MS/MS条件		
機器名称	: SCIEX社製 ExionLC		機器名称	: SCIEX社製 QTRAP4500	
カラム	: Phenomenex社製 Kinetex		カラム	: ESI Negative	
注入量	: 15 μ L		SRM条件	PFOS	499→80 (定量用) 499→80 (確認用)
カラム温度	: 40℃			PFOA	413→369 (定量用) 413→169 (確認用)
移動相	: A液 (0.02% 酢酸、2mM 酢酸アンモニウム含有水)			PFHxS	399→80 (定量用) 399→99 (確認用)
	B液 (メタノール)			$^{13}\text{C}_8$ -PFOS	507→80
	0～8.25min	A液 : 80%→2.0% B : 20%→98%		$^{13}\text{C}_8$ -PFOA	421→376
	8.25～11min	A液 : 2.0% B : 98%		$^{13}\text{C}_7$ -PFHxS	402→80
	11～11.1min	A液 : 2.0→80% B : 98→20%			
	11.1～15min	A液 : 80% B : 20%			
流速	: 0.6 mL/min				

PFOS、PFOA さらに PFHxS 試薬を添加し、PFAS 溶液を調製した。ここへ防食塗布したコンクリート供試体を 5 日間浸漬した。浸漬後の供試体は、PFAS 水溶液から取り出した後、ブラシを用いて供試体表面を水洗浄し、表面に付着している PFAS を洗い流した。その後、個別の容器に準備した水道水 5L 中に各供試体を浸漬し、PFAS 濃度を確認した。

また、水洗浄後の防食被覆供試体の表面に残存する PFAS 量を測定するため、表面ふき取り試験を実施した。表面ふき取り試験は「低濃度 PCB 含有廃棄物に関する測定方法(第 5 報)」¹⁶⁾を準用し、ふき取りに用いる溶媒をヘキサンからメタノールへ変更して実施した。供試体表面上の任意の箇所に 100cm² (10cm×10cm)範囲を選定し、メタノール溶媒を含ませた脱脂綿で表面をふき取り、拭き取った脱脂綿をメタノールで抽出して PFAS 濃度を測定した。

3. 5 分析方法

LC は ExionLC(SCIEX 社製)、カラムは Kinetex C18 2.6 μ m 50×3.0mm(Phenomenex 社製)、MS は QTRAP4500(SCIEX 社製)を用いた。測定条件を表－2 に、装置全景を写真－3 に示す。

4. 結果と考察

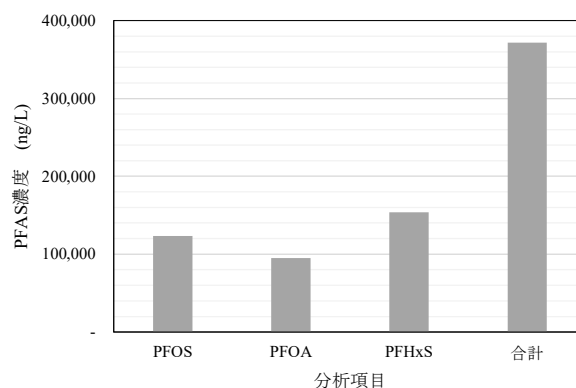
4. 1 PFAS 含有コンクリートの作製

各 PFAS 濃度が 100,000ng/L となるように調製した PFAS 溶液中の濃度は図－1 の結果となった。

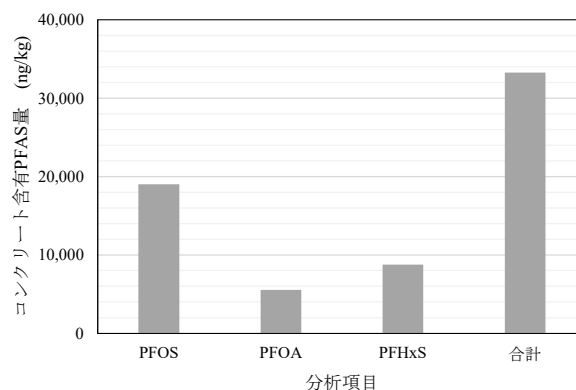
PFAS 溶液中にコンクリート供試体を含浸させ、そのコンクリート中に含まれる PFAS 含有量を測定した結果を図－2 に示す。PFOS が最も多く含有されていることを確認した。



写真－3 LC-MS／MS 装置の全景



図－1 PFAS 溶液の濃度



図－2 コンクリートの含浸量

ここで、初期 PFAS 溶液中に存在する PFAS 量を分母とし、コンクリートに含有された PFAS 量を分子として、これを含浸率(%)とした。以下、式(1)に示す。

$$\text{含浸率} = (C \times W) / (X_1 \times V_1) \times 100 \quad (1)$$

C：コンクリート中の PFAS 濃度(ng/kg)

W：コンクリート重量(kg)

X₁：原水 PFAS 濃度(ng/L)

V₁：原水容量(L)

図-3 にコンクリート中への PFAS の含有率を示す。PFOS が 35.4%と最も含浸率が高く、コンクリート内に浸透しやすいと考えられた。PFOA と PFHxS は同程度の含浸率であった。全体として、14 日間で 20.6%の PFAS がコンクリートの内部へ浸透する結果となった。

4. 2 PFAS 含有コンクリートからの溶出試験

作製した PFAS 含浸コンクリート供試体を水道水で満たした容器内へ浸漬し、溶出試験を実施した。容器内の水を適時採水し、溶出液中の PFAS 濃度を測定した。図-4 に無対策の PFAS 含浸コンクリート供試体の溶出試験結果を示す。PFAS 濃度は短時間で上昇した後、118h 以降では濃度変化が小さくなり、平衡状態に至った。

また、コンクリート供試体に含浸した PFAS 量から水中へ溶出した PFAS 量を減算することにより、コンクリート供試体に残存する PFAS 量を算出した。以下に式(2)を示す。

$$\text{含有量} = C_0 - X_2 \times V_2 \div W \quad (2)$$

C₀：コンクリート中の初期 PFAS 濃度(ng/kg)、

X₂：浸漬液中の PFAS 濃度(ng/L)、

V₂：浸漬液容量(L)、

W：コンクリート重量(kg)

含有量の経時変化を図-5 に示す。コンクリート中の PFAS 含有量は、14 日間までに平衡状態となり、PFOS が最も溶出しにくかったことを確認した。

浸漬後のコンクリート中の PFAS 含有量より、コンクリート中の残存率(%)を算出した。以下に式(3)に表す。

$$\text{残存率} = C/C_0 \times 100 \quad (3)$$

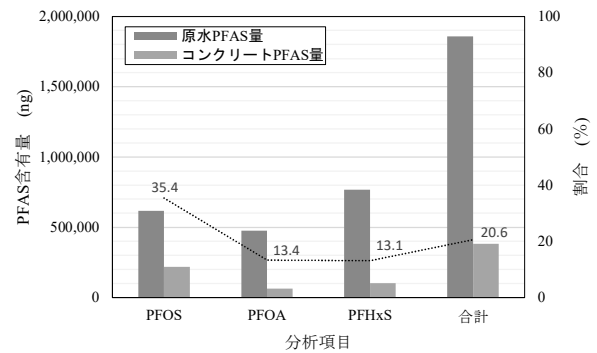


図-3 コンクリートへの含浸量

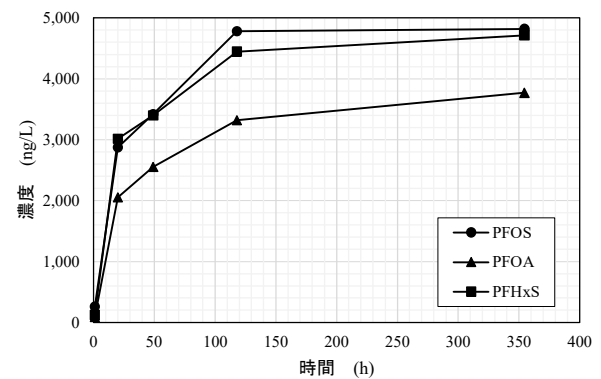


図-4 溶出液中の PFAS 濃度の経時変化

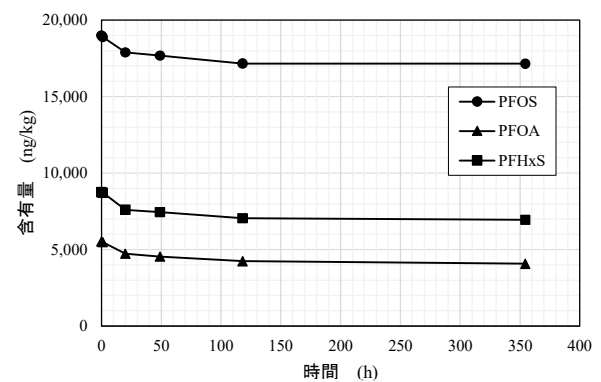


図-5 コンクリート中の PFAS 含有量

C₀：コンクリート中の初期 PFAS 濃度(ng/kg)、

C：コンクリート中の PFAS 濃度(ng/kg)

含有量の経時変化を図-6 に示す。コンクリート中の残存率としては、PFOS が 3 成分中で最もコンクリート中から溶出され難く、90%となった。また、PFOA・PFHxS はそれぞれ 74%と 79%の残存率であった。

コンクリート内部から外部への物質の移動は、コンクリートの内部における濃度勾配に起因する移動

とコンクリート表面から湧き出すことによる移動があるとされる。

後者の移動が支配的に生じる場合、フィックの第二法則による方程式が成り立つ。このとき、累積溶出量は以下の式(4)で示される。¹⁷⁾

$$M=2C_0S\sqrt{Dt/\pi} \tag{4}$$

M：溶出量(ng)
C₀：コンクリート中の初期 PFAS 濃度(ng/m³)、
S：試験体の表面積
D：拡散係数(m²/s)
t：時間

図 4 に示した防食塗装処理を施していないコンクリートの溶出試験結果と上述のフィックの第二法則によって推定される累積溶出量を比較した。

なお、法則に則した評価手法としては、本来コンクリート界面の水を常に清潔な水へ交換し、採水した溶媒への移動量を評価する必要があるが、今回は溶出水を交換せずに試験を経時変化の観察を行った。また、コンクリート表面の PFAS 濃度は水と接触することで 0ng/m³となるものと仮定した。図-4 から、118h から 355h までの PFAS 濃度は平衡状態であることが明らかであるため、試験開始から 118h までの溶出量を最小二乗法に近似し、拡散係数の算定を行った。

図-7～図-9 に PFAS のそれぞれの溶出量にて実測と推定式の比較を示す。また、推定式より得られた拡散係数を表-3 に示す。

表-3 PFAS 溶出試験による拡散速度

品目	拡散速度 (m ² /h)
PFOS	0.89×10 ⁻⁶
PFOA	5.31×10 ⁻⁶
PFHxS	3.88×10 ⁻⁶

これより、本報での拡散速度は PFOS<PFHxS<PFOA であることが確認できた。

4. 3 防食塗膜による PFAS 溶出の遮断効果

PFAS 含浸コンクリートが水と接触することで、コンクリートから水への PFAS 溶出が生じてしまうため、防食塗膜による溶出遮断効果の確認を行った。防食塗膜によって液相との界面での PFAS の移動を物理的に遮蔽し、水への PFAS の溶出を抑えることを目的とした。図-10 に防食塗膜処理後の溶出試験結果を示す。防食被覆処理によって、溶出液中

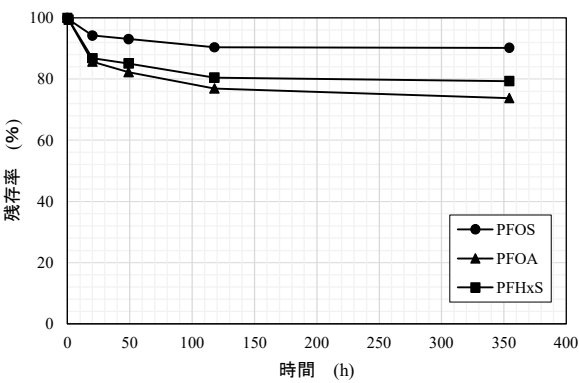


図-6 コンクリート中の PFAS 含有率

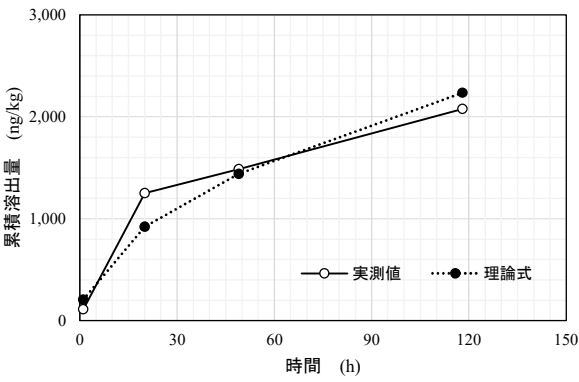


図-7 PFOS 溶出量の経時変化

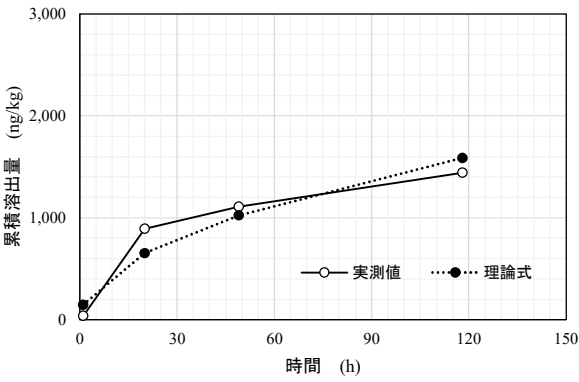


図-8 PFOA 溶出量の経時変化

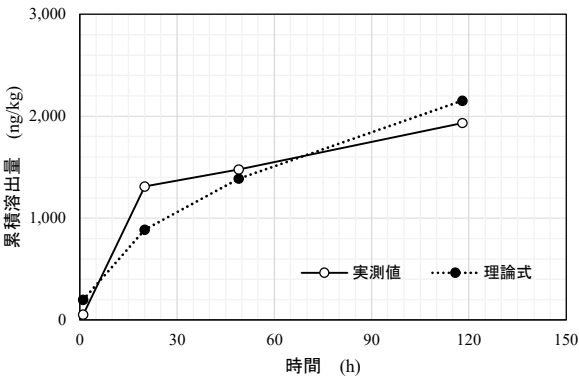


図-9 PFHxS 溶出量の経時変化

の PFAS 濃度はほぼ検出されなかったことから、溶出防止対策として有効であるといえる。

4. 4 PFAS 付着性能の確認試験

防食塗膜工法による要求性能では、素地となるコンクリート中の PFAS を外部へ漏出しないことが第一に上げられる。さらに、防食塗膜後のコンクリート構造物を継続して使用する上では、防食層の表面に PFAS 含有水が流れ込み、付着した場合においても、速やかに洗い流せる必要がある。

そのため、防食塗膜処理済のコンクリートを PFAS 含有水に浸漬させた後の PFAS の付着の程度と、水洗浄によって PFAS を容易に除去することが可能かを確認した PFAS 含有溶液中に防食塗膜処理したコンクリートを浸漬させ、防食塗膜の表面に PFAS を付着させた。付着させた後のふき取り試験結果を図-11 に示す。その後、流水による表面洗浄を実施し、風乾した。図-12 に洗浄後の表面ふき取り試験の結果を示す。水洗浄前の PFAS は $340\text{ng}/100\text{cm}^2$ であり、洗浄後では $88\text{ng}/100\text{cm}^2$ となった。このことから、流水による簡便な洗浄方法だけで約 74% の PFAS を付着面から除去することが可能であるといえる。すなわち、防食剤に付着した PFAS は容易に洗い流すことが可能である。

また、洗浄後の防食被覆コンクリートを水道水中に浸漬し、溶出試験を行った。図-13 に溶出液中の PFAS 濃度の経時変化を示す。25 日を経過しても、水相の PFAS 濃度は $50\text{ng}/\text{L}$ 以下であった。一般的に、樹脂による防食剤は固化する過程で発泡することにより、表面に微細な孔が生じることがある。細孔中に PFAS が付着した場合には、表面を洗浄するだけでは容易に洗い流すことができないため、残留した PFAS による二次汚染が発生する可能性がある。本報で採用した防食工法は、表面に細孔がほぼ確認できなかったため、表面に付着した PFAS を高率的に除去できたものと考えられる。

5. まとめ

コンクリートに含浸した PFAS 溶出挙動に関して、3 種の PFAS の内、PFOS が最もコンクリートに含浸されやすい結果であった。また、溶出試験を行い、コンクリートから PFAS が溶出されることを確認した。

また、PFAS 含有コンクリートに防食被覆することで、PFAS の溶出を遮断することができることを

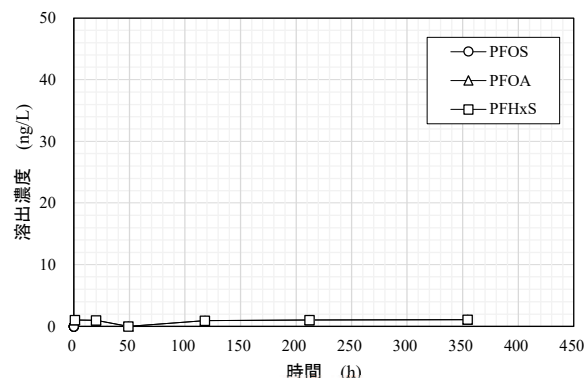


図-10 防食塗布したコンクリートの PFAS 溶出試験結果

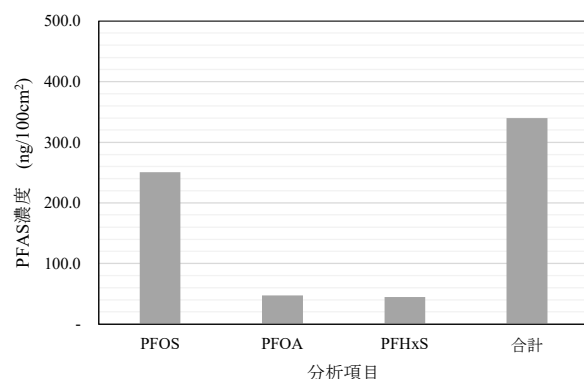


図-11 表面ふき取り試験結果(洗浄前)

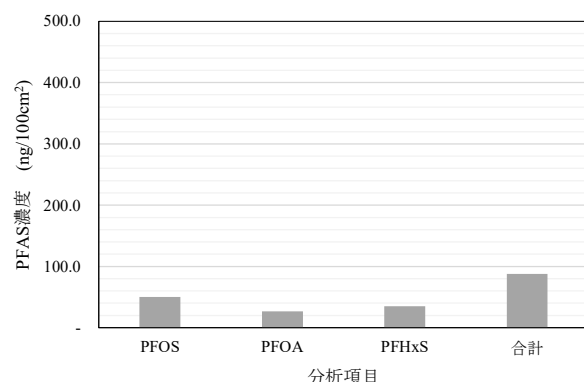


図-12 表面ふき取り試験結果(洗浄後)

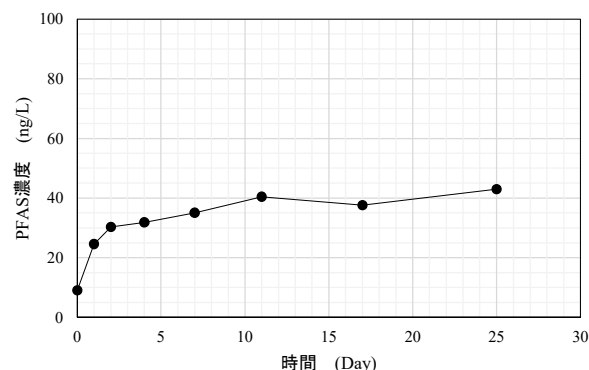


図-13 防食塗布したコンクリートの PFAS 溶出試験結果

確認した。さらに、本工法で採用した防食塗膜はPFASが表面に付着しても、水洗浄によって容易にPFASが溶脱することを確認した。

参考文献

- 1) 泡消火設備，一般社団法人泡消火装置工業会
<http://shosoko.or.jp/equipment/awa.html>
- 2) 環境省，PFOS等を含有する消火器・泡消火薬剤等の取り扱い及び処理について
<https://www.env.go.jp/chemi/kagaku/pfos.html>
- 3) 環境省，令和6年11月1日，PFOS等含有泡消火薬剤全国在庫量調査の結果について
https://www.env.go.jp/press/press_03919.html
- 4) 環境省，令和2年5月28日，環水大発第2005281号 環水大土発第2005282号
- 5) 環境省，令和6年12月24日，PFOS・PFOAに係る水質の目標値等の専門家会議(第5回)、資料1-2 水道水におけるPFOS及びPFOAの取扱いの改定方針等について(案)
<https://www.env.go.jp/content/000276966.pdf>
- 6) 環境省，令和3年3月26日，ペルフルオロヘキサンスルホン酸（PFHxS）について
<https://www.env.go.jp/content/900539428.pdf>
- 7) 羽原ら，Gypsum&Lime，No.240(1992)，p.314-323，硬化コンクリートの空隙構造とその物性
- 8) 渡邊ら，コンクリート工学年次論文，Vol.42，No.1，2020，コンクリート中へのセシウムイオンの侵入挙動の基礎評価
- 9) 鶴岡ら，第27回地下水・土壌とその防止対策に関する研究集会，2022，PFOS、PFOAおよびPFHxSによる土壌・地下水汚染の調査・対策技術の現状
- 10) 防衛省，令和4年7月22日，自衛隊施設における泡消火設備専用水槽水質調査結果について
<https://www.mod.go.jp/j/press/news/2022/07/22e.pdf>
- 11) 防衛省，令和5年10月6日，防衛省・自衛隊が保有するPFOS含有泡消火薬剤等の処理完了予定時期等について
<https://www.mod.go.jp/j/press/news/2023/10/06b.pdf>
- 12) 沖縄県総務部管財課，令和6年2月15日，沖縄県庁泡消火剤流出
<https://www.pref.okinawa.lg.jp/kensei/kencho/1014074/1022967.html>
- 13) Phong K.Thai, Journal of Hazardous Materials Letters, 3, 2022, Release of perfluoroalkyl substances from AFFF-impacted concrete in a firefighting training ground (FTG) under repeated rainfall simulations
- 14) Christine Baduel, Journal of Hazardous Materials, 296, 2015, p.46–53, Perfluoroalkyl substances in a firefighting training ground (FTG), distribution and potential future release
- 15) 梅原悠平ら，防衛施設学会年次フォーラム(2023)，p.49-54，PFAS汚染土壌の浄化工法開発に向けた基礎的検討
- 16) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課，令和2年10月，低濃度PCB含有廃棄物に関する測定方法(第5報)
<https://www.env.go.jp/content/900535195.pdf>
- 17) 田野ら，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006，セメント硬化体からの重金属溶出機構に関する実験的検討

環境水中 PFAS 対策技術

PFAS REMEDIATION TECHNOLOGY FOR ENVIRONMENTAL WATER

大山将*, 平尾壽啓**

OYAMA Sho and HIRAO Toshihiro

* 株式会社鴻池組 技術研究所 大阪テクノセンター（〒559-0034 大阪市住之江区南港北 1-19-37）

** 株式会社鴻池組 環境エンジニアリング本部 環境技術部（〒559-0034 大阪市住之江区南港北 1-19-37）

キーワード：PFAS、環境水、粉末活性炭吸着、水素燃焼式高温過熱水蒸気、分解処理

(PFAS, Environmental water; Powdered activated carbon adsorption, Hydrogen-combustion-type high-temperature superheated steam, Decomposition treatment)

1. はじめに

有機フッ素化合物 PFAS（ペルおよびポリフルオロアルキル化合物）による環境水等の汚染に強い関心が集まっている。PFAS は撥水性および撥油性という特性を持ち、また化学的および熱安定性等に優れ、撥水・撥油剤、界面活性剤、コーティング剤、金属メッキ処理剤、殺虫剤、泡消火薬剤等に 70 年以上¹⁾ 広く使用されてきたが、ペルフルオロオクタンスルホン酸 (PFOS) やペルフルオロオクタン酸 (PFOA) は化学的に極めて安定性が高く、水溶性かつ不揮発性の物質であるため、環境中に放出された場合には水系に移行しやすく、難分解性のため長期的に環境に残留すると考えられている²⁾。近年の分析技術の発展、向上により炭素鎖数 1~3 の超短鎖 PFAS が測定できるようになり、環境中における超短鎖 PFAS の検出事例が報告されつつある³⁾。その中でも、特にトリフルオロ酢酸 (TFA) が環境中に拡散していることが示され、その存在量は、PFOS、PFOA に比べて圧倒的に多く、生物への影響や毒性評価等の調査が行われている⁴⁾。

国内においては、環境省の直近の調査結果^{5,6)} を見ても PFOS・PFOA および PFHxS が河川水や地下水等から幅広く検出されている状況であり、その他の PFAS を含めてその移動性を封じ込めつつ、安全で確実な PFAS 分解処理技術の確立が望ましいと考えられる。

環境水中に含まれる PFAS への対応として、まず初めに低コストで直接分解処理する手法の開発に着手し、純水中の PFOS・PFOA が超音波照射で生じるキャビテーションバブルの圧壊時に気液界面領域で熱分解する⁷⁾ という報告を基に、水中高速水噴流によるキャビテーションを利用した PFOS・PFOA 等の分解処理について基礎的検討を行い、キャビテーションの効果により PFOS・

PFOA 等の濃度を低下させ得ることを確認⁸⁾ した。次に、速やかに社会実装可能でかつ低コストの水処理技術として「粉末活性炭による吸着処理」に着目した。筆者らは過去に旧軍毒ガス弾等を使用した化学物質の一つである有機ヒ素化合物（主にジフェニルアルシン酸）⁹⁾ による地下水汚染に対して「粉末活性炭吸着+凝集沈澱処理」を適用して揚水した地下水の処理を行った。この際、pH を酸性雰囲気調整して粉末活性炭に吸着させる¹⁰⁾ ことで、吸着性の低いジフェニルアルシン酸を安定して吸着・除去できる¹¹⁾ ことを経験した。この経験を活かし、PFOS、PFOA および PFHxS 等の PFAS を含む環境水の吸着処理を実験的に検討することとした。なお、PFAS を吸着した粉末活性炭の最終的な無害化処理の方法も勘案し、処理水を得る固液分離技術には精密ろ過 (MF) 膜領域の膜分離技術（ろ過処理技術）を採用することにした¹²⁾。

また、粉末活性炭に吸着させた PFAS については、最終的に、適切かつ確実に破壊（分解処理）する必要があると考える。そこで筆者らは、令和 5 年に環境省が公表した「PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」¹³⁾（以下「技術的留意事項」という）に合致し、環境負荷を低減させた PFAS の新たな分解処理技術として、水素を燃焼させて生成する 1,100℃を超える高温の過熱水蒸気を用いた分解処理手法の開発を進めている¹⁴⁾。

本発表では、まず粉末活性炭による PFAS の吸着処理の開発に関して、PFAS を含む実際の河川水を用いて実験・検討した結果について報告する。次に、粉末活性炭に吸着した PFAS の分解処理の開発に関しては、水素燃焼式高温過熱水蒸気分解処理の試験装置を使用し、PFOS 等を含む泡消火薬剤の希釈液に粉末活性炭を添加して作

製した「PFAS 吸着粉末活性炭スラリー」の分解処理実験を行った結果について紹介する。

2. 粉末活性炭による PFAS 吸着試験

2.1 試験に用いた粉末活性炭および試料水

実験には比較的安価で取り扱いが容易な 4 種類の粉末活性炭（WET 品；湿潤状態）を準備した。原料別に木質（活性炭 A）、ヤシ／木質（活性炭 B）、石炭（活性炭 C）、木質（活性炭 D）の 4 種類で、いずれも水蒸気賦活で製造された一般的な製品で、浄水・排水処理、有機物除去等の用途に使用されている。また、植物由来の材料を原料として新規に開発された粉末活性炭（活性炭 E；乾燥品・酸洗品）も検討に加えた。

試料水は PFOS、PFOA 等の PFAS を含む実際の河川水を使用した。試料水の pH、TOC、鉄・マンガン濃度、主な PFAS として PFOS (C8)、PFHxS (C6)、PFOA (C8)、PFHxA (C6) 等の濃度を表-1 に示す。試料水や処理水中の PFAS の分析は、JIS K 0450-70-10 および US EPA Method 1633 に示された方法¹⁵⁾に従った。

表-1 試料水の性状および PFAS 等の濃度

分析項目	単位	試料水（河川水）
pH	-	6.8 ~ 8.0
TOC	mg/L	1.8 ~ 2.3
鉄	mg/L	<0.1 ~ 3.3
マンガン	mg/L	<0.1 ~ 17
PFASs/PFCAs 主な含有状況	ng/L	PFOS : 140 ~ 500 PFHxS : 650 ~ 2,200 PFOA : 140 ~ 300 PFHxA : 350 ~ 670
他の PFAS 関連物質	ng/L	6 : 2FTS : 270 ~ 310 8 : 2FTS : 17 ~ 25 PFOSA : 40 ~ 48

※ PFASs/PFCAs は直鎖体のみの結果を示している

2.2 PFAS 吸着量比較実験方法

試料水を用いて活性炭 A～E の PFAS 吸着量の把握を行った。試料水 2 L、1 L もしくは 500 mL を PP 製ディスポーザルカップに量り取り、活性炭 A～E を試料水に対して添加量 100 mg-dry/L 程度を基本として、活性炭によっては 25～100 mg-dry/L 程度の範囲で数水準変化させて試料水に添加し、攪拌機を用いて 20℃程度に調整した室温

で 1 時間攪拌した。攪拌中に pH 調整は行わなかった。攪拌終了後に速やかに 5C ろ紙でろ過してろ水を得た。試料水およびろ水中的 PFAS 濃度を差し引いた値から、粉末活性炭の固形分に対する吸着量を算出した。

2.3 PFAS 吸着量比較実験結果

粉末活性炭 A～E の PFAS 吸着量比較実験の結果を図-1 に示す。試料水は PFASs（ペルフルオロアルキルスルホン酸類）および PFCAs（ペルフルオロアルキルカルボン酸類）の両方とも同程度の濃度で含まれていたが、同様の平衡濃度であれば PFOS、PFHxS（PFASs）の方が PFOA、PFHxA（PFCAs）よりも吸着量が多い結果であった。また、当然ではあるが、平衡濃度が高いと吸着量が増加する（水中に吸着する物質が多いと多くの量が吸着し、吸着する物質が少ないと少ない量しか吸着しない）。したがって、平衡濃度が高い状態を処理プロセスの中で意図的に作った方が、粉末活性炭の持つ吸着能力をより多く発揮できるため、図-2 に示した 2 段階処理フローの

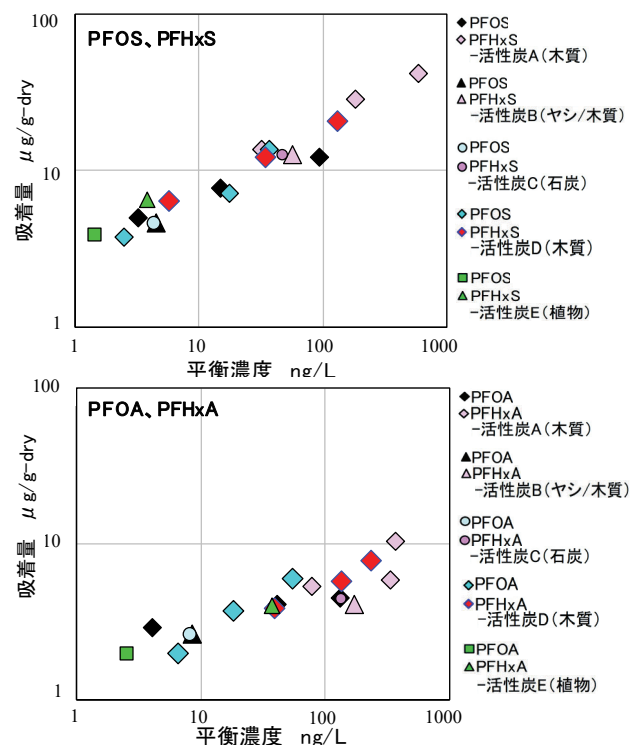


図-1 平衡濃度と吸着量との関係

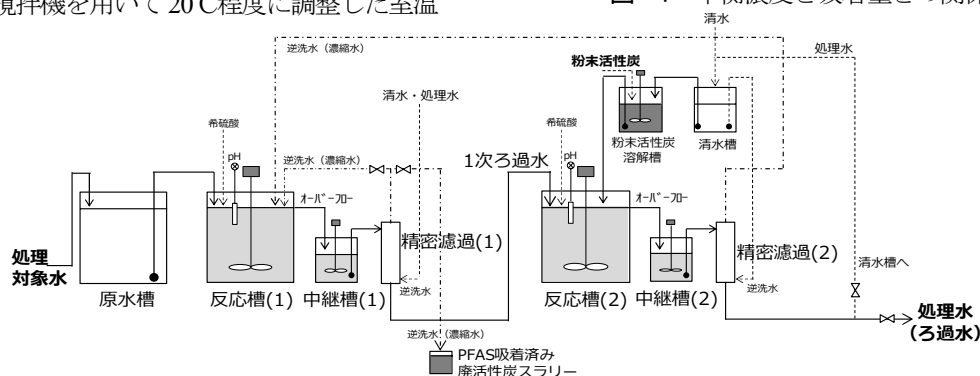


図-2 想定している PFAS を含む環境水の粉末活性炭を用いた吸着処理の基本フロー（2 段階処理ケース）

ような多段階の吸着処理プロセスの適用を実処理では想定している。

なお、粉末活性炭の種類（活性炭 A：木質、活性炭 B：ヤシ/木質、活性炭 C：石炭、活性炭 D：木質、活性炭 E：植物由来）によって PFOS、PFHxS、PFOA、PFHxA の吸着量に大きな差異は認められなかった。

2.3 室内吸着処理試験方法

活性炭 A（木質）については、50 L 規模の室内吸着処理試験をバッチ試験で実施した（写真-1）。70 L の PE 製ポリペールを反応槽とし、試料水 50 L に粉末活性炭（活性炭 A）を 110 mg-dry/L 添加し、ミニ水中ポンプ（吐出量 25 L/min）2 台を使用して 1 時間攪拌して吸着処理とした。

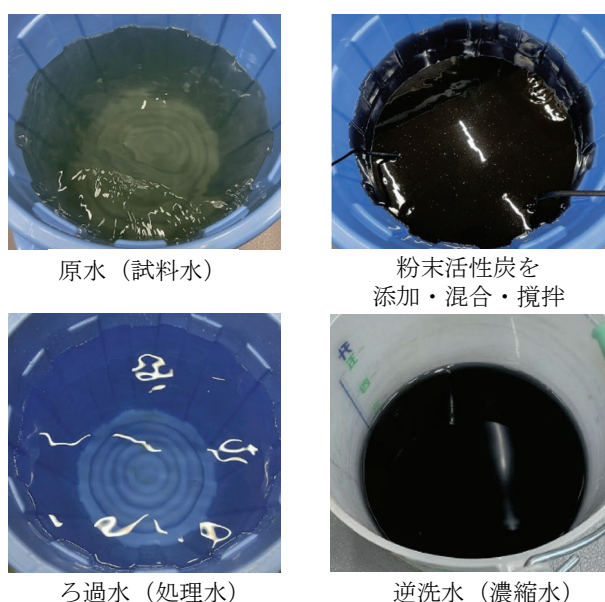


写真-1 活性炭 A を用いた試験（約 50 L）

精密濾過にはフィルター精度 0.15 μm ×99.95%の親水性 PTFE プリーツ型フィルター¹⁶⁾を装着したろ過装置（ECO クリーン 1N、6 L/min）を使用し、ろ水を「処理水」とした。攪拌時に工業用希硫酸（62.5%）を用いて pH を 4 程度に調整して粉末活性炭に吸着させるケースについても試験を行った。

活性炭 D（木質）および活性炭 E（植物）については、2.2 に示す方法に加えて、希硫酸を用いて pH を 4 程度に調整して吸着させるケースの実験も行い、活性炭 A を用いた試験結果と比較した。

2.4 室内吸着処理試験結果

活性炭 A（木質）を使用した試験結果（吸着処理中の pH は未調整）について、活性炭 D（木質；101 mg-dry/L）および活性炭 E（植物；101 mg-dry/L）の実験結果と比較したグラフを図-3 に示す。

活性炭 A を使用した 50 L 規模の吸着試験と活性炭 D、E を使用した 500 mL 規模の吸着実験では、概ね同様の PFAS 除去効果を示した。試料水に対して粉末活性炭を 100 mg-dry/L 程度添加した場合において、PFSA s（C4～C8）は 90～99%以上濃度が低減した。PFCAs（C4～C11）については、炭素数が多い C7～C11 では 93～99%以上濃度が低減した（初期濃度が低い PFDA（C10）を除く）。一方、PFHxA（C6）、PFPeA（C5）については、活性炭 A ではそれぞれ 10%程度、50%程度の濃度低減にとどまったが、活性炭 D、E ではそれぞれ 91～92%程度、67～72%程度濃度が低減した。また、PFBA（C4）については、活性炭 A では濃度低減が見られなかったが、活性炭 D、E では 25～30%程度が低減した。C4～C6 の PFCAs 対しては、粉末活性炭の種類（活性炭 A：木質、活性炭 D：木質、活性炭 E：植物）によって吸着量の差異が若干認められた。

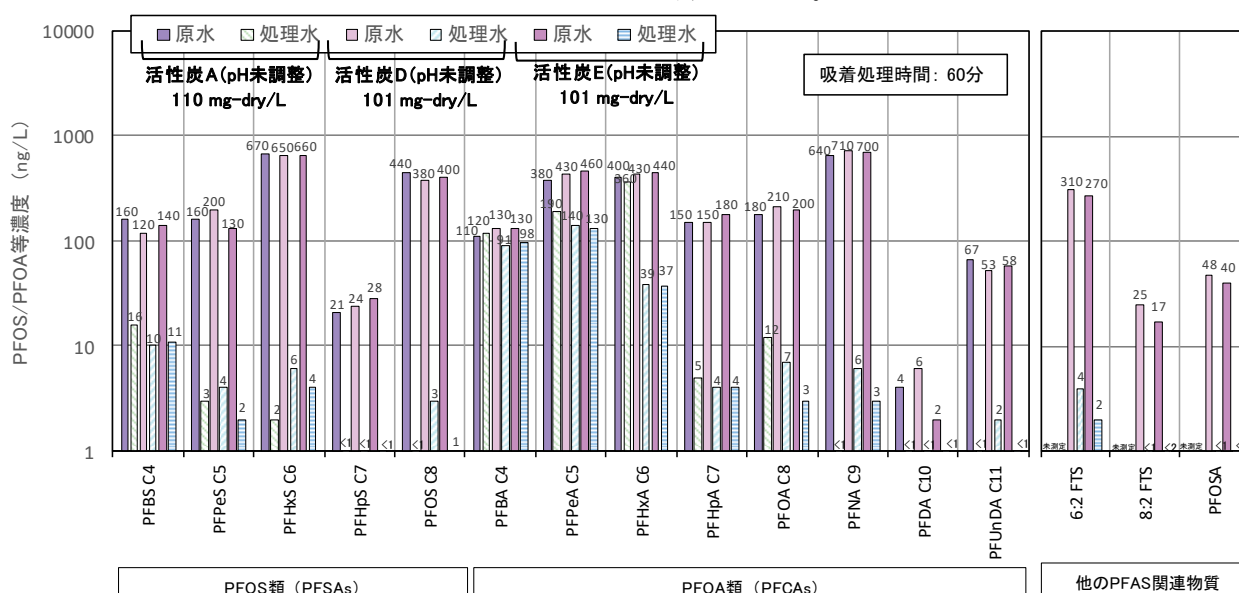


図-3 PFAS 吸着除去効果の比較（pH 未調整）

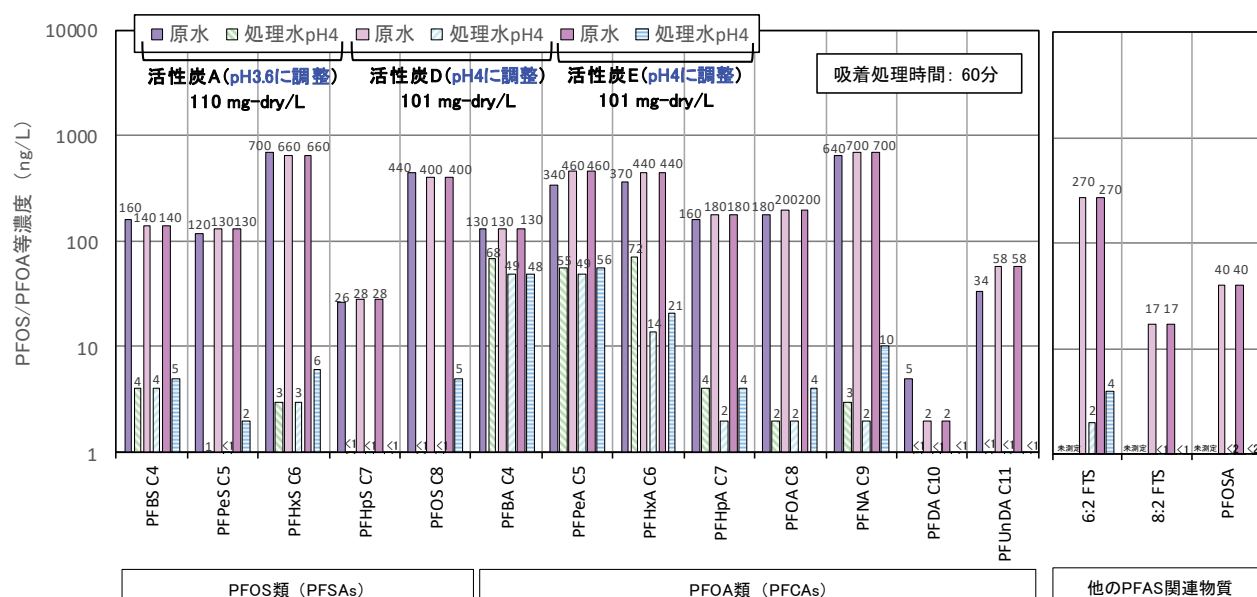


図-4 PFAS 吸着除去効果の比較 (pH を酸性側に調整)

試料水の分析では上記の PFAS 以外に 6:2FTS (270～310 ng/L) のほか、8:2FTS (17～25 ng/L)、PFOSA (40～48 ng/L)、4:2FTS (数 ng/L 程度)を確認したが、粉末活性炭による吸着処理により濃度が低減した。吸着処理中に pH を 4.0 程度と酸性雰囲気調整したケースにおいても、活性炭 A を使用した 50 L 規模の吸着試験と活性炭 D、E を使用した 500 mL 規模の吸着実験では、概ね同様の PFAS 除去効果を示した。pH を酸性雰囲気に調整すると、粉末活性炭に対する PFAS の吸着量は増加し、PFBS (C4) についても 96～98% 程度の濃度低減が可能となった。C4～C6 の PFCAs では、PFHxA (C6) で 10～92%→81～97%、PFPeA (C5) で 50～72%→84～89%、PFBA (C4) では 0～30%→48～63%と濃度低減効果が大きく向上した。また、6:2FTS、8:2FTS、PFOSA、4:2FTS について、酸性雰囲気においても濃度低減効果を確認した。

2023 年に水道技術研究センターが公表した「水道における PFAS の処理技術等に関する資料集」¹⁷⁾では、粉末活性炭における短鎖 PFAS は破過しやすく、特に PFBA (C4) ではほとんど吸着除去できないと評価しているが、PFAS を活性炭吸着処理する際に pH を酸性雰囲気に調整することで、PFBA 等の短鎖 PFCAs の吸着除去効果の向上に非常に効果的であることを確認した。また、粒状活性炭や粉末活性炭に対する PFOS や PFOA の吸着特性について、中性雰囲気よりも酸性雰囲気の方が活性炭への吸着量は増加することが以前より示されているが¹⁸⁾¹⁹⁾、炭素数が少ない短鎖 PFAS においても吸着量が増加する傾向を今回の一連の試験や実験で確認することができた (図-4)。

なお、今回使用した試料水には鉄、マンガンが比較的高い濃度で含まれていたが、粉末活性炭による PFAS 吸着処理に関して特に支障は見られなかった。

3. 水素燃焼式高温過熱水蒸気を用いた PFAS 分解処理技術の開発

3.1 PFAS の分解処理について

前章で述べた粉末活性炭による PFAS の吸着処理では、PFAS 吸着後の使用済み活性炭 (廃活性炭) が発生するが、この廃活性炭に含まれる PFAS は、最終的に、適切かつ確実に破壊 (分解処理) される必要があり、前述の「技術的留意事項」¹³⁾に合致した分解処理の適用が必要となる。

実処理の一例として、クレハ環境 (株) では PFOS 含有廃棄物の処理を実施している。ロータリーキルン式焼却炉やロータリーキルンストーカ式焼却炉を用いて PFOS 含有泡消火薬剤の分解処理実証試験を行い、技術的留意事項の要件である PFOS の分解効率 99.999% 以上を確認しており²⁰⁾²¹⁾、2011 年～2021 年の間に約 4,000 t の PFOS 含有廃棄物を無害化処理したことを報告している²²⁾。また、PFOA 含有廃棄物に対してもロータリーキルン式焼却炉やロータリーキルンストーカ式炉を用いて分解処理実証試験を行い、PFOA の分解効率 99.999% 以上を確認している²³⁾。

筆者らにおいても、上記の様な実処理の状況をふまえて、環境負荷を低減させた PFAS の新たな分解処理技術として、水素燃焼式高温過熱水蒸気分解処理の開発を進めている。試験装置を新たに作製し、PFAS 吸着粉末活性炭スラリーの分解処理試験を行ったので、その結果を紹介する。

3.2 水素燃焼式過熱水蒸気分解試験装置

過熱水蒸気は沸点以上に加熱された水蒸気で、1,100℃を超える高温の過熱水蒸気はダイオキシン類や PCB と

いった汚染物質を熱分解することが可能であり^{24,25)}、高温水蒸気分解法としてフロン類破壊技術²⁶⁾としても活用されている。PFAS を吸着した粉末活性炭の熱分解処理を想定した場合、「技術的留意事項」¹³⁾においても高温の焼却処理(約1,100℃以上を推奨)が想定され、分解効率として99.999%(ファイブナイン)以上であること等が求められていることから、高温過熱水蒸気を用いた手法においても1,100℃以上の温度域の達成を目標とした。

そこで、水素と酸素を水素バーナーで燃焼させて生成する高温の水蒸気を活用する「水素燃焼式過熱水蒸気発生技術」^{27,28)}を採用し、水素バーナーを装着して所要の滞留時間を確保できる高温過熱水蒸気分解炉、高温の排ガスを急冷するスクラバー(クエンチャー)、炉内を負圧維持する吸引ファン(排風機)等からなる試験装置を製作した(写真-3)。

試験装置の主な仕様は水素バーナー燃焼容量:35 kW(約30,000 kcal/h; 常用最大)、水素・酸素供給量比:2:1(昇温時)~2:1.2程度(粉末活性炭スラリー等供給時)の範囲で調整、炉内寸法:φ400 mm×L 1,585 mm、炉内温度:最大1,250℃、液体・スラリー供給量:2.5 kg/h(常用)、炉内圧力:0~-0.3 kPa程度(負圧制御)、燃焼ガスの滞留時間:2秒以上、スクラバースプレー:4 L/min×3個である。

水素燃焼式過熱水蒸気技術の特徴は①最高1,600℃までの高温が実現可能、②燃料燃焼由来CO₂がゼロ、③排ガス量が極めて少量(排ガスの急冷で過熱水蒸気は水(液体)になるため)、④水素バーナーから液体、スラリーの供給が可能(燃焼火炎に直接供給できる)などである。別の装置で水素バーナーの火炎に粉末活性炭スラリーを供給して燃焼状態を観察した際の状況を写真-4 に示す。



写真-3 水素燃焼式高温過熱水蒸気分解処理試験装置

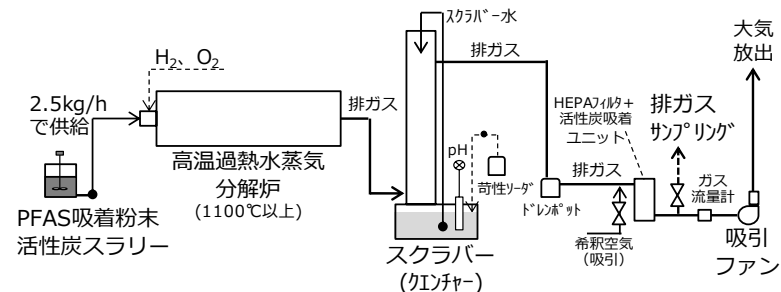


図-5 高温過熱水蒸気分解処理試験概要(設備構成)

3.3 実証試験方法および試験条件

過去に使用されていたPFOSを約2%含むとされる泡消火薬液(不純物としてPFHxSを含めて複数のPFASを含む; 写真-5(a))を水道水に1,000倍希釈となるように添加し(写真-5(b))、さらに試薬のPFOA、PFHxAを所定量添加した後、PFAS吸着試験で使用した活性炭A(木質)を固形分が10%となるように添加し、攪拌機を用いて数日間泡立たないように攪拌してPFASを粉末活性炭に吸着させた後(写真-5(c))、「粉末活性炭スラリー」として分解処理試験に供した。

PFASが吸着した粉末活性炭スラリーの水素燃焼式高温過熱水蒸気による分解処理試験の概要を図-5に示す。

事前に分解炉内を約1,250℃まで昇温した後、作製した固形分10%の粉末活性炭スラリーを2.5 kg/hで約2時間定量供給した。処理中はスクラバー水のpHが9以上となるように24%工業用苛性ソーダを自動添加した。分解処理試験装置の運転データは連続的に記録し、収支計算の根拠とした。分解処理試験では、スクラバーの後段にHEPAフィルターを装着して活性炭も充填できるユニットを接続した。スクラバー通過後の排ガスをHEPAフィルター(0.3 μmの捕集効率99.99%)、気相吸着用粒状活性炭の順に通して大気放出する形とし、排ガス試料の採取はHEPAフィルター+活性炭吸着ユニットの後段で行った。

なお、気相吸着用粒状活性炭槽の安全性を勘案し、排ガスの酸素濃度を30%未満に低下させるために、HEPAフィルター+活性炭吸着ユニットの直前で空気を必要量吸引させた。



写真-4 粉末活性炭スラリー燃焼状況

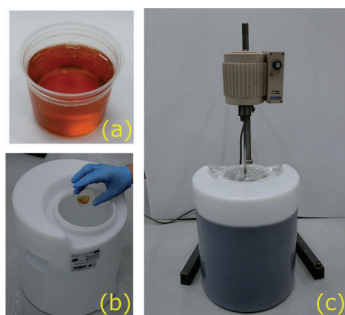


写真-5 活性炭スラリー作製状況

分解処理試験中は吸引ファン前に設置したサンプリング孔より排ガスを採取し、PFAS 分析に供した（採取方法等は「技術的留意事項」⁹⁾に準じた）。加えてフッ化水素、フロン類（CF₄、CHF₃、CH₂F₂、C₄F₈）、排ガス連続分析計（O₂、CO₂、CO、NO_x、SO₂）による測定を実施した。また、粉末活性炭に吸着した PFAS 含有量²⁵⁾、スラリーろ液、スクラバー水（処理前・後）の PFAS 濃度を固相抽出-LC/MS/MS 法で分析し、「技術的留意事項」に示された分解効率、分解除去効率の算出に用いた。

3.3 実証試験結果

粉末活性炭スラリーの含水率は実測で 89.1%（固形分 10.9%）と、設定の含水率 90%（固形分 10%）より若干低かったため、実測値を採用して分解効率等を保守的に評価することとした。スクラバー水量は処理後には増加しており、排ガスの急冷により過熱水蒸気が凝縮されていることを確認した。排ガス量は実績で 7.51 m³/h であったが、スクラバー（クエンチャー）で急冷・洗煙しただけの「生ガス」相当分を算出すると 2.71 m³/h であった。

表-2 分解処理の主な試験データ

項目	処理データ	備考
スラリー供給	2.5 kg/hr	設定
スラリー供給時間	2.30 hr	実績（11:45～14:03）
スラリー含水率	89.1 %	実測値（設定：90%）
スラリー濃度	10.9 %	実測値（設定：10%）
粉末活性炭固形分量	0.627 kg	実測値（設定値→0.575kg）
スラリー水分量（ろ液）	5.123 L	実測値（設定値→5.175L）
スクラバー水量（前）	182.4 L	実績
スクラバー水量（後）	224.0 L	実績
スクラバー水量増分	41.6 L	実績（計算上は約38.9L）
排ガス量	8.23 m ³ /h	実績、希釈空気含む
排ガス温度	26.1 °C	実績（平均値）
排ガス量（標準状態）	7.51 m ³ /h	※

※排ガス（生ガス相当；希釈空気吸引量を差し引いた値）：2.71 m³/h

粉末活性炭スラリーを処理している時間帯の炉内温度は 1,250～1,300℃程度（実測値）で常に 1,100℃以上を確保していた。主な試験データを表-2 に示す。

分解処理試験における PFAS 濃度は C4～C10 の PFSAs、C4～C14 の PFCAs を分析したが、泡消火薬液に主に含まれる PFOS や不純物として多く含まれる PFHxS、試薬を添加した PFOA、PFHxA の 4 物質の PFAS の結果について表-3 に示す。粉末活性炭固形分あたりの PFAS 含有量は PFOS:55,000 μg/kg (55 mg/kg)、PFOA:16,000 μg/kg (16 mg/kg)、PFHxS:20,000 μg/kg (20 mg/kg)、PFHxA:30,000 μg/kg (30 mg/kg) であった。

スクラバー水（処理前・後）からはそれぞれ微量検出され、排ガスからは PFOA:1.0 ng/m³N、PFHxA:3.0 ng/m³N が検出された。PFOS+PFOA:1.0 ng/m³N（PFOS:<0.3 ng/m³N であるが、PFOS として 0.3 ng/m³N を採用すると、PFOS+PFOA:1.3 ng/m³N）で、3.0 ng/m³N が検出された PFHxA を考慮しても「技術的留意事項」¹³⁾に示された管理目標参考値（排ガス：60 ng/m³N）を下回る結果であった。なお、酸素濃度が 21%を超える排ガスが排出されたことから、「技術的留意事項」¹³⁾に示される排ガス濃度の酸素濃度補正（標準酸素濃度における換算濃度の算出）は行っていない。

次に「技術的留意事項」¹³⁾に示された方法で分解効率、分解除去効率を算出した結果を表-4 に示す。PFOS および PFHxS の分解効率、分解除去率はそれぞれ 99.999%（5 ナイン）以上、99.9999%（6 ナイン）以上であった。また、PFOA および PFHxA の分解効率、分解除去率はともに 99.999%（5 ナイン）以上であった。

以上より、PFAS を吸着した粉末活性炭スラリーの水素燃焼式高温過熱水蒸気を用いた分解処理において、「技術的留意事項」¹³⁾が求める分解処理の要件（PFOS および PFOA の分解効率が 99.999%以上を満たすこと）を満たし、環境上適正な分解処理が技術的に可能であること

表-3 PFOS・PFOA・PFHxS・PFHxA の分析結果

項目		粉末活性炭スラリー			スクラバー水			排ガス	
		固形分	水分（ろ液）		処理前	処理後			
C8	PFOS	55000 μg/kg-dry	0.0006 μg/L		0.0009	0.0009	μg/L	<0.3	ng/m ³ N
C8	PFOA	16000 μg/kg-dry	0.0010 μg/L		0.0059	0.0040	μg/L	1.0	ng/m ³ N
C6	PFHxS	20000 μg/kg-dry	<0.0002 μg/L		0.0003	0.0003	μg/L	<0.3	ng/m ³ N
C6	PFHxA	30000 μg/kg-dry	0.029 μg/L		0.0037	0.0031	μg/L	3.0	ng/m ³ N
定量下限値		0.8 μg/kg-dry	0.0002 μg/L		0.0001	0.0001	μg/L	0.3	ng/m ³ N

表-4 PFOS・PFOA・PFHxS・PFHxA の分解効率・分解除去効率の算出

項目		粉末活性炭スラリー		スクラバー水			排ガス		分解効率 %	分解除去効率 %
		単位	固形分	水分	処理前	処理後	増加分	単位		
C8	PFOS	μg	34471.2	0.003	0.164	0.202	0.037	ng	5.181	99.99988
C8	PFOA	μg	10028.0	0.005	1.076	0.896	0	ng	17.270	99.9998
C6	PFHxS	μg	12535.0	0.001	0.055	0.067	0.012	ng	5.181	99.99986
C6	PFHxA	μg	18802.5	0.149	0.675	0.694	0.020	ng	51.811	99.9996
		①投入			②排出			③排出	①と②③	①と③

（注1）分析値が定量下限値未満の場合は定量下限値を採用して計算（ハッチング部）

（注2）スクラバー水の増加分（処理後－処理前）がマイナスの場合は「0」とした

が確認できたと考えている。

なお、PFAS として高濃度に含まれる PFOS、PFOA、PFHxS、PFHxA の結果を示したが、C4～C10 の PFSA、C4～C14 の PFCA を分析しており、粉末活性炭の PFAS 含有量の分析で検出された C4～C10 の PFSA、C4～C12 の PFCA についても、適切に分解処理がなされている結果が得られている。

排ガス中のフッ化水素濃度は 0.50～0.62 mg/m³N (平均 0.57 mg/m³N、n=3)、フロン類は C₄F₈ (PFC-c318 ; ペルフルオロシクロブタン) が 3.3 volppm 検出されたが、その他のフロン類は不検出 (検出下限 : 0.3 volppm) であった。C₄F₈ については高濃度の PFOS 等が熱分解して低分子化する過程で副生したものと考えられた。排ガス連続分析計では O₂ : 25% 程度 (24～28%)、CO₂ : 1.8% 程度 (0.2～3.4%)、CO : 3 volppm 程度 (0.8～7 volppm)、NO_x : 6 volppm 程度 (3.3～8.7 volppm)、SO₂ : 17 volppm 程度 (16～17 volppm) の値であった。フッ化水素および CO については「技術的留意事項」¹³⁾に示された管理目標値等の値 (フッ化水素 : 5 mg/m³N、CO : 100 ppm) を下回る結果であった。

4. まとめ

環境中に拡散した PFAS の「封じ込め」に関して、PFOS、PFOA 等の PFAS を含む実際の河川水を用いて、粉末活性炭を用いた吸着処理に関する検討を行った。吸着処理時の pH 調整の有無に関わらず PFSA (C4～C8) は粉末活性炭への吸着性がよく、濃度低減効果が大きかった。PFCA (C4～C12) のうち、炭素数が多い C7～C12 では、吸着処理時の pH 調整の有無に関わらず粉末活性炭への吸着性がよく、濃度低減効果が大きかった。C4～C6 では pH 未調整のケースで明らかに吸着量が減少し、特に PFBA (C4) は活性炭に吸着しにくかった。一方、pH を酸性雰囲気調整することで、pH 未調整のケースと比較して濃度はさらに低減し、PFBA (C4) でも 48～63% 程度の濃度低減効果が得られることを確認した。粉末活性炭の種類や添加量、酸性雰囲気等の諸条件を最適化することで濃度低減効果がさらに向上するものと期待される。また、近年、欧州委員会から複数の PFAS に対してグループアプローチを適用した規制を行う方針が示され、PFOS、PFOA を含む 24 種類の PFAS の相対効力係数 (RPF; Relative Potency Factor) を用いた相対毒性アプローチが提案されている³⁰⁾。ある程度まとまった PFAS 群に対して、PFOA に対する係数を 1 とした毒性等価係数を採用して PFOA 等量濃度として評価・管理する³¹⁾考え方は、対策を検討・実施する場合においても、数多くの PFAS を一律に一定の値まで低減させるのではなく、リスクベースで当量合計濃度を評価し低減させることとなるため、過剰な設備投資や運用コスト等の抑制といった観点からも、合理的な対策に繋がることが期待される。

PFAS の「安全で確実な分解」については、水素燃焼式高温過熱水蒸気分解処理試験装置を使用し、常に 1,100℃を超える高温域を確保した状態で、PFOS 等を含む泡消火薬液の希釈液に粉末活性炭を添加して作製した「PFAS 吸着粉末活性炭スラリー」の処理実験を実施した。高温過熱水蒸気分解処理の結果、PFOS および PFHxS の分解効率/分解除去効率は 99.999% (5 ナイン) 以上/99.9999% (6 ナイン) 以上、PFOA および PFHxA はともに 99.999% (5 ナイン) 以上であった。これらの結果から、水素燃焼式高温過熱水蒸気を用いた PFAS 分解処理手法は、「PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項」¹³⁾が求める分解処理の要件を満足し、環境上適正な分解処理が技術的に可能であることが確認できたと考えている。なお、水素燃焼式高温過熱水蒸気分解処理の実用化に向けて、①超高温 (約 2,900℃、断熱理論火災温度) 水素・酸素燃焼火災内での高効率分解処理の実現、②実機化を想定した分解炉長の延長による滞留時間の延長と安定・確実な分解処理の実現を目的とした試験装置の改造と検証を今後予定している。

水素燃焼で生成する高温過熱水蒸気を用いた粉末活性炭吸着 PFAS の分解処理技術は、有害化学物質の熱分解処理においても CO₂ 排出量を低減し、将来的なカーボンニュートラルの達成に寄与し得る技術と考えている。また、あらゆる有機化合物の分解処理に適用可能であるとも考えており、粉末活性炭による PFAS 吸着除去技術などと組み合わせた合理的なソリューションの提供を目指し、技術開発をさらに推進していく所存である。

謝辞

水素燃焼で生成する高温過熱水蒸気を用いた粉末活性炭吸着 PFAS の分解処理については中外炉工業 (株) との共同開発で検討した結果について掲載した。共同開発に携わった商品開発部の各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 堀久男 : 有機フッ素化合物の国際規制動向と分解無害化・再資源化反応の開発, オレオサイエンス, 第 16 巻, 第 3 号, pp111-118, 2016.
- 2) 環境省・厚生労働省 : PFOS 及び PFOA に関する対応の手引き (第 2 版), 2024.
<https://www.env.go.jp/content/000073850.pdf> (2025.1.10 閲覧)
- 3) Y. Wang, M. Lin, S. V. Duy, G. Munoz, S. Sauve, J. Liu : Fast analysis of short-chain and ultra-short-chain fluorinated organics in water by on-line extraction coupled to HPLC-HRMS, Science of the Total Environment 943, 173682, 2024.
- 4) H. P. H. Arp, A. Gredelj, J. Glüge, M. Scheringer, I. T. Cousins : The Global Threat from the Irreversible Accumulation of Trifluoroacetic Acid (TFA), Environmental Science & Technology 58 (45), pp19925-19935, 2024.

- 5) 環境省：令和4年度公共用水域及び地下水のPFOS及びPFOA調査結果一覧, 2024.
<https://www.env.go.jp/content/000212639.pdf> (2025.1.10 閲覧)
- 6) 環境省：要調査項目（水質汚濁に係る環境基準）要調査項目等 存在状況調査結果（令和5年度）, 2023.
<https://www.env.go.jp/content/000241707.pdf> (2025.1.10 閲覧)
- 7) H. Moriwaki, Y. Takagi, M. Tanaka, K. Tsuruho, K. Okitsu, Yasuaki Maeda : Sonochemical Decomposition of Perfluorooctane Sulfonate and Perfluorooctanoic Acid, Environ. Sci. Technol., Vol.39, No.9, pp3388-3392, 2005.
- 8) 大山将, 松生隆司, 大坪修平, 宇川岳史：環境水中に含まれるPFOS/PFOAのキャビテーション技術による分解処理に関する基礎的検討, 第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, S4-02, pp300-305, 2022.
- 9) 環境省：国内における毒ガス弾等に関する総合調査検討会, 茨城県神栖市における汚染メカニズム解明のための調査地下水汚染シミュレーション等報告書, 2007.
<https://www.env.go.jp/chemi/report/h19-02/index.html> (2025.1.10 閲覧)
- 10) 環境省：有機ヒ素化合物の汚染源周辺地域における高濃度汚染対策について, 平成20年度第3回国内における毒ガス弾等に関する総合調査検討会, 資料3-2, 2009.
<https://www.env.go.jp/content/900409486.pdf> (2025.1.10 閲覧)
- 11) 環境省：茨城県神栖市における有機ヒ素化合物の高濃度汚染対策のまとめ（案）, 平成23年度第5回国内における毒ガス弾等に関する総合調査検討会, 資料5, 2012.
https://www.env.go.jp/chemi/gas_inform/sonota_singi/gas/23_05/mat05.pdf (2025.1.10 閲覧)
- 12) 大山将, 松生隆司, 中島卓夫, 平尾壽啓：環境水中に含まれるPFOS/PFOA等(PFAS類)の粉末活性炭吸着処理に関する検討, 第28回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, S2-18, pp195-200, 2023.
- 13) 環境省：PFOS及びPFOA含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項, 2022. <https://www.env.go.jp/content/000077696.pdf> (2025.1.10 閲覧)
- 14) 大山将, 松生隆司, 中島卓夫, 平尾壽啓, 大久保朋哉, 明賀法之, 河野友郎, 小嶋聡：水素燃焼で生成する高温過熱水蒸気を用いた粉末活性炭吸着PFAS類分解処理技術の開発, 第34回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, F3-4-O, pp553-554, 2023.
- 15) US EPA : Method 1633 Analysis of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Aqueous, Solid, Biosolids, and Tissue Samples by LC-MS/MS, EPA 821-R-24-001, 2024.
- 16) 山内仁, 西村章, 西村聡, 木滝悠介, 渡部一孝, 矢部千尋：ブリーツフィルター・機能性粉体法による難分解性有機化合物の除去, 第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, S1-02, pp7-11, 2022.
- 17) (公財) 水道技術研究センター：水道におけるPFASの処理技術等に関する資料集（修正版）, 2023.
https://www.jwrc-net.or.jp/docs/p-ken_report_rev.pdf (2025.1.10 閲覧)
- 18) Q. Yua, R. Zhanga, S. Deng, J. Huang, G. Yu : Sorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on activated carbons and resin: Kinetic and isotherm study, Water Res., Vol. 43, pp1150-1158, 2009.
- 19) W. Chen, X. Zhang, M. Mamadiev, Z. Wang : Sorption of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on polyacrylonitrile fiber derived activated carbon fibers: in comparison with activated carbon, RSC Adv., Vol. 7, pp927-938, 2017.
- 20) 小林正喜, 大岡幸裕, 白土典広：産業廃棄物焼却施設におけるPFOS含有泡消火薬剤分解処理の最適条件の検討, 第22回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, E2-9, pp523-524, 2011.
- 21) 堀口司, 大岡幸裕, 阿部美明, 白土典広：産業廃棄物焼却施設におけるPFOS含有泡消火薬剤の分解処理について（第2報）, 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, E3-7, pp593-594, 2012.
- 22) 草野洋平：PFOS含有廃棄物の処理とPOPs含有の難処理物に関する取り組み, Material stage, Vol.22, No.8, 2022.
- 23) 大岡幸裕, 草野洋平, 加藤正敏：産業廃棄物処理施設におけるPFOA含有廃棄物の分解処理について, 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, F1-7, pp461-462, 2022.
- 24) 轟木朋浩, 佐藤岳史, 馬目栄二, 五反田武志, 吉川智子：間接熱脱着＋水蒸気分解法によるダイオキシン類汚染土壌浄化技術, 土壌環境センター技術ニュース, 第9号, pp24-29, 2004.
- 25) 佐藤岳史, 轟木朋浩, 中島卓夫, 井澤武史, 高柳周二, 野口喜美夫：間接熱脱着＋水蒸気分解法によるPCB汚染土壌・汚泥の無害化, 環境科学会誌, Vol.24, No.2, pp134-143, 2011.
- 26) 環境省：CFC破壊処理ガイドライン, 平成11年3月改訂, 1999. <https://www.env.go.jp/content/900448365.pdf> (2025.1.10 閲覧)
- 27) 中外炉工業(株)：水素燃焼式過熱水蒸気技術, 2021.
<https://chugai.co.jp/wp/wp-content/uploads/2021/07/decarb/pdf/decarb-03.pdf> (2025.1.10 閲覧)
- 28) 川崎久志, 明賀法之, 神戸寿夫：水素燃焼式過熱水蒸気発生装置の開発と工業利用, 工業加熱, Vol.59, No.1, pp5-9, 2022.
- 29) 中井智子, 米澤武志, 大山将, 平尾壽啓：PFAS類を吸着した粉末活性炭からのPFAS類抽出条件の検討, 第28回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, S2-18, pp309-314, 2023.
- 30) 環境省：PFOS, PFOA以外のPFASに係る国際動向, PFASに対する総合戦略検討専門家会議（第2回）, 資料3-1, 2023.
<https://www.env.go.jp/content/000123227.pdf> (2025.1.10 閲覧)
- 31) 酒井伸一：資源循環・廃棄物管理と脱炭素社会構築 総論(7) PFAS管理の方向性と資源循環・廃棄物管理, JW センター情報, Vol.23, No.3, pp11-15, 2023.
https://www.jwnet.or.jp/uploads/media/2023/10/kikansi_202310_p11_15.pdf (2025.1.10 閲覧)

PFAS 汚染土壌・地下水の汚染拡大防止技術

DIFFUSION PREVENTION METHODS FOR PFAS-CONTAMINATED SOIL AND GROUNDWATER

日野良太*, 西川直仁*, 日笠山徹巳*

HINO Ryota, NISHIKAWA Naohito and HIGASAYAMA Tetsumi

* 株式会社大林組エンジニアリング本部（〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟）

キーワード：PFAS, 汚染土壌・地下水, 不溶化処理, 透過性地下水浄化壁

(PFAS, contaminated Soil and Groundwater; Stabilization and solidification, Permeable Groundwater Treatment Barrier)

1. はじめに

有機フッ素化合物（以下、PFAS）は、撥水・撥油性、熱・化学的安定性等の物性を示すことから、金属メッキ処理剤、水成膜泡消火剤および調理器具コーティング剤等の幅広い用途で使用されている。PFASに明確な定義はないが、およそ数千種類の物質が特定されており、その管理の在り方について国際的に議論されている。

PFASの中でもペルフルオロオクタンスルホン酸（以下、PFOS）とペルフルオロオクタン酸（以下、PFOA）およびペルフルオロヘキサンスルホン酸（以下、PFHxS）については、過去に幅広く使用されてきたが、有害性や高い環境残留性等をふまえて、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約（POPs 条約）の対象物質として国際的に製造および使用や排出が制限されている。PFOS と PFOA の直鎖型イオンの構造式を図-1 に示す¹⁾。いずれの物質も炭素とフッ素が直鎖型で多数結合しており、末端がスルホ基かカルボキシル基の構造となっている。

環境中の PFOS および PFOA については、2020 年に水道法の水質管理目標設定項目に位置付けられ、水環境に関する指針値（暫定）（PFOS と PFOA の合算で 50 ng/L）が設定された。また、PFHxS については、2021 年に水質汚濁に係る環境基準の要調査項目として選定された。環境省が実施した 2020 年度の有機フッ素化合物全国存在状況把握調査²⁾では、調査を実施した 143 地点のうち、21 地点で

指針値（暫定）を超過する値が検出され、PFOS および PFOA が環境中に広く存在することが確認された。一方、都道府県等も地域の実情に応じて調査を実施している。

PFOS および PFOA で汚染された土壌の処理事例は、スラリー化した掘削土壌に対して資材を混合することによる泡沫連行および吸着に伴う洗浄処理がある³⁾。また、原位置処理として、酸化剤を注入した後に地盤内を加熱すること⁴⁾や PFAS 汚染土壌がアルカリ環境で液相に移行しやすくなるという特性を利用したアルカリ資材と酸化剤の併用⁵⁾によって処理効果を促進する技術もある。その他にキャビテーションによる処理⁶⁾、活性炭による地下水の処理などが挙げられる⁷⁾。

著者らは、PFAS のうち、主に PFOS と PFOA による汚染土壌・地下水の処理技術を検討している。検討技術は、汚染土壌・地下水のいずれに対しても適用できるように、PFAS の多くが地盤内において土壌から地下水に移行しやすいという特性⁸⁾を有するという点に着眼している。また、より低コストで低環境負荷な処理技術の開発を目指しており、汚染土壌・地下水から PFAS を分解・除去する技術だけでなく、濃度低減や敷地外への汚染拡大防止技術などを開発中である⁹⁾。

本稿では、汚染拡大防止対策として汚染土壌からの PFAS 溶出を抑制する不溶化処理と汚染地下水を敷地外へ拡大させない透過性地下水浄化壁を検討しており、各処理技術に関しての室内試験結果を報告する。

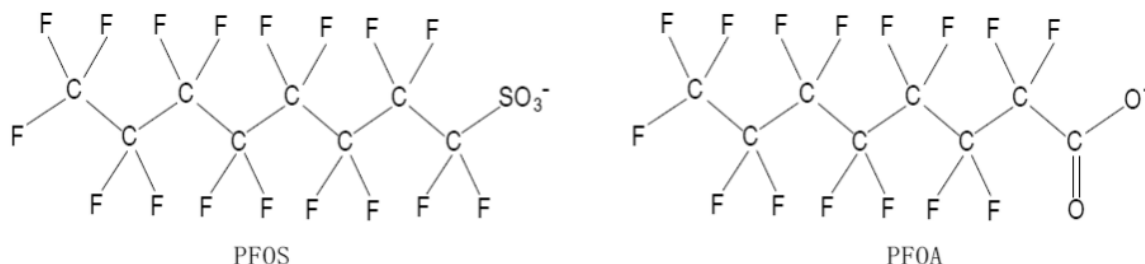


図-1 PFOS と PFOA の構造式（直鎖型イオン）¹⁾

2. 開発技術の概要

2.1 不溶化処理

汚染物質の不溶化処理は、掘削した汚染土壌を現地で不溶化するオンサイト処理と汚染土壌を掘削せずに不溶化処理を行う原位置処理（図-2）がある⁹⁾。前者は、掘削土壌に対して不溶化資材を混合した後に埋め戻しまたは場外へ搬出する方法であり、後者は、地盤内の汚染土壌と不溶化資材を建設重機によって混合攪拌¹⁰⁾するか井戸や裸孔等から不溶化資材を地盤に浸透させるものである¹¹⁾。

PFAS 汚染土壌に適用できる不溶化資材について、国内での報告例はないが、ふっ素及びその化合物に適用される不溶化資材は複数の事例が報告されている。大山らは酸化マグネシウムを添加することで不溶化処理した事例を報告している¹²⁾。高橋らは鉄鋼スラグ含有ふっ素に対してアパタイト処理を行い、フルオロアパタイトの形成による鉱物学的不溶化を検討しており、カルシウムやリン酸の添加量が多いほどふっ素の溶出濃度が減少することを示した¹³⁾。亀井らは半水石膏に含まれるアルミナ、酸化カルシウム、硫酸カルシウムの水和反応で生成されるエトリンガイトと高炉セメント B 種により不溶化処理を行った¹⁴⁾。

本検討では、実際の汚染サイトにおける不溶化処理施工中の重機作業および処理後の掘削・積込などのハンドリング性確保を勘案して、不溶化および固化の両方の効果を有する資材を選定することとした。そこで、過去の事例も踏まえて、カルシウム系¹⁵⁾およびマグネシウム系¹⁶⁾の資材を用いた不溶化処理の適用可能性を探索した。ただし、PFAS の C-F 結合を切断するためには、ふっ素の高い電気陰性度と C-F 結合の短い原子間距離によって、高エネルギーが必要である¹⁶⁾。そのため、フッ化カルシウムやフッ化マグネシウムなどの難溶性の化合物への形態変化は期待できない。一方、正に帯電した媒体と陰イオン性 PFAS の間には静電引力が形成され、陽イオンの架橋効果も静電引力とみなすことができる。また、陽イオンは、有機物よりも吸着性が高いことから PFAS の土壌からの溶出を抑制できる^{17), 18)}。さらに、粉末活性炭は PFAS の吸着性があることが知られている¹⁹⁾。そこで、本稿での PFAS 汚染土壌の不溶化処理は、陽イオンと粉末活性炭の吸着および固化を期待して検討するために、PFAS 溶出抑制と強度発現の効果を確認した。

2.2 透過性地下水浄化壁

透過性地下水浄化壁は、壁を通過した汚染地下水に含まれる PFAS を構築した壁に含まれた資材に吸着させることで敷地外等へ PFAS の拡大を防止する技術である。本技術は、施工方法によって置換型と注入型の 2 種類に分けられる。前者は、掘削した地盤に周辺地盤よりも透水性が高い吸着資材を充填することにより、図-3 のように地下水汚染を拡大させない範囲の地下水流向下流周縁に壁を

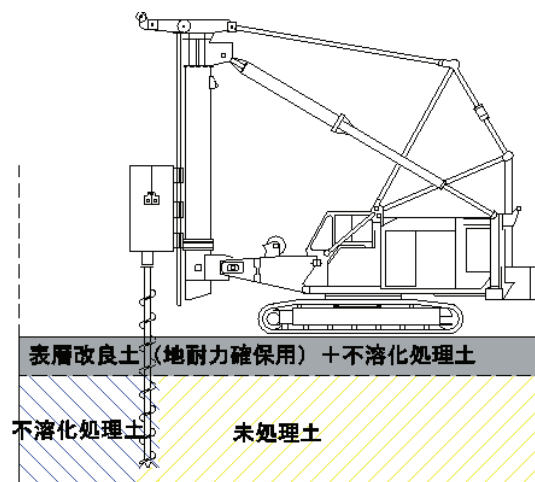


図-2 原位置不溶化処理 施工イメージ図

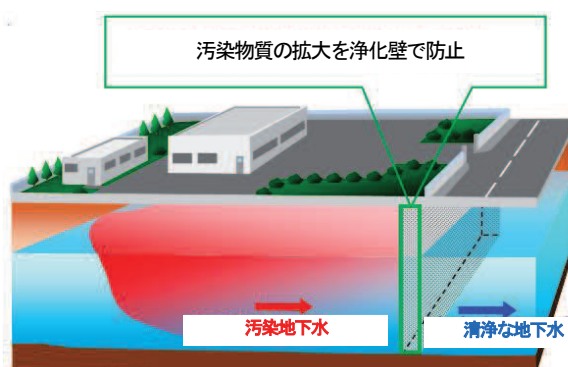


図-3 透過性地下水浄化壁イメージ図

構築する。後者は、微細粒子をスラリー化した吸着資材を井戸から注入することにより、地盤内に PFAS 吸着性の壁を構築する技術¹¹⁾である。本技術は、井戸から資材を注入することで地盤の透水性が低下するため、対策範囲全周に浄化壁を構築する。

本稿では、PFAS の吸着性が高い活性炭を主として、ゼオライトを併用した透過性地下水浄化壁を検討した。吸着資材として活性炭を使用する場合は、PFAS の吸着性を有するとともに、PFAS 以外の物質も吸着することに留意する必要がある。つまり、多種多様な物質が多く含まれる地下水等を対象とする場合に、活性炭の PFAS 吸着容量が低下する可能性が考えられる。そこで、PFAS 以外の物質に対して吸着性が認められるゼオライトを併用することで、活性炭の PFAS 吸着容量を増加させる技術を開発した。

3. 試験方法

3.1 不溶化処理

不溶化処理の適用性は、模擬汚染土壌を使用して検討した。模擬汚染土壌は、所定量の土壌と PFAS 試薬で調整した所定濃度（合計 200,000 ng/L、PFOS/PFOA：各 100,000 ng/L）の溶液を振とうすることで作製した。振とう方法は、液固比 10 の条件において、環告 18 号の条件で 24 時間振

こうした。振こうした後は、遠心分離（1,000G、5 分間）を行い、土壌と溶液を分離し、分離土壌を模擬汚染土壌とした。土壌は、市販の真砂土（香川県産）を 2mm 未満に篩分けした。試薬は、WAKO 製の純度 95%を使用した。

不溶化処理の効果は、土壌からの PFAS 溶出の抑制効果と処理土壌の強度発現を確認することで確認した。不溶化処理は、カルシウム系またはマグネシウム系の資材と固化材、吸着材を併用して、汚染土壌と混合した。使用した資材は、カルシウム成分として消石灰、マグネシウム成分として酸化マグネシウム、固化材として高炉セメント B 種もしくは半水石膏、吸着材として粉末活性炭である。ここで、地盤と資材を混合させる原位置不溶化処理を想定した場合と、土壌と資材を均一に混合するために、混合資材に水を加えることでスラリー化させた。水の添加量は、施工時にスラリー状態を維持できる条件を想定した上で決定した。

表-1 に試験ケースを示す。表-1 の BL(Ca)は、カルシウム系資材（ケース①～③）で用いた模擬汚染土壌の資材混合無しケースである。一方、BL(Mg)は、マグネシウム系資材（ケース④⑤）で用いた模擬汚染土壌の資材混合無しケースである。試験は、模擬汚染土壌 20 g に対してスラリー化させた資材を混合し、この資材混合土壌(処理土壌)を屋内（室温 20℃）で 7 日間養生した後に分析試料土として使用した。

強度発現試験は、不溶化処理と同様に 2mm 未満の真砂土または粘性土と各種資材をスラリー化させて混合した。処理土壌は、直径 5 cm×高さ 10 cm のモールドに充填し、7 日間養生した後、円筒形モールドから脱型した試料体を用いて強度発現について確認した。

円筒形モールドへの充填方法は JGS0821（安定処理土の締固めをしない供試体作製）に、一軸圧縮試験は JGS0511（土の一軸圧縮試験方法）に準拠した。また、脱型時に試料体が自立しなかった場合は、強度発現を確認するための一軸圧縮試験を実施していない。なお、一部の試験ケースは、処理地盤の透水性を評価するための飽和透水試験（JIS A 1218）を実施した。

3.2 透過性地下水浄化壁

透過性地下水浄化壁に用いた吸着材料として、粉末活性炭、ゼオライト、粉末活性炭＋ゼオライトの 3 ケースを想定し、それらに対して PFAS の吸着量をシリアルバッチ試験で確認した。シリアルバッチ試験とは、繰り返しバッチ試験を示しており、所定濃度に調整した溶液を複数用意し、溶液に対象とする吸着材を添加・混合し、固液分離した吸着材を新たな溶液に添加・混合する作業を繰り返すことで吸着材の吸着容量を確認するための試験である。

試験に使用した溶液は、採取した河川水に PFAS 試薬を所定濃度（合計 200,000 ng/L、PFOS/PFOA：各 100,000 ng/L）で添加することによって模擬汚染水とした。吸着材は、粒状活性炭のみとゼオライトのみ、粒状活性炭とゼオライトの併用（重量比 1:1 で混合）の 3 種類で検討した。試験は、固液比 100（溶液：吸着材＝75 g：0.75 g）として、100 rpm で 10 分振こうした後に、ペーパーフィルターで固液分離を行った。振こうした速度と振こうした時間は、振こうしたに伴って吸着材が破壊されずに溶液と吸着材が十分に混合できていると想定される値で設定した。分離した試料を溶液（模擬汚染水）に投入し、振こうしたおよび固液分離を行い、これを 5 回繰り返した。固液分離した後の溶液は、PFOS/PFOA の分析試料とした。また、試験前後の PFAS 以外の代表物質（ナトリウムイオン：Na⁺、カリウムイオン：K⁺、カルシウムイオン：Ca²⁺、マグネシウムイオン：Mg²⁺、塩化物イオン：Cl⁻、重炭酸イオン：HCO₃⁻、硫酸イオン：SO₄²⁻、硝酸イオン：NO₃⁻）を分析し、ゼオライトを併用することによる PFAS 以外の吸着特性を評価した。

3.4 分析方法

不溶化処理の土壌溶出量は、環境省が示した土壌中の PFOS、PFOA 及び PFHxS に係る暫定測定方法（溶出量試験、含有量試験）²⁰⁾を適用した。透過性地下水浄化壁の試験で実施した溶液の PFOS/PFOA 分析方法は、令和 2 年環水大発第 2005281 号および環水大発第 2005282 号の付表 1（LC/MS/MS 法）を適用した。

表-1 不溶化処理の試験ケース

凡例名	土 壌	消石灰	酸化マグネシウム	高炉セメントB種	半水石膏	粉末活性炭	イオン交換水
	g						
BL(Ca)	20	—	—	—	—	—	—
①	20	0.6	—	2.8	—	—	6
②	20	0.6	—	2.8	—	0.05	6
③	20	0.6	—	—	2.8	0.05	3.4
BL(Mg)	20	—	—	—	—	—	—
④	20	—	1.2	2.8	—	—	6
⑤	20	—	1.2	2.8	—	0.05	6

4. 試験結果と考察

4.1 不溶化処理

図-4 に表-1 の試験ケース毎の土壌溶出量の結果を示す。図中の BL(Ca)は PFOS が 2,750 ng/L、PFOA が 3,650 ng/L であった。消石灰と高炉セメント B 種を混合したケース①においては、BL(Ca)に対して PFOS が 64%、PFOA が 32%の抑制率（「1-土壌溶出量（資材混合ケース）/土壌溶出量（BL）」（%））となった。

酸化マグネシウムを用いたケースでは、BL(Mg)は PFOS が 1,900 ng/L、PFOA が 2,000 ng/L であった。酸化マグネシウムと高炉セメント B 種を併用したケース④で、BL(Mg)に対して PFOS が 79%、PFOA が 45%の抑制率となった。

消石灰もしくは酸化マグネシウムと高炉セメントもしくは半水石膏に粉末活性炭を併用したケース②③⑤においては、粉末活性炭の混合率が土量比の 0.25%でも BL(Ca)ならびに BL(Mg)に対して PFOS および PFOA が 99%以上の抑制率となった。また、半水石膏を混合したケース③では、高炉セメントを混合したケース②の pH（土壌環境分析法）が 12.4 に対して 7.8 と中性域での処理が可能となったことから、処理地盤の pH 環境への影響も低減できると考えられる。

カルシウム系資材と高炉セメント B 種または半水石膏を混合することによる固化作用については、ケース①の不飽和条件で 2,306 kN/m²、飽和条件で 1,326 kN/m²、ケース③の不飽和条件で 165 kN/m²、飽和条件で 205 kN/m² となった。半水石膏の混合ケースにおいては、高炉セメント B 種を混合したケースに劣るものの、いずれのケースにおいても固化処理工法研究会が示す建設重機の作業地盤として必要な強度の目安 100～200 kN/m² を満たしていることから、十分な強度を確保できることが確認した。

マグネシウム系資材による処理土壌の物理特性を評価するために、スラリー化した資材（粉末活性炭体のみもしく

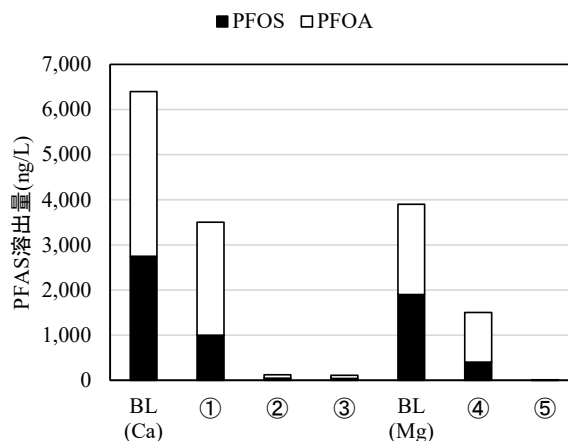


図-4 不溶化処理の試験結果

は粉末活性炭+酸化マグネシウム+高炉セメント B 種)を真砂土か粘性土に混合した場合の試験を実施した。試験結果を表-2 に示す。マグネシウム系資材に対しては、カルシウム系資材で検討した一軸圧縮強度の固化効果に加えて、固化後の処理土壌に対しての透水性も評価した。真砂土および粘性土に対して、酸化マグネシウムおよび高炉セメント B 種を混合することで透水係数が 10⁻⁹m/sec オーダーとなり、一軸圧縮強度も 221 kN/m²、1,206 kN/m² と強度発現が確認された。一方、土壌に対して活性炭のみをスラリー化した資材を混合した場合は、モールドから脱型できずに強度発現は確認されず、透水係数が 10⁻⁴～10⁻⁶m/sec オーダーであった。また、カルシウム系資材を用いた処理土壌の透水性に関しては、本稿で試験を実施していないがマグネシウム系資材と同様の傾向になると考えられる。さらに、半水石膏を用いた評価に関しても今後検討する予定である。

4.2 透過性地下水浄化壁

透過性地下水浄化壁の PFOS/PFOA の試験結果を図-5 から図-7 に示す。ここで、図-5 と図-6 は粒状活性炭もし

表-2 物理特性試験結果（マグネシウム系資材）

項目		単位	真砂土	真砂土	粘性土	粘性土
土量		g	4,000	4,000	4,000	4,000
混合 資材	酸化マグネシウム	g	—	240	—	240
	高炉セメントB種	g	—	560	—	560
	粉末活性炭	g	40	40	40	40
	水	g	1,200	1,200	970	970
粒度 分布	0.075～2mm	%	85.4	76.5	14.5	15.0
	0.005～0.075mm	%	8.3	16.3	45.0	60.5
	0.005mm未満	%	6.3	7.2	40.5	18.5
試験 結果	透水係数	m/sec	4.28×10 ⁻⁴	2.25×10 ⁻⁹	1.41×10 ⁻⁶	8.17×10 ⁻⁹
	一軸圧縮強度	kN/m ²	自立せず	1,206	自立せず	221

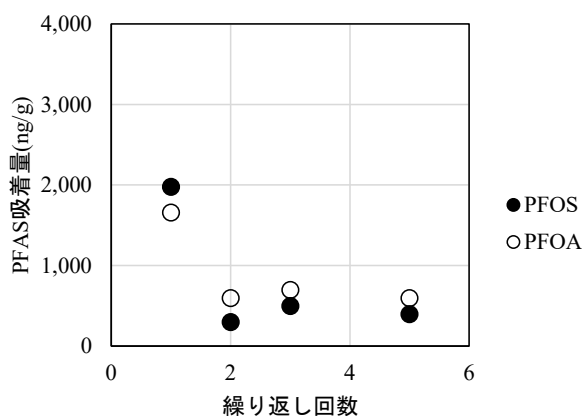


図-5 PFAS 吸着試験結果（粒状活性炭）

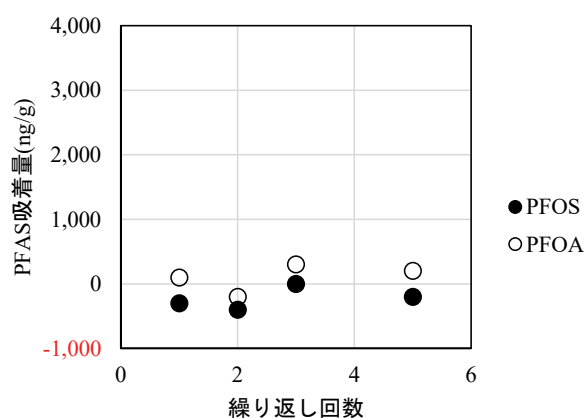


図-6 PFAS 吸着試験結果（ゼオライト）

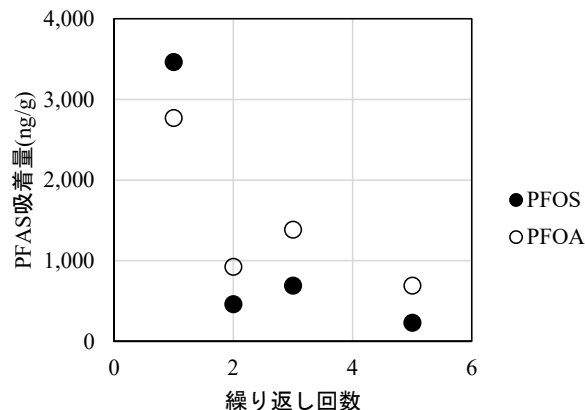


図-7 PFAS 吸着試験結果（粒状活性炭＋ゼオライト）

くはゼオライトのみを使用した結果であり、図-7 は粒状活性炭とゼオライトを併用した結果である。PFAS の吸着量は、粒状活性炭単独のケースと粒状活性炭とゼオライトの併用のケースにおいて吸着試験を繰り返す（繰り返し回数が大きくなる）につれて、低下する傾向にある。粒状活性炭ならびに粒状活性炭とゼオライトの併用の PFOS 吸着量は、繰り返し回数が 1 回目で PFOA よりも高い結果を示していたが、2 回目以降は PFOA の吸着量が多い。また、ゼオライトのみのケースでは、PFAS の吸着はほとんどみられなかった。

繰り返し回数毎での粒状活性炭のみと粒状活性炭とゼ

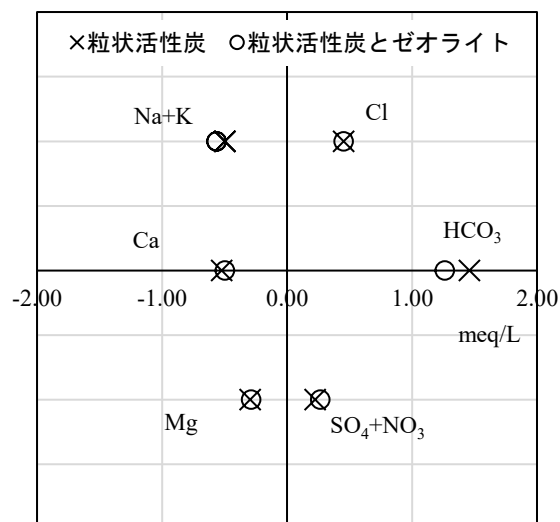


図-8 PFAS 以外の物質の吸着試験結果

オライトの併用による PFAS 吸着量を比較する。繰り返し回数 1 回目において粒状活性炭のみの吸着量は、PFOS が 1,980 ng/g、PFOA が 1,660 ng/g であった。一方、粒状活性炭とゼオライトを併用した場合の吸着量は、PFOS が 3,460 ng/g、PFOA が 2,770 ng/g であった。繰り返し回数 2 回目から 5 回目の粒状活性炭のみの吸着量は、PFOS が 300～500 ng/g、PFOA が 600～700 ng/g であった。一方、粒状活性炭とゼオライトを併用した場合の吸着量は、PFOS が 230～690 ng/g、PFOA が 700～1,400 ng/g であった。

以上のことより、粒状活性炭とゼオライトを併用することで PFOS が 1.4 倍、PFOA が 2 倍の吸着量となった。この要因を検討するために、繰り返し回数 3 回目の吸着試験前後において PFAS 以外で河川水に含まれている主要な溶存イオン（Na、K、Ca、Mg、Cl、HCO₃、SO₄、NO₃）を測定した。測定結果をヘキサダイアグラムとして図-8 に示す。粒状活性炭のみを使用した結果と比較して、ゼオライトを併用することで重炭酸イオン（HCO₃）が 20%程度低下していることを確認した。また、他物質は、ほとんど変化していない結果となった。そのため、重炭酸イオンなどがゼオライトに吸着することで粒状活性炭の吸着容量に対して PFAS 吸着量が増加したと考えられる。

5. まとめ

本稿では、PFAS で汚染された土壌・地下水に対して、PFAS の特性を考慮して開発した処理技術として、不溶化処理と透過性地下水浄化壁を記載した。PFAS の地盤内の特性として、PFAS の多くが土壌から地下水に移行しやすいという特性⁹⁾を有する。

不溶化処理に関しては、カルシウム系資材の消石灰およびマグネシウム系資材の酸化マグネシウムと固化材の高炉セメント B 種もしくは半水石膏に加えて、吸着材として粉末活性炭を微量混合することによって、PFOS/PFOA

ともに土壌溶出量を99%抑制することができた。また、半水石膏によって、中性域での処理が可能になることを確認した。さらに、処理土壌は固化処理工法研究会が示す100～200 kN/m²を満たすことから、建設重機の作業地盤としては十分な強度を確保できており、砂質系（真砂土）と粘性土に対しても透水性が低下することを確認した。

透過性地下水浄化壁に関しては、粒状活性炭とゼオライトを併用することで、PFASの吸着容量が高まる結果となった。これは、ゼオライトがPFAS以外の物質を吸着させることで粒状活性炭へのPFAS吸着容量が大きくなったと考えられる。また、本稿では割愛しているが、上向流通水カラム試験の結果でも粒状活性炭とゼオライトを併用することで粒状活性炭の吸着容量が大きくなっていることを確認している。

以上のことから、PFAS汚染土壌に対して、汚染拡大防止技術として不溶化処理と透過性地下水浄化壁の適用可能性を確認した。しかしながら、不溶化処理土壌の長期安定性²¹⁾、異なる土質の適用可能性などの課題は残っていると考える。また、透過性地下水浄化壁についてもPFAS吸着の耐久性の評価を行うとともに、吸着性を有する資材をスラリー化した微細粒子に加工し、資材を井戸から注入する技術についても検討する予定である。そのため、今後も効率的な処理技術の開発および検討を進め、実サイトにおける実証試験なども行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 環境省：中央環境審議会水環境部会環境基準健康項目専門委員会（第13回）資料7-2、2010年9月24日、<https://www.env.go.jp/council/09water/y095-13b.html>.
- 2) 環境省：令和2年度有機フッ素化合物全国存在状況把握調査の結果について、2021年6月22日報道発表資料、<https://www.env.go.jp/press/109708.html>.
- 3) 青木陽士、稲田ゆかり、隅倉光博、加藤雄大、倉部美彩子、小島啓輔：土壌洗浄・分級による有機フッ素化合物（PFOS/PFOA）の浄化検討、第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、pp.294-299, 2022.
- 4) 佐藤徹朗、瀬野光太、窪田成紀、中島誠：PFOS/PFOAを対象とした電気発熱法ハイブリッドによる原位置土壌・地下水浄化技術の開発、第26回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、pp.178-181, 2021.
- 5) 日野良太、鎌田明秀、西川直仁：有機フッ素化合物（PFAS）汚染土壌・地下水の処理技術の開発、防衛施設学会年次フォーラム、pp.53-58, 2024.
- 6) 大山将、松生隆司、大坪修平、宇川岳史：環境水中に含まれるPFOS/PFOAのキャビテーション技術による分解処理に関する基礎的検討、第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、pp.300-305, 2022.
- 7) 中島誠、瀬野光太、佐藤徹朗、平裕貴、西村章、西村聡：粉末活性炭添着ブリーツフィルターを用いたPFOA/PFOS汚染地下水処理に関する検討、第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、pp.103-108, 2022.
- 8) 鶴岡佑樹、大石雅也、鈴木義彦、松本直樹、森一星、潜在的規制物質の調査・対策スキームの検討部会：PFOS、PFOA及びPFHxSによる土壌・地下水汚染の調査・対策技術の現状、第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、pp.1-6, 2022.
- 9) 地盤工学会：土壌・地下水汚染の調査・予測・対策、地盤工学会、pp.168-177, 2003.
- 10) 上岡誠一、粕谷衛：土壌に含有する6価クロムのセメント系固化材による原位置不溶化処理に関する基礎研究、土木学会論文集、No.664, VII-17, pp.43-54, 2000.
- 11) 西田憲司、三浦俊彦、日笠山徹巳、平井恭正、土光政伸、森田一太、大澤誠司：微細な酸化鉄粒子の地盤注入による汚染拡散防止手法の実証試験、土木学会第68回年次学術講演会、pp.145-146, 2013.
- 12) 大山将、奥村正孝、保賀康史、西村良平：酸化マグネシウム系材料による固化・不溶化処理技術、地盤工学会誌、Vol.57, No.7, pp.20-23, 2009.
- 13) 高橋史武、坂井仁、島岡隆行、中居直人、北村洋樹：電気炉スラグ含有フッ素のアパタイト処理による不溶化メカニズムの検討、土木学会論文集G, Vol.72, No.7, III, pp.351-359, 2016.
- 14) 亀井健史、蓬萊秀人：高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発、地盤工学ジャーナル、Vol.4, No.1, pp.91-98, 2009.
- 15) 福武健一、三浦俊彦、日野良太、亀田健太郎、日笠山徹巳：ふっ素汚染土壌に対する不溶化処理の事例、土木学会第74回年次学術講演会、pp.VII-76, 2019.
- 16) 石川延男：フッ素化合物をめぐる化学技術の進歩、有機合成化学、第42巻、第9号、pp.770-774, 1978.
- 17) Zhou et al.: Effective sorption of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on hexadecyltrimethylammonium bromide immobilized mesoporous SiO₂ hollow sphere, Chemosphere, Vol. 90, pp. 2461-2466, 2013.
- 18) Xing et al.: The complex effect of DOM on PFOA and PFOS transport: Considering the interference of solution ionic strength and cation type, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 10, 108619, 2022.
- 19) 木村功二、藤井滋穂、田中周平、邸勇、野添宗裕：粉末活性炭による残留性有機フッ素化合物類の吸着除去特性および影響要因の検討、環境工学研究論文集、Vol. 45, pp.301-308, 2008.
- 20) 環境省：「PFOS、PFOAに関するQ&A集」及び「PFASに関する今後の対応の方向性」等について、2023年7月31日、https://www.env.go.jp/press/press_01977.html.
- 21) 日野良太、三浦俊彦、福武健一、西田憲司、森下智貴、日笠山徹巳、江種伸之：水銀およびふっ素によって汚染された地盤の原位置不溶化に伴う長期安定性に関する評価、地盤工学ジャーナル、Vol.15, No.3, pp.563-571, 2020.

森林表土を利用した植生工の有効性と生産性向上に向けた遠隔操作施工

INSTRUCTION FOR PROCEEDINGS OF JSDFE

石垣幸整*

ISHIGAKI Yukito

* 工博 日特建設株式会社 技術開発本部（〒104-0004 東京都中央区東日本橋 3-10-6 Daiwa 東日本橋ビル 5 階）

キーワード：植生工、森林表土利用工、生産性向上、LIDAR、遠隔操作施工

(*Vegetation method, Top soil utilization method, Productivity improvement, LIDAR, numerical remote-control*)

1. はじめに

本報告では与那国駐屯地開設にあたる基地造成工事において、表土を活用し植生工を実施した事例を紹介する。また近年、建設業が進めている多様な労働環境構築や生産性向上などを目的とした ICT 活用の一環として、植生工における遠隔操作施工の取り組みについて紹介する。

与那国の様な離島では様々な地理的・物流的な制約条件が生じるが、その中で貴重な生態系保全や島外に搬出できない産業廃棄物の削減は大きな課題の一つである。与那国島は日本最西端の離島であり、台湾から約 111km と非常に近接した場所に位置している。その地理的特性から地政学的戦略拠点として防衛上重要な役割を果たしている一方、生物地理学的にも非常に重要なエリアに属しており、郷土種の保全や珊瑚礁をはじめとする海洋生態系の保護が求められる。さらに、与那国島は台風の経路上に位置することが多く強風・豪雨が想定される。そのため、法面侵食防止だけでなく赤土流出防止対策としても、植生工には高い耐侵食性能が必要となる。

一般的に、切土や盛土の侵食防止を目的とする植生工には、「外来草本」や日本由来の植物種子を中国などの他国で生育させ、その種子を輸入した「外国産在来種」が使用されている。しかし、これらは周辺生態系に与える影響が大きく、与那国島の様に固有の生態系が形成されている地域には適さない。特に、現地に生息する郷土種（工事周辺地域もしくは日本固有の植物）と交雑し、遺伝的多様性に影響を与える可能性のある外国産在来種の影響は大きいと考えられており、近年、使用を控える方向性が示されている¹⁾²⁾。こうした場合、郷土種を購入する、もしくは工事周辺区域から種子を採取するなどの方

法が検討されるが、コストや調達量の面から適用が困難となるケースが多い。

森林表土利用工は土工事で活用が難しい表土を植生工の生育基盤材として活用し、表土に含まれる埋土種子により緑化を図る工法である。そのため、現場発生材の再利用という観点だけでなく、必ずしも種子を調達する必要が無いため、生物多様性の面でも離島での植生工として適している。与那国駐屯地においては、こうした状況を踏まえ、植生基材吹付工である「カエルドグリーン工法」が森林表土利用工として施工された。一般的な森林表土利用工は生育基盤中に混合できる表土量は体積比で 10～20%程度であるが、「カエルドグリーン工法」は 60～80%程度と非常に高い。さらに、生育基盤を団粒化させて耐侵食性能を向上させており、与那国島に求められる植生工としての性能は一般的な植生基材吹付工や森林表土利用工よりも優れている。そこで、本報告は与那国島の施工結果や経過観察結果³⁾から、「カエルドグリーン工法」の有効性や課題などを提示する。

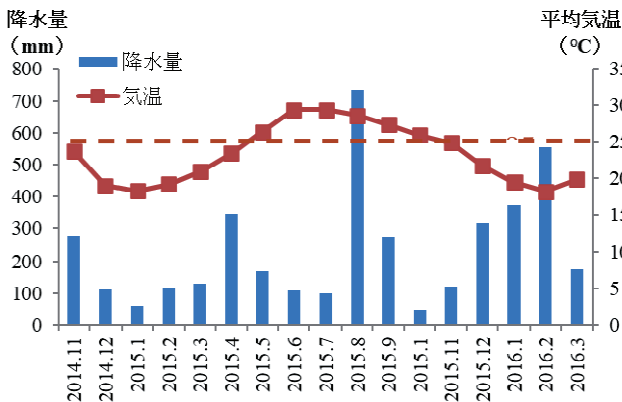
また、与那国島の様な離島においては前述の生態系保全や産業廃棄物の削減といった環境面の課題に加え、働き手の確保、作業員宿舍の確保といった課題も大きなものとなる。これらの課題に対応するためには、単位施工量あたりの必要作業員数を減らすなどの生産性向上のほか、現場以外の場所から吹付機器を操作する遠隔操作施工が有効になると考えられる。本報告では植生工の大容量施工や遠隔操作施工の取り組みについても紹介する。

2. 与那国駐屯地の表土活用事例

2.1 施工地概要

表一 施工地概要

場所	沖縄県八重山郡与那国町	
年間降水量	2232.8 mm	(2006～2015 年の平均値)
年間平均気温	24.1℃	(2006～2015 年の平均値)
年間平均風速	5.6 m/s	(2006～2015 年の平均値)
地質	八重山層群、琉球層群	
周辺植生	草地（イネ科草本類）、アダン林	
施工面積	約 49,000 m ²	
のり面勾配	盛土部：1:2.0 切土部：1:1.2	
施工時期	2014 年 11 月～2016 年 3 月	



図一 施工時期月別降水量合計値と月別平均気温

施工は2014年から2018年まで断続的に実施され、カエルドグリーン工法の総施工面積は約 96,000m² となった。与那国島は亜熱帯海洋性気候に属しており、温暖多雨で気温の較差が小さいことが特徴である。施工箇所は1:2.0の盛土部と1:1.2の切土部であり、日中に法面が日陰となるような条件ではなかった。周辺植生はイネ科草本植物からなる草地とアダン林であった。表一は与那国島の施工当時の気象や施工条件などを示したものである。図一に施工時期の月別降水量の合計と月別平均気温⁴⁾を示した。一般的に、平均気温からみた植生工の施工適期は春夏期では日平均気温が10～25℃、秋期では15～25℃とされている。与那国島は気象条件から、植生工の施工適期は11月～4月であることが読み取れる。

2.2 施工方法

2.2.1 表土採取

表土は2014年11月から2015年3月の間にバックホウで採取した。採取深さは30～50cmである。採取したすき取り土は、国頭マージ、沖積土壌を主体としたものでリター層の厚さは概ね5cm未満であった。一般的な森林表土利用工は表層10cm程度をすき取ることが多いが、重機によるすき取りが困難なことから人力施工もしくは施工能率が大きく低下する結果となり、表土採取コストが増加する傾向にある。カエルドグリーン工法は表土を含む掘削土を生育基盤材として活用できることから、表土採取コストを抑制できる。

2.2.2 使用機械

図二、三は使用した吹付および生育基盤製造プラントである。生育基盤製造プラントは必要な1日あたりの製造量にあわせて選定することが可能で、与那国駐屯地においてはミキサー容量が0.5m³と1.0m³のプラントを用いて施工した。

2.2.3 生育基盤の製造と吹付

生育基盤の配合は事前配合試験を実施して決定する。図四は吹付状況、表二は生育基盤の配合を示したものである。改良土は団粒剤や保水剤などを用いて表土を含む掘削土を改良したものである。1m³あたりの生育基盤に使用する表土量は0.7m³(ほぐし土量)となった。吹付はロータリー式吹付機を用いて、人力による施工を行った。吹付けた生育基盤の土壌硬度(山中式土壌硬度計)が20mm前後となるように調整し、施工直後の降雨による侵食を受けないよう管理した。

2.3 緑化性能の検証

2.3.1 調査目的と方法



図二 0.5m³の吹付・生育基盤製造プラント



図三 1.0m³の生育基盤製造プラント



図四 吹付状況(分離型吹付プラント)

表二 生育基盤材の配合

改良土	有機質系 基盤材	高度化成 肥料	緩効性 肥料	接合剤 (粉体)
0.8 m ³	0.4 m ³	4 kg	4 kg	1 kg

表土を活用したカエルドグリーン工法の施工適期や緑化性能を検証するため、植生調査を実施した。試験施工箇所2箇所及び任意に選定した25箇所における法面全体の植被率の他、施工地全体を踏査し、出現種を調査した。なお、本調査は2014年11月～2016年3月までの施工箇所約49,000m²に対して実施したものである。

2.3.2 植被率

施工面に対し植物が占める面積を示した植被率は植生の成績判定をする目安として使用されており、道路土工指針の森林表土利用工の判定の目安では、施工適期を3ヶ月経過した時点での植被率が10%以上となることが1つの判定指標として示されている⁹⁾。

2014年11月に実施した試験施工の植被率の推移を図-5に示す。施工後3ヶ月の植被率は切土部で90%、盛土部で70%以上となり、森林表土利用工判定の目安を満足することが確認された。図-6は試験施工および本施工時の植被率と施工時期との関係を施工月別の植被率を用いて作成したものである。本施工では3ヶ月経過しても植被率が比較的低い箇所も見受けられたが、施工後8～10ヶ月経過した2016年3月時点では全ての調査箇所で50%以上の植被率となり、良好な植生となった。図-7、8は調査地の全景を示したものである。図-6より、2015年11月時点では、6～7月に施工した箇所は5月に施工した箇所と比較し、植被率が大幅に低くなっている。これは夏期の高温が発芽や生育に影響を及ぼしたと考えられる。また、2016年3月時点では、施工時期にかかわらず、植被率が改善している。これは6～7月に施工した

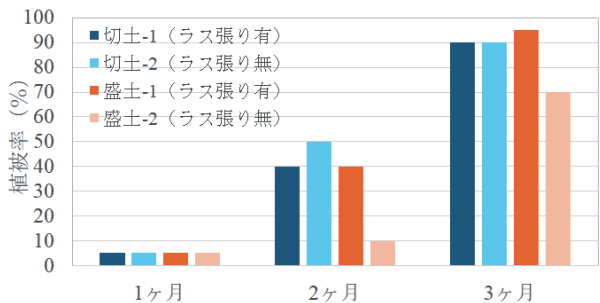


図-5 試験施工の植被率の推移

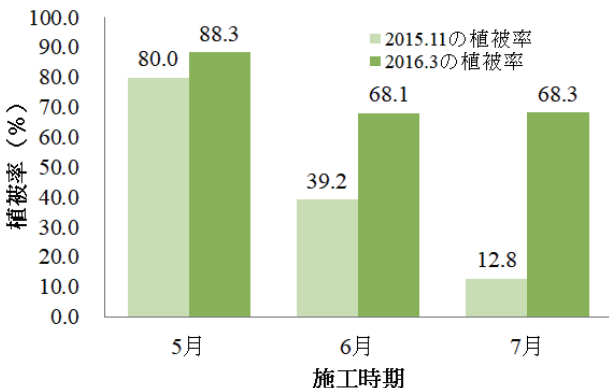


図-6 植被率と施工時期との関係



図-7 本施工の調査区の全景 1



図-8 本施工の調査区の全景 2

表-2 出現種の一覧

区別	種数	種名
一年生草本 (越年草含む)	18	アキノノゲシ、イヌビユ、エビスグサ、オオバコ、オニタラビコ、オヒシバ、キツネアザミ、コメツブウマゴヤシ、タカサブロウ、タチアワユキセンダングサ、タネツケバナ、ツユクサ、テリミノイヌホウズキ、ハイニシキソウ、ハルノノゲシ、ベニバナバロギク、メヒシバ、ルリハコベ
多年生草本	14	イリオモテアザミ、カタバミ、ギンギン、ギョウギシバ、クマツヅラ、クワズイモ、コウライシバ、シマツユクサ、シマノキツネボタン、ススキ、チドメグサ、ツボクサ、ヒメキランソウ、ワルナスビ
木本	3	アダン、ギンネム、ハマゴウ

調査区が施工適期を経たことによるものであり、3ヶ月以上の施工適期を経れば十分な植生が成立するものと考えられる。

2.3.3 出現種

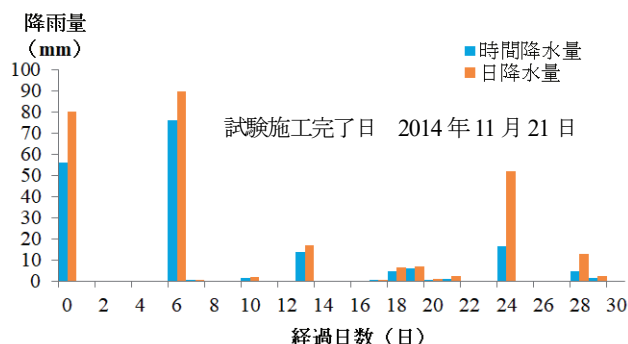
表-2は調査の結果確認した出現種を示したものである。種子を混合しない森林表土利用工において、生育する植物の種類や、種数は生物多様性の回復度合いを示す

一つの指標となる。調査の結果、全体で 35 種類もの植物が出現し、多様な植生となっていることが確認された。また、調査区の多くは施工地周辺と同様にメヒシバやギョウギンバなどのイネ科草本類が優占しており、周辺植生へ早期に近づいていることが確認された。

2.4 耐侵食性能の検証

図－8 は試験施工箇所の時間降水量の最大値と日降水量の履歴を示したものである⁴⁾。なお、30 日経過後の植被率は 5%であり、耐侵食性能には影響を及ぼしていない。期間中の時間降水量の最大値は 76mm、日降水量の最大値は 89.5mm を示したが、生育基盤の補修が必要となるような侵食は確認されなかった。

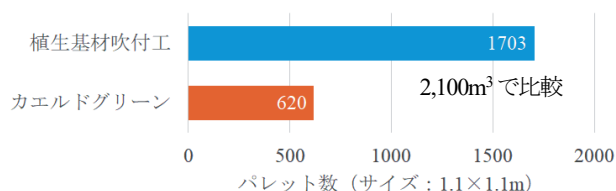
本施工時期である 2015 年の 8 月～9 月には二つの台風（13 号、21 号）が到来した。施工地周辺の時間降水量の最大は 49mm、日降水量合計の最大は 302.5mm、最大瞬間風速の最大は 63.8m を記録した。カエルドグリーン工法の被害は降雨や強風による生育基盤の侵食・剥離であったが、そのほとんどは植被率が低く生育基盤が植物で覆われていない箇所に被害が集中した。試験施工時の時間降水量の最大値よりも低かったにもかかわらず、侵食が生じたのは日降水量による影響が大きく、生育基盤の含水比が長時間の降雨により上昇したためだと考えられる。前述した台風以外の降雨では生育基盤の侵食や剥離は確認されず、与那国島の気象条件に対してもカエルドグリーン工法の生育基盤は十分な耐侵食性を有していたと考



図－8 試験施工時の時間降水量と日降水量

表－3 表土の累計使用量

施工体積 (A)	施工体積 1m ³ 当たりの ほぐし土量 (B)	使用量 (A×B)
約 2,100 m ³	約 0.7 m ³	約 1,470 m ³



図－9 運搬パレット数量の比較

えられる。

2.5 現場発生材（表土を含む掘削土）の使用量の検証

表－3 は 2015 年 5 月から 2016 年 3 月までの表土の累計使用量を示したものである。生育基盤中 1m³ あたり約 0.7m³ のほぐし土量を使用したため、約 1,470m³ の現場内再利用が可能となり、島外搬出に要する産廃処理費用を大きく低減できた。この数値は実測ではなく計算上のものであるが、吹付ロス量まで考慮すれば少なくとも表－3 で示した数値を再利用できたと考えられる。また、図－9 は島内に海上運搬する必要のある材料使用量（パレット数量）を一般的な植生基材吹付工と比較したものである。計算上の算出数値ではあるが、カエルドグリーン工法は植生基材吹付工と比較し約 74%の低減が可能であることを確認できた。気象条件や運搬船により大きく左右される海上運搬量を低減することは、円滑な工事の進捗に貢献すると考えられる。

2.6 表土活用の留意点と課題

2.6.1 表土採取と保管

表土は表層数 cm～10cm 程度の層であり、植物の種子を含む未分解の落ち葉などの有機物や腐植の多い鉾質土壌である。有機物が含まれているため、植生工の生育基盤として非常に優れている一方、盛土などの土工事には不適である。バックホウを用いて表土を含む掘削土を採取する方式は経済的な観点などから、大規模な造成工事に適している。ただし、保管用地の確保や採取工程が本工事の工程と密接に関係することから、設計段階から十分に検討する必要がある。

2.6.2 篩い分けによる異物除去

バックホウによる表土を含む掘削土の採取において、掘削土に多量の礫が含まれている場合、篩い分けが必要となる。これは掘削土を植生基盤として活用するためにはミキサーを使用した改良工程が必要であり、礫がミキサーの攪拌に支障をきたすためである。また、吹付工として使用するためには 20～30mm 以内の篩い分けが必要となる。ただし、与那国駐屯地では礫の含有量が少なく、改良前の篩い分け作業は必要とはならなかった。また、カエルドグリーン工法は 30cm 程度の人頭大の礫が含まれている場合には、スケルトンバケットによる篩い分けが必要となるが、改良前の 20～30mm の篩い分けのために、篩い分け機、破砕機などの大型機械設備を別途設ける必要は無い。これは、改良工程で表土を含む掘削土をスラリー化した後に篩い分けをする工程を含んでいるためである。この工程により、混入した 20～30mm 以上の礫は振動篩い機により分別され、生育基盤材に含まれることなく分別される。

2.6.3 森林表土利用工の植被率

道路工指針の森林表土利用工の成績判定の目安⁵⁾では、施工後 3 ヶ月の植被率 10%を一つの指標としている。これは、外来種よりも緩慢な埋土種子の発芽特性や、購入種子を用いた一般的な植生工よりも、種子の混入量が少



図-10 浸水させたカエルドグリーンの生育基盤

なくなることなどが大きく考慮されている。与那国の様な離島工事においては、生育基盤材が侵食されることにより、赤土の流出が大きな問題となる。施工適期での施工が第1手段として求められるが、工程管理上、困難なことが多い。植被率が低い状態が長期間続いた場合、そのリスクが大きくなるため、補足的な追加種子混合による早期の植被率向上や、カエルドグリーン工法のように耐侵食性に優れた基盤を用いるなどの対策を検討する必要がある。図-10は吹付けたカエルドグリーン工法の生育基盤と地山を浸水させ、比較したものである。カエルドグリーン工法の生育基盤は団粒化作用により土粒子が溶け出さないことが確認できる。

3. 植生工の大容量化と遠隔操作施工への取り組み

3.1 大容量化と遠隔操作施工に伴う機械化

一般的な植生基材吹付工で用いられる吹付けシステムはモルタル吹付工に適用するものとして日本に導入されたもので、それ以来人力作業が標準となっている。図-11は吹付プラントを示したものである。安全性や生産性向上のため、トンネル吹付工事や諸外国での吹付工事においては、ロボット施工が導入されているが、植生基材吹付工においては、未だ人力作業が主流であり機械化施工が進んでいない。これは、日本特有の狭隘であり種々の形状となる施工条件が一つの要因となっていることが考えられる。冒頭で述べたように、働き手の確保、作業環境・生産性の向上は建設業が直面している喫緊の課題であり、植生工においても取り組むべき課題である。これらの課題に対し、人力施工から脱却する機械化施工への取り組みは必須であり、機械化施工を用いて大容量施工や遠隔操作施工に取り組む必要がある。

3.2 スロープセイバーの概要と生産性向上効果

「スロープセイバー」は機械化施工により、法面吹付工事の生産性向上を目的として開発された工法である⁶⁾。図-12に工法概要を示す。2段法面まで施工可能なC-17型と1段法面までの施工が可能なC-08型の吹付アタッチメントを有し、材料供給は大容量施工に対応するため、ロータリー式吹付機と強制2軸ミキサーを用いた



図-11 一般的な吹付プラント



図-12 スロープセイバー概要（植生工）



図-13 スロープセイバー吹付状況

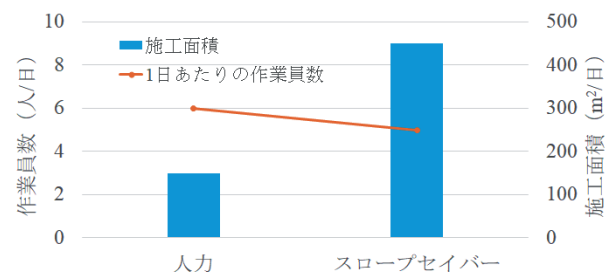


図-14 スロープセイバーの生産性向上効果

プラントを使用する。また、ベースマシンは0.8m³のバックホウを標準としている。人力法面吹付作業が不要となるため、材料吐出量を大幅に増加させることが可能となる。開発当初は大容量コンクリートポンプを用いたモルタル吹付への適用を図っていたが、近年では植生基材

吹付工の大容量化による生産性向上にも取り組んでおり、人力吹付けの約2倍の吐出量を実現している⁸⁾。カエルドグリーン工法への適用も進めており、「スロープセイバー」を使用することで約3～5倍の吐出量で施工できることを確認している。図-13はカエルドグリーン工法に「スロープセイバー」を適用したものである。図-14はその生産性向上効果を示したものであり、1日当たりの作業員数がほぼ同等でありながら、吐出量が大きく増加することから1日当たりの施工面積は約3倍になることが期待できる。

3.3 リアルタイム吹付厚計測システム

法面吹付工事において吹付厚さは重要な管理項目である。出来形計測としてだけでなく、施工中の適正な吹付厚さの管理、材料ロス率の低減という観点からも最も重要な管理項目となる。一般的に、施工中の管理は検測ピンやスパーサーなどを用いた定性的な管理を用いており、所定の厚さ以上であることを目視で確認することに留ま



図-16 システム概要

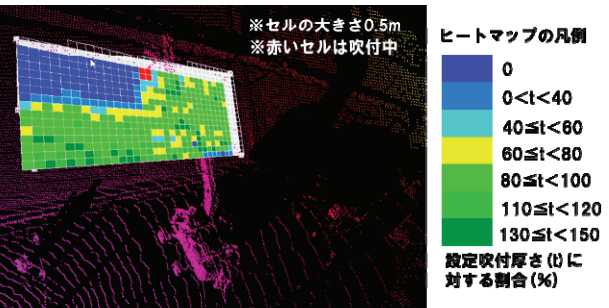


図-17 計測画面の一例

	TLS	LIDAR
機種名	Faro focus remium350	OS1-128
最大測定距離	350m	120 m
測定精度 (Precision)	2 mm @10 m、 3.5 mm @25 m	0.25-2 m: ±3 cm 2-20 m: ±1.5 cm 20-60 m: ±10 cm
測定精度 (Accuracy)	±1 mm (10～25 m)	Lambertian: 5 cm 以内 Retroreflectors: 10 cm 以内
垂直解像度	0.009°	0.35° ～2.8°
点群取得数/秒	2,000,000	2,621,440

表-4 TLS と LIDAR の諸元

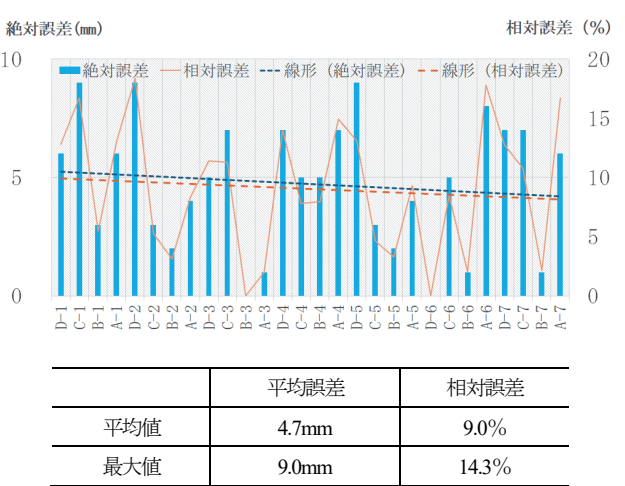


図-18 TLS と LIDAR の計測値の比較

表-5 計測条件

測定距離	25～30m
法面の角度	30°
目標吹付厚	50mm
測定面積	28m ²
1m ² あたりの点群数	TLS : 3、694～8、627 LIDAR : 10～20

っている。スロープセイバーのような機械施工においては、安全上の観点から作業者が吹付箇所の近傍で目視確認することは困難である。そこで、スロープセイバーでは LIDAR を用いたリアルタイム吹付厚計測システム (GREEN×LIDAR) を採用している。図-16、17はシステム概要と計測画面の一例を示したものである。LIDAR は三脚などに静置設置する。吹付中に LIDAR の点群データを処理することで、吹付厚をリアルタイムでヒートマップ表示することを可能にしている。ヒートマップは 0.5～1.0m 四方の大きさに設定したセル内の点群データを平均化して色別に表示している。等厚の発泡ポリスチレン板の厚さを計測した実験環境下ではあるが、30m の計測距離において計測精度±3mm 以下を実現しており、レーザースキャナ (TLS) との差も殆ど無いことを確認できた⁹⁾。表-4 に使用した TLS と LIDAR の諸元を表に示す。

図-18 は TLS との植生基材吹付工の計測データ (目標吹付厚 5cm) の比較を示したもので、TLS に対する絶対誤差と相対誤差を示した。計測値は 1m²あたりの点群の平均値であり、図-18 の横軸は左から計測距離に近い順に並んでいる。表-5 は計測条件を示したものである。測定精度や点群数に大きな違いがあるにも関わらず、30m 程度までの計測距離であれば、平均絶対誤差は 5mm 以内に収まっており、距離が離れるにつれて誤差が大きくなる傾向も見られない。また、最大絶対誤差も 10mm 以内を示した。

等厚の発泡ポリスチレン板や植生基材吹付工の計測結果より、計測精度や点群数の大きく異なる TLS と LIDAR との差が大きく生じていないことから、点群数を平均化しセル毎の計測値として管理することの有効性が確認できたと考えている。また、LIDAR を静止設置する必要性があるため、実施工の計測にあたってはその計測範囲が施工性に大きな影響を及ぼす。法面の凹凸の大小など計測条件に左右されるが、これまでの実験結果や実現場での計測結果より、本システムの現状の実用的な計測距離は 20～30m 程度だと考えている。これはスロープセイバーの 1 日当たりの施工可能面積を 1～2 回程度の設置でカバーできる範囲であり、十分に実用的なものだと考えている。

3.4 遠隔操作システムの実証施工

災害現場での施工や多様な働き方を進めるため、スロープセイバーの遠隔操作化に取り組んでいる。与那国島の様な離島での施工においても、技能者の確保や宿舎必要人員数の削減のような観点で有用なものだと考えている。遠隔操作システムは ARAV(株)の Model V を用いて構築しており、運転席に後付け可能なシステムを採用することで、汎用性を高めている。図-19 は運転席にその操作治具を取り付けたものである。通信規格は ARAV(株)独自の g-protocol を採用することで、インターネット経由でも操縦信号は 0.05 秒台の通信を確立しており、遠隔操作においてもストレスのない操作が可能となっている。また、遠隔操縦はジョイスティックの他、ゲームコントローラの使用も可能となっている。図-20、21 にそれぞれの操作状況を示す。図-22 は福島ロボットテ



図-19 遠隔操作バックホウの運転席

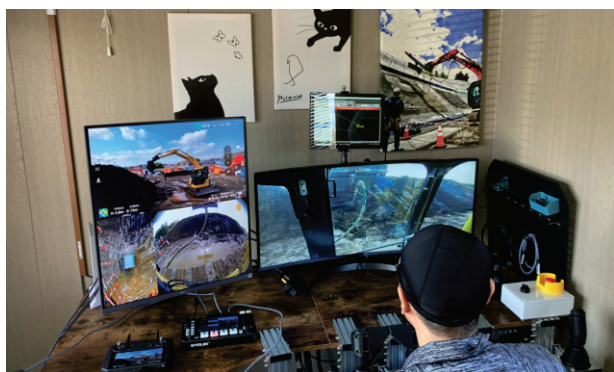


図-20 ジョイスティックでの操作状況

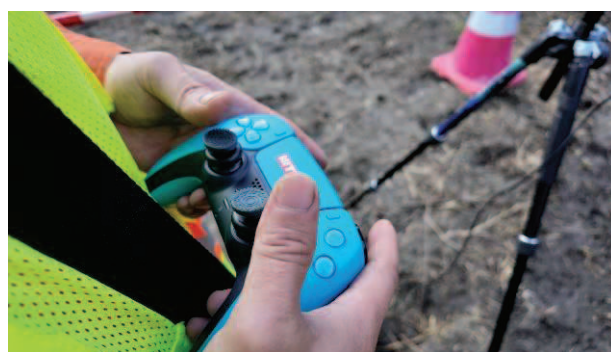
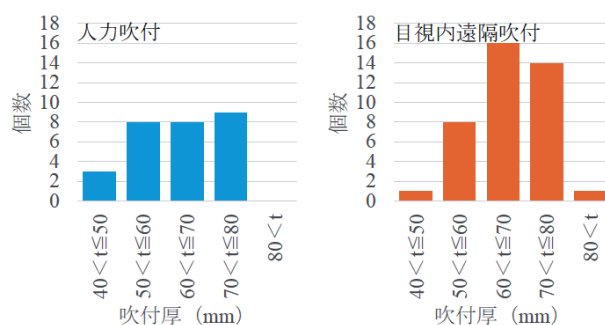


図-21 ゲームコントローラでの操作状況



図-22 福島 RTF での実証試験状況



	人力吹付	目視内遠隔操作
データ数	28	40
平均値 (mm)	54	57
最大値 (mm)	69	79
最小値 (mm)	40	40

図-23 人力吹付と目視内遠隔操作との比較

トフィールド（以下、福島 RTF）で実施した実証試験の施工状況を示したものである。図-23 に人力吹付とゲームコントローラ操作を用いた目視内遠隔操作との吹付厚さとの比較を示す。平均吹付厚さはほぼ同等となり、人力吹付とほぼ同様に吹付可能であることを確認できた。掘削・積み込み作業のような一般的な土工事の遠隔操作と異なり、スロープセイバーを用いた法面吹付作業は単位時間あたりのレバー操作回数が比較的少なく、迅速な操作も必要とされない。そのため、吹付ロボットの操作自体は比較的容易なものである。ただし、吹付厚さは 30～100mm 程度の厚さとなるため、直接目視できない遠隔地からの操作においては、吹付に適したアタッチメント

動作と LIDAR を用いた繊細な管理が必要となると考えている。離島においては通信環境の構築が重要となるが、近年では Starlink などの衛星通信システムの導入が容易になってきており、今後は通信速度、安定性の向上が課題になると考えている。福島 RTF の実機試験やこれまでの知見から、スロープセイバーの吹付作業においては 200～300ms 以下の遅延であれば、十分に作業可能だと判断しており、操作環境の容易さに大きな影響を与える映像伝送の安定化手法を今後検討していく予定である。

4. おわりに

表土利用を用いた植生工は生態系保全や産業廃棄物削減を目指すうえで有用な手法であるだけでなく、周辺住民の工事に対する理解を得るうえでも効果的なアプローチとなり得る。基地造成などの開発行為は我が国の安全を将来にわたって担保するうえで必要な行為であると同時に、貴重な生態系を守り、次世代に日本の美しい自然環境を継承していくことも非常に重要だからである。特に離島においては独特の生態系が形成されており、外部からの資材搬入や廃棄物処理にかかる制約も大きいことから、環境へのインパクトを最小化するために、より積極的な表土利用が求められるといえる。

本報告で紹介したカエルドグリーン工法は森林表土利用工の一手法として、活用できる表土の量や種類が多いことに加え、団粒化による高い耐侵食性能を発揮する点が大きな特徴である。そのため、基地造成工事に限らず、ダム建設工事など大規模工事での実績が着実に増えている。一方、現場発生材を広範に再利用するためには、表土だけでなく伐採木の扱いにも視野に入れる必要があり、今後の工事現場のニーズとしても極めて重要な課題となる。特に離島での施工では、島外からの資材搬入を極力抑えることが費用面・環境面の両面で望ましい。

そこで、カエルドグリーン工法では表土と木材チップを組み合わせた生育基盤を使用することにより、現在の材料運搬量をさらに 20%程度削減することを目指して検討している。こうした取り組みは、離島が抱える資源や廃棄物処理の課題解決にも直結すると期待される。

また、冒頭でも述べたように、機械化施工による大容量施工や遠隔操作施工への取り組みは、生産性の向上や多様な働き方の実現による労働力確保という観点で、離島における工事にきわめて有効な手段の一つだと考えられる。今後は、これらの新技術を組み合わせることで、限られた人員でも大規模かつ迅速に施工できる体制の構築が期待できる。ただし、安全性や施工精度の確保を含め、実用化に向けては解決すべき課題がまだ多いことも事実である。実機を用いた検証や、ICT をさらに活用した施工管理の高度化など、一つ一つの課題に対応するための研究開発が継続的に求められる。

今後は、表土利用に関連する施工技術や ICT 活用技術がより一層発展し、離島をはじめとする全国各地の施工

現場に普及することで、環境保全と社会インフラ整備が持続的に両立されることを期待する。これからも、実証と研究を重ねながら、安全保障と自然保護の双方に貢献できる技術の開発と普及に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 日本緑化工学会：生物多様性に配慮した緑化植物の取り扱い方に関するガイドライン 2023、日本緑化工学会誌、48(4)、pp557-575、2023。
- 2) 全国特定法面保護協会：のり面緑化工の手引き（改訂版）、2024
- 3) 石垣幸整、堀江直樹：与那国島におけるすき取り土を使用した森林表土利用工の施工事例、日本緑化工学会、42(1)、pp137-140、2016。
- 4) 気象庁：“過去の気象データ検索”、気象庁ホームページ、<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etm/index.php>(参照：2014年11月～2016年3月 所野)。
- 5) 日本道路協会：道路土工一切土工・斜面安定工指針、pp247、2009。
- 6) 石垣幸整：モルタル吹付工における LIDAR を用いたリアルタイム吹付厚計測技術とその事例紹介、基礎工、51 巻 8 号、総合土木研究所、pp.86-90、2023。
- 7) 石垣幸整・中西貴大：法面吹付ロボットの開発と LIDAR によるリアルタイム吹付厚計測-モルタル吹付工の生産性向上に向けた取り組み、建設ロボットシンポジウム論文集21 巻、建設ロボット研究連絡協議会、O4-1。
- 8) 石垣幸整、蔵谷樹：生産性向上を目的とした大容量植生基材吹付工法の開発、日本緑化工学会誌、50(1)、pp.87-90、2024
- 9) 蔵谷樹、石垣幸整、藤田哲：植生基材吹付工における LIDAR を用いた吹付厚のリアルタイム計測精度の検証、日本緑化工学会誌、50(1)、pp.99-102、2024

令和6年能登半島地震において「水」を軸とした避難生活の支援報告

～被災地での「生活用水」支援活動から得た知見～

Report on support for the evacuation life centered on "Water" at the 2024 Noto Peninsula Earthquake
—Knowledge gained from "Living Water" support activities in disaster-stricken areas—

中根圭介¹⁾、栗田恵子²⁾
NAKANE Keisuke and KURITA Keiko

- 1) ユーティリティ・ソリューションズ代表、技術士（総合技術監理部門、上下水道部門）、防災士
2) コアララボ代表、災害医療コーディネーター、慶應義塾大学経済学部学生（通信教育課程）

キーワード：生活用水、災害、避難所、災害関連死、シャワー、洗濯、感染症対策
(Living Water, Disaster, Shelter, Disaster-related deaths, Shower, Laundry, Infection Control)

1. はじめに

令和6年(2024)1月1日に発生した能登半島地震、そして同年9月に同じ地域を襲った奥能登豪雨により、多くの尊い命が失われ、甚大で悲劇的な被害は今なお続いている。

著者らは、ちょうど30年前に発生した阪神淡路大震災の被害において課題となっている災害時の避難生活の質の向上のための「生活用水」の必要性について、過去2年間、本学会研究発表会において発表している。

令和5年度は生活用水を製造する「非常用生活用水浄化装置」の開発について、令和6年度は、その装置の適用事例について発表を行った。

今回、能登半島地震の発生直後から実装置を現地に持ち込んで、実際の避難所で長期間支援提供を行ったことで、様々な知見や課題を得たので報告する。

(1) 先行調査

今回の能登の被災地で著者らが行った生活用水支援に関連した文献類には、以下のようなものがある。

- a) 「避難所における良好な生活環境の確保に向けた取組指針（令和6年12月改定）」（内閣府防災担当、2024.12月に改訂）¹⁾

指針には『場所（避難所）の支援』から『人（避難者等）の支援』への考え方の転換等、「能登半島地震の対応を踏まえた各種取組の実施や避難所の在り方の見直し」などが反映されている（図-1）。

ここに、「生活用水の確保」の項は、指針の中で具体化・詳細化されている（図-2）。

第2 発災後における対応

2 避難所の設置と機能整備

(2) 指定一般避難所の機能

⑦ 災対法第86条の6に基づき、被災者の避難所における生活環境の整備のため、優先順位を考慮して、必要に応じ、次の設備や備品を整備するとともに、被災者に対する男女別のトイレ・更衣室・洗濯干し場・授乳室・休養スペースの設置等によるプライバシーの確保、暑さ寒さ対策、**入浴及び洗濯の機会確保**の他、子ども遊びや学習のためのスペースの確保等、生活環境の改善対策を講じること。

（略）

エ **洗濯機・乾燥機**、洗濯干し場

オ **仮設風呂・シャワー**

（略）

⑨ 避難生活が長期化した場合、被災者の孤立感を解消し、生きがいや居場所を見出し、心身の健康を確保していくため、避難所内に喫茶、**足湯**、集会所等の交流の場を提供することが望ましいこと。

図-1 避難所の機能整備¹⁾

第2 発災後における対応

1 1 生活用水の確保

(1) 飲料水の他に、トイレや入浴、避難所の清掃、洗濯、器材の洗浄などの用途に欠かせない「生活用水」の確保が必要になる。飲料水は支援物資として確保されるが、その他の用途の水についても、感染症の防止等、衛生面の観点から、分散型の生活用水の確保として、平時からタンク、貯水槽、防災井戸等の整備に努めており、衛生的な水を継続的に確保すること。

(2) 入浴支援を行うNPOや民間温浴施設等の関係事業者との協定の締結、避難所との送迎のためのマイクロバス等の確保、シャワーや仮設風呂の設置のための資機材の備蓄、洗濯キットの備蓄、クリーニングサービスの提供のためのクリーニング事業者との協議、水循環型シャワー等の新技術の活用検討など、入浴機会や洗濯機会が確保されるよう平時から準備しておき、災害発生時には速やかに対応すること。

(3) スフィア基準に沿って、入浴施設（シャワー、仮設風呂等）を50人に1つ設け、男女別に提供するようにすること。

図-2 生活用水の確保¹⁾

b)「スフィアハンドブック 人道憲章と人道支援における最低基準」（国際赤十字・赤新月運動他）²⁾

本書には、人道憲章の枠組みに基づいて生命を守るための主要な分野における最低限満たされるべき基準が、図-3 に示すように「給水」、「給水量」についても記載されている。



図-3 スフィア基準における給水の位置づけ²⁾

紛争地域などを含んだ給水、衛生および衛生促進に関するスフィア最低基準には、図-4 および図-5 に示す2つの具体値が記載されている。

図-4 に示すように「一般的な慣行では、生存に必要な最低水量は1人あたり1日15リットル」となっている。

基本指標
各世帯の飲料水と家庭における衛生を保つために必要な水の平均使用量
・ 1人1日、最低15リットル
・ 支援の状況と段階によって量を決める
水関連施設の最大利用者数
・ 蛇口1つにつき、250人（基準流出量：毎分7.5リットル）
・ 手動ポンプ1台につき、500人（基準流出量：毎分17リットル）
・ 解放井戸1基につき、400人（基準流出量：毎分12.5リットル）
・ 洗濯施設1か所につき、100人
・ 入浴施設1か所につき、50人

図-4 スフィア基準による最低基準²⁾

この15リットルの内訳は、図-5 のように示されている。

また、「都市部の中間所得層では、健康と尊厳を保つためには最低でも1人あたり1日50リットルが適切な量であるかもしれない」とも書かれている。

ニーズ	量（リットル／人／日）	状況に応じて考慮される事項
生存に必要な水：水の摂取量（飲料および食べ物）	2.5-3	気候や生理的個人差による
衛生上の行動	2-6	社会的および文化的規範による
基本的な調理	3-6	食べ物の種類や社会的および文化的規範による
基本的な水の総量	7.5-15	

図-5 スフィア基準の1人1日15リットルの内訳²⁾

c)「大規模自然災害の被災地における感染制御マネジメントの手引き」（アドホック委員会：被災地における感染症対策に関する検討委員会報告、一般社団法人日本環境感染症学会）³⁾

本書では、被災による外的、内的な環境悪化のため感染症のリスクが大きくなることを示している（図-6）

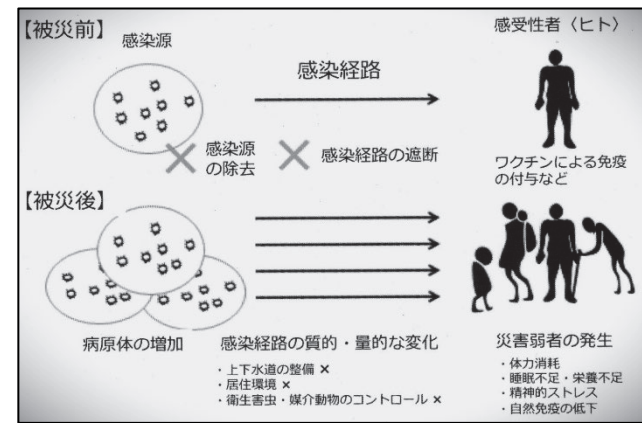


図-6 被災前と被災後の感染症拡大の様子（公衆衛生基盤の破壊による感染症の増大より³⁾）

我が国で起きた災害において、避難所で得られた教訓として、避難者の健康や命を守る水の必要性・重要性について以下が指摘されている。

- ・泥や汗で汚れた体を洗い流すことは、感染防止、精神衛生にとっても有効である³⁾
- ・入浴による効果は、精神衛生、感染予防、睡眠の確保、免疫力の向上などが認められている^{3)、4)}
- ・医療行為や調理等では手指洗浄が必須であるが、まず生活用水の流水で十分に流した後、浄水で仕上げ洗うことで浄水や消毒剤の使用量削減につながる³⁾
- ・衣類や下着の洗濯により、感染症発症の防止効果が期待できる³⁾
- ・避難所のQOL（Quality of life：生命・人生・生活の質）向上が災害関連死の削減につながる。（感染症、水のないストレス：トイレを我慢する、基礎疾患の悪化など）⁵⁾

d)「チーム医療の質的向上を目指したシミュレーション教育の効果—ノンテクニカルスキルの視点から—」（大野木恵子、東京医科大学雑誌）⁶⁾

著者 2)による上記の研究では、災害を想定したシミュレーション訓練は、反復練習をすることで訓練効果が上がるという結果を示している⁹⁾。

e)「リスクコミュニケーションを通じた断水災害軽減のための水需要マネジメント」(土木学会論文集)⁷⁾

この研究では、600 人へのアンケート形式で「断水時の受忍限度の平均日数の比較」調査が行われている(図-7)。これによると、調理、食器洗い、トイレ、洗濯、風呂・シャワー、洗面等それぞれの我慢できる限界日数は、夏場では1.1～3.8 日、他の時季では1.4～4.2 日であるとの結果となっている。

表-8 断水受忍限度の平均日数の比較			
	夏	春秋冬	p値※
飲料水	1.5	2.0	0.04
調理用水・食器洗い用水	2.3	2.8	0.02
トイレ用水			
大便のみ水洗	1.1	1.4	0.03
小便についても毎回水洗	1.8	2.0	0.02
洗濯用水	3.5	4.1	0.01
風呂用水			
シャワー	2.2	3.4	0.01
湯船にも浸かる	3.8	4.2	0.03
洗面等用水	2.1	2.3	0.02

図-7 断水時の受忍限度 (平均日数) ⁷⁾

2. 能登半島地震被災地での活動実績

著者らは令和 6 年(2024)1 月 2 日に、支援要請が無いまま現地へ向けて出発し、以下の支援を行った。
ここに、行き先の当てがなくても行動に移した理由は、令和 5 年奥能登地震や、ここ数年に新潟、青森、秋田、鳥取、静岡など全国各地で起きた豪雨災害の際に被災地に電話やメールで支援を申し出たが、プル型では要請に結びつかなかった経験から今回はプッシュ型で行くことを決めていたためである。

(1)1 月 2 日～3 日

2 日に機材を車に載せて千葉を出発、3 日に七尾市と志賀町に到着して、両役場を訪ね支援を申し出たが、その時点では不要との回答であった。そこで金沢市内に移動し、ホテルで待機した(図-8)。



図-8 給水に並ぶ住民
(1 月 3 日 中能登町にて)

(2)1 月 4 日～7 日

ホテルにて、電話および FAX 等で支援先を探した。

しかしながら、11 の自治体や社会福祉協議会等と接触したが、いずれからも要望を受けるには至らなかった。

(3)1 月 8 日～2 月 25 日 七尾市中島小学校避難所でトイレ洗浄水支援

ホテル滞在中、ホテル従業員の友人が避難生活でトイレ洗浄に困っているという情報を入手した。
翌日その避難先(七尾市立中島小学校)にプッシュ型で訪問し、市職員、校長、教育委員会、消防などと調整してプール水を使って支援することとなった。(図-9)
なお、中島小学校にはすでに海上自衛隊の入浴支援部隊が入っており、入浴環境は整っていた。

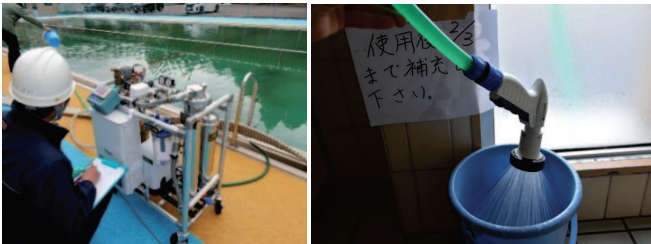


図-9 中島小学校の水源(プール)とトイレ洗浄水

(4)1 月 23 日～3 月 22 日 七尾市立小丸山小学校でシャワー、洗濯、清掃用水支援

中島小学校の近隣の七尾市立小丸山小学校では、シャワーがない状況であったことから協力要請があった。
そこで、中島小学校で使用していた「非常用生活用水浄化装置」を移設することにした。また、従来から協力体制にあった LP ガス機器メーカー、非常用シャワーユニットメーカーと機材を出し合い、1 月 23 日～3 月 22 日までの約 2 か月間、温水シャワーに加え、洗濯・乾燥+手洗い用水の総合支援を行った。
なお、移設元の中島小学校には代替として送水ポンプを設置した。

(5)2 月 10 日～4 月 9 日 輪島市阿岸(あぎし)公民館で洗濯用水支援

某社経由で NPO から洗濯用水の支援要請があり、2 月 10 日～4 月 9 日、輪島市阿岸(あぎし)公民館で、建物の裏を流れる沢の水を浄化して洗濯水に提供した。

(6)4 月 22 日～1 週間程度

輪島市もんぜん児童館で、水道が仮復旧した直後の土砂混入水をろ過し、仮設風呂に提供した(図-10)。



図-10 仮設水道に接続

3. 具体的な活動と成果

前記4か所の避難所では、

- ①トイレ流し水
- ②洗濯＋シャワー＋清掃用水
- ③沢の水を浄化し洗濯用水
- ④仮設水道管の土砂分離

という全て異なる利用方法を行い、それぞれ要望に応えることができた。

上記①～④の中で、とくに効果が良好だった2例を報告する。

(1) 小丸山小学校（前記②）

以前から災害支援の協力体制を敷いていた NPO 法人 LP ガス災害対応コンソーシアム、I・T・O株式会社、株式会社タニモトという純民間4者で、プール水から洗濯・ガス乾燥・温水シャワー・清掃用水を供給するシステムを現地で構築し、生活用水の多目的利用を実証した（図-11）。

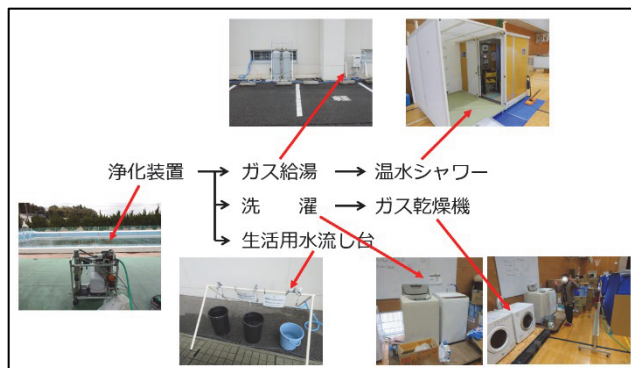


図-11 小丸山小学校での生活用水の多目的供給

小丸山小学校では1月23日～3月22日までの約2ヶ月間浄化装置を設置し、その間の維持管理は要領をレクチャーしたのち避難所スタッフに任せ、ほぼトラブルなく稼働できた。

運転データを取った1月29日～3月22日の間、避難所利用者数は延べ約3,800人、本装置が提供した生活用水量は95,800リットル、その間のフィルターの交換は7回であった。

なお、洗濯やシャワーに使った排水は、下水道が破壊されていたため、市と協議し雨水側溝を経由して河川に放流する了解を取った。その際、環境破壊を最小限に抑えるため植物性洗剤、赤ちゃん用洗剤、石鹸などを使用する配慮をした。

(2) 輪島市阿岸公民館（前記③）

全国の指定避難所のうち学校はおよそ4割で、残り6割は学校以外である。したがってプールを備えていない避難所が多数である。

輪島市の阿岸公民館もその例であった。

ここの避難所では洗濯をしたいという要望があり、2月

10日～4月9日の間、公民館建物の裏を流れる沢の水を浄化して洗濯用水を供給した。

プールの貯留水と違って沢の水は土砂と接しているため、土の有機分等を含んで茶緑色に着色していた。特に降雨後は汚れも多く、フィルターの詰まりが早かったり処理水に若干色が残ったりした。

そのため、避難所スタッフと協議して、雨上がりはろ過を行わない対応をとった。



図-12 裏の沢の水(原水)と処理装置

幸い雨で使えない日はさほど多くはなく、阿岸公民館で述べ280回の洗濯に利用された（図-12）。

ここで使用した浄水装置の処理能力には余裕があったので、余った浄化水を給水車に入れて近隣公民館の洗濯用に陸送するハブとしても利用された（図-13）。



図-13 浄化処理水を近隣へ送る様子

4. 得られた知見

(1) 生活用水の幅広い利用価値

前述の小丸山小学校の実施例では、1つの水源と1台の「非常用生活用水浄化装置」で温水シャワー1ユニット、洗濯機2台、掃除用水3カランなど多用途に利用ができた。また各用途が同時に利用されても供給能力が不足することはなかった（仕様最大給水量33リットル/分）。ここにおいて、今回のモデルの多用途性を確認することができた。

(2) 生活用水の必要量

七尾市立小丸山小学校の避難所では、提供した生活用水をいつでも自由に制限なしに使ってもらった。その結果、1月23日～3月22日の間に延べ3,800人に約95,800リットルの水の利用があった。

その間の使用量を図示したものが、図-14である。

この図において、前半では著者1)の装置によるシャワーと並行して水循環式シャワーを利用していたため1人1日あたりの使用水量は15～25リットルと少なか

ったが、後半では水循環式シャワーの使用を中止したことで、最大で1人1日あたり約33リットルの使用を確認した。

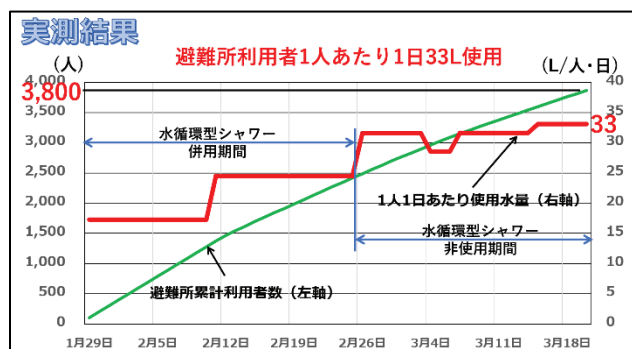


図-14 避難所利用者1人1日あたりの生活用水使用量

なお当該避難所では下水道が使用禁止であったため、この図の数値には全期間を通して、トイレ流し水は含んでいない。

図-14に示した結果から、先行調査で紹介したスフィア基準の「最低基準1人の1日15リットル」では、大幅に必要な水量が不足することが確認できる。

さらにトイレ等の用途や、夏場は水使用量が増えることを考慮すると、スフィア基準に示唆された「都市部の中間所得層では、健康と尊厳を保つためには最低でも1人あたり1日50リットル」の指針が妥当と言える。

(3) 医療の面からの評価

著者2)は、支援した避難所において利用者に聞き取り調査を行い、以下の声を確認した。

a) 高評価の点

- ・「地震が起きて、着の身着のまま避難所に避難してきた。雪の重みで、家がいつ潰れるかわからないと心配しながらの生活だったが、避難所でのシャワーはとても有難かった。」
- ・「シャワーが暖かく、さらに、勢いがあるお湯が出たのが良かった。」
- ・「遠方の金沢市まで入浴や洗濯に行く必要がなくなった。」
- ・「洗濯物がガス乾燥で洗濯後すぐに乾いて、避難所で干さなくて良いのが有難い。(避難所で下着など干すことには抵抗がある)」
- ・「小丸山小学校では、洗濯もシャワーもあって一か所で完結しているから良かった。」
- ・「地震で家の中が埃っぽくて、タンスの中の衣類を洗わなければいけない。阿岸の公民館に洗濯機を設置してもらって助かった。」

b) 改良が必要な点

- ・「シャワーの湯が着替えのスペースに飛ぶので、衛生面で気になる。」
- ・「シャワーの排水溝のところに髪の毛がたまるので、

入浴時に各自が取り除く必要があった。」

- ・「(男性の方)洗濯で自分の順番が来ると、前の人の洗濯物を取り出すことになっているが、知り合いの女性の人の物だと、お互いにすごく抵抗があり、すごく気を遣う。」

温かいシャワーが使用できたこと、洗濯が制限なく利用できたこと、は被災者の方々のストレス軽減に役に立ったと考えられる。

6. 支援業務終了にともなう成果からの提言

(1) 自衛隊の「入浴支援」と共同支援の可能性

今回、民間主導で生活用水を軸にシャワー、洗濯、掃除に提供することができた。

なお、自衛隊による「入浴支援」は最善の方法であるが、保有数は多くない。また自衛隊派遣の3要件「公共性」、「緊急性」、「非代替性」のうち「非代替性」については、今回のモデルで代替できる可能性を感じた。

さらにオールイン型の「災害支援パッケージ」も具体化した(図-15)。このパッケージモデルを活用することにより、自衛隊等と分担しながら、被災時に限られた人員で避難所の質の向上を図ることが可能であるとする。

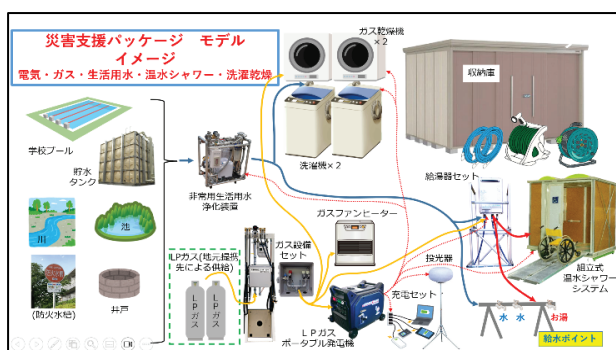


図-15 災害支援パッケージのイメージ

(2) 生活用水の必要量

調査は避難所1ヶ所のデータであるが、水の使用制限がない場合は避難所利用者1人当たり1日33リットルの生活用水が利用された(トイレ用水含まず)。

トイレ用水や、夏場の使用量が増加することを考慮すると、スフィア基準の1人あたり1日50リットルを備えるのが妥当である。

7. 生活水の大切さ

我が国では、小学校高学年の教科書にも衛生の大切さが書かれている。その内容は、「食中毒、病気の感染を防ぐために衛生に気を付けること、正しい洗濯の仕方、流水を使った手指衛生の方法」などである。⁸⁾

ただし、大規模な断水が発生すると、衛生的な水が確保できなくなり、教科書に記載されているような行動も困難になる。

いずれにしても、何らかの方法で十分な生活用水を確保することが避難所での生活が平常時における日常生活とのギャップを埋めることとなり、被災者のストレス軽減や災害関連死の低減に寄与することは自明である。

8. 今後の課題

ここ数十年、長期の避難生活を強いられるような災害は冬場に多く夏場には起きていないようである。

しかし、夏場に発生した場合は冬場に比べて食中毒を含む感染症、熱中症、皮膚疾患、害虫による虫刺され、睡眠不足などのリスクが極めて高くなる。このため、十分な生活用水を取得することが極めて重要であり、適切な量の生活用水を供給することは衛生の確保、ミスト等による体感温度の低下など、改善につながる可能性がある。

すなわち、夏場対策が今後の研究課題である。

9. 結 論

(1) 今回被災地に持ち込んだ「非常用生活用水浄化装置」を使い、原水としてはプール水や沢の水、使用用途としては洗濯、シャワー、清掃・洗浄など、様々な用途に対応できるという良好な結果を得た。

(2) 民間の4者で構築した支援モデルで、延べ約3,800人の避難所利用者に計約95,600リットルの生活用水の供給が可能であった。

また現場での維持管理は避難所スタッフに任せましたが、装置の操作が簡便だったことで問題なく扱うことができた。

(3) 利用者からは、生活用水の供給に対して多くの高評価を得たので、ストレス低減に貢献できた。

(4) ストレスが少ない生活用水の使用量は、1人あたり1日50リットルが必要と考える。

10. おわりに

著者2)によれば、能登半島地震では今までの災害に比べて長期化する傾向にあり、避難所生活が災害関連死を増やしている。すなわち、熊本地震では避難所は7か月ほどで閉じたのに、能登半島地震では1年経っても、まだ避難所が運営されている地域が存在する。

また、能登半島地震の影響で亡くなった「災害関連死」について、石川県内の201人を対象にNHKが分析した結果、体調が悪化した場所は、最初に身を寄せた避難所が最も多かったと指摘している(図-16)。

さらに、「災害関連死」を防ぐために行われた1.5次避難や2次避難でも体調を崩す人が相次ぎ、繰り返し指摘されている避難所の環境の改善に加え、移動中や新たな避難先できめ細かくケアする体制づくりが課題となっている、という報道があった。⁹⁾

結論として、「通常の暮らしと避難生活のギャップがストレスに比例する」と考えられることから、今回行った生活用水の提供により少なくとも不自由・不便・不快を感じない避難生活を送れるように支援を行うことが重要であ

ると言える。

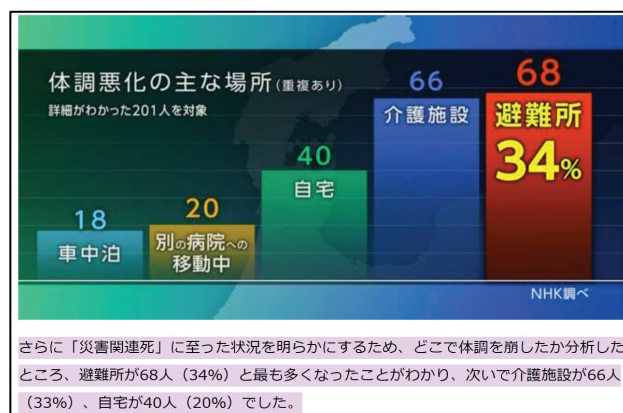


図-16 災害関連死者が最初に体調不良を起こした場所⁹⁾

11. 謝 辞

本報告を行うにあたっては、自らも被災者でありながら七尾市および輪島市の各避難所で運営に当たられていたボランティアと避難者の方々、七尾市職員各位、多くのアドバイスをいただいた防衛大学校名誉教授 大野友則先生、仮設用資機材を提供いただいたNPO法人LPガス災害対応コンソーシアム、I・T・O株式会社、株式会社タニモト、クリタック株式会社、など多くの各関係者のご支援・ご協力を得た。ここに、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府(防災担当): 避難所における良好な生活環境の確保に向けた取組指針(令和6年12月改定), https://www.bousai.go.jp/taisaku/hinanjo/pdf/2412kankyoku_kuho.pdf (2025.01.10 閲覧)
- 2) 国際赤十字・赤新月運動他: スフィアハンドブック 人道憲章と人道支援における最低基準, 107, 2018
- 3) アドホック委員会: 被災地における感染症対策に関する検討委員会報告, 大規模自然災害の被災地における感染制御マネジメントの手引き, 一般社団法人日本環境感染症学会, S1-77, 2014
- 4) 石澤太市: 入浴法および入浴習慣が心身に及ぼす影響に関する研究, 金沢大学大学院博論, pp.1-67, 2014
- 5) 内閣府: 災害関連死事例集, 本編, https://www.bousai.go.jp/taisaku/hisaisyagousei/pdf/jirei_i_01.pdf (2025. 1. 15 閲覧)
- 6) 大野木恵子: チーム医療の質的向上を目指したシミュレーション教育の効果—ノンテクニカルスキルの視点から—, 東京医科大学雑誌, 77, Vol.1, 77p, 2019
- 7) 吉澤源太郎他: リスクコミュニケーションを通じた断水災害軽減のための水需要マネジメント(土木学会論文集, D3, Vol.74, No.1, 35-49, 2018)
- 8) 新編: 新しい家庭 5・6 私がつくる みんなでつくる 明日をつくる 東京書籍 令和5年3月10日検定済 8-9, 94-99p(小学校家庭科用 文科省検定教科書2 東書, 家庭 503)
- 9) 能登災害関連死: 最初に身を寄せた避難所で体調悪化が最多 <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20241226/k10014679141000.html> (2025. 1. 15 閲覧)

液状化対策及び地下構造物の保護に関する D・Box の活用検討

EVALUATION OF D-BOX APPLICATION FOR LIQUEFACTION COUNTERMEASURES
AND PROTECTION OF UNDERGROUND STRUCTURES

野本太*, 嶋田宏**岩佐隆***
NOMOTO Futoshi ,SHIMADA Hiroshi and IWASA Takashi

* メトリー技術研究所株式会社 代表取締役〒347-0031 埼玉県加須市南町3 番 40 号
** 博（工）技術士 同社 技術部長,***同社 土木部長

キーワード：液状化被害低減,振動低減, 軟弱地盤支持力増加, 爆破衝撃緩和
(Liquefaction Damage Reduction , Vibration Reduction, Increase in Bearing Capacity of Soft Ground , Mitigation of Blast Impact)

1. はじめに

我が国の防衛施設においては、施設そのものの検討に加え、構造物が設置される地盤の特性を考慮し、適切な改良および補強技術を導入する必要がある。これは地盤の安定性を向上させることにより、多様なメリットや相乗効果を得ることが出来るためである。本研究では、浅層部の改良を通じて地盤の補強、液状化対策、振動低減などを実現する技術「D・Box」（ディーボックス）の概要について説明する。

また、D・Box の防衛施設における具体的な適用例として、道路（滑走路）、建物基礎、地中埋設物などへの利用の可能性を示し、D・Box による液状化対策及び衝撃等による地下構造部の保護に関する活用の一考察を行うものである。

2. D・Box 工法の概要

D・Box 工法は、内部拘束機能を備えたポリプロピレン（以下 PP）製の D・Box を使い、これに碎石などを充填し対象地盤に設置、転圧する事により、構造物が設置される地盤直下を締固めて補強する工法である（D・Box の形状および施工性を表-1 に示す）。



写真-1 D・Box-LS（左）と施工状況（右）

D・Box とは区画分割された箱状の単位を意味し、土の区画拘束効果を最大限に生かすよう工夫した箱状の袋である（Divided Box）。袋の内部にはトラスバンド（D・BoxLS タイプ、写真-1）という袋内部の土粒子を一次拘束するための拘束具を持ち、これにより地盤強度に関係なく、形状を維持して強度を発現する事が出来る。通常、土のうなどの袋に碎石などの粒状体を詰めて吊上げると、写真-2のように底部が変形を起こす。これは沼地などの軟弱地盤上に土のうを設置した際にも起こる現象である。一方内部拘束を持つD・Boxモデルでは、写真-3のように、吊上げても変形は最小である事が分かる。これによりD・Boxは、沼地などの超軟弱地盤においても、設置後の即時転圧が可能となる。また振動低減や液状化被害低減などの複合効果を持ち、投入する中詰材も碎石や砂など自然素材のため、環境特性にも優れた工法である。

束するための拘束具を持ち、これにより地盤強度に関係なく、形状を維持して強度を発現する事が出来る。通常、土のうなどの袋に碎石などの粒状体を詰めて吊上げると、写真-2のように底部が変形を起こす。これは沼地などの軟弱地盤上に土のうを設置した際にも起こる現象である。一方内部拘束を持つD・Boxモデルでは、写真-3のように、吊上げても変形は最小である事が分かる。これによりD・Boxは、沼地などの超軟弱地盤においても、設置後の即時転圧が可能となる。また振動低減や液状化被害低減などの複合効果を持ち、投入する中詰材も碎石や砂など自然素材のため、環境特性にも優れた工法である。

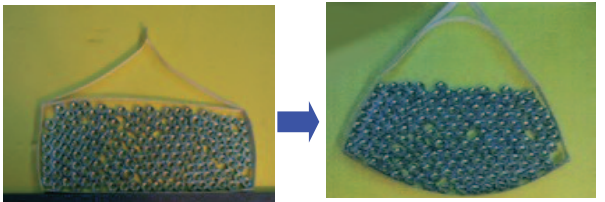


写真-2 粒状体を入れた袋を吊上げた状況

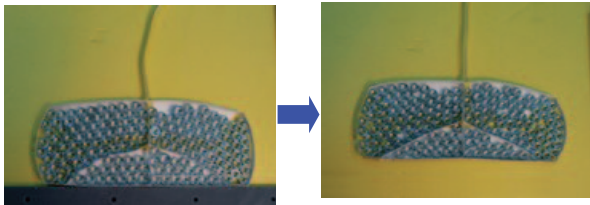


写真-3 内部拘束のある袋を吊上げた状況

表-1 D・Box の形状と施工性

製品種	寸法（mm）			容積 （m ³ ）	碎石投入時 の重量 （Kg）	製作工 袋／日	敷設工 袋／日
	縦	横	高				
D・Box LS100	1,000	1,000	250	0.25	≒450	80～100	80～120 80～120 m相当
D・Box LS150	1,500	1,500	450	1.01	≒1850	40～60	40～80 90～180 m相当

3. D・Box の活用例

3.1 超軟弱地盤での地盤補強例

D・Box の吊上時の底面には円錐形状の窪みが形成される(写真-4)。超軟弱地盤上にD・Boxを敷設すると、この円錐形状部に土粒子は入り込み拘束され、せん断破壊しにくい状態となり支持力が増大する。さらに、バックホウやランマ等でのD・Box表面への加圧・転圧によりD・Box直下地盤の上昇した水圧(過剰間隙水圧)はD・Box内部に吸収され、圧密が促進されることにより粘着力が増し地盤支持力が増加する。



写真-4 D・Box 底部の円錐形状と下面の地盤状況

こうした特性により、通常地盤はもとより、冠水状態の超軟弱地盤であっても、D・Boxを表層に敷設し加圧・転圧する事により、地盤補強が可能となる。

S 県にあるダム の老朽化した水門を改修する工事例では、数十年の利用でダム の湖底に腐葉土が 3m以上堆積した、人も歩けない程の軟弱地盤である(写真-5)。工事は対岸より約 200mの仮設道が必要であった。そのため、D・Boxを図-1のように設置した後、水門前に120tのラクタークレーンの作業ヤードを構築した(写真-6)。

施工の主な手順は、①軟弱な地盤面にD・Boxを直接設置した後、重機(0.8のバックホウ)のバケットでD・Boxを地盤に圧入。②長さ6mの敷鉄板に合わせ、鉄板の両端部と中央部に計3袋のD・Boxを配置。③D・Boxの設置後、上部に透水性のある土木用シートを敷設。④上面部に敷鉄板を敷設。敷設後重機が乗入れて①～④の作業を反復しながら施工を進めた(写真-7)。

D・Box敷設直後は、D・Boxの下面形状により間隙水圧を一時的な反力としているため、D・Box上面部に敷き鉄板などを設置し、上部の荷重がD・Box全体に面的にかかるよう処置する必要がある。数日間そのまま使用し、間隙水圧が消散すれば、地盤本来の有効応力が発現するため、こうした問題は解消する。



写真-5 ダム湖底部の仮設道路計画

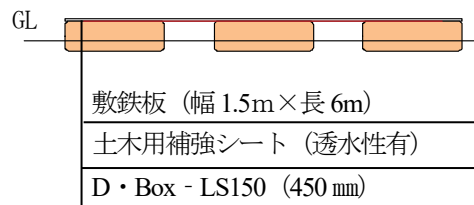


図-1 D・Boxの基本敷設断面図

こうしたD・Boxの補強効果は、水害時に冠水した地盤を補強し、重機などの通行が必要な緊急道路や、湿地帯などにも利用可能である。また敷鉄板他の資機材があれば、D・Box内部には発生土等を使用することも可能(荷重が40kN/m²程度)で、大型トラックなどの通行も可能となる。

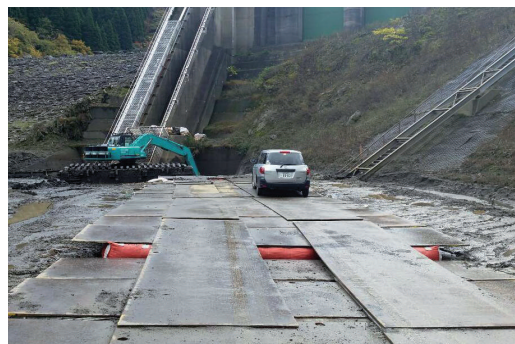


写真-6 ①～④の作業状況



写真-7 仮設道路と作業ヤードの状況

3.2 茨城県K市道路での液状化対策事例

2011年3月の東北大震災時のK市の道路は液状化による被害(写真-8)を受け、近接する鹿島港からの物資輸送障害を経験したことから、主要幹線道路の液状化対策として路床面にD・Boxを敷設した。D・Boxを用いた液状化被害低減工法のK市の実績は延長約2kmである。



写真-8 液状化による道路被害とD・Boxによる対策工

液状化対策道路の舗装構成は、図-2に示すとおりであり路床部に厚さ25cmのLS100を道路断面当たり9袋、幅9mで敷設した。図-3に舗装断面構成を示す。

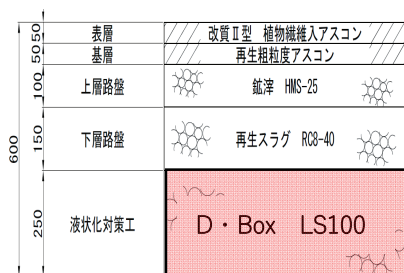


図-2 D・Boxによる液状化対策舗装断面

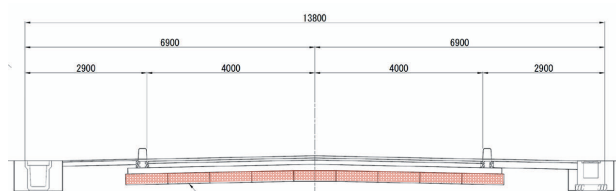


図-3 舗装断面構成 (道路幅9m)

3.3 液状化時の地下構造物の保護でのD・Box活用例

埋立地の道路を横断する地中埋設管等では液状化が発生した場合に、浮上りによる段差により交通障害やライフライン被害に繋がる。D・Boxを用いた対策を行った瀬戸内工業地帯のA社工場内の車道を横断するケーブルピットの液状化対策例を示す。D・Box LS100を両端に2段で敷設後、加圧・転圧しD・Box下面の地盤を締め固めることにより地盤強度(FL値)が増加し、且つドレーン効果により液状化時のケーブルピットの浮き上がりを15cm抑制することを可能とした(図-4~7、写真-9)。

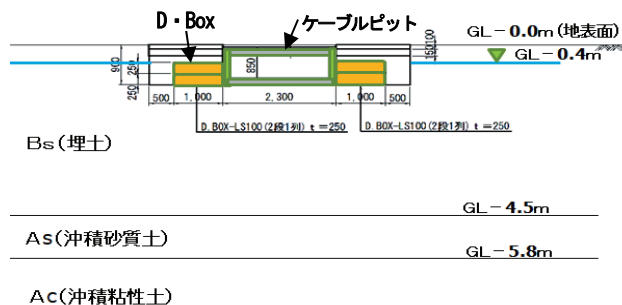


図-4 道路横断部のケーブルピット液状化対策例

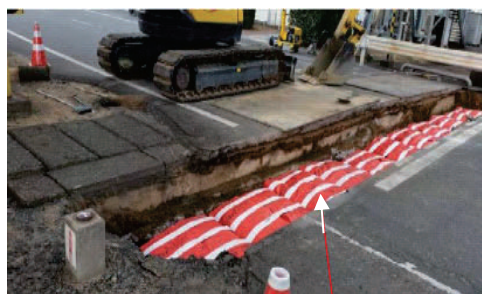


写真-9 D・Boxを用いたケーブルピット液状化対策例

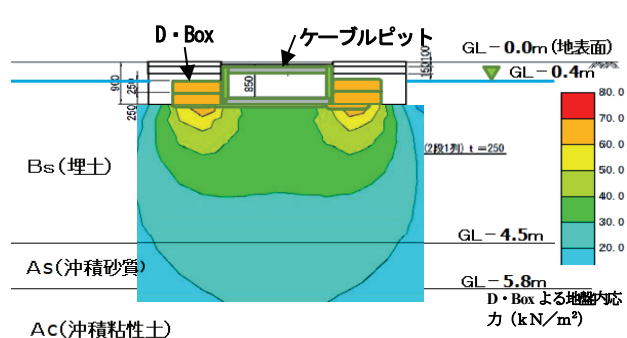


図-5 D・Boxによる地盤内応力分布図

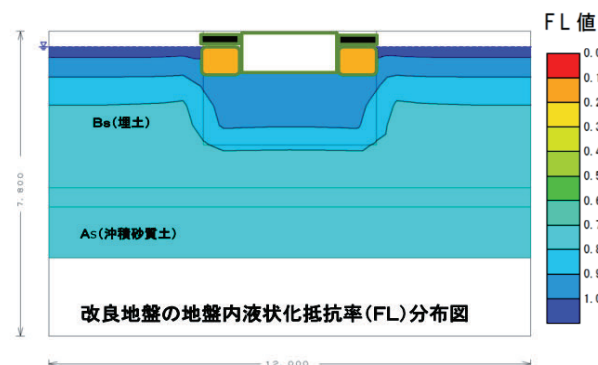


図-6 D・Box設置後のFL値

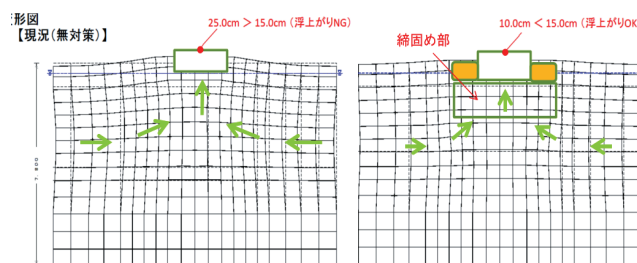


図-7 D・Box敷設後のケーブルピット変形解析結果

D・Box工法による地盤の締め固め効果や、ドレーン効果により、道路などの液状化被害低減効果を得ることが出来る他、図-8に示すように既設の地下埋設物である排水施設の周辺に敷設し、加圧・転圧することにより液状化被害を低減することも可能である。また本事例の示す通り、構造物の外周部に設置しての効果も得られるため、既存施設への導入も容易である。

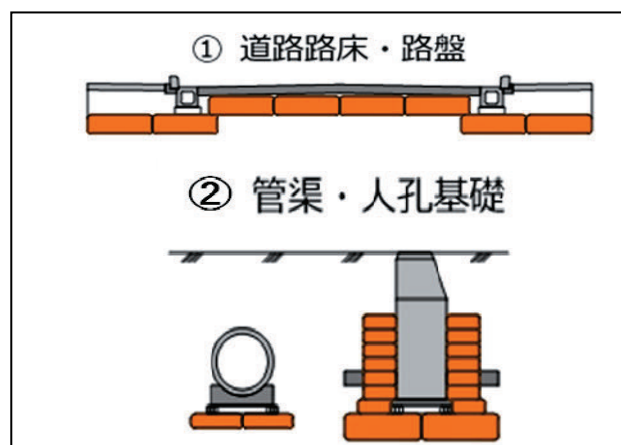


図-8 D・Boxを用いた液状化被害低減対策イメージ

4. 地中構造物の保護に関する実験

D・Box の特性を利用した使用法として、爆発物等の被害から、基礎部や土中構造物の保護、滑走路等の平滑部の被害範囲の減少効果に関する、簡易模型実験を実施した。

これは D・Box の構造特性として、①上載荷重に対しては大きな耐圧強度を発揮 (4500 kN/m^2 以上) するが、側方からの力に対しては、容易に変形する事。②袋単位で土粒子を区画 (あるいは地盤を区画) しているため、影響範囲を限定出来る可能性がある。の2点に基づいた試験である。

4-1 土中構造物の爆発物からの保護に関する模型実験

土中で爆発が起こった際の、D・Box の有無による違いを簡易模型実験により検証した。設置状況は以下の通りで、地盤表面に爆発物を直接設置したものが図-9 のケース 1 (K1)、爆発物と構造物との間に D・Box を敷設したものが図-10 のケース 2 (K2) である (数値単位:mm)。

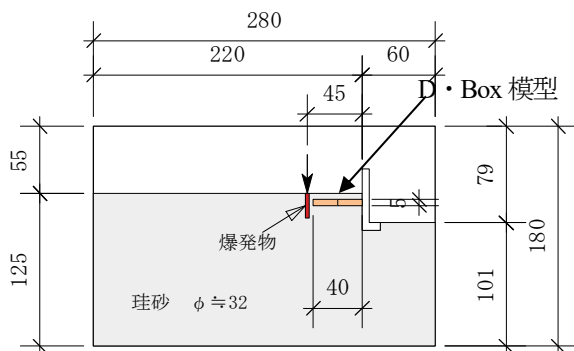
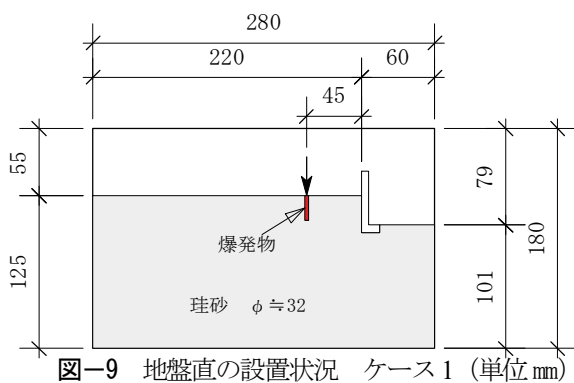


図-10 D・Box 模型の設置状況 ケース 2 (単位 mm)

模型実験はそれぞれ爆発物に着火し、爆発後の状況比較を行った。

写真-11 はケース 1 の爆発時の状況である。爆発直後に大きな土圧 (側圧) が構造物にかかり、瞬時に変形していた事が分かる。

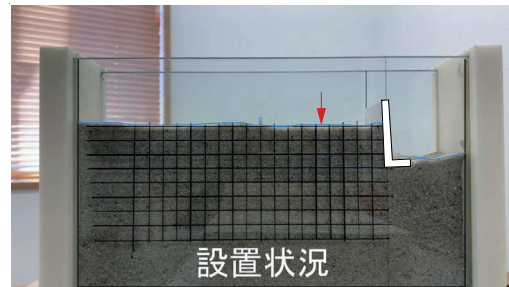


写真-10 K1 の設置状況

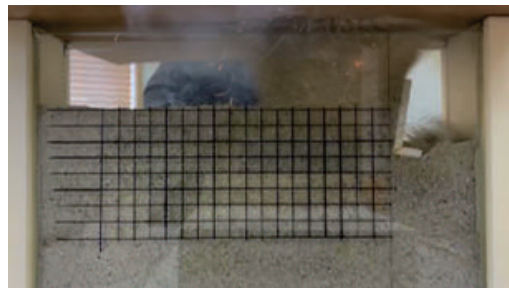


写真-11 K1 の爆破時の状況

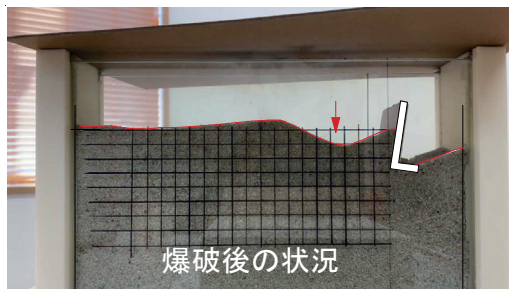


写真-12 K1 の試験後の状況

次に構造物の背面に D・Box 模型を配置した試験を写真-13~15 に示す。

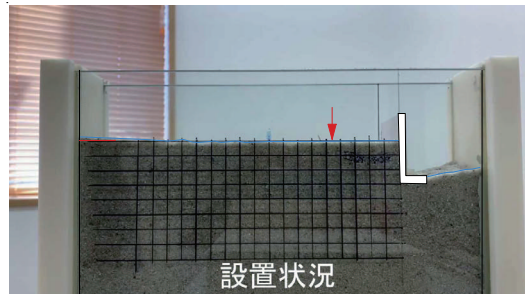


写真-13 K2 の設置状況

爆発の直後、爆発側の D・Box が側方に変形しているが、構造物の変形が殆ど無い事が分かる (写真-15)。



写真-14 K2 の爆発時の状況

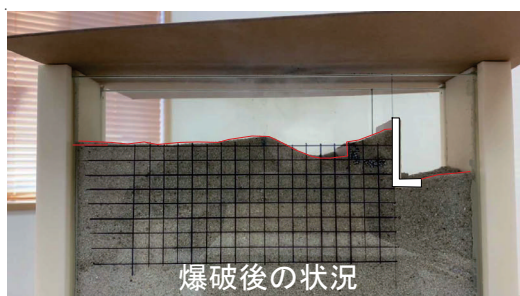


写真-15 K2の試験後の状況

それぞれのケースの、設置時（青色）から爆発後（赤色）の地表面の変化を図-11に示す。

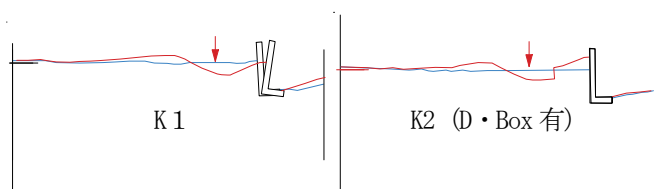


図-11 K1とK2の試験後の状態比較

K1では、爆心位置より半円状に地盤がえぐられ、その影響が構造物に到達しているのが分かる（写真-12）。一方K2では、構造物側の半円がD・Boxにより防がれ、途中で切れているのが分かる（写真-15）。

今回のK1の実験結果では、爆破位置より周辺の土粒子は、半円状に飛び散り、えぐられた地面の角度は、土粒子の内部摩擦角（ $\phi = 32^\circ$ ）とほぼ一致していた。この事より、土中ではこの範囲内にある構造物は、大きなダメージを受ける事が予想されるが、D・Boxを対象構造物の周辺に設置する事により、被害範囲を縮小できる可能性を得た。因みに今回構造物の背面部に、D・Boxモデルと同形状の剛体を接置した場合の試験では、爆破の衝撃をそのまま構造物に伝えてしまい、構造物に大きな変形が生じた。これはD・Boxが、側方からの衝撃圧力に対して、衝撃力を吸収し緩和することが出来たためと考えられる。

4-2 平滑部における被害範囲に関する実験

以下に平滑面におけるD・Boxの有無による比較実験結果を示す。

実験模型はそれぞれ、図-12と図-13の通りで、爆発前と爆発後の地盤、及び模型構造物の状態を比較した。

平滑面に直接爆発物をセットしたケース3（K3）では、K1同様、爆破により地盤は半円状に広がり、爆発直後には構造物の一部が吹き飛ばされる様子が確認できる。

K3における設置状況を示した写真-16と、爆発後の地盤、及び構造物の状況を写真-18に示す。

地盤の変形及び爆風により、上部の構造物は全て転倒、若しくは大きく傾いた。

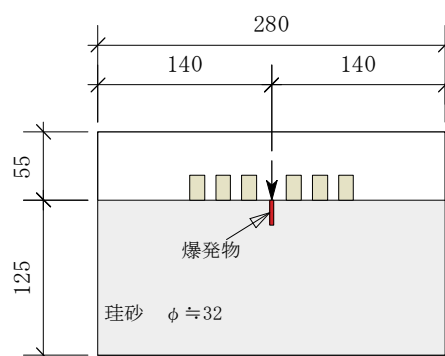


図-12 平面地盤に爆発物を直接セットした状況 K3

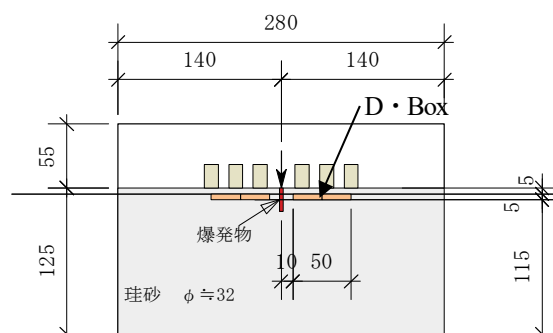


図-13 爆発物の両側にD・Boxを設置した状況 K4

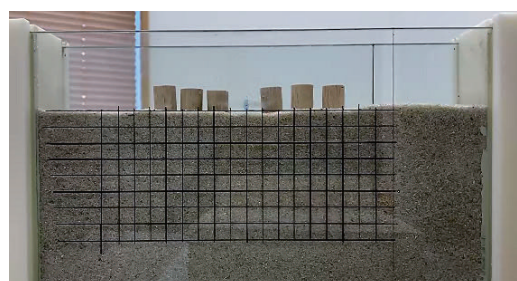


写真-16 K3の設置状況



写真-17 K3の爆発時の状況



写真-18 K3爆発後の状況

次に K3 と同条件の地盤に、D・Box 模型を配置した実験結果を示す。

K4 における設置状況を示した写真-19 と、爆発時の地盤、及び構造物の状況を写真-20 に示す。

爆破直後、爆心部に近い構造物が側方へ押し出されているが、外側の D・Box 模型、及び構造物には、大きな変化が見られない結果となった（写真-21）。

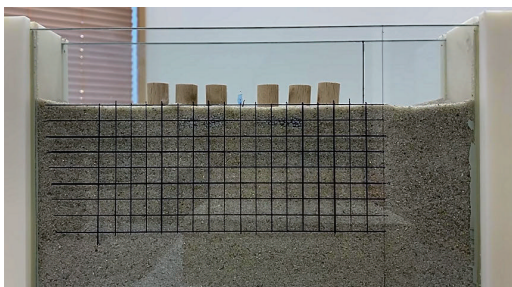


写真-19 K4 の設置状況

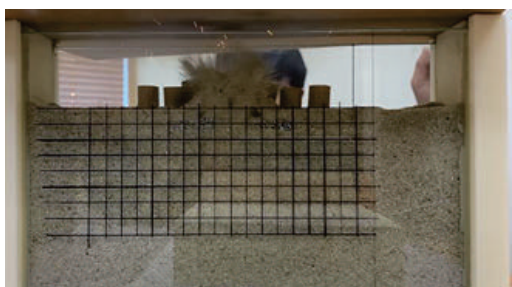


写真-20 K4 の爆発時の状況



写真-21 K4 爆発後の状況

K4 の試験では K3 に比べて、地盤及び構造物の変形や転倒が少ない結果となった。爆心部に隣接した D・Box 及び構造物の変形等はあったものの、K2 と同様、D・Box が変形する事により爆破の衝撃を吸収し、被害範囲を抑制したと考えられる。

以上の実験結果より、D・Box を地下構造物の保護や、滑走路等に敷設した場合の被害範囲の抑制効果は期待できるものである。更にその利用についても汎用性が高いのが D・Box の特徴である。基本的には防護が必要な構造物の周辺に設置することにより、新設構造物だけでなく、既存の施設にも容易に導入可能である。また元々軟弱地盤の補強に優れた製品のため、敷設した箇所の D・Box 上部は、道路や付帯構造物の基礎としても利用が可能となり、効率的で強靱性を持つ施設の建設や補強にも寄与する事が出来ると考える。

5. まとめ

D・Box の地盤補強効果や、液状化抑制効果については、これまでの実績の中でその効果は確認されている。

また簡易ではあるが、今回行った構造物保護に関する試験においても、D・Box 模型の有無による違いが、予想以上に明確な差として現れた事は、大きな収穫であった。

D・Box は地盤に求められる基本的な性能を、浅層部の改良により実現できる工法であり、D・Box の構造を応用し、利用する事により、構造物の保護と言った利用も可能となる。通常地盤強度には大きなバラツキがあり、そのバラツキに対して設置される構造物の面積が大きい場合は、不等沈下などの要因となる。これに対して D・Box は、区画された単位で敷設し、これを転圧し締固めるため、構造物直下の地盤強度を一様化する事が出来る。D・Box を敷設した構造物が不等沈下しないのは、D・Box により地盤強度が平均化されるためであり、D・Box 直下の地盤を締固める事が可能で（一財：沿岸技術センターの評価認証有）、地盤補強、沈下対策、液状化対策と言った幅広い補強に利用できる。

こうした複合的な D・Box の効果を活用し、今後、防衛施設や関連する道路や滑走路、及び埋設物への強靱化対策として、各施設への利用研究を進めていきたい。

謝辞

今回研究発表の場を与えて頂き感謝致します。また爆破を含む簡易模型実験については、専門家の方から見れば、不完全な試験と映るかもしれませんが、試験の性格上材料の確保が難しく、実際は市販の爆竹を使い、何度もやり直した結果の一部を発表しました。こうした分野の研究については、いかに安定した試験環境を作るかが鍵となりますが、この論文を機にご指導、ご鞭撻を頂ければと考えています。ご拝読ありがとうございました。

参考文献

- 1) D・Box による軟弱地場の締固め効果に関する検証試験（第 38 回ジオシンセティックス論文集 2023.11）
- 2) D・Box を用いた地盤補強効果の確認試験（第 13 回地盤工学会巻頭支部発表会 2016.10）
- 3) D・Box 工法を用いた地盤強度増加の確認事例（第 14 回地盤工学会関東支部発表会 2017.11）
- 4) D・Box 工法によるため池における圧密強化作用の現場試験（第 59 回地盤工学会研究発表会 2024.7）
- 5) 港湾関連民間技術の確認審査・報告書（第 24002 号）一財）沿岸技術研究センター 令和 6 年 9 月

「衝擊・振動問題」

飛翔体衝突によって励起される RC 構造物の衝撃振動が 内部機器へ及ぼす影響に関する研究

STUDY ON THE INFLUENCE OF IMPACT VIBRATION ON INTERNAL EQUIPMENT CAUSED BY PROJECTILE COLLISIONS WITH RC
STRUCTURES

上村勇太*, 笠置昌寿**, 武者浩透*, 宇賀田健***, 森広毅****, 別府万寿博*****

UEMURA Yuta, KASAGI Masatoshi, MUSYA Hiroyuki, UGATA Takeshi, MORI Koki and BEPPU Masuhiroitaro

- * 修（工）大成建設（株）技術センター社会基盤技術研究部（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1）
** 修（工）大成建設（株）本社原子力本部 先端解析技術部（〒163-0604 東京都新宿区西新宿 1 丁目 25-1）
*** 博（工）大成建設（株）本社原子力本部（〒163-0604 東京都新宿区西新宿 1 丁目 25-1）
**** 修（工）防衛大学校 理工学研究科後期課程（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
***** 博（工）防衛大学校 建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

キーワード：衝突実験，飛翔体，RC 構造物，内部機器，高周波数振動，数値シミュレーション

(Collision Experiment, Projectile, RC Structure, Internal Equipment, High-frequency vibration, Numerical Simulation)

1. はじめに

重要インフラ構造物においては、火山噴火や竜巻等の自然的事象、あるいはテロ行為などの人為的事象による衝撃的な荷重を考慮した設計が必要とされている。これまで、衝撃荷重に対する RC 構造物の「表面破壊」、「裏面剥離」および「貫通」などの局部破壊に関する研究や、これらを防ぐための躯体厚や材料、裏面防護方法などに関する研究は多くなされている¹⁾。一方で、重要インフラ構造物には、その機能を維持するための機器設備が設置されており、衝突により構造物に励起される高振動数の振動が、内部の機器設備に影響を及ぼすことも懸念される。しかし、RC 構造物の高振動数領域における応答特性に着目した研究は少ない現状である。従って本研究では、衝突に対する RC 構造物の振動応答をより適切に評価することを目的として、飛翔体の衝突試験を実施し、RC 構造物の高い振動数領域の振動応答を計測、分析し、さらに数値解析によるシミュレーションを行う。

2. 飛翔体衝突実験の概要

2.1 飛翔体衝突実験装置の概要

飛翔体衝突実験は、図-1 に示す飛翔体発射装置を使用して行った。コンプレッサーにより圧縮された空気をエアチャンバーに通し、空気圧により飛翔体を射出する。試験体は鋼製架台の上に移動を拘束しない条件で設置し、架台の高さを調整することで衝突面外壁の中央に飛翔体が衝突するようにした。試験体背後の反力壁表面には緩衝ゴムを設置した。

2.2 試験体

試験体は RC 構造物の壁と床を模擬するため、RC ボックス試験体とし、その寸法は幅 1,150mm×高さ 1,150mm×奥行き 900mm、壁厚は衝突を受ける外壁を $t=120\text{mm}$ 、衝突面背面の外壁と上下のスラブは $t=80\text{mm}$ とした

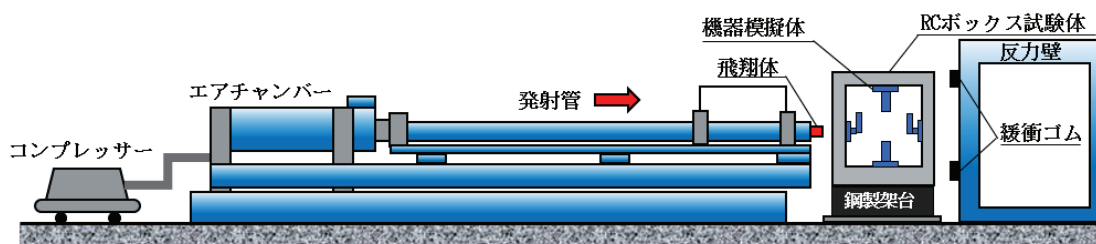


図-1 飛翔体衝突実験装置の全体図

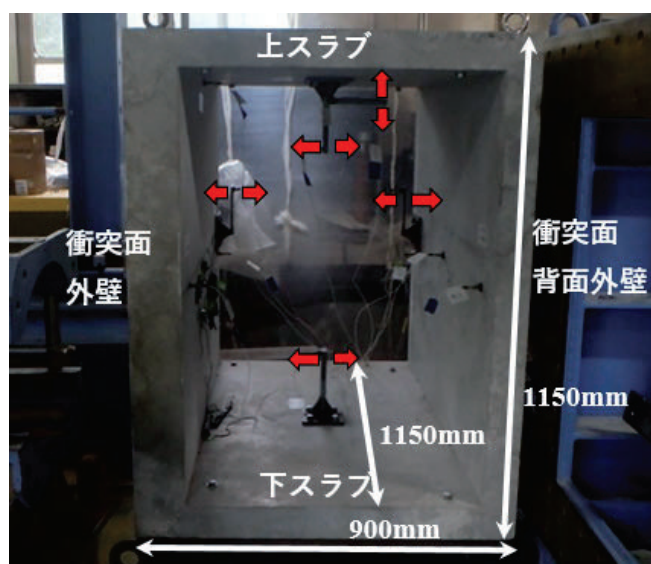


図-2 RC ボックス試験体



図-3 機器模擬体

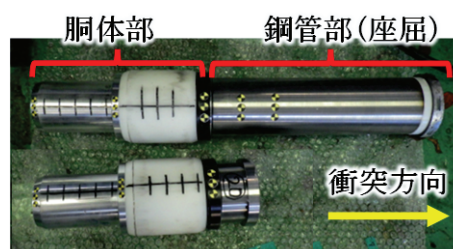


図-4 柔飛翔体（上）と剛飛翔体（下）

表-1 実験ケース

ケース名	厚さ[mm]				衝突速度 [m/s]	飛翔体		衝突回数 [回]	損傷度 予測
	衝突面 外壁	上スラブ	下スラブ	衝突面 背面外壁		剛性	質量[kg]		
A1	120	80	80	80	40	柔	5.7	3	微小
A2	120	80	80	80	80	柔		3	小
A3	120	80	80	80	100	柔		2	中
A4	120	80	80	80	40	剛		1	裏面剥離
B	160	80	80	80	80	柔		1	微小
C	120	100	130	100	80	柔		1	小

(図-2)。RC ボックス試験体は実大スケールの構造物に対する相似則²⁾を考慮し、約 1/10 程度の縮小試験体として設計した。

RC ボックス試験体の内部には、固有振動数を設定した振動体（機器模擬体）を設置した（図-3）。鋼板を壁やスラブと並行方向にした機器模擬体（ $t=9\text{mm}$ ）は、壁やスラブと同じ方向に振動する。鋼板が垂直方向の機器模擬体（ $t=16\text{mm}$ ）はスラブに設置し、衝突方向と同じ方向に振動する。機器模擬体はベースプレートを介して、試験体にボルト接合した。

2.3 飛翔体

飛翔体が衝突速度 40~100m/s で試験体に衝突したときに、試験体に局部破壊が生じないようにするために、衝突時に先端の鋼管部の座屈が進行する柔飛翔体を基本とした。柔飛翔体の鋼管部の肉厚は 1.75mm、長さは 300mm である。飛翔体の剛性による影響を確認するために、比較用ケースとして剛飛翔体の衝突試験も実施した（図-4）。

2.4 計測項目

試験体に衝撃用の加速度計を設置し、衝突によって試験体に生じる振動を計測した。加速度計は、ボックス試

験体の衝突面外壁と衝突面背面外壁については中央と端部、上下のスラブについては中央に、合計 8 箇所取り付けした。また、試験体に設置した 5 個の機器模擬体の先端にも、加速度計を取り付けた。

衝突面外壁の中央には、ひび割れの発生を確認するためのひずみゲージを設置した。試験体の滑り変位を確認するため、レーザー変位計により変位を計測した。加えて、飛翔体の変位時刻歴から衝撃荷重を推定するため、高速度カメラによる撮影を行った。

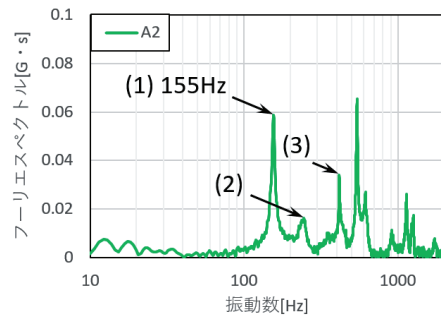
2.5 実験ケース

衝突振動に影響する要素として、飛翔体の衝突速度（A1~A3）、試験体の板厚（A2, B, C）、飛翔体の剛性（A1, A4）、衝突回数（A1~A3）の 4 つをパラメータとして設定し、表-1 に示す全 6 体のボックス試験体の飛翔体衝突試験を実施した。本論文では、基本ケースである A2 を中心に分析、解析シミュレーションした結果をまとめる。また、衝突実験前後における試験体の固有振動数を推定するために、飛翔体衝突位置と同位置をハンマーで打撃するハンマリング試験を行った。

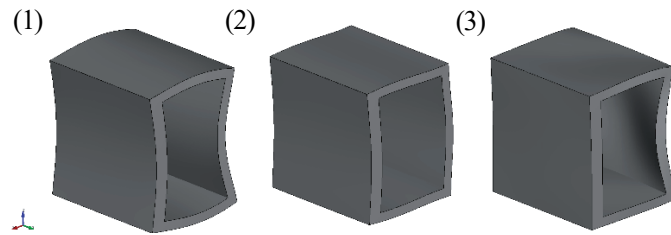
3. 実験結果および分析

3.1 ハンマリング試験

図-5 にはケース A2 の衝突試験前後のハンマリング試験により得られた加速度フーリエスペクトルを示す。加速度フーリエスペクトルには、事前に行った FEM での振動モード形状推定結果 (図-5(b)) に対応する複数のピークが表れており、試験体の弾性時の 1 次の固有振動数は 155Hz と推定された。

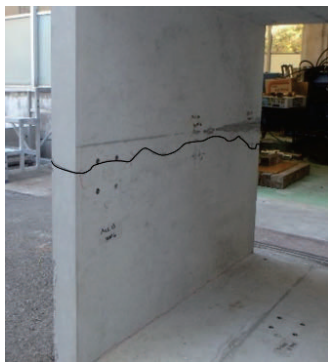


(a) 加速度フーリエスペクトル

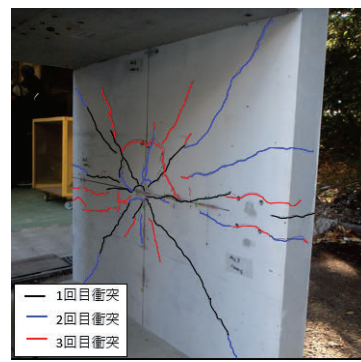


(b) 振動モード形状 (FEM での推定)

図-5 ハンマリング試験結果



(a) 衝突面背面外壁



(b) 衝突面外壁

図-6 衝突実験後の試験体損傷状況 (ひび割れ図)

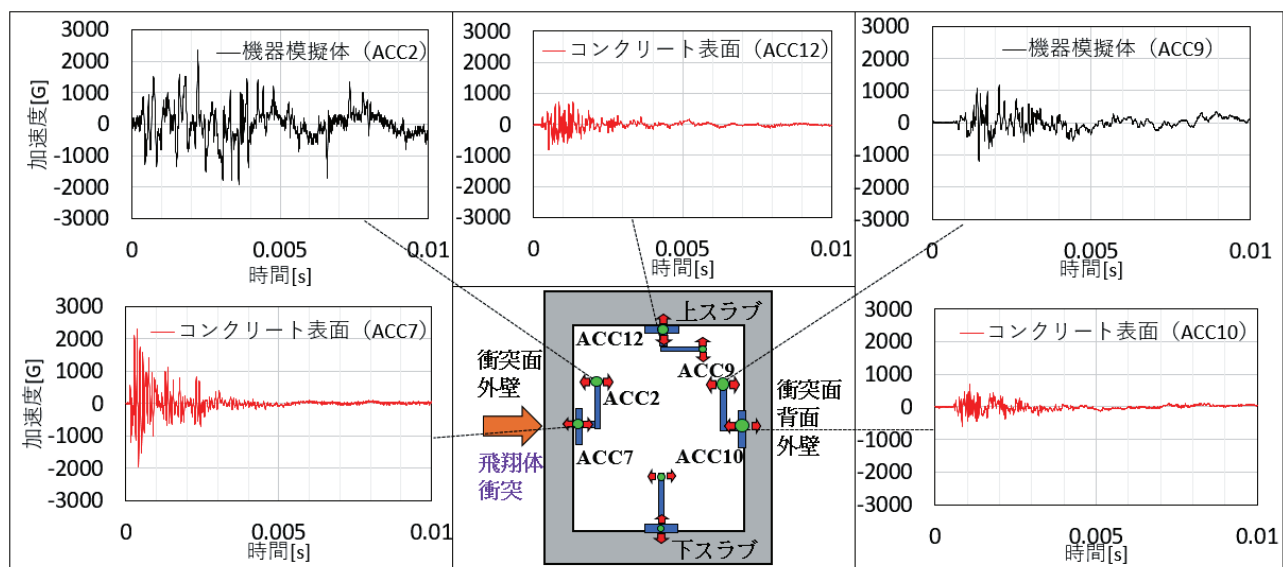


図-7(a) 加速度時刻歴 (生データ)

3.2 飛翔体衝突実験

図-6 には、衝突回数ごとの試験体内側の損傷状態を示す。衝突によって、衝突面外壁の裏面には中央を横切るひび割れと、X 字型のひび割れが生じている。衝突面背面外壁にも中央を横切るひび割れが発生している。衝突回数が増えるにつれて、衝突面外壁の裏面には放射状のひび割れの数が増えている。

図-7 に試験ケース A2 で計測された振動波形を示す。図-7(a)は、計測された生の波形データであり、図-7(b)は、

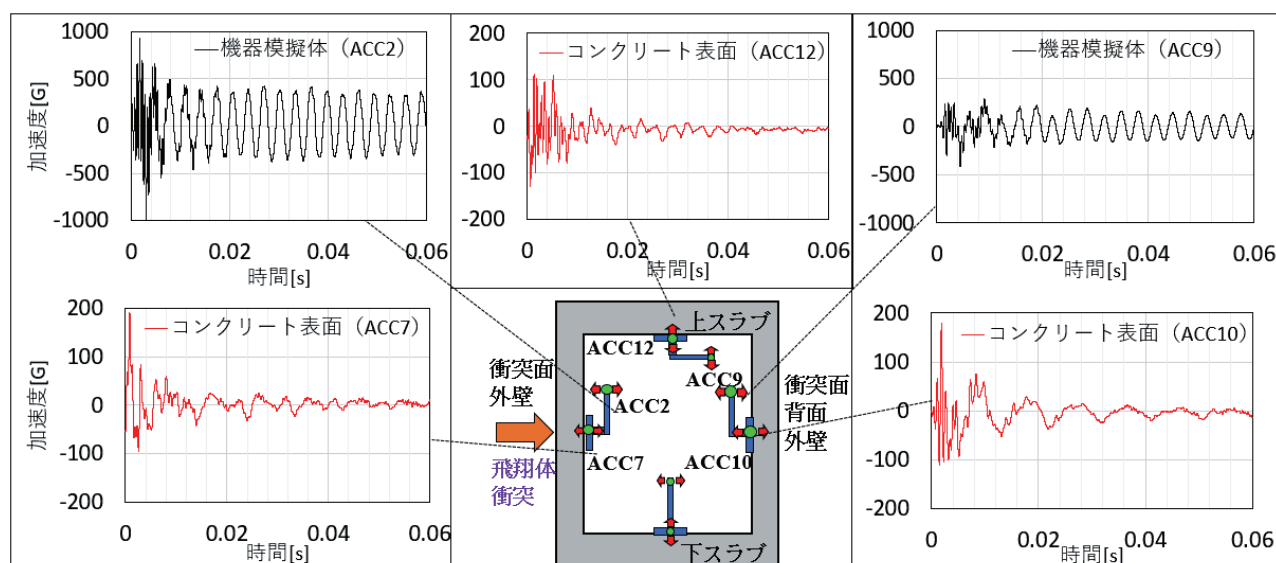


図-7(b) 加速度時刻歴 (2000Hz ローパスフィルター処理後)

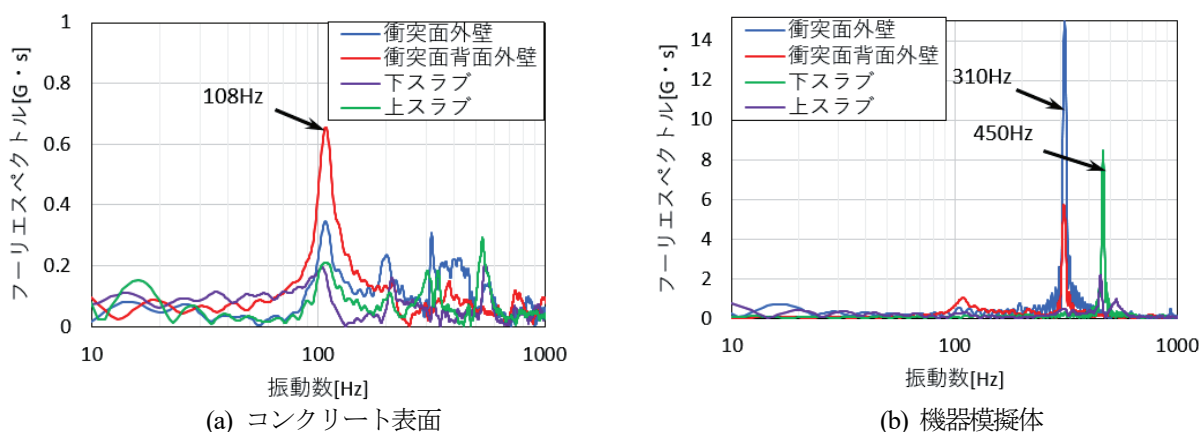


図-8 加速度フーリエスペクトル

ローパスフィルターにより 2000Hz 以下の成分を抽出した結果を示している。図-7(a)で試験体各部の振動を比較すると、衝突面から背面に向かって振幅が低減しており、衝突面からの距離に応じて振動の開始時刻が僅かに遅れている。衝撃的な振動成分が、衝突面からそれ以外の部位に向かって伝播する特徴が表れている。

一方、図-7(b)の試験体各部の振動を比較すると、衝突面と背面の振動は同じ振動数成分を含んでおり、振幅も同程度である。ローパスフィルター処理により高振動数の成分を取り除くことで、衝突により励起された試験体の固有モードによる振動成分が抽出されたと考えられる。衝突により RC 試験体に発生した振動には、衝突点から背面に向かって瞬間的に伝播する非常に高い振動数成分と、衝突によって励起された版の面外方向の固有振動成分が含まれていることがわかった。

図-8にコンクリート表面および機器模擬体の各部材における、加速度フーリエスペクトルを示す。コンクリート表面の応答(図-8(a))を見ると、試験体全体の固有モード振動が励起されていることにより、全ての位置で同じ振動数が卓越している。この卓越振動数(108Hz)は、試験体の 1 次の固有振動数 (155Hz) が、衝突によって生じ

た損傷の影響で軟化したものである。機器模擬体の応答(図-8(b))を見ると、壁に設置した $t=9\text{mm}$ の機器模擬体は約 310Hz、スラブに設置した $t=16\text{mm}$ のものは約 450Hz の 1 次固有モード振動が励起されている。

3.3 複数回衝突の影響

図-9に、同一の試験体 (A2) に対して複数回の飛翔体衝突試験を行った結果から、衝突面背面外壁の同じ位置で計測された加速度フーリエスペクトルを重ね合わせ図を示す。一回目の衝突においては 108Hz に試験体の面外 1 次固有振動数のピークが表れているのに対し、二回目の衝突では 85Hz、三回目の衝突では 64Hz にピークが推移している。図-6で示した通り複数回の衝突によって試験体のひび割れが増加しており、試験体の損傷が進行して剛性が低下した影響が、各回の衝突振動応答に表れたと考えられる。試験体のひび割れが顕著に増加するのは衝突面外壁のみだが、衝突面背面外壁の振動に損傷による剛性低下の影響が明確に表れている。これは試験体の規模が小さいため、各壁や床が独立して振動しているのではなく、試験体全体の固有モードで振動しているためと考えられる。

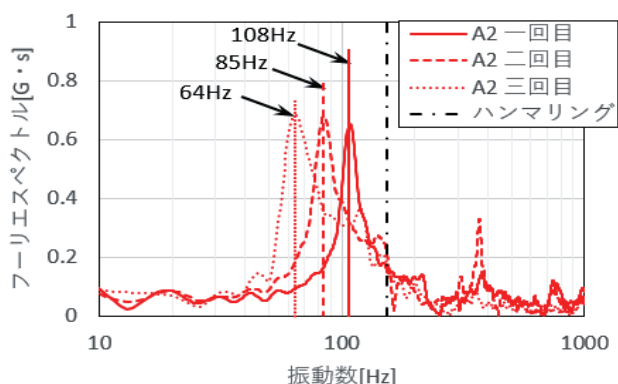


図-9 複数回の飛翔体衝突実験における
衝突面背面外壁の加速度フーリエスペクトル (ACC10)

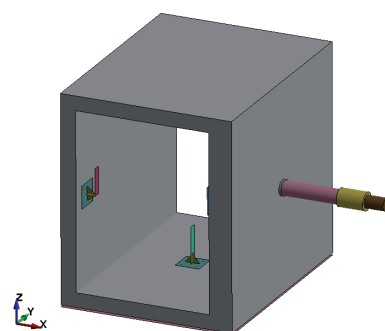


図-10 有限要素モデル (斜視図)

表-2 材料物性値

コンクリート (Fc=33.4)					鉄筋 (SD295A)				鋼板 (STKM13A)		
単位 重量 (kN/m³)	ヤング率 (N/mm²)	圧縮 強度 (N/mm²)	引張 強度 (N/mm²)	ポア ソン 比	単位 重量 (kN/m³)	ヤング 率 (N/mm²)	降伏 強度 (N/mm²)	ポア ソン 比	ヤング 率 (N/mm²)	降伏 強度 (N/mm²)	ポア ソン 比
22.1	29000	33.4	2.28	0.2	77	205000	350	0.3	205000	320	0.3

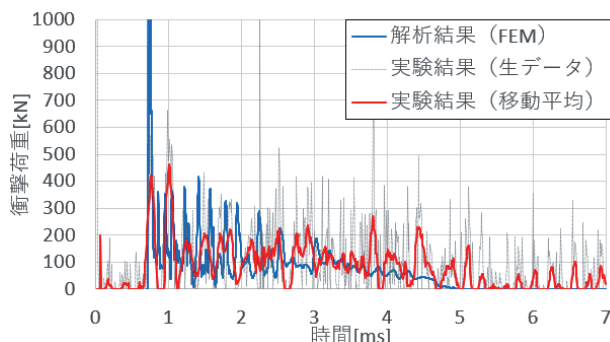


図-11 衝撃実験時の衝撃荷重 (A2)

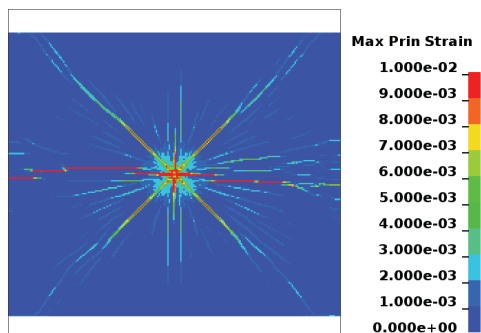


図-12 実験後の試験体衝突面外壁裏面ひび割れ (A2)

4. シミュレーション解析

4.1 解析手法と有限要素モデル

図-10 に解析モデルを示す。陽解法による非線形 FEM の構造解析が可能な解析コードである LS-DYNA (R12.1.0)による再現解析を行った。数値解析の対象は試験体 A2 の一回目の衝突ケースとする。

RC ボックス試験体は、コンクリートをソリッド要素、鉄筋をビーム要素でモデル化した。飛翔体の鋼管部はシェル要素、後方の胴体部はソリッド要素でモデル化し、胴体部の質量密度の調整により全体の質量を再現した。

4.2 材料特性

コンクリートはひび割れによる剛性低下を再現するため、Winfrith コンクリートモデル(MAT 085)を適用した。使用した材料物性値を表-2 に示す。コンクリートのひずみ速度効果は、試験解析結果から衝突面に生じた平均的なひずみ速度を算定し、圧縮側と引張側で考慮する動的増加係数をそれぞれ定め、圧縮強度および引張強度に対してそれぞれ1.50および1.66の係数を乗じることで考慮した。鉄筋と飛翔体(鋼管部)は弾塑性体(MAT 024)でモデ

ル化し、ひずみ速度依存性は、Cowper-Symonds モデル³⁾を使用して考慮した。

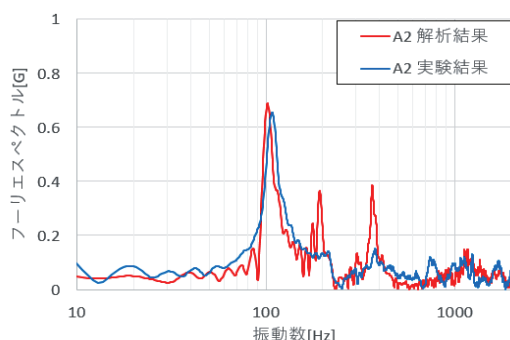
4.3 その他の条件

飛翔体とボックス試験体の間 (摩擦係数 $\mu=0.3$) と、ボックス試験体と鋼製架台の間 ($\mu=0.45$) には接触境界を定義した。飛翔体に対して初期速度を与えることによりボックス試験体に衝突させた。コンクリートと鉄筋には、試験体の固有振動数を含む 80~2000Hz の振動数範囲で減衰比が一定となる減衰モデルを設定し、減衰比は 3%と仮定した。

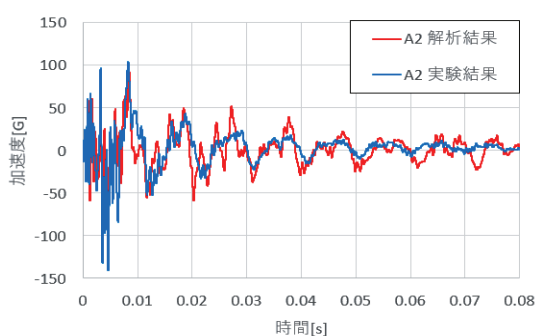
4.4 解析結果と考察

図-11 に衝突実験時の衝撃荷重を示す。衝突の瞬間にパルス荷重が作用した後、座屈の進行により一定の荷重を軸に振動するような傾向は、高速度カメラによる計測結果から評価した衝撃荷重と概ね一致した。

図-12 に解析で得た衝突面外壁の裏面に生じたひび割れ分布を示す。衝突実験で発生した X 字型のひび割れと、中央を横切るひび割れを解析結果でも良好に再現している。

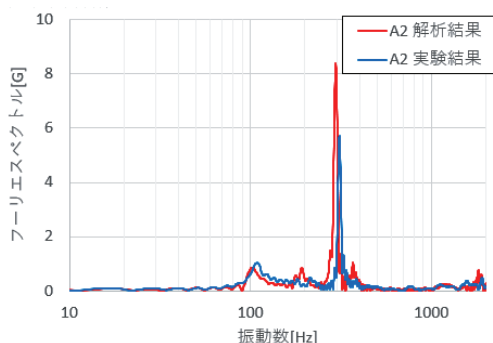


(a) 加速度フーリエスペクトル (ACC10)

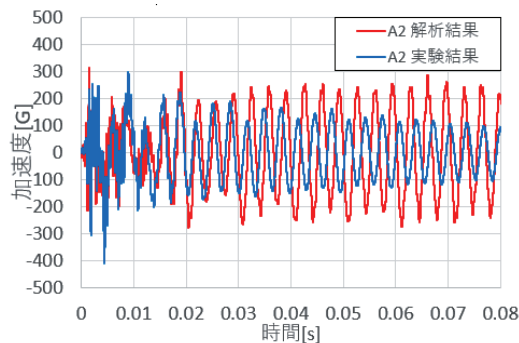


(b) 2000Hz ローパスフィルター加速度時刻歴 (ACC10)

図-13 衝突面背面外壁中央のコンクリート表面における加速度応答



(a) 加速度フーリエスペクトル (ACC2)



(b) 2000Hz ローパスフィルター加速度時刻歴 (ACC2)

図-14 衝突面外壁端部に設置された機器模擬体の加速度応答

図-13 に衝突面背面外壁の中央におけるコンクリート表面の加速度フーリエスペクトルと振動波形を示す。図-13(a)から、振動数によっては少し振幅の差があるものの、ピーク振動数は一致していることから、試験体の振動特性を概ね再現できている。また、図-13(b)より加速度波形も良好に再現できている。コンクリートの構成則によりひび割れを評価し、引張強度に対するひずみ速度依存性を適切に考慮することで、試験体の損傷による卓越振動数の変化を再現できた。

図-14 に衝突面外壁端部に設置した機器模擬体の加速度応答を示す。図-14(a)より機器模擬体の振動特性をある程度再現できているが、シェル要素でモデル化しており、交差部の剛性を考慮していないため、モデルの方が 10Hz 程度低振動数になっている。図-14 (b)の加速度波形も試験結果の傾向は再現できているものの、定常振幅は一致していない。精緻な再現のためには機器模擬体のモデル、コンクリート表面の応答、接合部の影響をより正確に再現する必要があると考えられる。

5 結論

RC 構造物の高振動数領域における振動特性を把握することを目的として衝突試験を実施し、コンクリート表面および内部に設置された機器模擬体の振動を計測し、計測した波形の分析と数値解析によるシミュレーションを実施した。本研究で得られた知見と課題を以下に示す。

(1) 衝突によって試験体に生じる振動は、衝突面から裏面へと極めて短い時間で伝播する高振動数の振動成分

と、衝突により励起された試験体の固有モード振動成分を有することがわかった。

(2) 計測した振動の分析、複数回衝突時の応答比較により、衝突による振動応答には、コンクリートのひび割れ等の損傷による振動数低下の影響が表れることがわかった。

(3) LS-DYNA を用いた FEM 解析シミュレーションを実施した。試験結果を考慮し、コンクリートの非線形性と、引張強度に対するひずみ速度効果を考慮した衝突解析を行うことで、試験体のひび割れを模擬し、振動応答を良好に再現できた。機器模擬体の振動応答まで再現するには、解析モデルの更なる精度向上が必要と考えられる。

一方で、本結論は今回の試験体寸法でのものであり、実構造物の評価を想定する場合、(1)や(2)の影響がどの程度生じるかについて確認する必要がある。

参考文献

- 1) 上野裕稔, 別府万寿博, 市野宏嘉, 武者浩透, 岡本修一: 柔飛翔体の高速衝突を受ける超高強度繊維補強コンクリートパネルの局部破壊に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.1149-1162, 2017.
- 2) 手嶋良祐, 別府万寿博, 市野宏嘉, 福永一基: 重力場における縮小模型実験に対する相似則の提案と検証, 構造工学論文集, Vol.67A, pp.826-837, 2021.
- 3) 坂本裕子, 白井孝治, 宇田川敏子, 近藤俊介: 竜巻飛来物と鋼板の衝突挙動に対するひずみ制限による破壊基準の適用性, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.975-988, 2016.

プレパックドコンクリートの耐爆性の向上に関する研究

A STUDY ON IMPROVEMENT OF BLAST-RESISTANT PERFORMANCE OF PREPACKED CONCRETE

市野宏嘉

ICHINO Hiroyoshi

博（工）防衛大学校准教授，システム工学群建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

キーワード：プレパックドコンクリート，接触爆発，スポール
(*prepacked concrete, contact explosion, spalling*)

1. はじめに

コンクリートは建築物，社会基盤構造物などに広く用いられる材料である．通常，コンクリート工事は，セメント，水，細骨材（砂），粗骨材（砂利，岩）等をプラントで混合した生コンクリートを工事現場に運搬し，型枠に流し込む工程で行われる．一方，型枠にあらかじめ粗骨材を詰めておき，その隙間にモルタルを充填してコンクリートを得る「プレパックド工法」がある．プレパックド工法は，工事現場近辺にプラントを要しない，水中での施工にも対応できる等の利点がある．

本研究では，プレパックドコンクリートを用いた各種の防護構造物の設計法の確立を目的とし，プレパックドコンクリートが爆発作用を受けた場合の性能の検討を行うものである．著者は，プレパックドコンクリートが爆発を受けた際の損傷について調べ，練り混ぜを行って製造する一般的なコンクリートの接触爆発時におけるスポール発生限界とほぼ同等であることを報告した¹⁾．本稿では，これをさらに発展させ，プレパックドコンクリートの耐爆性を向上させるため，強度や粗骨材がその耐爆性に及ぼす影響を報告する．

2. 実験方法

2.1 プレパックドコンクリートの製造

本研究で使用した試験体は，粗骨材をあらかじめ型枠に詰めておき，これにB種高炉セメントを主成分とする無収縮グラウト材を流し込み，粗骨材の間隙を充填することにより得られるものである．なお，

この試験体はコンクリート標準示方書²⁾に定義されたプレパックドコンクリートと混和剤やフレッシュ性状が一部異なるが，その主要な材料と粗骨材の投入後にモルタルを充填する施工法が共通し，その力学的な性質が類似することから，ここでは「プレパックドコンクリート」と呼称する．

本研究で使用したプレパックドコンクリートの配合を表-1に示す．実験ケースの詳細は後述する．表-1に示す結合材（セメント）と細骨材および混和材を，あらかじめ混合したものをプレミックス材と呼ぶ．試験体の製造にあたっては，プレミックス材を所定量の水が入ったペール缶に投入して，高速ハンドミキサーで3分間程度練混ぜを行いその後5分間静置してグラウト材を製造した．型枠にはあらかじめ粒度調整をした粗骨材を手作業により詰めておき，図-1に示すように，上面よりゆっくりと浸透状況を目視確認しながらグラウト材を流し込んだ．

2.2 実験方法および条件

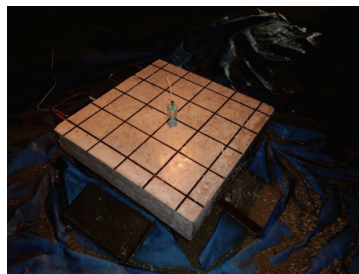
爆発実験にあたり，爆発実験室の地表面を水平に整地し，地表面に溝形鋼を加工して四角形に組んだ支持具を置き，その上に試験体を設置して4辺支持とした．実験の概要を，図-2に示す．試験体の寸法は縦横500mmで，厚さは60, 80, 100および120mmとした．取り扱い時の試験体の損傷を防ぐため，D10鉄筋を試験体の外周に配置した．表-2に実験ケースを示す．粗骨材には図-3に示す砂岩碎石および多孔質石灰岩碎石を用いた．砂岩碎石の表乾密度は $2.69 \sim 2.72 \text{ g/cm}^3$ ，吸水率は $0.79 \sim 0.80\%$ であった．粒

表－1 プレパックドコンクリートの配合

実験ケース			水結合材 比 (%)	単位体積質量 (kg/m ³)				
粗骨材		グラウト材		グラウト材				粗骨材
種類	G _{max} (mm)			水	結合材	細骨材	混和剤	
砂岩	20	普通強度	53.1	169	319	477	1.915	1470
砂岩	20	高強度	22.5	117	517	412	2.331	1470
砂岩	40	普通強度	53.1	179	339	508	2.037	1470
多孔質石灰岩	20	普通強度	53.1	160	303	453	1.911	1410



図－1 試験体の製造



(a) 実験の様子

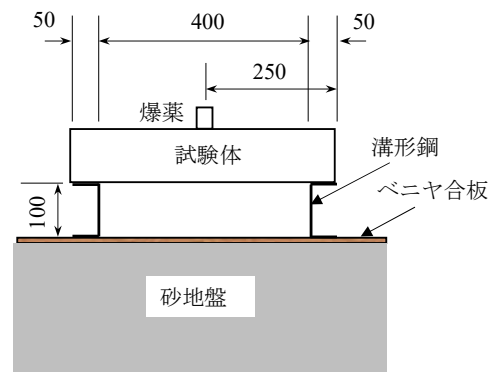


(a) 砂岩



(b) 多孔質石灰岩

図－3 粗骨材の外観



(b) 各部の寸法

図－2 実験の概要

度は最大寸法 20mm，最小寸法 10mm のものと最大寸法 40mm，最小寸法 20mm の 2 種類であり，それらの単位容積質量はそれぞれ 1470kg/m³ と 1400kg/m³ であった．多孔質石灰岩碎石の表乾密度は 2.48g/cm³，吸水率は 3.74%で，粒度は最大寸法 20mm，最小寸法 10mm（単位容積質量 1410kg/m³）の 1 種類とした．グラウト材は普通強度と高強度の 2 種類を用い，材齢 3 日の試験体と，十分な強度が発現するまで養生期間をとった試験体の 2 種類を作製した．なお，表中の No.と併記した実験ケースを表す記号は，左から粗骨材の種類（S：砂岩，L：多孔質石灰岩）と最大粒径 G_{max}(mm)，板厚(mm)，爆薬量(g)，グラウト材の種類（N：普通強度，H：高強度）と材齢（3 日のみ 3d と表示）である．

実験用の爆薬としてはコンポジション C-4 爆薬を使用し，これを直径／高さ＝1 の円柱形に成型して図－2 に示す位置に設置して，6 号電気雷管により起爆した．爆薬の質量は実験の条件に応じて 10～

50g とした．本実験では，円柱形爆薬の底面は試験体に接触している．このような爆発の条件を「接触爆発」とよぶ．コンクリート等の板状の部材が接触爆発を受けた場合，図－4 に示すように，部材には局部的な破壊が生じる．爆薬量が比較的小さい，あるいは板厚が十分大きい場合には，図－4(b)に示すように爆発面（表面）側のみにクレータと呼ばれる損傷が生じる．板厚を薄くするか，あるいは爆薬量を増すと，図－4(c)に示すようにクレータに加えて爆発面と反対側（裏面）にスポールと呼ばれる損傷が生じ，さらに板厚を薄くするか爆薬量を増すと図－4(d) に示すようにクレータとスポールが接続して板に貫通孔が生じる．本研究では，局部破壊の性状を観察するとともに，スポールの発生限界となる板厚と爆薬量の条件とそれに及ぼす粗骨材の影響について考察する．

表-2 実験ケース

No.		板厚 (mm)	爆薬 (g)	換算厚さ (g/cm ^{1/3})	粗骨材			グラウト	材齢 (day)	一軸圧縮 強度 (N/mm ²)
					種類	直径 (mm)				
						最大	最小			
1	S20-60-12-N	60	12	2.52	砂岩	20	10	普通強度	28	17.6
2	S20-80-12-N	80	12	3.35	砂岩	20	10	普通強度	28	17.6
3	S20-80-20-N	80	20	2.83	砂岩	20	10	普通強度	28	17.6
4	S20-100-20-N	100	20	3.54	砂岩	20	10	普通強度	28	17.6
5	S20-100-40-N	100	40	2.81	砂岩	20	10	普通強度	28	17.6
6	S20-120-30-N	120	30	3.71	砂岩	20	10	普通強度	64	24.9
7	S20-120-50-N	120	50	3.13	砂岩	20	10	普通強度	28	17.6
8	S20-100-20-N3d	100	20	3.54	砂岩	20	10	普通強度	3	2.9
9	S20-100-40-N3d	100	40	2.81	砂岩	20	10	普通強度	3	2.9
10	S20-100-20-H3d	100	20	3.54	砂岩	20	10	高強度	3	30.6
11	S20-100-40-H3d	100	40	2.81	砂岩	20	10	高強度	3	30.6
12	S20-100-20-H	100	20	3.54	砂岩	20	10	高強度	71	57.8
13	S20-100-40-H	100	40	2.81	砂岩	20	10	高強度	71	57.8
14	S40-80-12-N	80	12	3.35	砂岩	40	20	普通強度	64	27.7
15	S40-80-20-N	80	20	2.83	砂岩	40	20	普通強度	35	30.6
16	S40-100-20-N	100	20	3.54	砂岩	40	20	普通強度	64	27.7
17	S40-100-40-N	100	40	2.81	砂岩	40	20	普通強度	35	30.6
18	S40-120-30-N	120	30	3.71	砂岩	40	20	普通強度	64	27.7
19	S40-120-50-N	120	50	3.13	砂岩	40	20	普通強度	35	30.6
20	L20-60-12-N	60	12	2.52	多孔質石灰岩	20	10	普通強度	35	37.7
21	L20-100-20-N	100	20	3.54	多孔質石灰岩	20	10	普通強度	35	37.7
22	L20-100-40-N	100	40	2.81	多孔質石灰岩	20	10	普通強度	35	37.7

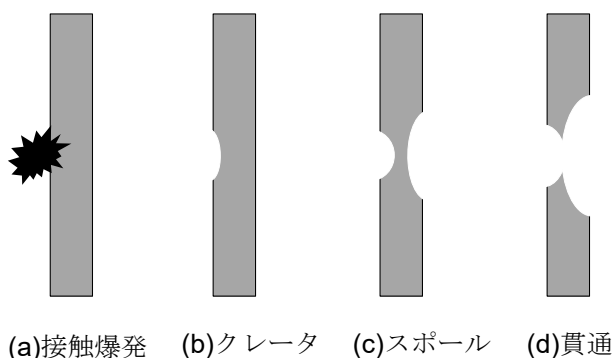


図-4 局所的な破壊の例

3. 実験結果

3.1 試験体の強度の影響

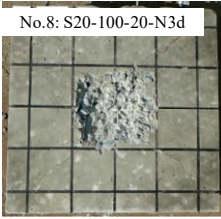
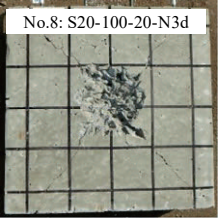
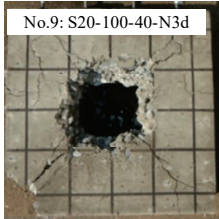
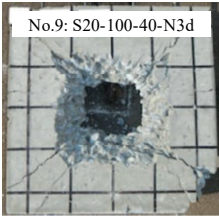
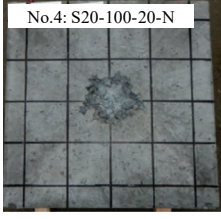
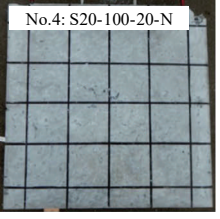
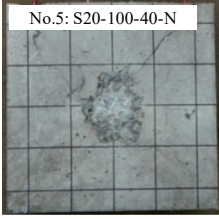
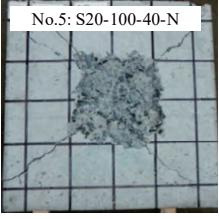
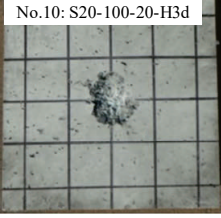
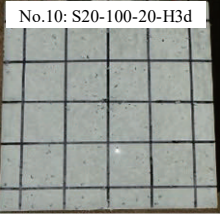
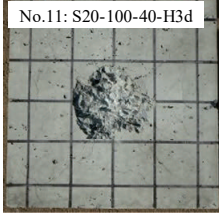
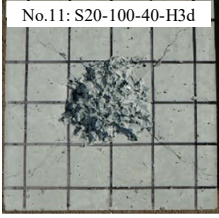
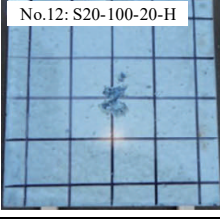
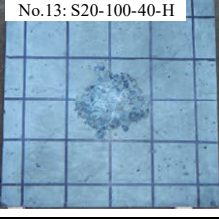
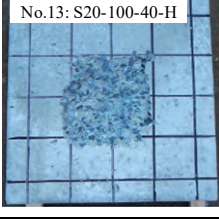
表-3 に、4 種類の強度の板厚 100mm の試験体について、C-4 爆薬 20g、40g で爆破した際の外観を示す。強度が最も小さい 2.9N/mm² の場合は表裏面いづれもコンクリートの損傷が生じているが、強度を大きくすると概して損傷の度合いは低減され、S20-100-20-N、S20-100-20-H3d ではスポールの発生が防止された。表-3 より、一軸圧縮強度が一定程度に達すると、それ以上強度が増しても局部破壊はもはや低減されないことがわかる。

S20-100-40-H では、同じ 40g 爆薬量での他のケースと同様、クレータとスポールの両方が生じたが、板全体の破壊が生じておらず、強度の上昇の影響がうかがえる。クレータ側では粗骨材が破壊あるいは剥落され、スポール側では粗骨材の剥落が生じたことは強度の大小にかかわらず共通した傾向である。McVay³⁾は、コンクリートに対する爆発による局部破壊について、高強度コンクリート壁では、27.6N/mm² の普通の強度のコンクリート壁と比較してスポールの深さが大きくなったことを報告している。さらに McVay³⁾は、高強度コンクリートでは、スポールの成因となる反射応力波の振幅が増加することにより破壊が促進され、強度の増加による破壊の低減の利点が相殺されることを指摘している。以上より、プレパックドコンクリートにおいても、一般的なコンクリートと同様、強度の増加により耐爆性の向上を図ろうとする場合には注意が必要である。

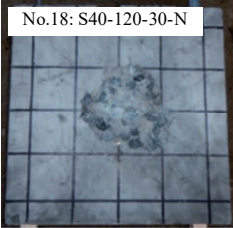
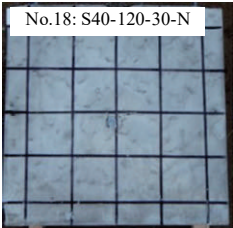
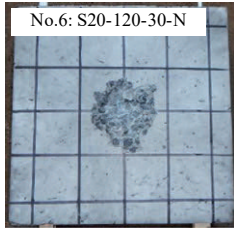
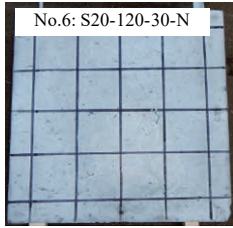
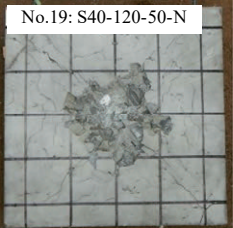
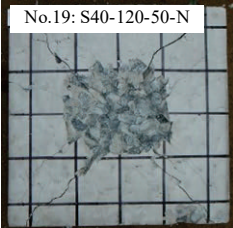
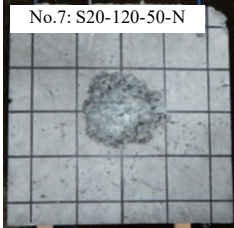
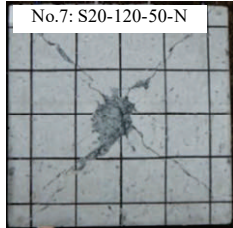
3.2 粗骨材による影響

表-4 に、粗骨材の最大粒径が 20mm の場合と 40mm の場合の試験体の損傷の代表例を示す。クレータとスポールの両方が発生した S40-120-50-N と S20-120-50-N を比較すると、同じ板厚と爆薬量の条

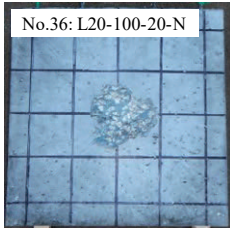
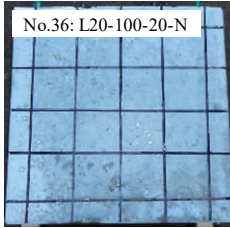
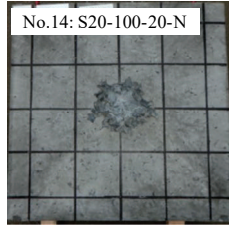
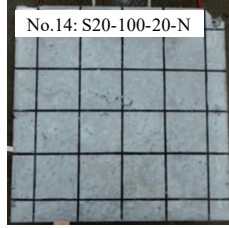
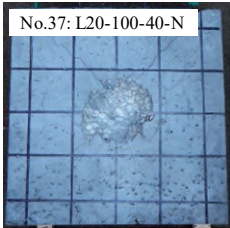
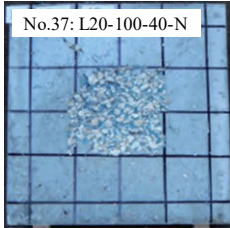
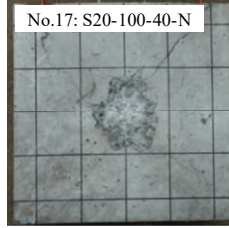
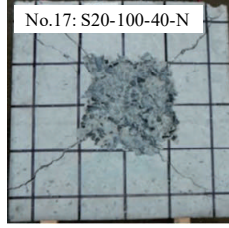
表－3 実験後の試験体（強度による比較）

一軸圧縮強度 f_c (N/mm^2)	表面(爆発面)		裏面	
	爆薬量: 20g 板厚: 100mm		爆薬量: 40g 板厚: 100mm	
2.9	No.8: S20-100-20-N3d 	No.8: S20-100-20-N3d 	No.9: S20-100-40-N3d 	No.9: S20-100-40-N3d 
	No.4: S20-100-20-N 	No.4: S20-100-20-N 	No.5: S20-100-40-N 	No.5: S20-100-40-N 
17.6	No.10: S20-100-20-H3d 	No.10: S20-100-20-H3d 	No.11: S20-100-40-H3d 	No.11: S20-100-40-H3d 
	No.12: S20-100-20-H 	No.12: S20-100-20-H 	No.13: S20-100-40-H 	No.13: S20-100-40-H 
30.6				
57.8				

表－4 実験後の試験体（粗骨材の最大粒径による比較）

板厚・爆薬量	表面(爆発面)	裏面	表面(爆発面)	裏面
	$G_{\max} = 40\text{mm}$		$G_{\max} = 20\text{mm}$	
120mm・30g	No.18: S40-120-30-N 	No.18: S40-120-30-N 	No.6: S20-120-30-N 	No.6: S20-120-30-N 
120mm・50g	No.19: S40-120-50-N 	No.19: S40-120-50-N 	No.7: S20-120-50-N 	No.7: S20-120-50-N 

表－5 実験後の試験体（粗骨材の種類による比較）

板厚・爆薬量	多孔質石灰岩		砂岩	
	表面(爆発面)	裏面	表面(爆発面)	裏面
100mm・20g	No.36: L20-100-20-N	No.36: L20-100-20-N	No.14: S20-100-20-N	No.14: S20-100-20-N
				
100mm・40g	No.37: L20-100-40-N	No.37: L20-100-40-N	No.17: S20-100-40-N	No.17: S20-100-40-N
				



(a) S20-100-40-N



(b) L20-100-40-N

図－5 試験体の断面

件であるにもかかわらず、粗骨材の最大粒径が40mmのS40-120-50-Nの損傷が大きい。S40-120-50-Nでは、粗骨材の粒径がより大きいために、粗骨材の剥離による損傷の範囲が広がりやすいと考えられる。すなわち、爆薬の量がスポール発生のしきい値を超えると、粗骨材の最大粒径が局部破壊に及ぼす影響が顕著に生じることが見てとれる。

表－4 に、多孔質石灰岩を使用した試験体の実験後の外観を示す。図より、外観上は砂岩の場合と多孔質石灰岩の場合で顕著な差異はない。しかし、図－5 に示す試験体の切断面では、両者に明瞭な差異が認められる。すなわち、同一の板厚、爆薬量であっても、砂岩碎石の場合には多数のひび割れが粗骨材とグラウト材の界面に生じ、図の例では切断時に試験体の損傷部分が崩壊した。一方、多孔質石灰岩の試験体は、切断しても損傷部分は崩壊することなくなお切断前の状態を保っている。一般的に、多孔質の岩石はコンクリートの粗骨材として適切ではない。しかし、多孔質石灰岩は表面形状が粗いためにグラウト材との付着が良好なため、耐爆性の向上の観点からはその欠点を補っているといえる。

4. プレパックドコンクリートのスポール発生予測

プレパックドコンクリートの強度や粗骨材が異なる場合のスポールの発生限界を、試験体の厚さ T を爆薬量の 3 乗根で除した換算コンクリート厚さ $T/M_E^{1/3}$ を用いて評価する。なお、ここでの爆薬量は TNT 換算爆薬量であり、本研究で用いた C-4 爆薬では、文献 4) に示された TNT 爆薬および C-4 爆薬の爆発熱エネルギーから、 $M_E = 1.13 \times M_{C4}$ と換算される。各実験におけるクレタ、スポール、貫通孔発生の特と試験体の厚さ（板厚） T 、TNT 換算爆薬量 M_E との関係を、図－6 および図－7 に示す。図中の S20-N の実験データには、既報¹⁾の実験の結果も含めている。さらに図中には、 $T/M_E^{1/3} = 3.4, 3.6$ および $3.8 \text{ cm/g}^{1/3}$ を表す曲線を併記した。

図－6 から、S20-N, S20-H3d ($f_c = 17.6, 30.6 \text{ N/mm}^2$) の場合には、 $T/M_E^{1/3} = 3.54 \text{ cm/g}^{1/3}$ でスポールは生じない。したがって、これらの条件でのスポール限界は、 $T/M_E^{1/3} = 3.6 \text{ cm/g}^{1/3}$ より小さいと考えられる。一方、S20-N3d, S20-H ($f_c = 2.9, 57.8 \text{ N/mm}^2$) の場合には、 $T/M_E^{1/3} = 3.54 \text{ cm/g}^{1/3}$ でスポールが生じる。ただし、S20-H ($f_c = 57.8 \text{ N/mm}^2$) の場合には、生じたスポールが軽微であるので、スポール限界は $3.6 \text{ cm/g}^{1/3}$

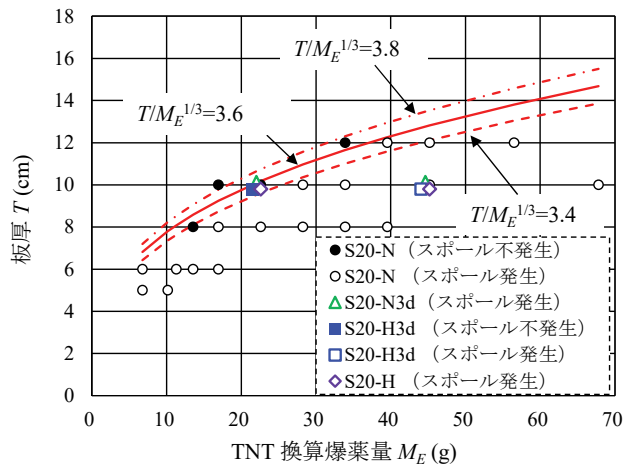


図-6 スポール限界に及ぼす強度の影響

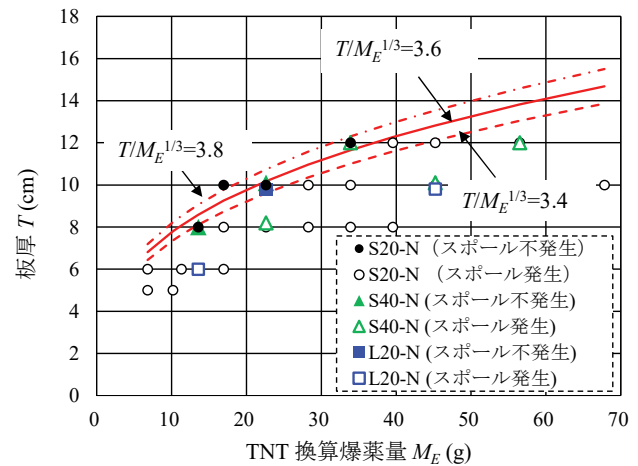


図-7 スポール限界に及ぼす粗骨材の影響

近傍にあると考えられる。以上より、一軸圧縮強度の範囲が $f_c=17.6\sim57.8\text{N/mm}^2$ の場合には、スポール限界は $3.6\text{cm/g}^{1/3}$ 程度であり、森下ら⁵⁾による一般的なコンクリートにおけるスポール限界 $T/M_E^{1/3}=3.6\text{cm/g}^{1/3}$ と大差がない。今回使用した高強度グラウト材は、材齢1日で 20N/mm^2 の強度が期待できる材料であり、プレパックド工法との組み合わせにより、耐爆構造物の迅速な構築に貢献できると考えられる。

図-7より、 $G_{\max}=40\text{mm}$ の場合について、 $T/M_E^{1/3}=3.6\text{cm/g}^{1/3}$ 近傍の実験結果を参照すると、 $T/M_E^{1/3}=3.35$ および $3.54\text{cm/g}^{1/3}$ でスポールは発生せず、 $T/M_E^{1/3}=3.71\text{cm/g}^{1/3}$ で極めて軽微なスポール（直径24mm、深さ5mm）が生じる。したがって、やや保守的に見て $T/M_E^{1/3}=3.8\text{cm/g}^{1/3}$ 程度がスポール限界であると考えられる。多孔質石灰岩の場合については、 $T/M_E^{1/3}=3.54\text{cm/g}^{1/3}$ でスポールは発生しない。したがって、多孔質石灰岩でのスポール限界は $T/M_E^{1/3}=3.6\text{cm/g}^{1/3}$ 程度として保守的に評価でき、砂岩碎石と同等であった。

5. おわりに

本研究では、プレパックドコンクリートの耐爆性を向上させるため、充填モルタルの強度や粗骨材を変化させてこれらがその耐爆性の指標となるスポールの発生限界に及ぼす影響を調べた。スポールの発生限界は、粗骨材の最大寸法が $G_{\max}=20\text{mm}$ で、試験体の一軸圧縮強度の値が $f_c=17.6\sim57.8\text{N/mm}^2$ の場合には、粗骨材に多孔質石灰岩を使用した場合を含めてスポール限界は $T/M_E^{1/3}=3.6\text{cm/g}^{1/3}$ 程度であり、本研究の範囲では一般的なコンクリートにおけるスポール限界と大差がない。粗骨材の最大寸法が $G_{\max}=40\text{mm}$ の場合には、スポール限界は $T/M_E^{1/3}=3.8\text{cm/g}^{1/3}$ 程度となる。

参考文献

- 1) 市野宏嘉：プレパックド工法による防護施設の抗たん性向上に関する研究，防衛施設学会令和5年度年次研究発表会，pp.43-46，2023。
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編，2023。
- 3) M. K. McVay.: Spall Damage of Concrete Structures, Technical Report SL88-22, U.S.Army Corps of Engineers Waterways Experimental Station, 1988.
- 4) U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command (Preparing Activity), Air Force Civil Engineer Support Agency.: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, UFC 3-340-02, Chapter2, 2014.
- 5) 森下政浩，田中秀明，伊藤孝，山口弘：接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1787-1797，2000。

SIFCON パネルと緩衝材により構成される爆発緩衝システムの RC 版への緩衝効果と裏面補強との併用効果に関する研究

A STUDY ON SHOCK-ABSORBING EFFECT OF AN EXPLOSION-ABSORBING SYSTEM COMPOSED OF
SIFCON PANEL AND SHOCK-ABSORBING MATERIAL ON RC SLABS AND
THEIR COMBINED EFFECT WITH BACKSIDE REINFORCEMENT

北村塔子*, 山口 信**, 米田ひかり*, 森島慎太郎***
KITAMURA Toko, YAMAGUCHI Makoto, YONEDA Hikari and MORISHIMA Shintaro

* 熊本大学 大学院自然科学教育部 博士前期課程（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1）
** 博(工) 熊本大学 大学院先端科学研究部 准教授（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1）
*** 博(工) 日鉄高炉セメント(株) SL 事業部 統括主任（〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 12-7）

キーワード：SIFCON, 接触爆発, 局部破壊, 緩衝システム, 裏面補強
(SIFCON, Contact detonation, Local failure, Absorbing systems, Backside reinforcement)

1. はじめに

接触爆発を受ける鉄筋コンクリート (RC) 版の損傷としては、作用を受けた面とは反対側の裏面側コンクリートが破片化して飛散する裏面剥離 (スポール) が生じる点に特徴がある。RC 造建築物内部の人命を防護するためには、スポール発生に伴うコンクリート片の飛散による 2 次被害を防止する必要がある。従って、スポールを抑止することが設計上の許容限界と位置付けられる。

著者らは既報¹⁾において、薄肉のスラリー充填繊維コンクリート (SIFCON) パネルにより裏面補強した RC 版の接触爆発に対する耐爆性能について実験的検討を行い、RC 版裏面に接合した SIFCON パネルが 10.8 倍の厚さの普通コンクリートに相当する良好な耐爆補強効果を有していることを明らかにしている。

ここで、著者らは将来的に、SIFCON パネルを耐爆構造物の壁体を構築する際の埋設型枠として適用することを想定している。その場合、爆発面側には裏面へ向けて伝播する応力波を減衰させるための何らかの工夫を施すことが望ましいと考えられるが、単に SIFCON パネルを爆発側に設置するだけであれば、応力波は減衰することなく RC 版へと透過することが予想される。この面で、SIFCON パネルと RC 版との間に適切な衝撃緩衝材を挿入する方法が有用視される。

そこで本研究では、RC 版の爆発面側にエネルギー吸収要素として SIFCON パネルを設置し、尚且つ RC 版－SIFCON パネル間に衝撃緩衝材として硬質ポリウレタン

フォームを挿入した積層構造版の接触爆発による局部破壊について実験的検討を行った (実験 1)。また、SIFCON パネルの埋設型枠への適用に向けた基礎検討として、上述の爆発緩衝システムと SIFCON パネルによる裏面補強との併用効果についても併せて検討した (実験 2)。

2. 実験方法

2.1 使用材料・調合および製造方法

表-1 に使用材料を示す。普通コンクリートと呼び強度 24 のレディーミクストコンクリートを用いた。SIFCON に関して、補強用繊維には形状が $\phi 0.2 \times 13\text{mm}$ の細径真直鋼繊維を用い、グラウト材の結合材として早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 (6000 ブレーン品) を、細骨材として珪砂 8 号をそれぞれ用いた。

表-1 使用材料

普通コンクリート	レディーミクストコンクリート (普通 24-18-20-N) 実測スランプ: 17.0cm (実験 1), 20.5cm (実験 2) 実測空気量: 6.2% (実験 1), 3.4% (実験 2)	
SIFCON	結合材	早強ポルトランドセメント 高炉スラグ微粉末 6000
	細骨材	珪砂 8 号 表乾密度: 2.40g/cm ³ , 粒径: 0.3mm 以下
	化学混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤 メチルセルロース系増粘剤 ポリエーテル系消泡剤
	補強用繊維	細径真直鋼繊維 寸法: $\phi 0.2 \times 13\text{mm}$, 引張強度: 2000MPa 引張弾性率: 205GPa, 実積率: 10.0%
緩衝材	硬質ポリウレタンフォーム	

衝撃緩衝材としては、低速衝突問題において発泡スチロールの有効性²⁾が、近接爆発問題においてアルミハニカム複合パネルの有効性³⁾がそれぞれ確認されているが、本研究では既報⁴⁾において良好な緩衝性能が確認された硬質ポリウレタンフォームを用いた。

SIFCON に用いたグラウト材は表-2 に示す通り、本繊維の間に充填可能で、尚且つ SIFCON の良好な耐爆性能を確保する上で好適と判断された調査⁵⁾によるものとした。表-3 にグラウト材のフレッシュ性状を示す。本繊維間に充填可能なグラウト材の 0 打フロー値 (JIS コーン使用) は 380 程度以上であることが確認されているが⁵⁾、両実験シリーズにおいてそれを満足する流動性が得られていることが確認される。

SIFCON は、予め型枠中に短繊維を敷き詰め、その間にグラウト材を注入することにより製造した。なお、本繊維の実積率は 10.0% であり⁵⁾、それが得られるように所定量の繊維を量り取って型枠中に敷き詰めた。また、グラウト材はその自重のみにより繊維間に充填させた。

2.2 静的力学特性

普通コンクリートおよび SIFCON の圧縮試験には $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体を、SIFCON の曲げ試験には $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 角柱供試体を各 3 体作製し、材齢 28 日目まで現場水中養生後、試験時まで気中養生とした。また、圧縮試験では圧縮応力-ひずみ曲線を、曲げ試験ではスパン長 300mm の中央 3 点曲げ載荷による荷重-載荷点変位曲線をそれぞれ測定した。

以上のようにして得られた力学特性値を表-4 に示す。SIFCON においては、いずれの実験シリーズにおいても 50MPa 以上の高い曲げ強度が得られていることが判る。

2.3 接触爆発試験方法

(1) 試験体

図-1 に接触爆発試験体の形状・寸法および配筋を、表-5 に接触爆発試験体一覧をそれぞれ示す。試験体は幅×長さが $500 \times 500\text{mm}$ の正方形版とした。配筋が局部破壊に及ぼす影響は小さいことが知られているが⁶⁾、本実験では割れ防止程度の目的で縦横の間隔 120mm の格子状鉄筋を RC 版の版厚中央に 1 層配した。また、RC 版および SIFCON パネルは材齢 28 日目まで現場水中養生後気中養生し、RC 版に予め設けた $\phi 18\text{mm}$ のボルト孔を介して M12 のボルトにより接合した。

実験 1 では、爆発面に緩衝材を挟んで SIFCON パネルを接合した試験体を検討対象としたが、RC 版厚は 60mm で一定とし、SIFCON パネル厚および緩衝材厚を 10、20 および 30mm の 3 水準でそれぞれ変化させた。実験 2 では、爆発面に緩衝材を挟んで SIFCON パネルを、裏面に直接的に SIFCON パネルをそれぞれ接合した試験体を検

表-2 グラウト材の調合

W/B [%]	W/P [%]	Sg/B [%]	S/B [%]	単位量 [g/batch]			
				W	C	Sg	S
35	25	50	40	5000	7150	7150	5700

注) W: 水, C: セメント, Sg: 高炉スラグ微粉末, S: 細骨材, B (=C+Sg): 結合材, P (=C+Sg+S): 粉体

表-3 グラウト材のフレッシュ性状および圧縮強度

実験	JP 漏斗 流下時間 [s]	Flow		圧縮強度 [MPa]
		JIS コーン 使用	$\phi 50 \times 100\text{mm}$ コ ーン使用	
1	18.2	409	337	117
2	11.65	402	324	102

注) 圧縮強度は、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 円柱供試体 3 体の平均値であり、養生条件は接触爆発試験体と同様である

表-4 普通コンクリートと SIFCON の静的力学特性

材料名	実験	γ [kN/m ³]	σ_B [MPa]	E [GPa]	σ_f [MPa]	$\bar{\sigma}_b$ [MPa]
普通コンクリート	1	22.8	33.4	26.2	—	—
	2	23.1	37.6	24.8	—	—
SIFCON	1	25.8	169	20.9	57.8	—
	2	25.7	152	20.4	54.9	39.4

注) γ : 気乾単位体積重量, σ_B : 圧縮強度, E: ヤング係数, σ_f : 曲げ強度, $\bar{\sigma}_b$: 曲げ靱性係数 (限界変位 4mm), 実験 1 の $\bar{\sigma}_b$ は測定機器の故障により測定できなかった

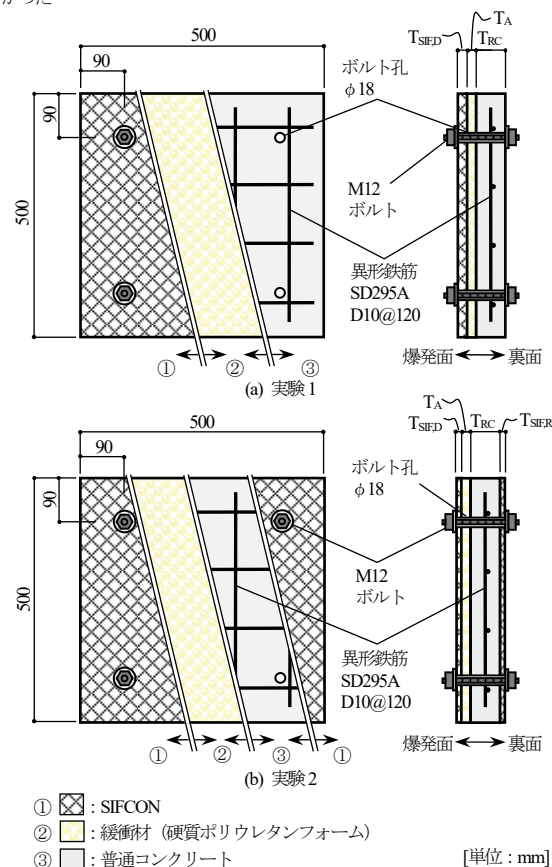


図-1 接触爆発試験体の形状・寸法および配筋

討対象としており、RC 版厚を 60mm で、爆発面側および裏面側の SIFCON パネル厚と緩衝材厚は 10mm でそれぞれ一定とした。なお、爆薬量は実験の状況に応じ、スポール限界が現れるように各 3 水準で変化させた。

ここで、本実験で用いた爆薬は、実験 1 で SEP 爆薬、実験 2 で含水爆薬と異なるが、下式に示すトリニトロトルエン (TNT) 等価質量を用いれば発生エネルギー量が等価な TNT の質量に換算することが可能である。

$$W_m = W_a \times K / K_{TNT} \quad (1)$$

ここに、 W_m ：爆薬の TNT 等価質量 [g]、 W_a ：実際の爆薬量 [g]、 K ：使用した爆薬の熱エネルギー [MJ/kg]、 K_{TNT} ：TNT の熱エネルギー [=4.29MJ/kg] である。図-2 中に各爆薬の物性値を示す。また、表-5 中には、式(1)により求めた各爆薬の TNT 等価質量を併記している。

(2) 試験方法

図-2 に接触爆発試験方法を示す。2 本の木製架台上に内法スパン 410mm となるように試験体を設置し、その上面中央で 6 号電気雷管を用いて発破器により爆薬（装薬形状は直径：高さ=1：1）を起爆させた。

(3) 局部破壊寸法の測定方法

図-3 に局部破壊寸法の定義を示す。クレータおよびスポールの直径は、形状が非対称となるため直線 1-4 に沿って 4 箇所測定し、それらの平均値とした。また、クレータおよびスポールの深さは、それぞれ爆発面および裏面から局部破壊の最深部に至るまでの距離とした。

3. 実験結果および考察

3.1 実験 1

(1) 破壊性状および破壊モード

表-6 に、実験 1 における代表的な試験体の破壊性状を示す。爆発面では、SIFCON パネル厚が 10 および 20mm の試験体で爆薬量に関わらず SIFCON パネルに貫通が生じ、その直下の緩衝材が粉碎されている様相が確認された。また、緩衝材が粉碎された箇所に接する RC 版の部分には若干の窪みが生じている様相が確認されている。

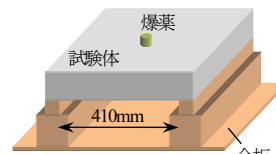
これに対し、SIFCON パネル厚が 30mm の試験体では上記とは異なる破壊性状が認められた。すなわち、SIFCON パネルは貫通することなく、パネル中のスポール破壊箇所が裏面へ向けて凸状に変形し、それが直下の緩衝材を押し潰すことで RC 版を押圧している様相が確認された。ここで、SIFCON 単体のスポール限界は $T/W_m^{1/3} = 1.62\text{cm/g}^{1/3}$ であることが確認されている⁷⁾。従って、厚さ 30mm の SIFCON パネルにおいてスポール限界となる爆薬の TNT 等価質量は 6.35g となるが、本実験ではその 10 倍以上の爆薬量であったにもかかわらず SIFCON パネル中のスポール破壊箇所は剥落には至らなかった。このことは、同箇所が延性に富んだ変形状を示したために、それが直下の緩衝材を押し潰す間に SIFCON パネル本体から分離することなく、最終的にはパネル裏面から 20mm 離れた RC 版が障害物となることでその変形が停止した可能性を示唆している。

表-7 に破壊モード一覧を示す。いずれの試験体構成においても破壊モードが「クレータ」から「スポール」へと変化するスポール限界に近い条件を特定することができた。また、表中で破壊モードが「クレータ」となっている実験データのうち最も爆薬量が多い条件をスポー

表-5 接触爆発試験体一覧

実験	ID	厚さ [mm]					爆薬種類	W_a [g]	W_m [g]
		T_{SED}	T_A	T_{RC}	T_{SEIR}	T_b			
1	1-1-0-25.9	10	10	60	0	80	SEP	30	25.9
	1-1-0-34.6	10	10	60	0	80	SEP	40	34.6
	1-1-0-43.2	10	10	60	0	80	SEP	50	43.2
	1-2-0-43.2	10	20	60	0	90	SEP	50	43.2
	1-2-0-51.9	10	20	60	0	90	SEP	60	51.9
	1-2-0-60.5	10	20	60	0	90	SEP	70	60.5
	1-3-0-51.9	10	30	60	0	100	SEP	60	51.9
	1-3-0-60.5	10	30	60	0	100	SEP	70	60.5
	1-3-0-69.2	10	30	60	0	100	SEP	80	69.2
	2-2-0-60.5	20	20	60	0	100	SEP	70	60.5
	2-2-0-64.9	20	20	60	0	100	SEP	75	64.9
	2-2-0-69.2	20	20	60	0	100	SEP	80	69.2
	3-2-0-77.8	30	20	60	0	110	SEP	90	77.8
	3-2-0-86.5	30	20	60	0	110	SEP	100	86.5
	3-2-0-95.1	30	20	60	0	110	SEP	110	95.1
2	1-1-1-181	10	10	60	10	90	含水	240	181
	1-1-1-196	10	10	60	10	90	含水	260	196
	1-1-1-211	10	10	60	10	90	含水	280	211

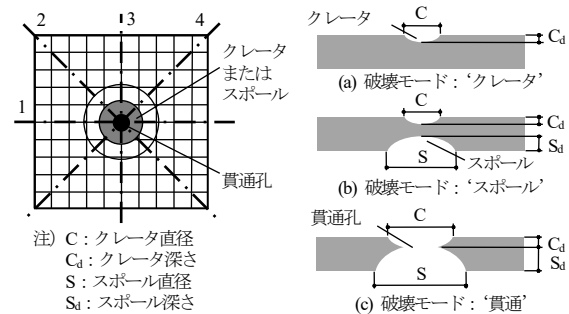
注) T_b ：総厚、 W_a ：実際の爆薬量、 W_m ：爆薬の TNT 等価質量



(a) 試験体および爆薬の設置方法

(b) 爆薬の物性値		
	SEP 爆薬	含水爆薬
状態	膠質	膠質
密度 [g/cm ³]	1.30	1.15～1.23
爆速 [m/s]	6900	5500～6000
熱エネルギー [MJ/kg]	3.71	3.23

図-2 接触爆発試験方法



注) C：クレータ直径
C_d：クレータ深さ
S：スポール直径
S_d：スポール深さ

図-3 局部破壊寸法の定義

ル限界と位置付けた場合、SIFCON パネルと緩衝材の合計厚さが増加するほどスポール限界爆薬量が増大する傾向にあることが判る。なお、表-6 において、裏面中央を中心とする円形のひび割れが生じている試験体が幾つか認められ、これらはその試験条件がスポール限界に近い条件であったことを示しているものと考えられる。

(2) 局部破壊寸法

普通 RC 版を対象とした損傷評価式（修正 McVay 式）⁹⁾によれば、その損傷深さは下式により評価される。

クレータ深さ

$$C_d/T = -0.046 \cdot T/W_m^{1/3} + 0.42 \quad (2)$$

全損傷深さ（クレータ深さとスポール深さの和）

$$(C_d + S_d)/T = C_d/T \quad (3.6 < T/W_m^{1/3}) \quad (3)$$

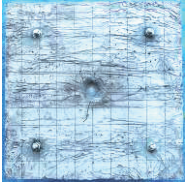
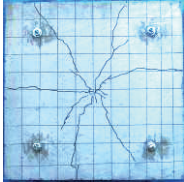
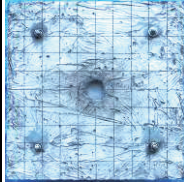
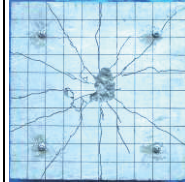
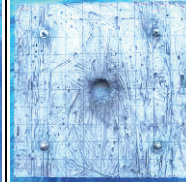
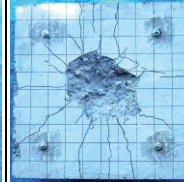
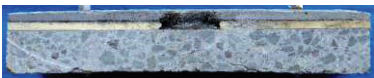
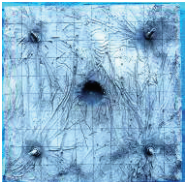
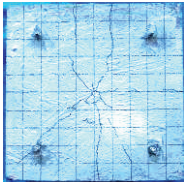
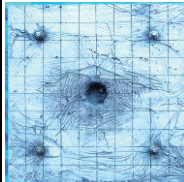
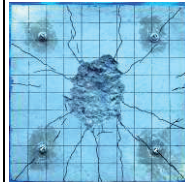
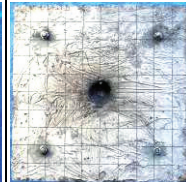
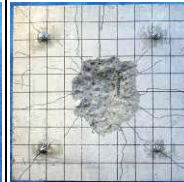
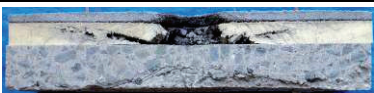
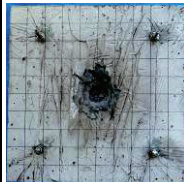
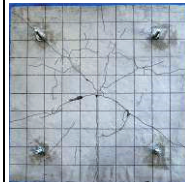
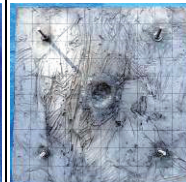
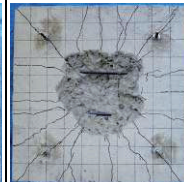
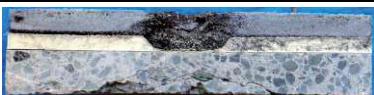
$$(C_d + S_d)/T = -0.49 \cdot T/W_m^{1/3} + 2.0 \quad (2.0 \leq T/W_m^{1/3} \leq 3.6) \quad (4)$$

$$(C_d + S_d)/T = 1.0 \quad (T/W_m^{1/3} < 2.0) \quad (5)$$

ここに、 C_d ：クレータ深さ [cm]、 S_d ：スポール深さ [cm]、 T ：版厚 [cm] である。なお、スポール深さは全損傷深さからクレータ深さを差し引くことで求められる。

図-4 に総厚 T_b で無次元化したクレータおよびスポー

表-6 代表的な試験体の破壊性状（実験 1）

a) 爆発面側 SIFCON パネル厚：10mm，緩衝材厚：10mm						
左：爆発面 右：裏 面	W _a =30g (W _m =25.9g)		W _a =40g (W _m =34.6g)		W _a =50g (W _m =43.2g)	
						
切断面						
b) 爆発面側 SIFCON パネル厚：10mm，緩衝材厚：30mm						
左：爆発面 右：裏 面	W _a =60g (W _m =51.9g)		W _a =70g (W _m =60.5g)		W _a =80g (W _m =69.2g)	
						
切断面						
c) 爆発面側 SIFCON パネル厚：30mm，緩衝材厚：20mm						
左：爆発面 右：裏 面	W _a =90g (W _m =77.8g)		W _a =100g (W _m =86.5g)		W _a =110g (W _m =95.1g)	
						
切断面						

注) 支持位置は左右両端であり，視認できた爆発面および裏面のひび割れを強調して示している。

ル深さの測定値を示す。なお，図中には総厚が等しい RC 版に関する式(2)～(5)による計算値も併記している。

無次元クレータ深さ C_d/T_0 は修正 McVay 式による計算値よりも一様に大きくなっており，その傾向は緩衝材厚さが大きい場合ほど顕著である。これは，上述の通り爆薬直下の緩衝材が完全に破砕されたためであるが，SIFCON パネル中のスポール破壊箇所が粉砕されていなかった SIFCON パネル厚 30mm かつ緩衝材厚 20mm のケースにおいては緩衝材厚が等しい他の試験体よりも C_d/T_0 がやや低減されていることが判る。

無次元スポール深さ S_d/T_0 は，全層を普通コンクリートと見做した修正 McVay 式による計算値よりも明らかに低減されており，最大で 0.5 程度の低減が認められる。このことは，爆発面近傍のコンクリートを SIFCON と緩衝材に置き換えることがスポール抑止を図る上で有効であることを示唆している。

修正 McVay 式⁹⁾では，普通 RC 版におけるクレータおよびスポールの深さ－直径関係を下式で与えている。

クレータ深さ－直径関係

$$C_d/T = 0.20 \cdot C/T \quad (C/T < 1.6) \quad (6)$$

$$C_d/T = 0.016 \cdot C/T + 0.30 \quad (1.6 \leq C/T) \quad (7)$$

表-7 試験体の破壊モード一覧（実験 1）

T _{SIFD} [mm]	T _A [mm]	爆薬の TNT 等価質量 W _m [g]									
		25.9	34.6	43.2	51.9	60.5	69.2	77.8	86.5	95.1	
10	10	○	●	●							
10	20			○	○	●					
10	30				○	●	●				
20	20					○	●	●			
30	20								○	○	
										●	

注) 破壊モードは，○：‘クレータ’，●：‘スポール’

スポール深さ－直径関係

$$S_d/T = 0.15 \cdot S/T \quad (S/T < 2.9) \quad (8)$$

$$S_d/T = -0.017 \cdot S/T + 0.71 \quad (2.9 \leq S/T) \quad (9)$$

図-5 および 6 に本実験データと上式による計算値との関係を示す。クレータの形状は，式(6)による計算値よりも深さ方向に大きくなる傾向にある。これは上述の通り，爆薬直下で緩衝材が破砕されたためであると考えられる。

スポールの形状に関しては，スポール限界近傍でスポールがやや歪な形状となった試験体 1-1-0-34.6 および 2-2-0-64.9 がやや逸脱しているものの，それを除けば式(8)による計算値と概ね良く一致する傾向にある。従って，本緩衝システムを適用することによりスポールは生じ難くなるものの，スポール限界を超える条件下では普通 RC

版と同様の形状を有するスポールが生じると考えられる。

(3) SIFCON パネルおよび緩衝材の等価コンクリート厚さの評価

本緩衝システムを適用した部材の損傷評価法構築のためには、SIFCON パネルおよび緩衝材それぞれの等価コンクリート厚さを明確にしておくことが重要であると考えられる。そこでここでは、部材のスポール限界を確保する上で必要な SIFCON パネルおよび緩衝材の等価コンクリート係数の導出を試みる。

修正 McVay 式によれば、普通 RC 版におけるスポール限界は、下式(9)により算出される。

$$T/W_m^{1/3} = 3.6 \quad (10)$$

ここで、本緩衝システムを適用した RC 版における SIFCON パネルおよび緩衝材の等価コンクリート係数をそれぞれ α および β とおくと、式(10)は以下のように書き換えられる。

$$(T_{RC} + \alpha \cdot T_{SIF,D} + \beta \cdot T_A)/W_m^{1/3} = 3.6 \quad (11)$$

式(11)に本実験で得られたスポール限界に近い 5 データを当てはめて重回帰分析を行った結果、下式が得られた。

$$(T_{RC} + 2.04 \cdot T_{SIF,D} + 2.06 \cdot T_A)/W_m^{1/3} = 3.6 \quad (12)$$

図-7 に式(12)の計算精度を示す。若干のばらつきはあるものの、式(12)の左辺は平均的にはスポール限界値である $3.6\text{cm/g}^{1/3}$ に近い値となっており、重回帰分析における重相関係数は 0.996 であったことから、概ね妥当な精度を有しているものと考えられる。また、式(12)によれば、SIFCON パネルと緩衝材の等価コンクリート係数はともに 2 程度となり、エネルギー吸収要素としての SIFCON パネルと、応力波減衰要素としての緩衝材のスポール低減への寄与は同程度であることが判る。

3.2 実験 2

(1) 破壊性状および破壊モード

表-8 に実験 2 における試験体の破壊性状を示す。3 試験体全てにおいて、爆発面側 SIFCON パネルには爆薬直下近傍で貫通が生じた。また、SIFCON パネルの貫通孔からやや離れた外周部付近に爆薬位置を中心とする同心円状のひび割れの発生が認められた。このひび割れは、爆発面側 SIFCON パネルが直下の緩衝材を押圧しながら裏面へ向けてたわむことにより生じたものと推察される。

緩衝材は、いずれの試験体においても爆薬直下近傍で完全に押し潰された状態にあった。また、補強対象である RC 版には、全試験体で貫通が生じた。

以上のように、全試験体で爆発面側 SIFCON パネルから RC 版にかけて貫通が生じたが、裏面側 SIFCON パネルの損傷に関しては、爆薬直下近傍を起点とした放射状ひび割れが発生している点は共通しているものの、爆薬量に応じて差異が認められた。すなわち、 $W_a=240$ および 260g ($W_m=181$ および 196g) では面外方向へ向けてたわみ変形が生じ、これによりパネルにひび割れの発生が

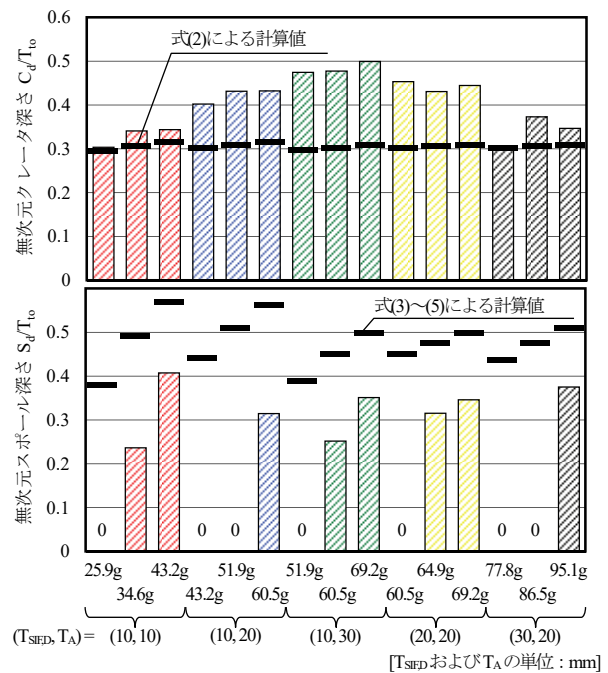


図-4 無次元化された損傷深さの測定値 (実験 1)

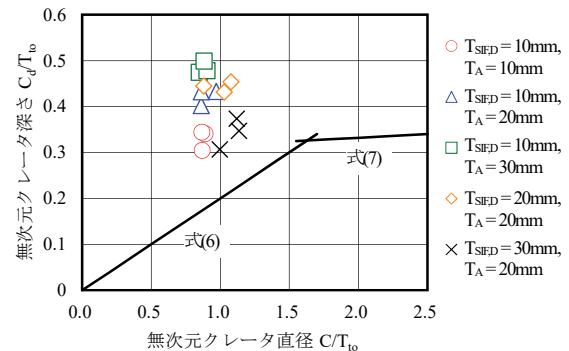


図-5 クレータ深さとクレータ直径との関係 (実験 1)

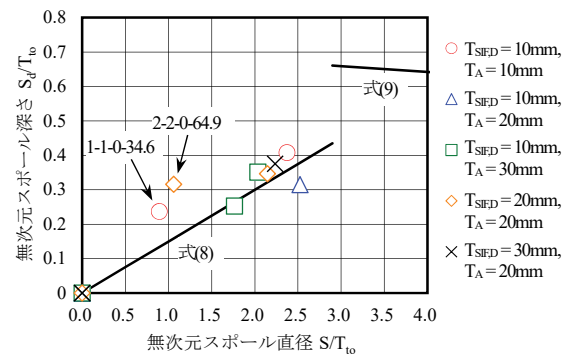


図-6 スポール深さとスポール直径との関係 (実験 1)

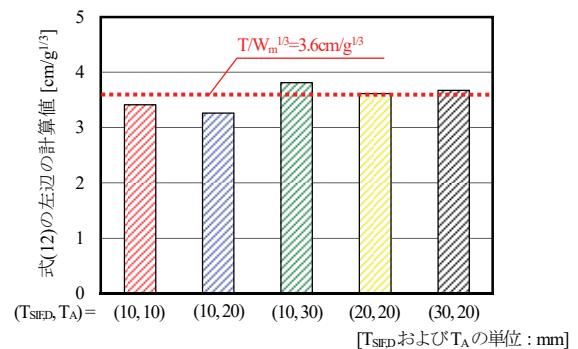
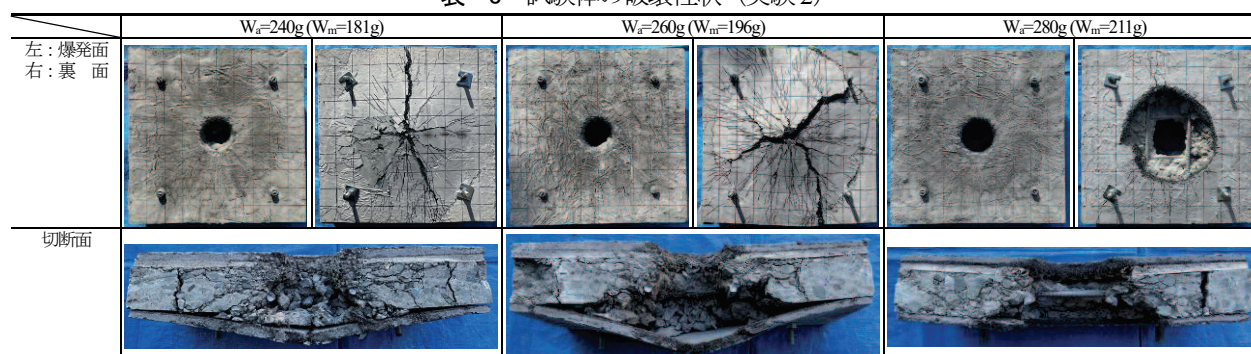


図-7 式(12)の計算精度 (実験 1)

表-8 試験体の破壊性状（実験2）



注) 支持位置は左右両端であり、視認できた爆発面および裏面のひび割れを強調して示している。

見られたが、W_a=280g (W_m=211g) になるとパネルに押抜きせん断に起因する貫通が生じた。従って、本試験体においては W_a=260g (W_m=196g) がスポール限界に近い条件であると考えられる。なお、上述の通り裏面側 SIFCON パネルが貫通していない場合であっても爆発面側 SIFCON パネルから RC 版にかけて貫通が生じているため、裏面側 SIFCON パネルに貫通が生じた場合には試験体全体に貫通が生じることになり、本試験体には‘スポール’の破壊モードは存在しない。従って、本試験体ではスポール限界と貫通限界とが一致することになる。

(2) 各層の等価コンクリート厚さを用いた損傷評価

前節で示した通り、爆発面側 SIFCON パネルおよび緩衝材の等価コンクリート係数は、それぞれ 2.04 および 2.06 であると考えられる。また、裏面に接合した SIFCON パネルの等価コンクリート係数は 10.8 であることが確認されている⁹⁾。従って、各層の等価コンクリート係数を用いたスポール限界の評価式は、以下のようになる。

$$\frac{2.04 \cdot T_{SIF,D} + 2.06 \cdot T_A + T_{RC} + 10.8 \cdot T_{SIF,R}}{W_m^{1/3}} = 3.6 \quad (13)$$

上式に本実験条件 (T_{SIF,D}=1cm, T_A=1cm, T_{RC}=6cm, T_{SIF,R}=1cm) を代入すると、スポール限界は W_m=196g となり、本実験結果と一致する。従って、各層の等価コンクリート厚さを用いることにより、本積層部材の損傷を評価できる可能性がある。但し、現段階で実験データ数が限定的であるため、今後更なる検討が必要である。

4. まとめ

本研究の範囲内で、以下に示す知見が得られた。

- (1) SIFCON パネルおよび緩衝材から成る爆発緩衝システムに関して、RC 版のスポールを抑止するための SIFCON パネルおよび緩衝材の等価コンクリート係数はそれぞれ 2.04 および 2.06 であり、これらのスポール低減への寄与は同程度であると考えられた。
- (2) 爆発面に上述の爆発緩衝システムを、裏面に SIFCON パネルをそれぞれ接合した RC 版のスポール限界は、各層の等価コンクリート厚さを用いて評価できる可能性が示唆された。

但し、現段階で実験データ数が限定的であるため、今後更なる検討が必要である。

謝辞

接触爆発試験は熊本大学産業ナノマテリアル研究所の爆発実験施設にて行われたものであり、外本和幸教授、田中茂准教授、徳田誠助教、草野健技術補佐員より多大なご協力をいただきました。また、実験にあたり、熊本大学技術部の戸田善統技術専門職員、瀧崎ありさ技術職員ならびに当時の学生である江本昇平氏、黒木隆道氏、友廣康太氏、平野大輔氏、美濃憲杜氏よりご協力をいただきました。さらに、本研究は JSPS 科研費基盤研究 (C) (課題番号：23K04105, 研究代表者：山口信) の助成を受けて実施されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山口信ほか：スラリー充填繊維コンクリート薄肉パネルにより裏面接着補強した鉄筋コンクリート版の接触爆発に対する耐爆性能，日本建築学会構造系論文集，Vol. 89, No. 823, pp. 1060-1071, 2024
- 2) 岸徳光ほか：三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型屋外実験，構造工学論文集，Vol. 46A, pp. 1257-1265, 1995
- 3) 別府万寿博ほか：近接爆発を受けるアルミハニカム複合パネルの緩衝効果に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 66A, pp. 1036-1046, 2020
- 4) 樋口洸太郎ほか：SIFCON パネルと緩衝材とを併用した RC 版への爆発緩衝工法に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 207-210, 2022
- 5) Morishima, S., et al.: Effects of Fiber Type on Blast Resistance of Slurry-Infiltrated Fiber Concrete under Contact Detonation, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 18, pp. 157-167, 2020
- 6) 森下政浩ほか：接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷，構造工学論文集，Vol. 46A, pp. 1787-1797, 2000
- 7) 山口信ほか：SIFCON の接触爆発に対する耐爆性能とそれを用いた積層型耐爆構造部材の開発，コンクリート工学論文集，Vol. 34, pp. 105-116, 2023

ごく少量のナイロン繊維をあと添加したコンクリートの
接触爆発に対する耐爆性能に関する研究

A STUDY ON BLAST RESISTANCE OF CONCRETE WITH A SMALL VOLUME OF
NYLON FIBERS ADDED LATER AGAINST CONTACT DETONATION

米田ひかり*, 山口 信**, 北村塔子*, 長友法樹***
YONEDA Hikari, YAMAGUCHI Makoto, KITAMURA Toko and NAGATOMO Hoju

* 熊本大学 大学院自然科学教育部 博士前期課程（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1）
** 博(工) 熊本大学 大学院先端科学研究部 准教授（〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1）
*** (株) エイオービー アンド ダヴィンチ インターナショナル 代表取締役（〒896-0001 鹿児島県いちき串木野市曙町 84）

キーワード： ナイロン繊維, あと添加, 耐爆性能, 接触爆発, 局部破壊
(Nylon fiber, Later addition, Blast resistance, Contact detonation, Local failure)

1. はじめに

接触爆発を受ける鉄筋コンクリート (RC) 版の損傷としては、裏面側コンクリートが破片化して飛散し、裏面剥離 (スポール) が生じる点に特徴がある。建物内部の人命を防護するためにはこのスポールを抑止することが許容限界であり、著者らはこれまでに、繊維補強セメント複合材料 (FRCC) の適用がスポール抑止の面で有効であることを明らかにしてきた^(例えば1)2)。

ところで、FRCC の高靱性、ひいては良好な耐爆性能 (スポール抑止性能) を得るためには、FRCC の繊維体積率はある程度高くする必要がある。それを可能にするため、FRCC のマトリックスとしては、単位粗骨材量が通常よりも少ないコンクリート調合¹⁾もしくはモルタル調合²⁾が適用される場合が多い。しかし、これら FRCC では低ヤング係数に起因する部材剛性低下等の問題が懸念される。さらには、これら FRCC は調合が特殊であるが故に実施工で採用され難い点に難点がある。この面で、通常のコンクリートに短繊維をあと添加することである程度の耐爆性能を確保できれば、利便性の観点から有用と成り得るものと思われる。

そこで本研究では、イスラエルで開発され、繊維分散性を向上させた補強用繊維であるナイロン繊維³⁾⁴⁾に着目し、普通コンクリートにそれをあと添加して製造したナイロン繊維混入コンクリート (NFC) の接触爆発に対する耐爆性能について実験的検討を行った。

2. 実験方法

2.1 使用材料・調合および製造方法

表-1 に使用材料を示す。補強用繊維として用いたナイロン繊維は、アスペクト比が 800~1000 と大きく、尚且つ繊維分散性を向上させるための特殊な表面処理が施されたものである。ベースコンクリートは、表-2 に示す通り、設計基準強度 30MPa、目標スランプ 18cm の条件で調合設計した。繊維体積率 V_f は、0, 0.026, 0.15, 0.30 および 0.60% の 5 水準で変化させたが、 V_f が 0.15% 以上

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	山砂+砕砂 混合品 表乾密度: 2.70g/cm ³ , 吸水率: 2.32%, 最大寸法: 2.5mm, 粗粒率: 2.57
粗骨材	碎石 2005 表乾密度: 3.05g/cm ³ , 吸水率: 0.41%, 最大寸法: 20mm, 実積率: 57.1%
化学混和剤	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸系エーテル化合物 流動化剤 (増粘剤-液タイプ) ポリカルボン酸系化合物と界面活性剤系特殊増粘剤の複合体
補強用繊維	ナイロン繊維 材質: ナイロン 66, 密度: 1.16g/cm ³ , 直径×長さ: 12~15μm×12mm, 引張強度: 550MPa, 引張弾性率: 4200MPa

表-2 ベースコンクリートの調合

W/C [%]	s/a [%]	単位量 [kg/m ³]				Sp/C [%]	Slump [cm]
		C	W	S	G		
54	45.0	338	183	809	1115	0.6	19.0

注) W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, C: セメント, W: 水, S: 細骨材, G: 粗骨材, Sp: 高性能 AE 減水剤

の調合では、繊維混入によるスランプ低下を補償するため流動化剤を対セメント質量比で1.5%（同製品の標準添加量の最大値）添加した。また、 $V_f=0.60\%$ においてはスランプが著しく低下し、密実な試験体の作製が困難と判断されたため、スランプ試験のみの実施とした。なお、 $V_f=0.026\%$ は、収縮ひび割れ低減を目的に選定された、本繊維の標準添加量である。

混練には容量55Lの強制2軸攪拌型ミキサを用いた。 $V_f=0.026\%$ では、練り上がったベースコンクリートに繊維を加えて3分間練り混ぜた。 V_f が0.15%以上の調合では、流動化剤を添加して90秒間攪拌した後、繊維を加えて上記と同様に混練した。

2.2 スランプ値

図-1 にスランプ値と繊維体積率との関係を示す。図中には既報³⁾の目標スランプ18cmのベースコンクリート（流動化剤無添加）を用いた試験結果を併記している。流動化剤を添加することにより、 $V_f=0.15\%$ 程度までであればベースコンクリートと同等のスランプ値が得られていることが判る。また、 $V_f=0.15\%$ 一定で比較した場合、流動化剤添加によりスランプ値に約10cmの増加が認められる。 V_f が0.15%を超えるとスランプ値に低下が認められたが、 $V_f=0.30\%$ 程度までであれば、マッシュパネ部品や2次製品への適用を想定する上では十分なワーカビリティが得られることが確認された。

2.3 静的力学特性

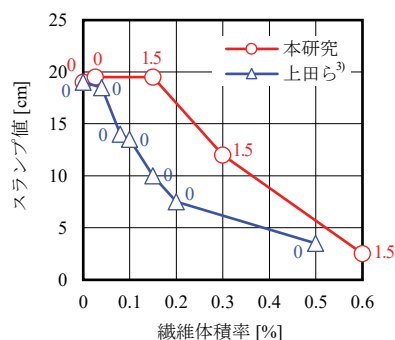
表-3 に静的力学特性の測定値を示す。ここで、本研究のように少量の繊維を含有するFRCCの靱性評価方法として、ASTM C1018 に示される残存強度係数が有効であることが示されている⁴⁾。表-3 を見ると、 $V_f=0.30\%$ に至るまで繊維体積率の増加に伴い残存強度係数が増大していることが確認される。それ以外の力学特性に着目すると、 $V_f=0.15\%$ において圧縮および曲げ強度に低下が認められ、その理由は現段階で判然としないが、それを除けば繊維混入による圧縮特性および曲げ強度の変化はそれほど顕著でないことが判る。

2.4 接触爆発試験方法

(1) 試験体

試験体は図-2 に示す通り、500mm 四方、厚さが80mmの正方形版とした。配筋が局部破壊に及ぼす影響は小さいことが知られているが⁵⁾、割れ防止程度の目的で120mm ピッチの格子状鉄筋を版厚中央に配した。

表-4 に試験体一覧を示す。 $V_f=0.026, 0.15$ および0.30%のそれぞれについて、爆薬量を40, 60 および80gの3水準で変化させた。繊維無混入の試験体については、既往



注) プロットエリア中の数値は流動化剤添加率（対セメント質量比）[%]

図-1 スランプ値と繊維体積率との関係

表-3 静的力学特性の測定値

V_f [%]	γ [kN/m ³]	σ_B [MPa]	E [GPa]	$\varepsilon_{0.002}$ [μ]	σ_f [MPa]	$R_{45/60}$ [%]
0	24.1 [1.00]	42.3 [1.00]	30.8 [1.00]	2870 [1.00]	6.60 [1.00]	0 [—]
0.026	23.3 [0.965]	41.5 [0.982]	30.3 [0.983]	2710 [0.944]	7.24 [1.10]	2.88 [—]
0.15	24.0 [1.00]	33.0 [0.780]	28.9 [0.939]	2820 [0.985]	5.83 [0.883]	7.02 [—]
0.30	24.4 [1.01]	47.1 [1.11]	30.4 [0.988]	3400 [1.19]	7.04 [1.07]	7.21 [—]

注) γ : 気乾単位体積重量, σ_B : 圧縮強度, E: ヤング係数, $\varepsilon_{0.002}$: 圧縮強度時のひずみ, σ_f : 曲げ強度, $R_{45/60}$: 残存強度係数 ($n_1=45, n_2=60$), [] 内は $V_f=0\%$ に対する比を表す。圧縮試験は $\phi 100 \times 200$ mm 円柱供試体により、曲げ試験は $100 \times 100 \times 400$ mm 角柱供試体の中央3点曲げ載荷（スパン長300mm）によりそれぞれ実施した。

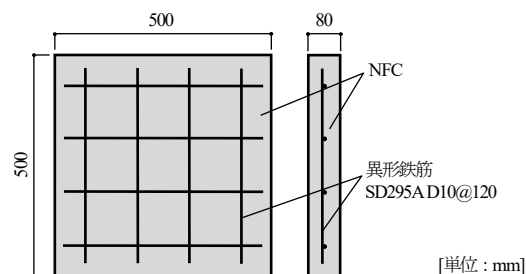


図-2 試験体の形状・寸法および配筋

表-4 試験体一覧

No.	ID	V_f [%]	T [mm]	W [g]	$T/W_m^{1/3}$ [cm/g ^{1/3}]
1	0-60	0	80	60	2.25
2	0.026-40	0.026	80	40	2.57
3	0.026-60	0.026	80	60	2.25
4	0.026-80	0.026	80	80	2.04
5	0.15-40	0.15	80	40	2.57
6	0.15-60	0.15	80	60	2.25
7	0.15-80	0.15	80	80	2.04
8	0.30-40	0.30	80	40	2.57
9	0.30-60	0.30	80	60	2.25
10	0.30-80	0.30	80	80	2.04

注) T: 版厚, W: 爆薬量, $T/W_m^{1/3}$: 換算コンクリート厚さ

の普通コンクリート版を対象とした損傷評価式⁵⁾の精度を検証する程度の目的で、爆薬量は60gのみとした。

ここで、接触爆発を受ける普通コンクリート版のスポール限界および貫通限界は下式⁵⁾により求められる。

$$\frac{T}{W_m^{1/3}} = \frac{T}{W^{1/3}} \cdot \left(\frac{K_{TNT}}{K} \right)^{1/3} = \begin{cases} 3.6; \text{スポール限界} \\ 2.0; \text{貫通限界} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、T: 版厚 [cm], W_m : 爆薬のトリニトロトルエン (TNT) 等価質量 [g], W: 爆薬量 [g], K_{TNT} : TNTの熱エネルギー [=4.29MJ/kg], K: 使用した爆薬の熱エネルギー

ギー $[=3.23\text{MJ/kg}]$ である。表-4 には各試験体の換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ を併記しているが、普通コンクリート版であれば、爆薬量 40 および 60g で破壊モードは‘スポール’、爆薬量 80g で‘貫通限界’と予想される。

(2) 試験方法

図-3 に示すように試験体を 2 本の木製架台上に設置し、その上面中央で 6 号電気雷管を用いて含水爆薬（密度： $1.15\sim 1.23\text{g/cm}^3$ ，爆速： $5800\sim 6000\text{m/s}$ ，熱エネルギー： 3.23MJ/kg ）を起爆させた。装薬の形状は直径と高さが等しい円柱形とし、試験中は起爆後のスポール破壊片の飛翔状況を高速度カメラにより側面から撮影した。

(3) 局部破壊深さの測定方法

接触爆発試験終了後、試験体に生じた局部破壊の深さを測定した。なお、図-4 に示す通り、クレータおよびスポールの深さは、それぞれ爆発面および裏面からクレータおよびスポールの最深部までの距離とした。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

表-5 にプレーンコンクリート版の破壊性状を示す。なお、表-5 および後掲の表-6 において、試験体の支持

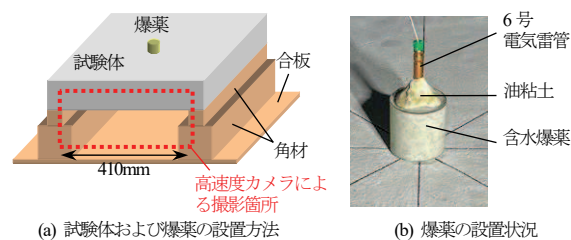


図-3 接触爆発試験方法

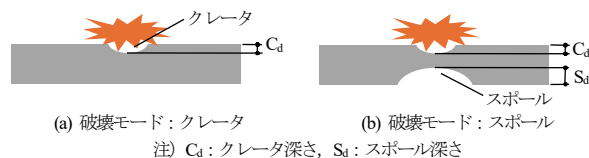


図-4 破壊モードおよび局部破壊深さの定義

表-5 プレーンコンクリート版の破壊性状

		爆薬量 60g	
左: 爆発面 右: 裏面			
	切断面		

表-6 NFC 版の破壊性状

a) $V_f=0.026\%$		爆薬量 40g		爆薬量 60g		爆薬量 80g	
左: 爆発面 右: 裏面							
	切断面						
b) $V_f=0.15\%$		爆薬量 40g		爆薬量 60g		爆薬量 80g	
左: 爆発面 右: 裏面							
	切断面						
c) $V_f=0.30\%$		爆薬量 40g		爆薬量 60g		爆薬量 80g	
左: 爆発面 右: 裏面							
	切断面						

位置は左右両端であり、視認できた爆発面および裏面のひび割れは強調している。爆薬直下に楕形のクレータが生じるとともに、裏面中央にはそれよりも大規模なスポールが生じたが、貫通孔の発生は認められなかった。すなわち、この試験体の破壊モードは‘スポール’であり、式(1)による計算結果と一致していることが判る。

表-6にNFC版の破壊性状を示す。爆薬量40gは、上述の通り普通コンクリート版であれば破壊モードが‘スポール’となる条件である。しかし、 $V_f=0.30\%$ の試験体では、裏面中央付近で剥離に伴う浮きが生じたものの、スポール破壊片の飛散は完全に抑止された状態にあった。すなわち、0.30%程度の繊維体積率であっても、耐爆性能の向上が明確に認められた。なお、同試験体の切断面には、スポール破壊面を形成するはずであった斜めひび割れが発達している様相が確認されるが、ナイロン繊維の架橋作用により、それより下部の飛散が十分に抑止されていることが判る。

爆薬量40g、 $V_f=0.026\%$ の試験体では、スポールは生じたもののごく小さなスポール破壊片が少量脱落した程度であった。また、 $V_f=0.15\%$ では、 $V_f=0.026\%$ よりもスポールの規模が増大しているが、その理由として、 $V_f=0.15\%$ の試験体では層状に剥離した比較的大きなスポール破壊片が生じていたことから、破壊片自体が強化されて質量が大きくなった結果、その飛散を抑止するための繊維架橋力が不足した可能性が考えられる。

爆薬量60gでは、繊維体積率に関わらず全試験体で破壊モードは‘スポール’となった。また、爆薬量80gは、上述の通り普通コンクリート版であれば‘貫通限界’となる条件であるが、NFC版全てにおいて貫通孔の発生は認められなかった。

3.2 局部破壊深さ

(1) プレーンコンクリート版

接触爆発を受ける普通コンクリート版の損傷評価式(修正McVay式)は、森下ら⁹⁾によって提案されている。同式によれば、普通コンクリート版の損傷深さは、式(1)に示した換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ を用いて、以下のように求められる。

クレータ深さ

$$C_d/T = -0.046 \cdot T/W_m^{1/3} + 0.42 \quad (2)$$

全損傷深さ(クレータ深さとスポール深さの和)

$$(C_d + S_d)/T = C_d/T \quad (3.6 < T/W_m^{1/3}) \quad (3)$$

$$(C_d + S_d)/T = -0.49 \cdot T/W_m^{1/3} + 2.0 \quad (2.0 \leq T/W_m^{1/3} \leq 3.6) \quad (4)$$

$$(C_d + S_d)/T = 1.0 \quad (T/W_m^{1/3} < 2.0) \quad (5)$$

なお、スポール深さは式(3)~(5)による計算値から式(2)による計算値を減じることで求められる。

爆薬量60gのプレーンコンクリート版に関する局部破壊深さの実測値と式(2)~(5)による計算値との関係を図

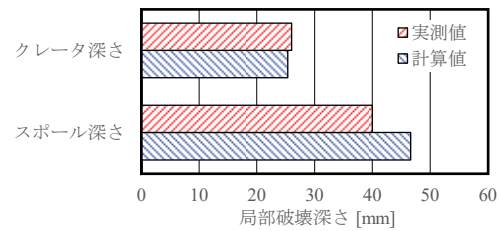


図-5 プレーンコンクリート版における局部破壊深さの実測値と計算値との比較

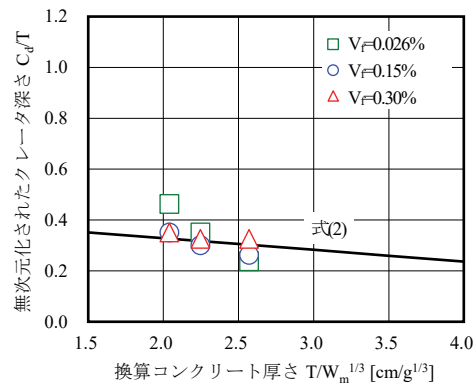


図-6 換算コンクリート厚さで整理したクレータ深さ

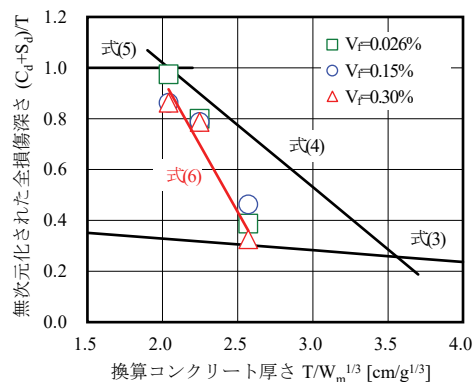


図-7 換算コンクリート厚さで整理した全損傷深さ

ー5に示す。スポール深さの計算値が実測値よりやや大きいものの、実測値と計算値とは概ね良く一致していることから、式(2)~(5)により妥当な精度でプレーンコンクリート版の局部破壊深さを評価できると考えられる。

(2) NFC版

図-6にクレータ深さを換算コンクリート厚さで整理した結果を示す。若干のばらつきはあるものの、NFC版のクレータ深さは式(2)による計算結果と平均的に良く一致する傾向にある。すなわち、ナイロン繊維を $V_f=0.30\%$ まで混入しても、クレータ深さはほとんど変化しないことが判る。

図-7に全損傷深さを換算コンクリート厚さで整理した結果を示す。本実験の範囲内で、スポール限界に近いと考えられる実験データが得られたのは $V_f=0.30\%$ の試験体であり、そのときの換算コンクリート厚さ $T/W_m^{1/3}$ は $2.57 \text{ cm/g}^{1/3}$ である。式(1)に示した通り、普通コンクリート版のスポール限界は $T/W_m^{1/3}=3.6 \text{ cm/g}^{1/3}$ であることか

ら、 $V_f=0.30\%$ の NFC を適用することでスポールを抑止するために必要な版厚を約 29%低減できることが判る。また、本実験の範囲内で、NFC 版 ($V_f=0.30\%$) に関する回帰式として、下式が得られる (決定係数は 0.932)。

$$(C_d + S_d)/T = -1.05 \cdot T/W_m^{1/3} + 3.06 \quad (6)$$

なお、式(6)は式(4)に比してやや急勾配になっており、これは、NFC ではスポール破壊片が繊維により補強されることでやや大きな破片となり、それが飛散に至ることで急速にスポール深さが増大するためであると推察される。

ところで長谷川ら⁹⁾は、ポリプロピレン繊維 (密度: 0.91g/cm^3 , 寸法: $\phi 0.7 \times 30\text{mm}$, 引張強度: 500MPa , 引張弾性率: 10GPa) を $V_f=2.0\%$ で混入したコンクリートのスポール限界が $T/W_m^{1/3}=2.7\text{cm/g}^{1/3}$ であることを報告しており、この値は本研究で対象とした NFC ($V_f=0.3\%$) のそれと比較して若干大きい。このことは、補強用繊維のアスペクト比 (ポリプロピレン繊維で 43.0, ナイロン繊維で 800~1000) の違いが耐爆性能に大きく影響する可能性²⁾を示唆している。

3.3 スポール破壊片の飛翔状況

図-8 に、例として爆薬量 60g の場合のスポール破壊

片の飛翔状況を示す。なお、撮影は $50\mu\text{s}$ おきに行ったが、紙数の都合上一部を抜粋して示している。いずれの試験体においても、スポール破壊部はかさぶた状に剥離している訳ではなく、破砕されたコンクリート片が爆薬直下近傍を頂点として飛翔する挙動を示していることが判る。

爆薬直下におけるスポール破壊片の飛翔距離と時間との関係を調べたところ、図-9 に示すように、いずれの試験体においても破壊片は飛翔距離 100mm 前後に至るまで等速直線的に飛翔していることが判った。そこで、これらのデータを線形回帰し、回帰式の傾きをもって飛翔速度とした。

図-10 に、爆薬量 60g の場合のスポール破壊片飛翔速度と繊維体積率との関係を示す。 $V_f=0.30\%$ において、繊維無混入と比較して 50%程度にまで飛翔速度が低減されていることが判る。また、 $V_f=0.026\%$ とごく少量の繊維を混入した場合であっても、30%程度の飛翔速度低減が認められる。このことから、換算コンクリート厚さがスポール限界を下回り、スポールが生じた場合であっても、ナイロン繊維混入はスポール破壊片飛翔速度の低減を図る上で有効であると考えられる。

ここで、図-11 に $V_f=0.30\%$ 、爆薬量 60g におけるスポール破壊面の様相を示す。破壊面からの突出繊維長さ

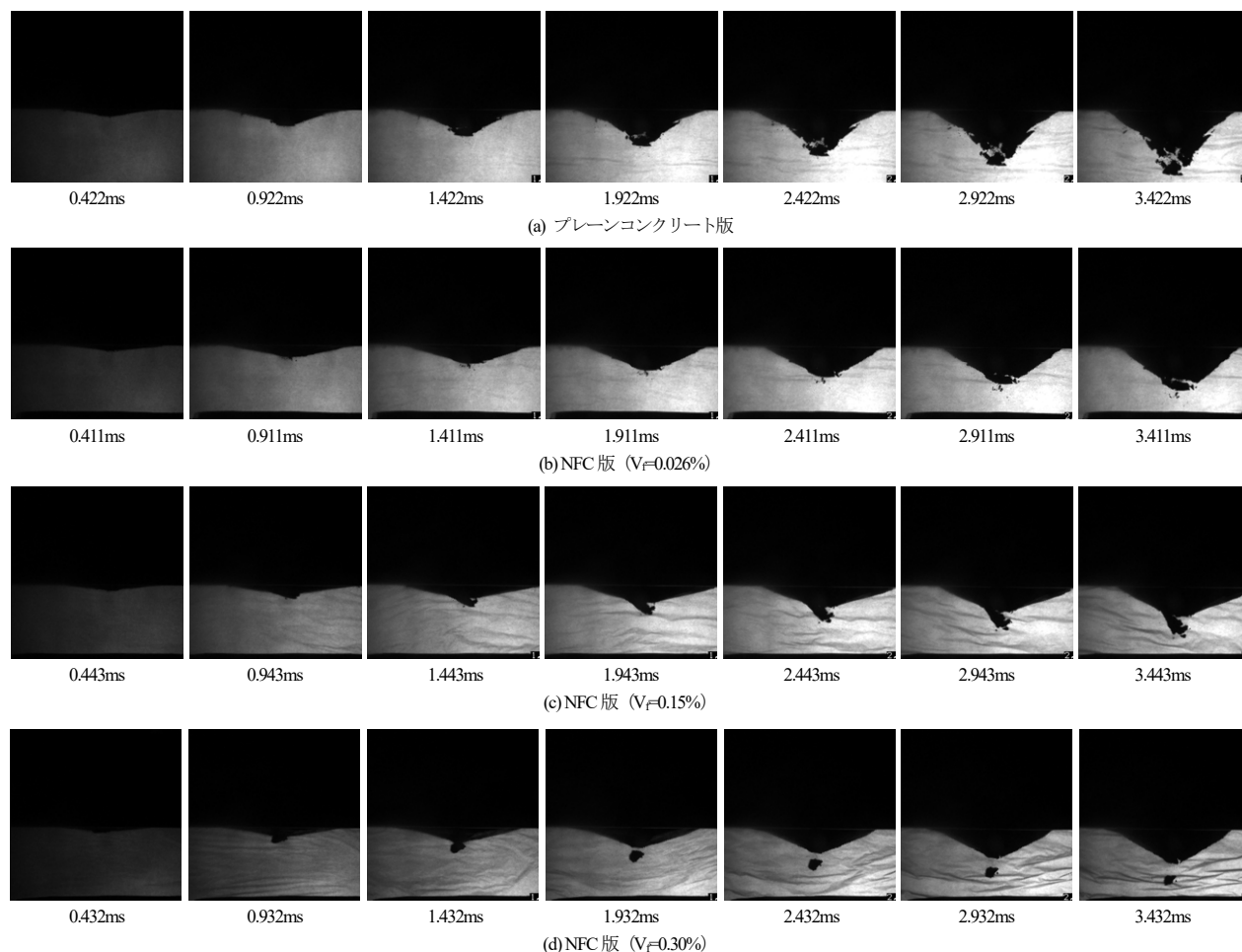
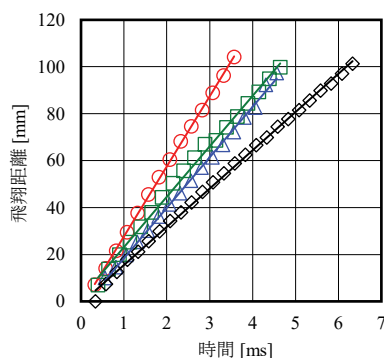


図-8 爆薬量 60g の場合のスポール破壊片の飛翔状況



凡例	V_f [%]	回帰式	決定係数
○	0	$D = 29.9t - 2.21$	1.00
△	0.026	$D = 21.5t - 3.17$	0.998
□	0.15	$D = 21.5t - 1.76$	0.996
◇	0.30	$D = 16.3t - 0.672$	0.998

注) D: 飛翔距離 [mm], t: 時間 [ms]

図-9 爆薬直下におけるスポール破壊片の飛翔履歴 (爆薬量 60g の場合)

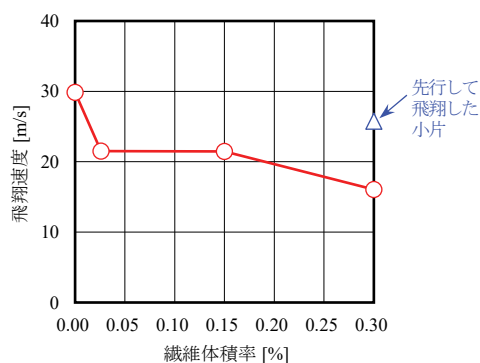


図-10 爆薬直下におけるスポール破壊片飛翔速度と繊維体積率との関係 (爆薬量 60g の場合)

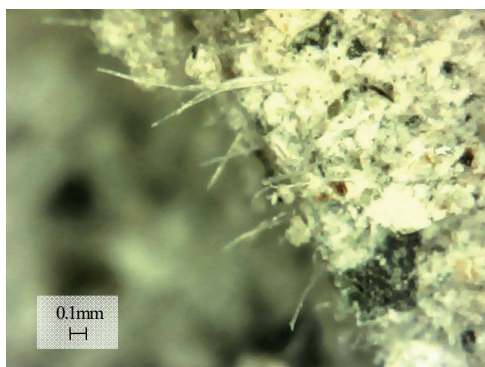


図-11 $V_f=0.30\%$ 、爆薬量 60g の NFC 版におけるスポール破壊面の繊維の様相

の平均値 3mm (繊維長の 1/4) が繊維破断・非破断を判断する上での目安となるが⁷⁾、図中の突出繊維長さは 3mm を超えていないように見受けられることから、繊維破断によりスポール発生に至ったことが予想される。すなわち、スポール破壊面を架橋したナイロン繊維が破断に至るまで十分に伸長することでスポール破壊片の運動エネルギーを吸収した結果、スポール破壊片の飛翔速度が低減されたものと推察される。

4. まとめ

本研究の範囲内で、以下に示す知見が得られた。

- (1) ナイロン繊維を体積率で 0.30% 混入することにより、スポールを抑止する上で必要な版厚を約 29% 低減できることが示された。
- (2) 換算コンクリート厚さがスポール限界を下回り、スポールが生じた場合であっても、ナイロン繊維混入がスポール破壊片飛翔速度の低減を図る上で有効であると考えられた。

但し、現段階で実験データ数が限定的であるため、今後更なる検討が必要である。

謝辞

本研究は、(株)エイオービー アンド ダヴィンチ インターナショナル、(株)日本ランテック、岡三リビック(株)との共同研究として行われました。また、接触爆発試験は熊本大学産業ナノマテリアル研究所の衝撃実験棟にて行われたものであり、外本和幸教授、田中茂准教授、徳田誠助教、草野健技術補佐員よりご協力を賜りました。さらに、熊本大学技術部の戸田善統技術専門職員および濱崎ありさ技術職員より研究支援を受けるとともに、友廣康太氏、福島鉄平氏、村上智紀氏をはじめとする熊本大学 山口研究室の皆様より多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山口信, 村上聖, 武田浩二, 三井宜之: ポリエチレン繊維補強コンクリートの接触爆発に対する耐爆性能, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 619, pp. 187-194, 2007
- 2) 森島慎太郎, 山口信, 渋谷颯志郎, 小川敦久, 片山隆: 接触爆発を受ける PVA 繊維補強モルタル版の局部破壊に及ぼす材料因子の影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 85, No. 771, pp. 779-789, 2021
- 3) 上田賢司, 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 大谷俊浩, 林田健二, 鶴田康徳, 黒野薫: ナイロン繊維混入コンクリートの諸物性に関する研究 (その 1. フレッシュ性状および初期ひび割れ), 日本建築学会九州支部研究報告, Vol. 40, No. 1, pp. 89-92, 2001
- 4) 黒野薫, 佐藤嘉昭, 大谷俊浩, 濱永康仁: 合成短繊維混入コンクリートの靱性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 419-424, 2006
- 5) 森下政浩, 田中秀明, 伊藤孝, 山口弘: 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 1787-1797, 2000
- 6) 長谷川大, 市野宏嘉, 別府万寿博, 室賀陽一郎: 接触爆発を受ける PPFRC 板の耐爆性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 912-924, 2019
- 7) 秋浜繁幸: 炭素繊維補強セメント複合材 (CFRC) について, 日本複合材料学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 145-151, 1984

鋼板製一体形タンクのバルジングに関する振動実験と FEM 解析の研究

A STUDY ON BULGING OF VIBRATION EXPERIMENT AND FEM ANALYSIS IN THE STEEL TANK

小野泰介*, 杉崎吉明**, 橋本進**

ONO Taisuke, SUGISAKI Yoshiaki and HASHIMOTO Susumu

*博（工）（一社）鋼板製一体形タンク工業会（〒104-0031 東京都中央区京橋 2-6-15 MCA 京橋ビル 2 階）

**（一社）鋼板製一体形タンク工業会（〒104-0031 東京都中央区京橋 2-6-15 MCA 京橋ビル 2 階）

キーワード：鋼板製一体形タンク，バルジング，有限要素法，固有振動数解析，振動実験
(steel tank, bulging, finite element method, natural frequency analysis, vibration experiment)

1. はじめに

東日本大震災や熊本地震において、広範囲でバルジング（内容液と構造体の連成振動）によるものとされている貯水槽の被害が多数発生している。また、記憶に新しい令和6年能登半島地震においてもバルジングによる貯水槽の被害が報告されている。

一方、貯水槽の中でも鋼板製一体形タンク（以下、鋼板製タンク）は今までの震災・大地震においても被害事例が無く、破壊されず高い耐震性を有していることが大きな特徴である。そのため、他の形式の貯水槽では被害が出ているのにもかかわらず、なぜ鋼板製タンクは被害が出ていないのかを検証する。

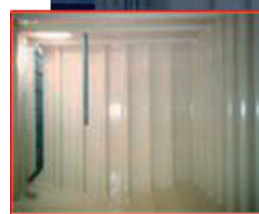
ところでバルジングについては、2022年4月に改訂された水道施設耐震工法指針・解説 2022年版¹⁾（日本水道協会）で新たに規定が追加されたばかりであるが、具体的な設計事例等は未だ示されていない状況にある。

また、2024年9月に矩形地上水槽（鋼製）の耐震設計に関する研究（Aqua-TANK プロジェクト）報告書²⁾（水道技術研究センター）が発表され、最新の研究に関する知見が報告されるに至っているが、バルジングについての設計指針等は明示されていないのが現状である。

よって、バルジング問題の解明が急務であり、貯水槽の耐震安全性を向上させるのが緊急の課題である。

本研究では、3000mm 角の鋼板製タンクについて実機振動実験を行い、耐震性を明らかにする。また、鋼板製タンクのバルジング固有振動数を実機振動実験と有限要素法（以下、FEM）による固有振動数解析により検証する。

外観



内部

写真-1 鋼板製タンク

表-1 鋼板製タンクの諸元

材質	SS400
板厚（呼び厚さ）	4.5mm
特徴	補強材なし、コルゲート
短期許容応力度	235MPa
質量	約 2800kg

2. 鋼板製タンクの実機振動実験

鋼板製タンクにおいて大型振動装置を用いて地震動での実機振動実験を行い、耐震性を明らかにするものである。

2.1 実験の概要

実機振動実験に使用する鋼板製タンクは写真-1 に示すような寸法 3000×3000×3000mm のタンクで、常用水深である 2700mm まで水道水を満たし、愛知工業大学が所有する大型振動装置に固定された架台にボルトで固定した上で振動実験を行う。

鋼板製タンクは、板厚 4.5mm、材質は SS400 を使用し、内外面溶接一体のコルゲート構造になっているので、剛性を十分に有する構造である。そのため内部には補強材は無い構造となっている。表-1 に鋼板製タンクの諸元を示す。

2.2 計測項目・計測機器

鋼板製タンクの耐震性を検証するために、側板の応答加速度を計測する。本実験で計測する応答加速度は、図-1 に示すように側板の中心に底面から高さ 500mm、1500mm、2500mm の3箇所計測する。加速度計は（株）共和電業社製の小形低容量加速度変換器 AS-5GB を用いる。

また、データのサンプリング周波数は 50Hz である。データ整理の仕方として、10Hz 以上ではノイズが多く含まれ、且つ応答への影響は小さいと考えられるので、フィルタリング処理を行う。

2.3 入力地震波

入力地震波には、1995 年の兵庫県南部地震における神戸海洋気象台で観測された JMA 神戸 NS 方向観測波（以下、神戸波）を使用する。しかし、この神戸波の入力を試みたが大型振動装置の能力の関係から、図-2 に示す出力振動台変位で加振する。また、このときの出力振動台加速度を図-3 に示す。気象庁の震度算出手順³⁾に基づき算定した震度は 6 強程度である。加振方向は加速度計のある側板に直交に加振する。

本実験では水深を 2700mm に統一して実験を行うため、水槽のスロッシング固有振動数は、1 次モードで 0.49Hz、2 次モードでは 0.87Hz である。図-4 に図-3 で示した神戸波の加速度パワースペクトルを示す。ここに、今回使用する鋼板製タンクのスロッシング固有振動数 1、2 次モードを破線で示す。図-4 から明らかなように、スロッシング固有振動数 1、2 次モードと箕輪⁴⁾が提案しているバルジングの発生周波数域（2.5～6.7Hz 程度）は異なっていることがわかる。

2.4 実験結果

(1) 側板の応答加速度

図-5 に計測された側板の応答加速度を示す。鋼板製タンクは約 9m/s^2 程度となっている。鋼板製タンクの側板の応答加速度は、高さ方向の計測位置による違いは見られず、ほぼ同等の値を示している。これは、鋼板製タンクは板厚 4.5mm で、且つコルゲート構造であるので、強度が均一になっていることによるものと思われる。また、側板が振動せず、最大加速度が約 9m/s^2 程度になったと考えられる。このことから鋼板製タンクは、側板が振動せずバルジングが起きにくいことがわかる。

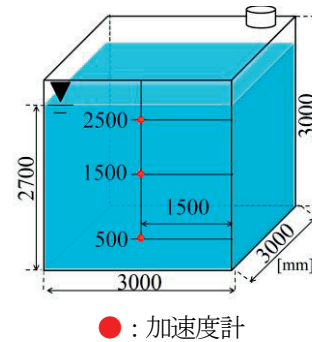


図-1 加速度計の配置位置

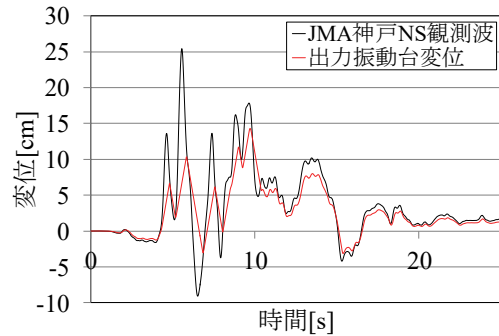


図-2 出力振動台変位

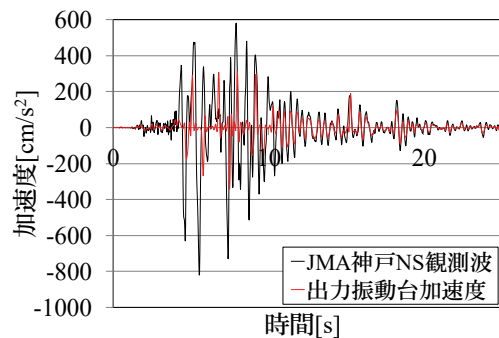


図-3 出力振動台加速度

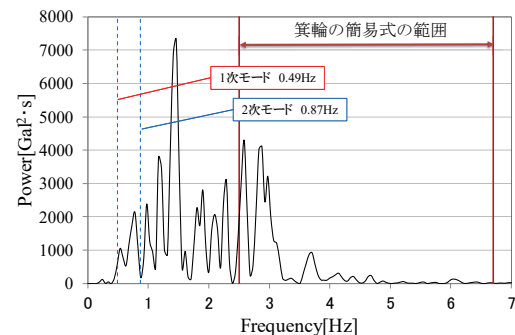


図-4 神戸波のパワースペクトル

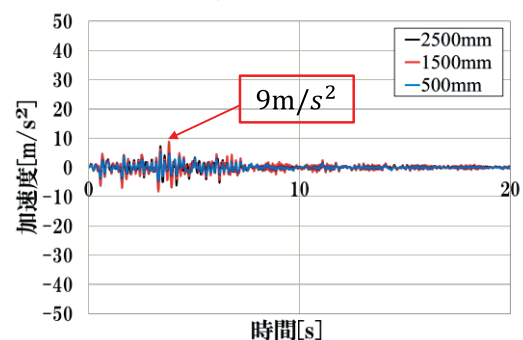


図-5 側板の応答加速度

(2) 側板の応答加速度のスペクトル解析結果

バルジング固有振動数は、側板の応答加速度から得られたスペクトル周波数であるとする。これより、側板で計測された応答加速度をスペクトル解析した結果を図-6 に示す。鋼板製タンクは9.7Hz 付近にスペクトルピークが存在している。鋼板製タンクは高周波側にスペクトルピークを示す結果になった。

さらに図-4 に示した神戸波のスペクトルと比較すると、本実験で用いた鋼板製タンクは、箕輪⁴⁾が検証したタンクより側板の剛性が高いと推測できる。また、地震動は数 Hz 台の成分が卓越する地震動が多いことから、鋼板製タンクは高周波側にスペクトルピークを有するので、側板が共振してタンクが破損する危険が非常に少ないと推察できる。

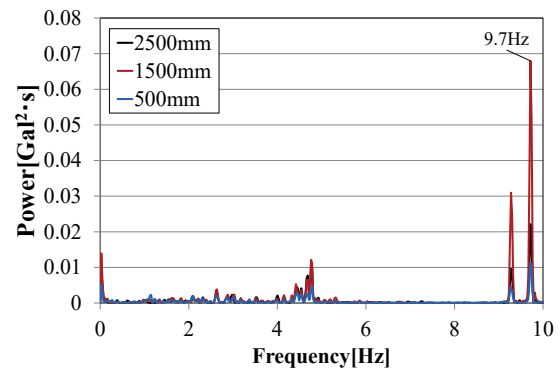


図-6 側板の応答加速度のパワースペクトル

3. FEM 解析

実機振動実験で扱った鋼板製タンクの FEM 解析を行い、バルジング固有振動数解析の結果を示すとともに、実機振動実験との比較を行う。これにより、鋼板製タンクのバルジング時の耐震性と本解析の有用性について報告する。

表-2 解析条件

ヤング率[GPa]	205
ポアソン比 ν	0.3
密度[kg/m ³]	7850
水槽部	shell 要素
流体部	ポテンシャルベース 3D 流体要素
拘束条件	底面 4 辺固定
流体水面	自由表面

3.1 解析方法

解析手法は志賀⁵⁾や竹本⁶⁾の研究と同様に、水は非粘性・非圧縮の理想流体と考えると流体運動にはポテンシャル理論が適用できるとする。さらに、構造である壁面と流体面で圧力が同一となる境界条件を用いて流体と構造の連成問題としてモデル化している。流体の解析には Navier-Stokes の方程式を用い、定量的な現象を把握するならば、3 次元モデルにより忠実に流体-構造をモデル化することが必要である。しかし、この解析には多大な時間を要することから、ここでは実験結果から得られた減衰を適切に表現するため Rayleigh 減衰を仮定、導入したポテンシャル理論を用いることで、実用的な計算時間で解析可能で定性的な現象を掴むこととする。特にバルジング振動を扱うことから、水面付近の揺動による流体運動が活発とならないで、現象を説明するのに十分な手法と考えている。

3.2 解析のモデル化

表-2 に解析条件を示す。本研究は、FEM 解析ソフトウェアである ADINA を用いる。このソフトの特徴は、流体部だけの解析と流体問題と構造問題を一つのマトリックスで解く流体-構造連成解析が可能なことである。水槽部は Shell 要素、流体水面は自由水面とし、基礎方程式はポテンシャルベース 3 次元流体方程式を用いることで解析を実行する。また拘束条件は底面部 4 辺固定、メッシュを作成する際にはタンクと流体との節点の結合を行わないことにより、滑らかに液面挙動が起きるよう配慮している。

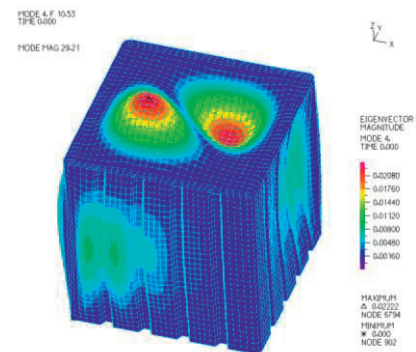


図-7 板厚 4.5mm 10.53Hz のモード図

3.3 バルジング固有振動数解析

本解析では、バルジング固有振動数を推定する。箕輪の研究⁴⁾によるとタンク側板のバルジング固有振動数は、2.5～6.7Hz と推定される。本解析では算出不足を防ぐため、固有振動数解析を一度に解析を実行するのではなく、0.1Hz 毎 1000mode で算出する。

図-7 にバルジング固有振動数解析結果のモード図を示す。本解析においてバルジング固有振動数は 10.53Hz となった。鋼板製タンクの実機振動実験の側板の応答加速度のパワースペクトル結果では 9.7Hz 付近が卓越していた。解析モデルにおいて、天板と底板の形状を簡略化していることなどから多少の固有振動数の誤差はあるが、概ね一致しているといえる。

また、落合⁷⁾によると米国では 10Hz 以上の振動数のみで設計基準地震動を超える地震動は耐震強度上の考慮を不要とする手法が採られている。落合のこの報告では、我国で観測された地震動記録を用いて、地震動の 10Hz を超える振動数成分は地震時の健全性への影響が極めて小さく、米国の手法が妥当であることを確認した。地震動の高振動数成分、特に 10Hz 以上の成分については、加速度応答が大きくなる場合であっても、そのエネルギーは小さいことから、構造物の損傷に与える影響は少ないとされている。このことから 10Hz 以上の地震動は貯水槽にも被害を与えないと考えられる。よって本論文においても、10Hz までの地震動で論じる。貯水槽の耐震設計においてタンク側板の固有振動数を 10Hz 以上に設計することは、バルジングの被害も軽減されると推測する。

さらに図-8 に仮定的に板厚を 2.3mm にした 5.45Hz のモード図と図-9 に板厚とバルジング固有振動数解析の関係を示す。この結果を見ると、板厚を薄くしていくと、当然のことながら側板の剛性が下がるため固有振動数も下がった値を示す。また、板厚 3.95mm は板厚 4.5mm 時の JIS 板厚下限許容値の厚さである。これより、実機振動実験側板の応答加速度のパワースペクトル値 9.7Hz により近い 9.96Hz の固有振動数を解析結果で示した。

ここで、箕輪⁴⁾によるとタンク側板のバルジング固有周期は 0.15~0.4s と推定している。つまり、バルジング固有振動数は 2.5~6.7Hz 程度と言える。正規の板厚（呼び厚さ）4.5mm の鋼板製タンクにおいて、側板の剛性が高く、内容液と側板が連成して振動したとしても小さく、バルジング振動が発生しないと考える。しかし、この解析結果から鋼板製タンクでも、板厚を薄くした場合（2.8mm の時、6.95Hz）、地震動と側板が共振し、バルジング振動が発生すると考えられる。このため、鋼板製タンクを設計する際、安全性を担保するために鋼板製一体形タンク工業会の定める最低板厚 4.5mm の側板厚を保つことが必要になるといえる。

4. おわりに

本研究では鋼板製タンクにおいて大型振動装置を用いた実機振動実験を行い、鋼板製タンクの耐震性を明らかにしてきた。具体的には、鋼板製タンクの側板での応答加速度のスペクトルピークは、比較的高い値を示すので、応答加速度の値が小さく、側板の応答加速度のスペクトルのピークが高周波側にあることから、バルジング発生域周波数に入っていないことがわかる。このことから、鋼板製タンクのバルジングに関してはここで取り上げたサイズでは危険が非常に少なく、安全であると考えられる。

ところで、最新の指針¹⁾や報告書²⁾において、バルジングによる設計基準が無い状況下であるので、早急にバルジングに関する新たな設計基準を規定する必要があると考

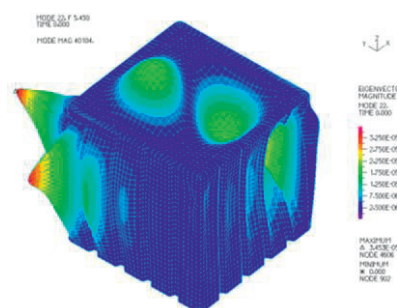


図-8 板厚 2.3mm 5.45Hz のモード図

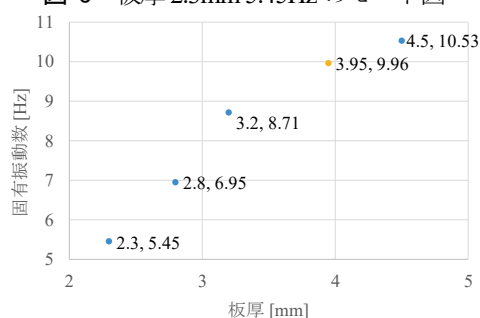


図-9 板厚とバルジング固有振動数解析の関係

える。特に側板の応答加速度のスペクトルのピークがバルジング発生域周波数に入る可能性が高いタンクに関して該当する。これらの形式のタンクは、最新の設計基準で設計されたタンクにも多数の被害発生例²⁾が報告されていることを鑑み、早急にバルジングに関する新たな設計基準を規定することが、必要不可欠である。

また、鋼板製タンクに着目し FEM 解析を行い、固有振動数解析の結果を示した。固有振動数は鋼板製タンクの実機加振実験の結果と概ね一致し、板厚を薄くすると固有振動数は低下した。このため、設計時にはバルジングを考慮し、鋼板製一体形タンク工業会の定める最低板厚 4.5mm の板厚を保つことが必要になるといえる。

参考文献

- 1) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 2022 年版
- 2) 水道技術研究センター：矩形地上水槽（鋼製）の耐震設計に関する研究（Aqua-TANK プロジェクト）報告書，2024.9.
- 3) 気象庁ホームページ：
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/index.html>
- 4) 箕輪親宏：スロッシングインパクトを考慮した長方形水槽の耐震性に関する研究，東京工業大学学位請求論文，2004.11.
- 5) 志賀典親他：振動実験と数値流体解析を用いたのバルジングの特徴の把握，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol.74, No.2，pp.285-294, 2019.1
- 6) 竹本純平他：ステンレス製パネルタンクの流体と構造を連成しての時刻歴応答解析，土木学会論文集 A2（応用力学），76(2)，pp.153-162, 2020.
- 7) 落合兼寛：10Hz を超える地震動成分と機械設備の健全性に関する考察，第 14 回日本地震工学シンポジウム（2014），GO11-Fri-6，pp.1780-1788.

構造形式の異なる二槽式 SUS タンクのバルジング発生時における水圧分布の検討

STUDY OF WATER PRESSURE DISTRIBUTION DURING BULGING OF TWO-LAYER SUS TANKS WITH DIFFERENT STRUCTURAL TYPES

平井秀*, 平野廣和**, 佐藤尚次***

HIRAI Shu, HIRANO Hirokazu and SATO Naotsugu

*中央大学, 理工学研究科都市人間環境学専攻博士前期課程 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

***工博, 中央大学教授, 総合政策学部 (〒192-0393 東京都八王子市東中野 742-1)

****工博, 中央大学教授, 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

キーワード: バルジング, SUS タンク, 二槽式タンク, 仕切り板, 有限要素法
(bulging, SUS tank, two-layer tank, partition plate, FEM)

1. はじめに

地震時における貯水槽の被害の一つに、バルジングが挙げられ、新たに設計に関する規定が追加されるに至っている。ここで、配水池などで使われる一般的な SUS パネルタンクは内部が中仕切りのパネル(以下、仕切り板とする)で 2 つに分けられた二槽式構造となっている。2022 年の福島県沖地震発生の際には、震度 5 弱であるにも拘わらず、仕切り板からの漏水(接合部分の溶接破断)が生じた事例がある。

よって、本報では構造形式の異なる 2 種類の既存の実機二槽式 SUS タンクを対象とした有限要素解析を実施する。具体的には二槽式 SUS パネルタンクと二槽式ステンレス鋼製角形タンクを対象とする。両者を対象にそれぞれ固有振動数解析を実施し、仕切り板の固有振動数を推定する。次に推定された振動数と同様の振動数を持つ正弦波を入力加速度とする時刻歴応答解析を実施する。解析結果から得られた仕切り板と側壁部に作用する合計圧力の最大値を高さ毎に算出して比較することで、両者の SUS タンクの仕切り板における耐震設計上の課題や挙動特性を明らかにするものである。

2. 現状の仕切り板の設計の考え方

ステンレス鋼製角形配水池設計指針²⁾より、仕切り板の構造は側壁と同構造とし、通常使用時(両槽満水)と片槽使用時(片槽空水)の 2 種類の使用状態を想定して設計を行っている。

通常使用時は、図-1 に示すように静水圧 P_0 による荷重が仕切り板両面から相殺し合う方向に作用することか

ら、無視できると考えている。また、地震時動水圧 P_k による荷重は、仕切り板両面で同一方向に作用し加算されることとしている。このとき、静水圧 P_0 、地震時動水圧 P_k について、式(1)に表すように、高さ方向の圧力の総和は静水圧が地震時動水圧より大きくなるのが仮定されている。

$$P_0 > P_k \quad (1)$$

このとき、仕切り板に作用する静水圧と動水圧の和(以下、合計圧力とする)と側壁に作用する合計圧力の関係は式(2)のように表される。

$$P_0 + P_k > (P_0 + P_k) + (-P_0 + P_k) = 2P_k \quad (2)$$

ここで左辺は側壁に作用する合計圧力、右辺は仕切り板に作用する合計圧力である。式(2)より静水圧による荷重が

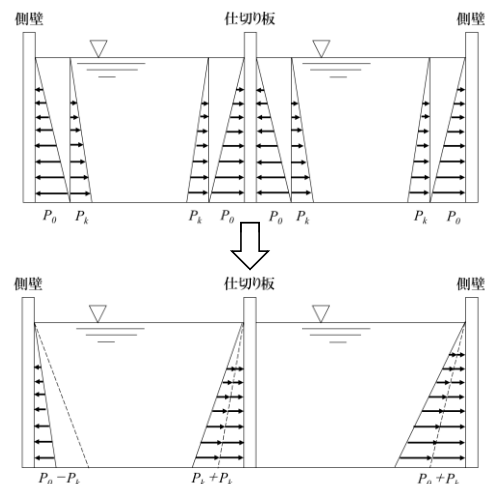


図-1 通常使用時の壁面に作用する圧力

仕切り板両面から相殺し合い、仕切り板に作用する圧力の総和は地震時動水圧 P_k の 2 倍の圧力のみであるとされている。そのため式(1)の条件下においては、仕切り板に作用する合計圧力である動水圧の 2 倍の値が側壁の静水圧と地震時動水圧の合計より小さくなる。したがって仕切り板の設計の際は、側壁と同構造とすれば耐震性を担保でき、設計に関する検討は不要とされている。

3. 解析対象のタンク

本報では、図-1、2 に示す二槽式 SUS タンクを対象とする。一つ目は一槽あたり 6000×3000×3000mm の二槽式 SUS パネルタンクである。そのため、タンクの内部に仕切り板を有している構造となっている。タンク内部には SUS 製の補強材がジャングルジムのように入り組んだ構造で配置されている。また、タンク壁面のパネルの板厚が他の材料のタンクと比較して薄いためこの部分の剛性が低いこと、さらに全溶接構造なので溶接長が長いこと、また補強材とパネルの剛性差が大きいなどの特徴を有している。解析は、内容量の 90% の水深 2700mm まで両槽に注水された状態で行う。二槽式 SUS タンクの諸元を表-1 に示す。二つ目は一槽あたり 14000×14500×6000mm の二槽式ステンレス鋼製角形タンクであり、SUS パネルタンクと同様に内部に仕切り板と補強材がジャングルジムのように入り組んだ構造で配置されている。またタンク壁面が一体型であり、矢板形状となっている。解析は、内容量の 93% の水深 5600mm まで両槽に注水された状態で行う。二槽式タンクの諸元を表-2 に示す。

本解析では、汎用有限要素プログラム ADINA を用いる。

解析条件は、水槽部を Shell 要素、補強材は Beam 要素、流体水面は自由水面とし、基礎方程式はポテンシャルベース 3 次元流体方程式を用いることで解析を実施する。メッシュ作成する際は、タンクと流体との節点接合を行いわないように考慮する。また拘束条件は底面周りの辺の変位と回転を固定している。

表-1 二槽式 SUS パネルタンクの諸元

材質	天井板	SUS329J4L
	壁面3段目	SUS329J4L
	壁面2段目	SUS444
	壁面1段目	SUS444
	アニュラプレート	SUS304A
	底板	SUS304A
幅 (mm)		6000
長さ (mm)		6000
高さ (mm)		3000
有効容量 (m ³)		83
水位 (mm)		2700
厚さ (mm)	壁面3段目	1.5
	壁面2段目	2.0
	壁面1段目	2.5

表-2 二槽式タンクの諸元

構造部材	寸法 (材質)
屋根	2mm (SUS329J4L)
壁面3段目	2mm (SUS329J4L)
壁面2段目	3mm (SUS316)
壁面1段目	6mm (SUS316)
中間補強体2段目	6mm×B200mm (SUS316)
中間補強体1段目	18mm×B250mm (SUS316)
アニュラプレート	6mm (SUS316)

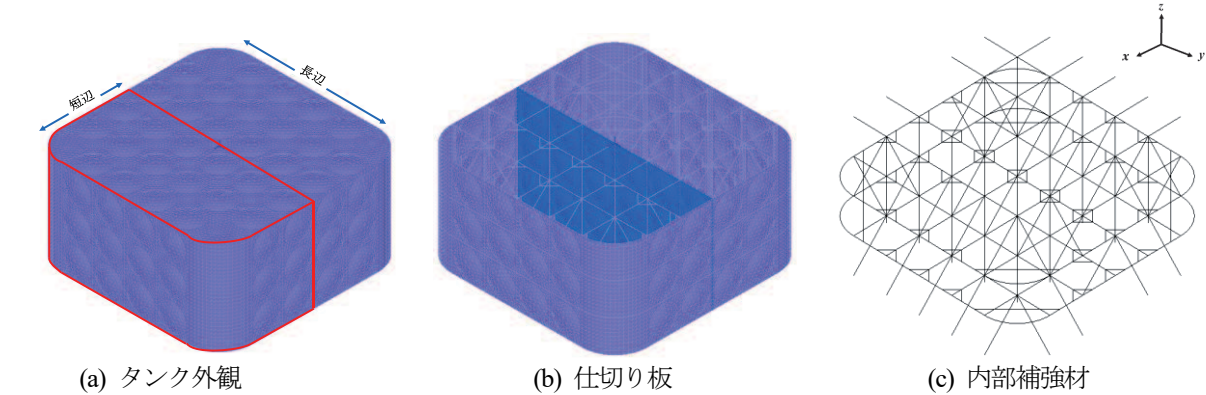


図-1 実機二槽式 SUS タンクの解析モデル

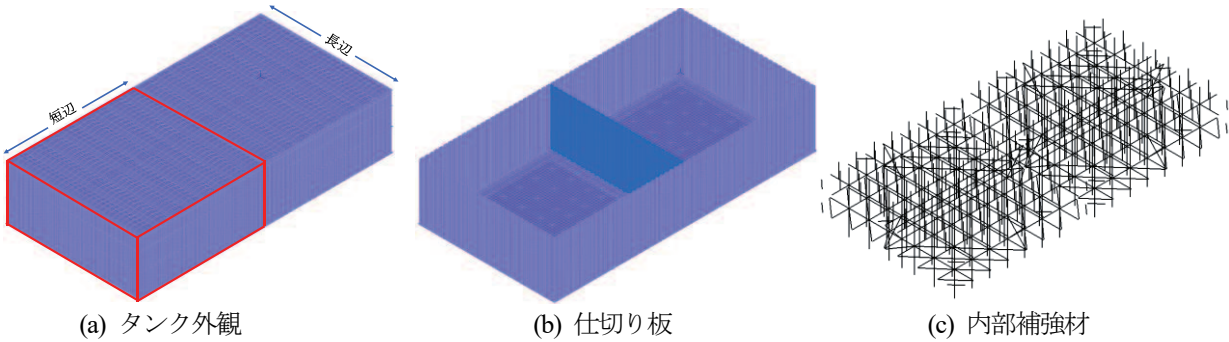


図-2 実機二槽式タンクの解析モデル

4. 固有振動数解析

4. 1 解析概要

固有振動数解析を行い、仕切り板の固有振動数を推定する。解析範囲は、二槽式 SUS パネルタンクは 0~20Hz、二槽式ステンレス鋼製角形タンクは 1.5Hz~10Hz とし、算出された刺激係数と対応するモード図により仕切り板のバルジング固有振動数を推定する。

4. 2 解析結果

固有振動数解析から得られたモード図を図-3 に示す。図-3(a)より、7.93Hz において仕切り板に顕著なモードの発生が確認できる。よって、仕切り板におけるバルジング固有振動数は 7.93Hz であると推定される。次に図-3(b)より、3.80Hz は長辺壁面に顕著なモードが発生していることから、側壁、仕切り板の固有振動数は、3.80Hz である可能性が高いと考えられる。

5. 時刻歴応答解析

5. 1 解析概要

固有振動数解析から推定されたバルジング固有振動数と同じ振動数を持つ正弦波を入力加速度とした時刻歴応答解析をそれぞれ行う。解析手順を以下に示す。

① 水を入れた状態における静的解析を実施

ここでは構造と流体の連成解析を行うため、自重の釣り合い計算を行い、時刻歴応答解析の初期条件とする。

② 正弦波を入力加速度とする時刻歴応答解析を実施

時刻歴応答解析では、外力として加速度を入力することにより解析を行う。二槽式 SUS パネルタンクでは 7.93Hz、二槽式ステンレス鋼製角形タンクでは 3.80Hz の正弦波を波数 10 波の入力加速度としてそれぞれ加振する。なおこの加速度は 350Gal であり、震度 6 弱相当である。加振方向は、加振軸とタンク長辺壁面が直角になる方向である。減衰は、タンク部に非線形問題に適用しやすいとされる Rayleigh 減衰 C を付加することで、減衰を付与している。

5. 2 解析結果

時刻歴応答解析結果から算出された仕切り板に作用する合計圧力と側壁部に作用する合計圧力、合計圧力から静水圧を差し引いた動水圧の高さごとの経時変化における最大値の比較をそれぞれ行う。二槽式 SUS パネルタンクと二槽式ステンレス鋼製角形タンクそれぞれの側壁部、仕切り板に作用する合計圧力の取得箇所は図-4、5 のそれぞれの図中に示す流体部の側壁部の中央部に位置する箇所とする。高さ方向に 0~2600mm の範囲で 100mm 毎に計

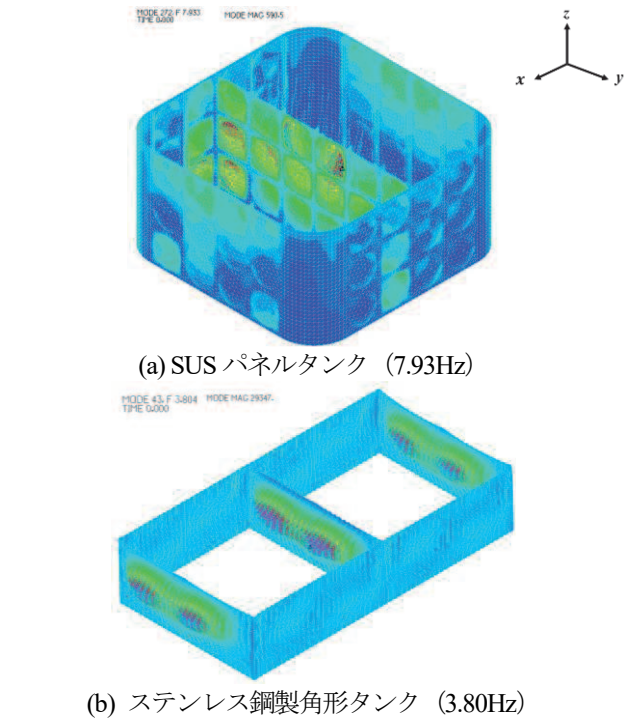


図-3 振動モード図

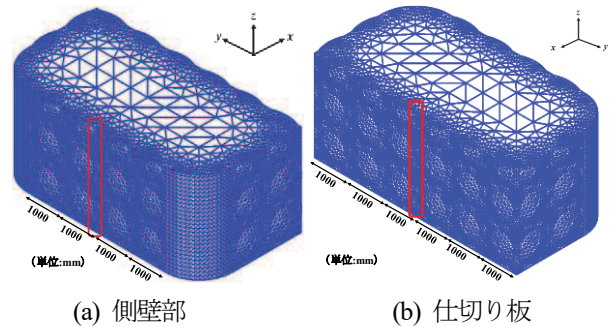


図-4 合計圧力の取得位置 (SUS パネルタンク)

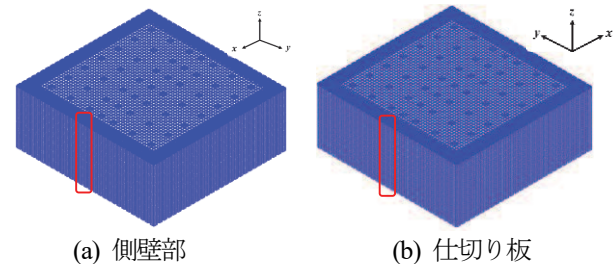


図-5 合計圧力の取得位置 (ステンレス鋼製角形タンク)

27 箇所取得する。図-4 より、二槽式 SUS パネルタンクは高さ方向に 0~2600mm の範囲で 100mm 毎に計 27 箇所、図-5 より、二槽式ステンレス鋼製角形タンクは高さ方向に 0~5600mm の範囲で 100mm 毎に計 57 箇所それぞれ取得する。

二槽式 SUS パネルタンクにおいて側壁部、仕切り板で取得された水圧の最大値と高さの関係を図-6 に示す。図-6 より、側壁部に作用する合計圧力と動水圧は概ね高さが下がるに従い大きくなり、パネルの接合部に対応する高さ 0mm、1000mm、2000mm で合計圧力はそれぞれ約 73,000Pa、約 52,000Pa、約 29,000Pa、動水圧はそれぞれ 47,000Pa、36,000Pa、22,000Pa、となっており、概ね全ての

高さにおいても動水圧の最大値が静水圧を上回る結果となっている。次に、仕切り板に作用する合計圧力と水圧は高さ 0mm から 400mm、500mm にかけて大きくなり、1000mm まで減少傾向となっている。高さ 1000mm から 1600mm、1700mm まで増加している。それ以降は減少傾向となっている。仕切り板も側壁部と同様に、概ね全ての高さにおいても動水圧の最大値が静水圧を上回っている。

二槽式ステンレス鋼製角形タンクにおける側壁部、仕切り板で取得された水圧の最大値と高さの関係を図-7 に示す。図-7 より、いずれの高さにおいて側壁、仕切り板ともに動水圧の最大値が静水圧を上回る結果となっている。側壁に作用する合計圧力と動水圧は共に、高さ 3000mm から 3500mm あたりまで増加傾向となっており、合計圧力は約 170,000Pa、動水圧は約 150,000Pa を最大値として、それ以降は減少傾向となっている。次に、仕切り板に作用する合計圧力は静水圧分布に概ね対応している。一方、仕切り板の動水圧分布は高さ 3200mm から 3600mm あたりまで増加傾向となっており、約 80,000Pa を最大値としてそれ以降は減少傾向となっている。

両者のタンクの比較より、SUS パネルタンクでは仕切り板の合計圧力が側壁と比較して大きいため耐震性が担保されていないことが確認できる。一方で、ステンレス鋼製角形タンクでは側壁の合計圧力が仕切り板と比較して大きいため耐震性が担保できていることが確認できる。これはタンクの側壁が一体型であることや矢板形状になっていることで SUS パネルタンクと比較して高い剛性を有しているためであると考えられる。ここで、現行の設計の考え方は仕切り板に作用する静水圧が地震時動水圧より大きくなることが仮定されているが、本解析においては両者のタンクともこの仮定が成立していない。よって当該箇所に関しては見直しが不可欠であると考えられる。

6. おわりに

本報では構造形式の異なる 2 種類の既存の実機二槽式 SUS タンクのを対象とした有限要素解析を実施し、具体的には二槽式 SUS パネルタンクと二槽式ステンレス鋼製角形タンクを対象にそれぞれ固有振動数解析を実施し、仕切り板の固有振動数を推定した。次に推定された振動数と同様の振動数を持つ正弦波を入力加速度とする時刻歴応答解析を実施し、両者の SUS タンクの仕切り板における耐震設計上の課題を明らかにすることを目的とした。

SUS パネルタンクの解析結果より、側壁部、仕切り板に作用する動水圧の最大値は概ね静水圧より大きくなっており、動水圧の分布は側壁部と仕切り板で非対称となっている。さらに仕切り板、側壁部に作用するそれぞれの合計圧力の最大値を比較すると、高さ 1200mm 以上で仕切り板に作用する合計圧力が側壁部に作用する合計圧力を上回っている。次にステンレス鋼製角形タンクの解析結果より、側壁の合計圧力が仕切り板と比較して大きいことが確

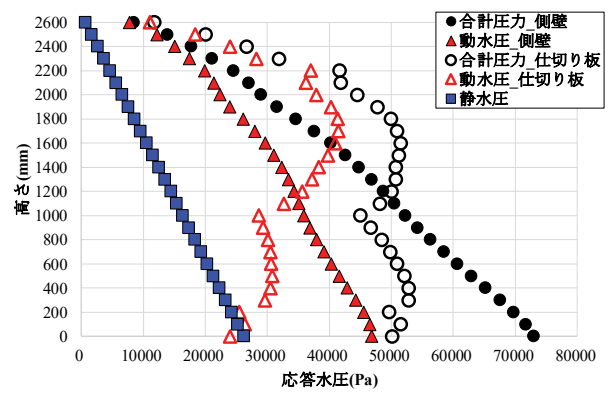


図-6 側壁部・仕切り板に作用する水圧の最大値 (SUS パネルタンク)

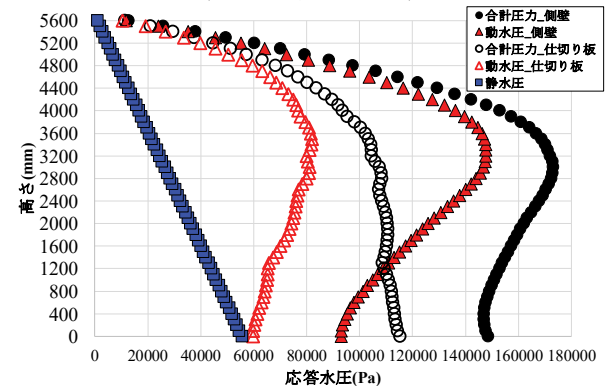


図-7 側壁部、仕切り板に作用する水圧の最大値 (ステンレス鋼製角形タンク)

認された。これはタンクの側壁が一体型であることや矢板形状になっていることで SUS パネルタンクと比較して高い剛性を有しているためであると考えられる。

以上のことから、現行の仕切り板に関する設計の考え方は SUS パネルタンクにおいて不適切であり、仕切り板の固有振動数と共振するような地震が発生した場合、現行の設計指針で仮定している条件が成立しない可能性が高いと考えられる。一方、ステンレス鋼製角形タンクにおいては仕切り板と側壁部の大小関係の逆転が確認されなかったことから十分な耐震性を有していると考えられる。ここで静水圧と動水圧の大小関係に関する仮定については構造形式問わず見直しが必要であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、(独) 日本学術振興会科学研究費・基盤研究 (C) の給付を受けたことを付記する。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人建設研究所：2022 (令和 4) 年 3 月 16 日 23 時 36 分頃の福島県沖を震源とする地震による鉄筋コンクリート造等建築物および建築設備の被害調査報告，2023.
- 2) 日本水道鋼管協会技術資料：ステンレス鋼製角型配水池設計指針，2010.

「建設技術」

圧倒的な高強度で防衛施設の強靱化・最適化を実現する

柱状地盤改良技術「SST 工法」

Columnar ground improvement technology “The SST method” that achieves reinforcement and optimization of defense facilities with overwhelming high strength.

菊地稔*, 飯田哲夫**

KIKUCHI Minoru and IIDA Tetsuo

* 株式会社エスエスティー協会 技術センター（〒290-0081 千葉県市原市五井中央西 1-18-5-106）

** 株式会社エスエスティー協会 取締役会長（〒290-0021 千葉県市原市山田橋 862-1）

キーワード：置換式、締固め式、高品質、高強度、強靱化、最適化

(Replacement, Compaction, High Quality, High Strength, Reinforcement, Optimization)

1. はじめに

軟弱地盤中に柱状改良体（以下「コラム」という。）を構築する従来の一般的な地盤改良工法では、セメント等の固化材を地中で攪拌して固結させることで強度が発現されるため、その固結力以上の強度や支持力が期待できず、また、地中の土を原位置でそのまま攪拌することから、混合不足や不適土の混入等による強度の低下も懸念されるため、求められる地盤支持力に応じて改良率を上げて対応せざるを得ず、コストが高くなってしまうという課題があった。さらに、現場で固化材を供給するためのプラントの設置が必要であり、特殊な攪拌機構を有する大型の施工機械を使用しなければならないため、現場での適用性やコストにおいても課題があった。

そうした中、平成7年1月に発生した阪神淡路大震災を契機として、より強固で安価に施工できる新たな地盤改良技術の必要性を痛感し、長年にわたって開発に取り組んできた。そこでは、上記のような課題を解決するため、「土粒子間の空隙と水を排除すればするほど土は固くなる」という土質力学の基本原則に立ち戻り、それを効果的に実

現するためには「異なる径の土粒子を混合させること」と「強い力で土粒子同士を圧縮すること」が重要と考え、締固めながらコラムを築造できる独自の機構等を発明し、長い年月をかけて試行錯誤を繰り返しながら強度や支持力の向上とコストダウン等を進めてきた。

2. 新たな柱状地盤改良技術「SST 工法」

2.1 SST 工法の概要

SST 工法は、「土粒子間の空隙と水を排除して土の密度と強度を高める」ことを基本原理としたも



写真-1 SST 工法による施工の様子

のであり、軟弱地盤中にコラムを構築する地盤改良技術において、従来一般的に行われてきた固化材の地中攪拌方式ではなく、掘削して地上に排出した土に固化材とさらに砂も加えることによって「異なる径の土粒子を混合」し、その改良土を新たに開発したオーガーにより「強い力で圧縮して締固め」ながら掘削孔に充填し、さらに「固化材の針状結晶体で土粒子を結合」させて強固なコラムを構築する技術である。世界で初めて鉛直方向だけでなく水平方向にも強力に締固めができるようになったことから、従来にはない高い強度と支持力を発揮するコラムを築造することができ、大型の施工機材等も必要としないシンプルな施工法と安いコストで強固な地盤改良を実現したものである（写真-1 参照）。

具体的な締固め機構としては、正回転により地盤を掘削するオーガー（口径 300~600mm）において、先端の円錐形部分の外周面に、特殊な形状をした2枚の鉛直ブレードを回転断面の対称位置で段違いとなる高さに取り付けたものであり、逆回転させることによりそのブレードが、地上から投入した改良土と周辺の土砂を鉛直方向と水平方向に大きな力（3t の穴掘建柱車でそれぞれ 35t/m²程度）で圧縮し、播（す）り固めができる世界で初めてのオーガーを開発した（図-1 参照）。

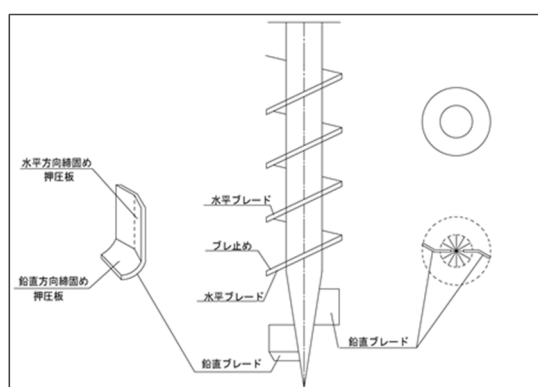


図-1 SST オーガーの締固め機構

施工法は、そのオーガーを穴掘建柱車（3~4t クラス）で正回転させて地盤を所要の深度まで掘削して（図-2 参照）、掘削土の土質に応じてその土

量の 1~1/4 の割合の砂と 200kg/m³の固化材を加えて油圧ショベル（0.06 m³クラス）で混合し（図-3 参照）、その改良土を少しずつ掘削孔に投入しながらオーガーを逆回転させてコラムを築造していくものであり、コラムと周辺地盤の締固めが限界に達するとその反力でオーガーが徐々に上昇し（図-4 参照）、所要の高さまで上昇したらオーガーを外して、コラムの頭部を突き固めて築造の完了となる。

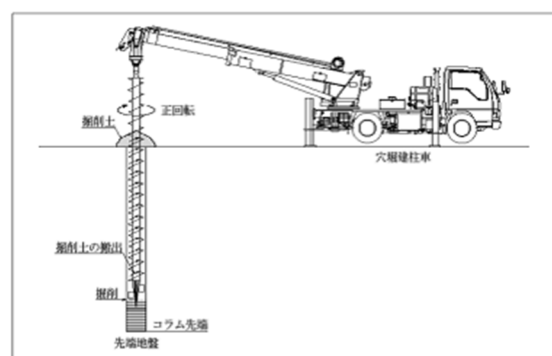


図-2 地盤の掘削

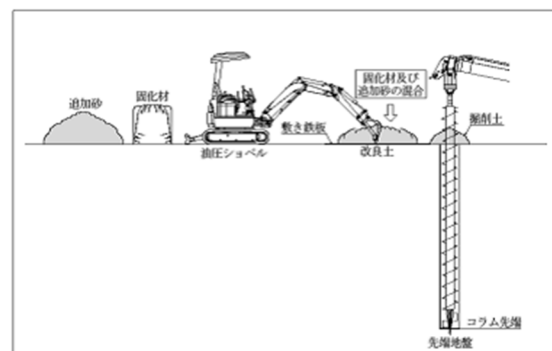


図-3 改良土の混合

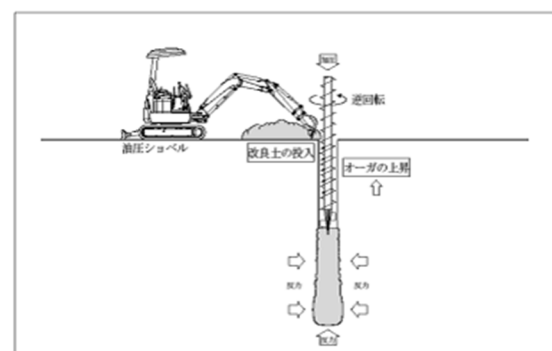
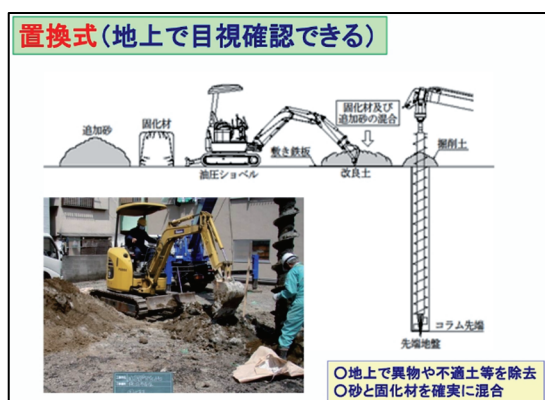


図-4 コラムの築造

その技術的特徴は、まず、掘削土を地上に排出することから、孔壁や土質等を直接目視で確認しながら地盤の状況に合わせて最適な施工ができることであり、また、掘削土から異物や不適土等を除去して油圧ショベルで十分に砂・固化材と混合できるため、コラムの全域にわたって均一で連続した高い品質が確保できることである（図－5、写真－2 参照）。



図－5 技術的特徴（置換方式）

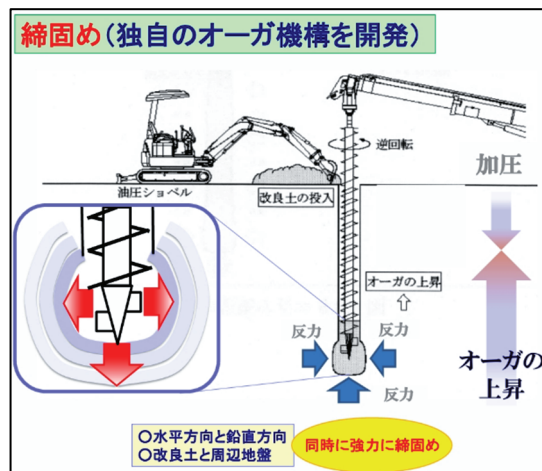


写真－2 均一で連続した高品質のコラム

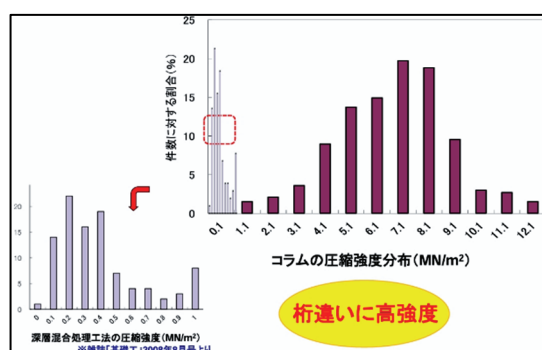
次に、開発したオーガーを掘削時と逆に回転させるだけで、上述したとおり掘削孔に投入した改良土と周辺地盤を鉛直方向と同時に水平方向にも強く圧縮できることであり、砂を加えることによる粒度分布の改善とも相まって土粒子間の空隙や水が十分に排除され、コラムはもちろん周辺地盤も強力に締固めができることである（図－6 参照）。

それにより、コラムの設計基準強度が2,400kN/m²と従来の地中攪拌による工法に比べて5~6倍も高くなり、圧縮強度分布についても桁違いに高強度なものとなっている（図－7 参照）。また、そのコラムが周辺地盤を押し広げて拡張する形で築造されることから、大きな地盤反力が発生し、鉛直支持力だけでなく強い周面摩擦力も発揮することが

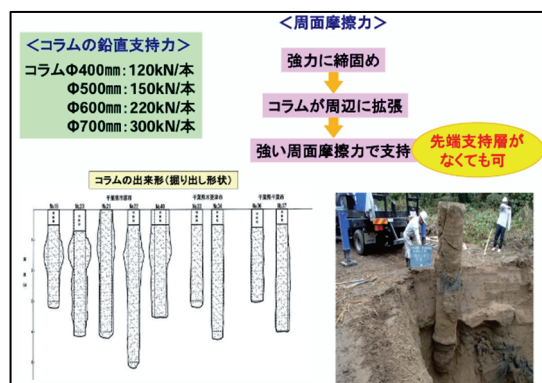
でき、さらには周辺地盤も締固められることによって、地盤全体としての支持力を大幅に向上させることができた（図－8 参照）。



図－6 技術的特徴（締固め方式）



図－7 強度の向上



図－8 支持力の向上

また、その他の技術的特徴として、従来工法では必ず残土が発生し、その処分が必要であったが、SST 工法では締固めによって土量を大幅に圧縮できるため、不適土等以外の残土は基本的には発生せず、大型の施工機械や水も電気も使用しないので、現場での適用性や施工性が格段に良くなって

は施工できない狭隘な現場でも適用できる（図－9 参照）。

2.3 SST工法によるコスト縮減と工期短縮

実績工事は、千葉県東金市地内で腐植土層が堆積し地下水位が高い地盤上に動物病院（鉄筋コンクリート造 2 階建て、上載荷重 65kN/m^2 ）を建築するものであり、基礎面積 829.54 m^2 にコラム径 600 mm 、コラム長 5.78 m のコラム 279 本を、2,326 万円で施工したものである。同じ現場条件で SST 工法と同程度の地盤支持力をスラリー攪拌工法で出すためには、設計基準強度を 450kN/m^2 とするとコラム径 $1,000\text{ mm}$ 、コラム長 5.08 m のコラムが 498 本必要となり、工事費は 3,897 万円と試算されることから、SST 工法によって 1,571 万円（40.3%）のコストを縮減することができた。

また、SST 工法ではコラムの打設は 35 日間かかったが、スラリー攪拌工法では 42 日間かかるので、SST 工法によって 7 日間 (16.7%) の工期を短縮することができた。さらに、スラリー攪拌工法で必要となる 1 週間程度の養生期間も考慮すると、その後の建築工事も含めた全体では大幅な工期短縮となる (表-1 参照)。

表-1 従来工法(スラリー攪拌工法)との比較

	従来工法	SST工法
設計基準強度	450kN/㎡	2,400kN/㎡
コラム径	1,000mm	600mm
コラム長	5.08m	5.78m
コラム本数	498本	279本
工 事 費	3,897万円	2,326万円
	40.3%の縮減	
工 期	42日	35日
	16.7%の短縮	

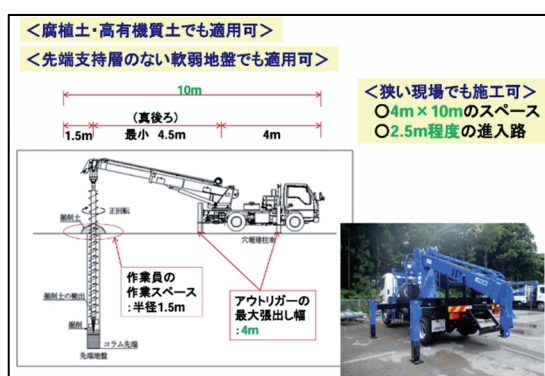


図-9 適用範囲の拡大

必要な現場スペース等については、使用する施工機械が自走式の穴掘建柱車（3~4t クラス）と油圧ショベル（0.06 m³クラス）だけであり、最小で 2.5m 程度の進入路と 4m×10m のスペースがあれば施工できるので、従来工法の大規模機械や設備で

3. SST 工法による防衛施設の強靱化・最適化

「土粒子間の空隙と水を排除すれば土の密度と強度が高まる」という土質力学の基本原理はいたってシンプルなものであるが、これをコラムの施工において実現することはこれまで誰もできていなかった。SST 工法の技術的なコアである締固め機構は、これを効率的・効果的に再現できるようにしたものであり、特に、地盤支持力の向上に大きく寄与する水平方向への締固めについては、世界で初めて実現できたことから、これまでの地盤改良技術および建設技術の水準を大きく向上させたものである。

SST 工法により、従来の柱状地盤改良工法では実現することのできなかった高強度と高支持力を、従来よりも安価なコストと簡易な施工法で実現したことから、地盤改良や地盤補強の工事が促進されることとなり、国内はもとより海外も含めて住宅・社会資本の整備の推進に大いに貢献するものと考えている。

SST 工法の施工実績としては、4-5 階建て程度のマンションといった中規模クラスの建築構造物の地盤改良が中心となっているが、それでは本来 SST 工法が発揮できる高強度等のメリットをまだ十分に活用できておらず、今後はより大きな荷重のかかる防衛施設等への適用の拡大も期待されるところである。

現在、防衛省では全国に存在する約 23,000 棟の建物や飛行場、港湾施設、電気・水道等のユーティリティを含む自衛隊施設について、大規模自然災害や武力攻撃・テロ行為等の各種脅威に対する強靱化を図るため、各基地や駐屯地等の最適化を行い、自衛隊施設が保有すべき防護性能を確保し、持続可能な施設の管理・運営を目的として最適化事業が進められているところであるが、この事業において当社の SST 工法が多く採用されることによって、最適化事業が円滑に進捗し大いに貢献できるものと考えている（図-10 参照）。

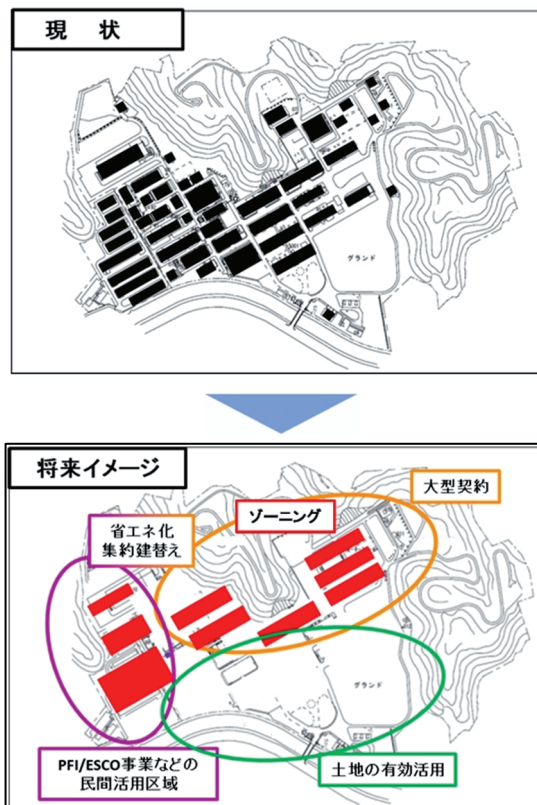


図-10 最適化事業のイメージ

SST 工法は、上記で説明したとおり、当社が開発し製造・販売する専用のオーガーさえあれば、自衛隊の施設関連部隊等が保有している建設機械で施工できるので、当社の技術者が部隊等の技術者に施工現場で施工方法を伝授することにより、地盤改良工事を外部の施工業者に発注することなく、部隊等が直営で施工することも可能である。ただし、部隊等が直営で施工することはないということであれば、SST 工法についてはもちろん当社が責任を持って工事を請け負い施工することとなる。（図-11 参照）

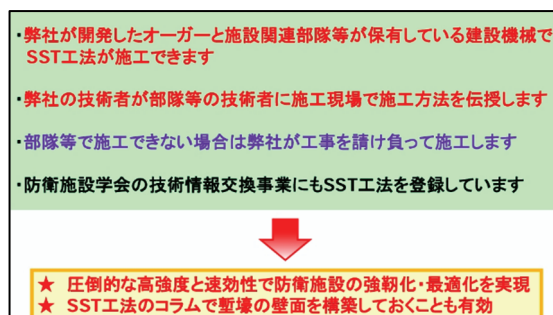
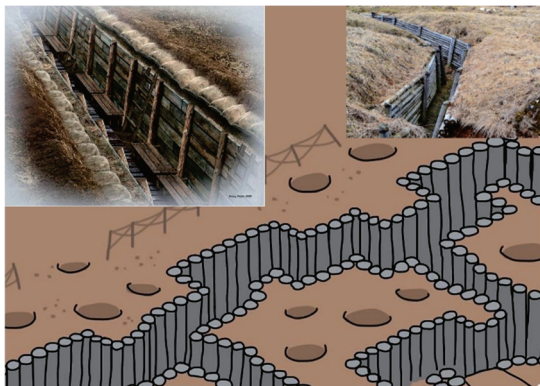


図-11 防衛施設への適用

また、ロシアによるウクライナ侵攻では旧来の塹壕戦が激しく行われており、地上での戦闘時における塹壕の必要性に防衛関係者の関心が高まっているものと推察されるが、例えば平時に塹壕の壁面となる部分を SST 工法のコラムで構築しておけば、戦闘状態になったときにコラムの壁に囲まれた区画内を掘削して周辺に掘削土を盛り上げるだけで、短時間に堅牢な塹壕が構築できるので、仮想敵国に気付かれることなく塹壕戦への備えをしておくことができるものとする（図－12、写真－3 参照）。



図－12 塹壕の構築イメージ



写真－3 塹壕の構築イメージ

なお、最適化事業をはじめ防衛施設の整備に SST 工法が採用され普及して行くためには、防衛施設の関係者に SST 工法を認知し理解していただくことが重要と考え、防衛施設学会の技術情報交換事業にも SST 工法を登録しているので、是非、情報交換をお申し込みいただきたい（技術情報交換事業の URL：<https://jsdfc.org/TIEP/TIEP.html>）。

4. おわりに

世界的に安全保障環境が厳しさを増す中で、SST 工法のような優れた技術を活用し、防衛施設の強靱化・最適化が促進され、我が国の防衛力がさらに強化・向上されることを強く望むものである。

回転杭工法の施工報告

CONSTRUCTION REPORT OF SCREW STEEL PIPE

時田知典*, 河野謙治**, 坂口裕司***, 笹祐也****
TOKIDA Kazunori, KOUNO Kenji, SAKAGUCHI Yuji and SASA Yuya

* JFE スチール(株) 建材技術部 土木技術室 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-3 日比谷国際ビル)

** JFE スチール(株) 建材技術部 土木技術室 主査 (同上)

**** JFE スチール(株) 建材技術部 土木技術室 主任部員 (同上)

*** JFE スチール(株) 九州支社

(〒812-0025 福岡県福岡市博多区店屋町 1-35 博多三井ビルディング 2 号館 7 階)

キーワード：基礎, 鋼管杭, 無排土
(*foundation, Steel Pipe Pile, No Soil Removal*)

1. はじめに

鋼管杭は、高い材料強度と大きな変形性能を有しているとともに材料品質が非常に安定していることから、長期にわたって使用され、高い信頼性が求められる建築物の基礎に非常に適した材料である。昨今、環境への負荷が低い、無排土での杭施工のニーズが増加している。筆者らは無排土での施工が可能な回転杭工法を開発し、実用化している。本論文では、回転杭工法の概要および特徴、環境負荷低減のニーズに対応した事例として佐賀駐屯地（仮称）での施工事例について述べる。



開端タイプ

2. 回転杭工法の概要

2.1 回転貫入杭の仕様

回転杭工法に用いる回転貫入杭の先端形状を図-1 に示す。鋼管径の 1.5～3.0 倍の直径を有する 2 枚の半円状の平鋼板を交差させたものを先端翼として鋼管の先端に取り付けた鋼管杭である。先端翼の中心に孔（鋼管径の 1/2）が空いている開端タイプと、先端が完全に閉塞している閉端タイプがある。先端翼は施工時には地盤から推進力を得て杭を貫入させる役割を持ち、供用時には大きな底面積で押込みや引拔きの荷重を支える役割を持つ。



閉端タイプ

図-1 先端翼の形状

2.2 適用範囲

建築分野で国土交通省大臣認定および性能評価を受けている適用範囲を表-1 に示す。先端地盤は砂質地盤および砂礫質地盤としている。

表-1 建築分野での適用範囲

先端形状	杭径 (mm)	先端翼倍率	最大杭長 (m)
開端タイプ	114.3～609.6	1.5、1.75、2.0 2.5、2.25、3.0	87
	700～1200	1.5、1.75、2.0	
閉端タイプ	114.3～267.4	2.0、2.5、3.0	60
	318.5～508	2.0、2.25、2.5	
	600～1200	1.5、1.75、2.0	



図-4 施工機械（全周回転機）

2.3 施工機械

特殊な施工機械は使用せず、基本的には汎用機械を用いた施工が可能であるが、大きなトルクを出せるような改良がなされているものを用いることが多い。おおよその選定目安を図-2 に示す。

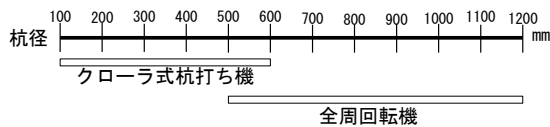


図-2 施工機械の選定目安

各施工機械を図-3、図-4 に示す。小・中径杭用には自走式で杭頭部にトルクを作用させる機械、大径杭用には杭胴部を掴んでトルクを作用させる機械（要クレーン）を用いるのが一般的である。



小型機 3点式杭打ち機
図-3 施工機械（クローラ式杭打ち機）

2.4 無排土施工

回転貫入杭に地上からねじ込み力（トルク）を与えると、先端翼が木ねじのような推進効果を発揮して、杭体が地中に回転貫入していく。この際、杭体積分の土砂は、先端翼下側の土砂が先端翼の上側および管内へ移動し、先端翼の上側に移動した土砂は鋼管により側方へ圧縮される。土砂の動きを模式的に示したものが図-5 である。施工前後の杭周囲の地盤密度とN値を計測して比較した事例では、杭施工後に杭の近傍で密度とN値が上昇しており、杭施工に伴って鋼管側方の地盤が圧縮されていることが確認できている。

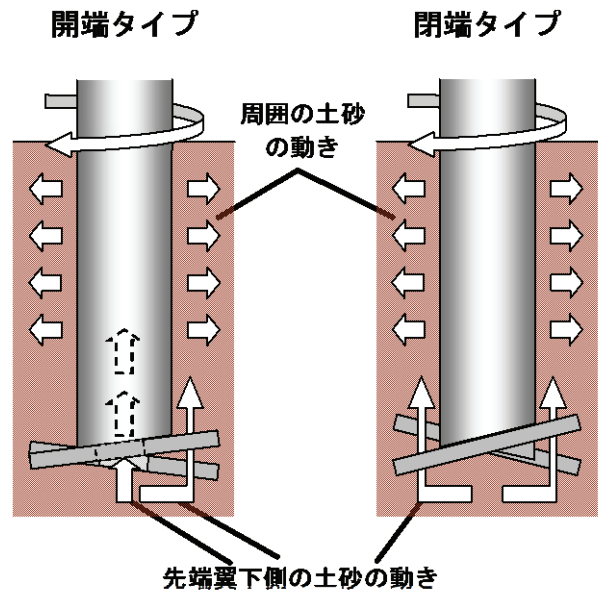


図-5 施工時の土砂の動き

図-5に示した土砂の動きによって、施工中から施工完了まで図-6、図-7のように地上部には一切土砂が排出されないことが試験工事および実工事での実績において確認できている。



図-6 施工中の地表面



図-7 施工完了後の地表面

無排土施工によるメリットは、残土処理費用が0になることだけではなく、処理のためのダンプが不要で周辺の交通への影響が抑えられることや、工場跡地等の土壌汚染の懸念がある地盤でも施工が可能なことなどが挙げられる。

2.5 セメントミルク不使用

大きな先端支持力を発揮するために、既製杭では支持層内で根固め球根を築造するのが一般的である。また、場所打ち杭では杭全長をコンクリートで築造する。

回転貫入杭の場合、先端支持力を先端翼自身の剛性で受け持つため、セメントミルクは一切使用しない。そのため、井戸水を利用している地区や伏流水や被圧水が存在する地区でも地下水への影響の懸念無く施工が可能である。

2.6 低騒音・低振動

回転貫入杭は鋼管をねじ込んで施工するため、大きな打撃音は発生せず、低騒音・低振動での施工が可能である。実際の杭を施工した時の4現場での測定結果は、騒音が杭施工場所から10mで平均75dB、振動が平均35dBであった。いずれも環境省が定める建設工事での基準値（騒音85dB、振動75dB）と比較して十分小さな値であることが確認できている。

3. 佐賀駐屯地（仮称）での施工事例

本章では回転貫入杭の防衛施設での施工事例について述べる。

3.1 工事概要

- ・件名：佐賀(5)駐屯地新設土木その他工事
- ・発注者：防衛省九州防衛局
- ・施工：大成建設・鴻池組・松尾建設 JV
- ・杭施工：大洋基礎株式会社、
ジャパンパイル株式会社、
丸五基礎工業株式会社
- ・杭本数：38本（バックショップ3）、
128本（格納庫3）
- ・杭工事期間：令和6年3月～6月

図-8に工事位置図、図-9に施設平面図を示す。



図-8 工事位置図

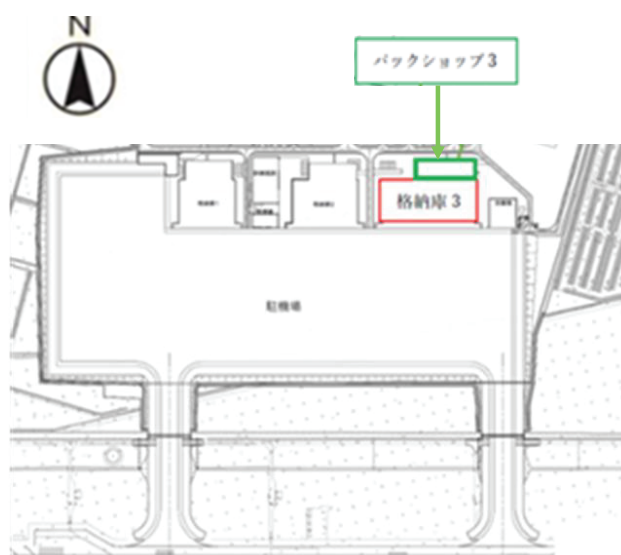


図-9 施設平面図

また、表-2 に回転貫入杭の仕様を示す。

表-2 杭仕様

バックショップ3

杭径 (mm)	板厚 (mm)	先端翼径 (mm)	杭長 (m)	数量 (本)
1100	24	2200	66.5	38

格納庫3

杭径 (mm)	板厚 (mm)	先端翼径 (mm)	杭長 (m)	数量 (本)
800	22	1600	66.0	74
1000	22	2000	66.0	54

3.2 回転貫入杭の採用要因

工事場所が面する有明海はのり養殖が行われており、周辺地域との取り決めにより養殖期間は環境保持のため、コンクリート打設工事を避ける必要があった。そのため中掘り工法やプレボーリング工法では工程に支障をきたす恐れがあり、コンクリート打設を必要としない回転貫入杭が採用された。

3.3 杭工事および施工結果

施工の様子を図-10～13 に示す。施工ペースは事前の計画通り、1 台あたり 2 日で 1 本のペースであり、5 台の施工機を使用して約 3 か月で全 166 本の施工を完了することができた。また、地盤柱状図位置から離れた位置で施工をするにつれ、杭先端の支持層到達が早くなり、支持層が不陸している傾向がみられた。これに対して、速やかに追加ボーリング試験を実施することによって地盤の不陸を正確に把握する施工管理を行った。

4. おわりに

佐賀駐屯地(仮称)新設工事で回転杭工法を適用した。無排土で計画通りの工程で施工することができ、コンクリート打設に制限があった本現場での適用性が有効であったことを確認した。



図-10 回転貫入杭施工状況（全景）



図-11 回転貫入杭施工状況（搬入）



図-12 回転貫入杭施工状況（杭吊り込み）



図-13 回転貫入杭施工状況（貫入）

謝辞

本論文は九州防衛局、大成建設・鴻池組・松尾建設 JV よりデータのご提供およびご指導・ご助言を受け作成いたしました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) (一財) 日本建築総合試験所：先端翼付き回転貫入鋼管杭（名称：つばさ杭（開端タイプ・閉端タイプ））国土交通省大臣認定および性能評価,2012.
- 2) 市川和臣,河野謙治：環境性能に優れた先端翼付き回転貫入鋼管杭「つばさ杭®」の支持力特性と施工性能,JFE 技報,No.31,p39-45,2013.1

火山砂防における消波工付き透過性ブロック堰堤の適用性に関する基礎的な研究

FEASIBILITY OF USING PERMEABLE BLOCK SABO DAMS INCORPORATING BREAKWATER STRUCTURES FOR VOLCANIC SEDIMENT MANAGEMENT

原田紹臣*, 藤本将光**, 佐藤哲也***, 神野忠広***

Norio HARADA, Masamitsu FUJIMOTO, Tetsuya SATO and Tadahiro KANNO

* 博（工/農） 立命館大学客員教授 理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1）

** 博（農） 立命館大学准教授 理工学部（〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1）

*** 共和コンクリート工業株式会社（〒060-0808 札幌市北区 8 条西 3-28）

キーワード：ブロック，実験，砂防ダム，透過性能，火山砂防
(Block, experiment, sabo dam, seepage, Volcanic Sediment)

1. はじめに

土石流は江戸時代から「山津波」とも呼称¹⁾されており、古い時代における被害例として1847年に発生した長野県の善光寺地震による斜面崩壊に伴った河道閉塞及びその決壊による災害等が挙げられる²⁾。これは、地震時に海域で発生する津波の現象と類似することから呼称されており、土石流対策に際しては、これらの海域での対策工が参考になると考えられる。

このような背景の中、近年、二次製品ブロックを活用した砂防(図-1)が、全国的に採用されてきている^{3) 4)}。また、ICT 施工の無人化施工等による堰堤工事においても、ブロック堰堤の活用^{5) 6)}が期待されている。特に、ブロック堰堤は、緊急性を要する火山砂防に対して、事前に備蓄されたブロックを柔軟に組み合わせることでの迅速な対応が可能であると考えられる⁹⁾。なお、火山砂防は、噴火時における火砕流の制御と、降灰後の降雨に伴う一般的な土石流対策が該当する。また、時間の経過に伴って降灰による影響が低減した火山砂防事業の終了時には構造物を存置することなく、安価な工事費で対策構造物を撤去するとともに、用いられていたブロックを他の対策工に転用できる利点がある。そこで、近年の火山砂防計画策定指針の策定を受けた今後の火山の影響を受けた変形する地盤上における遊砂地や導流堤等の工事において、屈撓性、迅速性、軽重量(空げき)、再設置の容易性等が有意と考えられるブロック積砂防堰堤の更なる活用が期待される⁷⁾。

ブロック堰堤に関するその他の既往研究として、ブ

ックにおける強度特性^{8) 9)}やブロック間の噛み合わせ強度特性¹⁰⁾に関する報告があり、実験等に基づいて検証されている。ただし、砂防関係施設点検項目において提案されている変形地盤上に対して追従して安定するブロック積砂防堰堤の屈撓性能¹¹⁾に関する実験については、考慮されていない。特に、砂防堰堤の天端高さの維持は、土砂捕捉の観点より重要である。一方、近年、既設のブロック堰堤が上流からの流れにより崩壊し、更なる安定化に向けた対策が急務な課題となっている¹²⁾。

また、砂防堰堤や導流堤の機能において、構造物の天端高さの保持は重要である。ここで、噛み合わせのあるブロックは変形地盤への追従とともに、一定の天端高さを確保する変位の抑制が期待できると考えられる。さらに、山津波の由来となっている海域における消波や根固



図-1 ブロック堰堤の施工事例

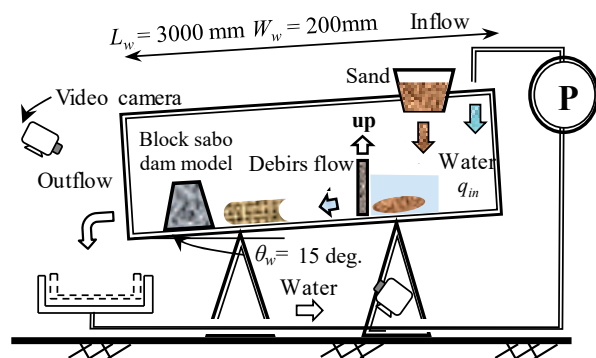


図-2 実験水路の概要

表-1 実験に用いたブロックの概要 (堰堤工)

Block type		Width	Height h	Mass
		w (mm)	(mm)	M_1 (kg)
Block type- a : interlocking block	Actual	1630	940	3015
	Model	65.2	37.6	0.193
Block type- b : rectangle block	Actual	1630	500	3054
	Model	65.2	20.0	0.195

めとして用いられている消波工ブロックは変形する地盤
 においての屈撓性能を有しているとともに、津波等に対
 する安定性能等に関しても実験等により期待されている
 13), 14), 15)。これらより、これらの海域で使用されている
 消波工ブロックを活用した火山砂防における堰堤や導流
 堤の構造物の一つとして有効である可能性が考えられる。

本研究では、今後の火山砂防における堰堤や導流堤の
 構造物として、近年に期待されている二次製品ブロック
 に対して、海域でこれまで使用されてきた消波工（ブロ
 ック）を併用させた新たな堰堤形式を提案し、捕捉時や
 導流時における安定性能に関して、基礎的な実験により
 考察する。さらに、この凹凸の噛み合わせを有したブロ
 ック積砂防堰堤の変形地盤上における屈撓性能や変位程
 度に関して、同様に、基礎的な実験によりその挙動につ
 いて把握する。

2. ブロック堰堤の安定性能に関する実験

ブロックを活用した火山砂防としての堰堤や導流堤の
 構造において、捕捉時等に発生する段波衝撃の流体力に
 対する安定性能の確保は重要である。そこで、上流から
 の流体力等の低減を期待した新たなブロック堰堤形式を
 提案し、基礎的な実験に基づいてこれらの適用性につ
 いて考察する。本実験は 1/25 程度の縮尺を想定し、高さ
 20 cm、幅 20 cm、長さ 300 cm の矩形水路を用い、土砂

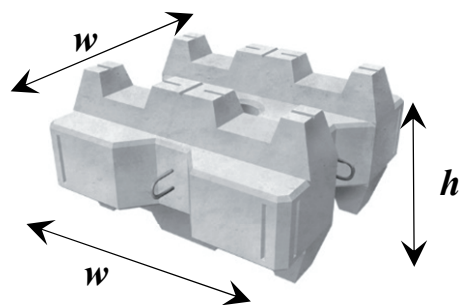


図-3 堰堤工として用いた二次製品ブロック(タイプ a)¹⁹⁾

表-2 実験に用いたブロックの概要 (消波工)

Block type		Width	Height h	Mass
		w (mm)	(mm)	M_1 (kg)
Block type- c : wave-dissipating block	Actual	1544	1698	1387
	Model	61.8	67.9	55.5

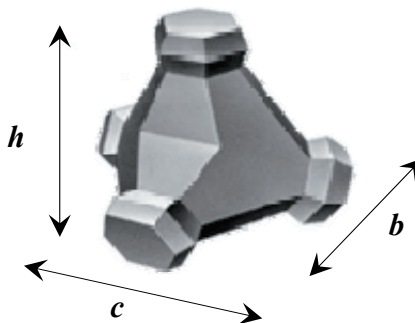


図-4 消波工として用いた二次製品ブロック(タイプ c)²⁰⁾

移動現象として土石流を想定するため、土石流の発生が
 可能な 15° の勾配で設定した (図-2) ¹⁶⁾。また、河床
 条件は固定床とし、流れを安定させるために、粗度とし
 て水路床に砂を貼り付けた。実験に使用した土砂（水路
 床に貼り付けた砂含む）は、過去の既往災害 ¹⁷⁾を参考に、
 降灰後の土石流段波による巨礫などの移動や作用力を考
 慮して、粒径 5 mm の珪砂とした。なお、水の供給流量
 については、予備実験より、上流から一定に供給する水
 ($q_m = 1.5$ L/s) をゲートにより一時的に堰き止め（貯水
 量：約 30 L）、その後、ゲートを引き上げて解放させて、
 上流から段波状の流れを与えた。また、供給する土砂量
 については、予備実験より、貯水量や河床勾配等より決
 定される最大の流砂量 ¹⁸⁾を想定して決定した。

従来のブロック堰堤の本体堰堤工（土砂捕捉を目的）
 を構成するブロックの種類や積み方による堰堤形状の違
 いによる安定性能への影響を把握するため、表-1 に示
 す 2 種類のブロック（a, b）を用いた。なお、ブロック a

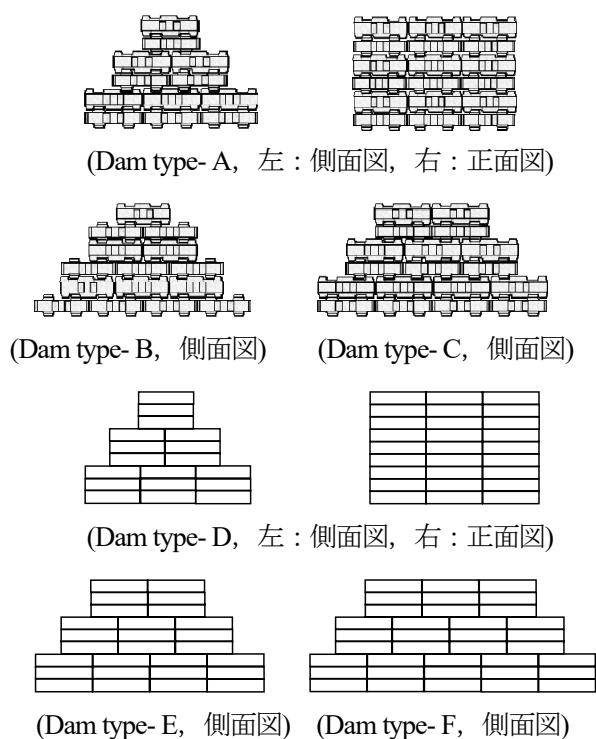


図-5 ブロック堰堤の形状・形式（消波工一併用無）

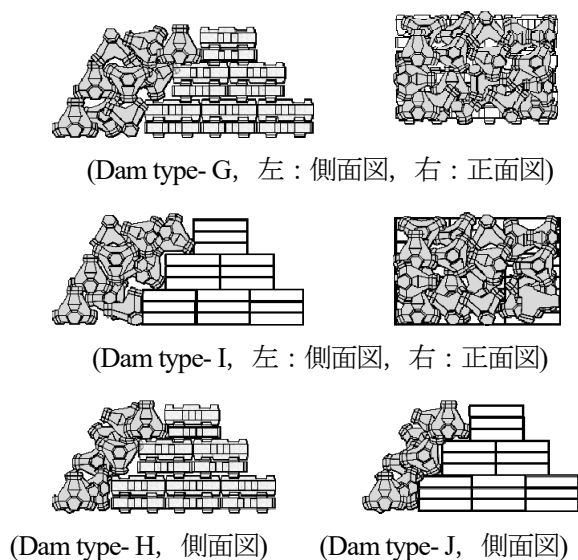


図-6 ブロック堰堤の形状・形式（消波工一併用有）

(65.2 × 65.2 × 37.6 mm; 0.193 kg) は、ブロック間の噛み合わせのための突起に伴う隙間により、透過性能が期待される汎用性のある二次製品ブロック¹⁸⁾ (図-3) とした。

一方、ブロック b は、ブロック a とほぼ同じ重量 (0.193 kg) 及び平面形状 (65.2 × 65.2 mm) となるように、高さを調整させて製作した直方体のブロック (65.2 × 65.2 × 20.0 mm; 0.195 kg) とし、ブロック間においては隙間が殆ど期待できない不透過性の噛み合わせが無い単純な矩形形状とした (表-1: 下)。なお、ブロック

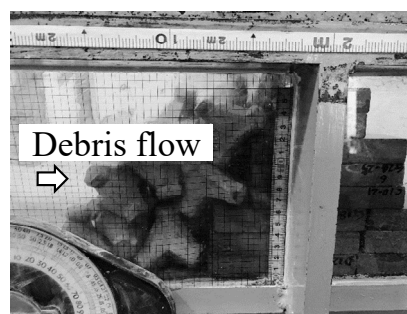


図-7 実験の状況.

表-3 実験に用いたブロックの概要（消波工）

Dam type	Q_{out} (L/s)	K_b ($= Q_{out} / q_{in}$)
A, B	0.61	~0.4
C	0.59	~0.4
D	<< 0.1	<< 0.1
E, F	<< 0.1	<< 0.1
G, H	0.60	~0.4
I, J	<< 0.1	<< 0.1

の材料については各ブロックとも同じものを使用し、一般的なフルードの相似則に基づいて質量を調整した。

一方、土石流等の段波による流体力の低減等を期待して、海域で一般的に用いられている表-2 や図-4 に示す波消（根固め）工ブロック c を併用した堰堤形式を提案する。ここで、ブロック (a, b, c) をそれぞれ用いて構築したブロック堰堤の形状（形式）を、それぞれ図-5 及び図-6 に示す。なお、各側面図の左側は上流側であり、ブロック堰堤の積み方や形状については、予備実験より設定している。図-5 の上半分に示す堰堤（ダム；A, B, C）は、透過性能と噛み合わせが期待できるブロック a (表-1: 上、図-3) を用いて、堰堤の上下流における法勾配や天端の厚みを変化させて下から積み上げた（層積み）。

また、図-5 の下半分に示すダム（D, E, F）は、直方体のブロック b (表-1: 下) を用いて、同様に、堰堤の天端の厚み等を変化させて下から積み上げた。一方、図-6 に示すダム G は、図-5 に示すダム C の上流側一列分（計：6×3 = 18 個、約 3.5 kg）のブロック a 群に対して、ほぼ同じ質量（約 3.5 kg）分に相当する消波工（ブロック c：表-2）で置き換えて、堰堤本体の上流側に乱積みにより下から積み上げた。

なお、ダム H は、ダム G で使用したブロック c のほぼ半分に相当する質量（約 1.75 kg）分のブロック c を、同様に、堰堤本体（ダム A）の上流側に乱積みにより下から積み上げた。また、ダム I は、ダム G で使用した同じ質量（約 3.5 kg）分のブロック c を、図-5 で示したダム D の上流側に乱積みにより下から積み上げた

表-4 実験条件及び安定性能に関する実験結果

Case	Block Type	Dam type	Sediment	Mass ΣM_1 (kg)	Stable
1-1		A		~6.9	NG
1-2	a	B		~8.7	NG
1-3		C	Nothing	~10.4	OK
2-1		D		~10.5	NG
2-2	b	E		~15.8	NG
2-3		F		~21.1	OK
3-1	a & c	G	Nothing	~10.4	OK
3-2		H		<u>~8.7</u>	OK
4-1	b & c	I		~14.0	OK
4-2		J	Exist	~12.3	NG
5-1	a & c	H		<u>~8.7</u>	OK
5-2	b & c	I		~14.0	OK



図-8 崩壊状況（左：ダム E，右：ダム J）

(図-7)。また、ダム J はダム I (又は、ダム G) で使用しほぼ半分に相当する質量 (約 1.75 kg) 分のブロック c を、同様に、堰堤本体の上流側に乱積みにより下から積み上げた。なお、土砂混入の有無の違いを把握するため、流水のみ (段波による鉄砲水等を想定) で実験を行った後に、土砂混入 (土石流) による実験を行った。

予備実験で得られた各ケースにおけるブロック堰堤の透過性能 (透水性；ただし、ゲートで堰き止めることなく水のみを定常で供給した場合の満水位直前における透水性能) を表-3 に示す。表-3 に示すとおり、ブロック a (表-1：上) を用いて構築されたダム A や B、C については、満水位直前における無次元化させた透過率 K_b (Q_{out}/q_{in}) が概ね 0.4 であった。また、消波工 (ブロック c) を併用したダム G や H についても、同程度の値であった。ここで、 Q_{out} はブロック堰堤等の直下流で計測した時間あたりの流出量である。

一方、直方体のブロック b を用いて構築されたダム D や E、F、I、J の満水位直前における透過率 K_b は、0.1 未満であった。なお、満水後は堰堤上部から流水が越流している様子が確認された。なお、これらの透過率 K_b の結果より、ブロックの種類や施工規模がほぼ同じ場合、

積み方や堰堤形状の違いが透水性へ与える影響は小さいものと推測される。また、堆砂後における各ケースの透過性能については、目詰まり等が見られて少し低下するのが確認されたが、定性的ではあるが、目詰まり前と顕著な変化は見られない傾向であった。ここで、目詰まりのメカニズムやその影響については実験規模等による影響が懸念されるため、詳細な検証については、今後の課題とする。なお、実験は同じ条件で 3 回ずつ実施して確認した。

実験条件 (各使用したブロックの総質量 ΣM_1 等) や実験で得られた安定性能に関する結果 (Stable) を表-4 に示す。表-4 に示すとおり、水のみを段波として供給した場合におけるブロック a (表-2：上) を用いた堰堤形式 (Case 1-1, -2, -3、ダム:A, B, C) に関して、ダム A (ΣM_1 が約 6.9 kg) 及びダム B (ΣM_1 が約 8.7kg) が段波衝撃により崩壊した。一方、水のみを供給したブロック b (表-2：下) を用いた堰堤形式 (Case:2-1, -2, -3、ダム:D, E, F) においては、ダム D (ΣM_1 が約 10.5 kg) 及びダム E (ΣM_1 が約 15.8 kg) が崩壊した。一方、ダム C (ΣM_1 が約 10.4 kg) 及びダム F (ΣM_1 が約 21.1 kg) は崩壊せずに、安定性を確保していた。ここで、ブロック堰堤における崩壊状況の一例 (ダム E) を図-8 (左) に示す。実験の観察によると、段波の衝撃時にブロックが下流側へ滑動して崩壊するのが見られた。ここで、段波衝撃時に堰堤へ作用した上流側面からの水圧等により、上部のブロック単体が安定できずに順に滑動した。ここで、上流からの段波に対して同一の安定性能を要求する場合、ブロック a はブロック b と比較して、コンクリート全質量の軽減において有意であることが分かった。この要因の一つとして、本体のブロック間の透過性能の違いや、積み方に影響を受けた噛み合わせ等による変形抵抗性能の違いによるものと考察される。これらの結果より、上流からの流体作用時の安定性能に関して、堰堤における透過性能の違いに伴う堰堤本体からの排水性能の向上による水圧低減効果⁷⁾や、ブロック間の噛み合わせ等の重要性が示唆された。

一方、水のみを供給した場合、ブロック a に対して、消波工 (ブロック c) を併用した堰堤形式 (Case 3-1、ダム G： ΣM_1 = 約 10.4 kg と、Case 3-2、ダム H： ΣM_1 = 約 8.7 kg) は崩壊しなかった。なお、水のみを供給したブロック b に対して、消波工を併用したダム I (Case 4-1、 ΣM_1 = 約 14.0 kg) は崩壊せず、ダム J (Case 4-2、 ΣM_1 = 約 12.3 kg) は崩壊した。消波工を併用した崩壊状況の一例 (ダム J) を図-8 (右) に示す。実験の観察によると、段波衝撃時には崩壊せずに、その後の堰堤上部からの顕著な後続流の越流により、ブロックが滑動 (水圧や揚力等によるブロックの移動) したものと考えられる。ここで、消波工を併用したダム H (Case 3-2) は、消波

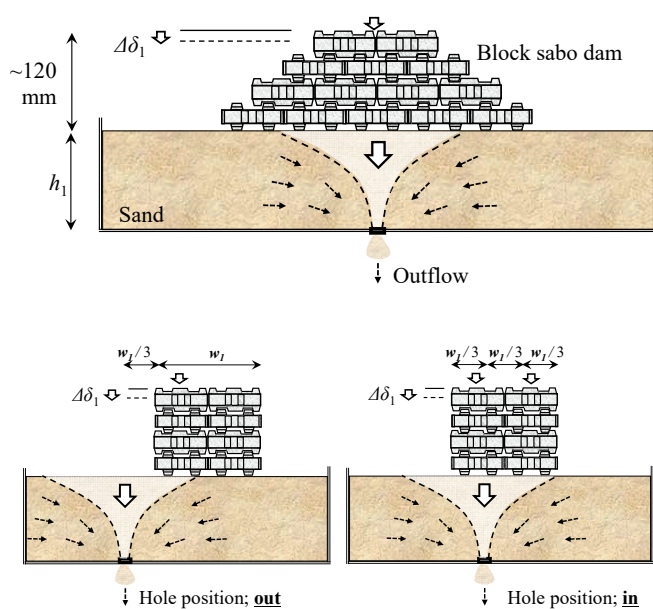


図-9 実験の概要（上:正面，左下: 側面-穴外，右下:側面-穴内）

工を併用していないダム C（Case 1-3）と比較して、堰堤上部の越流量が顕著に低減していることが分かった。この要因の一つとして、堰堤本体の上流側に設置した消波工により、上流からの段波の作用や流速を低減させて、結果的に越流量が低減したものと考察される²¹⁾。一方、土砂を混入させた土石流の場合、消波工を併用させた堰堤（Case:5-1, -2, ダム: H, I）は、土砂の混入に伴って堰堤に対して作用する力が増加すると想定されたが、違いや変化は殆ど見られないことが予備実験も含めて確認された。

これらの結果より、段波に対する同程度の安定性能を期待する場合、ブロックの噛み合わせや透過性能を有するブロック a は、それらの特徴を有さない直方体ブロック b と比較して、半分程度までのコンクリート総質量で構築できる可能性が分かった。また、これらのブロック堰堤の上流側に消波工を併用することにより、更に概ね 20～40 %までの総質量を低減できる可能性が分かった。

今回実施した実験は、ブロック堰堤におけるブロックの種類や堰堤形式の違いが安定性能に与える影響について、概略的に把握するための基礎的な実験に基づいた考察である。なお、小規模な実験における透水性の相似則については詳細な議論が必要²¹⁾であり、理論に基づく実規模における解析的な検討（例えば、解析シミュレーションによる実物大での検討）の併用も有効であると考ええる。今後は、河床勾配、粒径分布などの供給条件の変化、ブロック単体の安定性、実験規模の拡大化、流木の混入による影響等についても更なる検証を行う予定である。

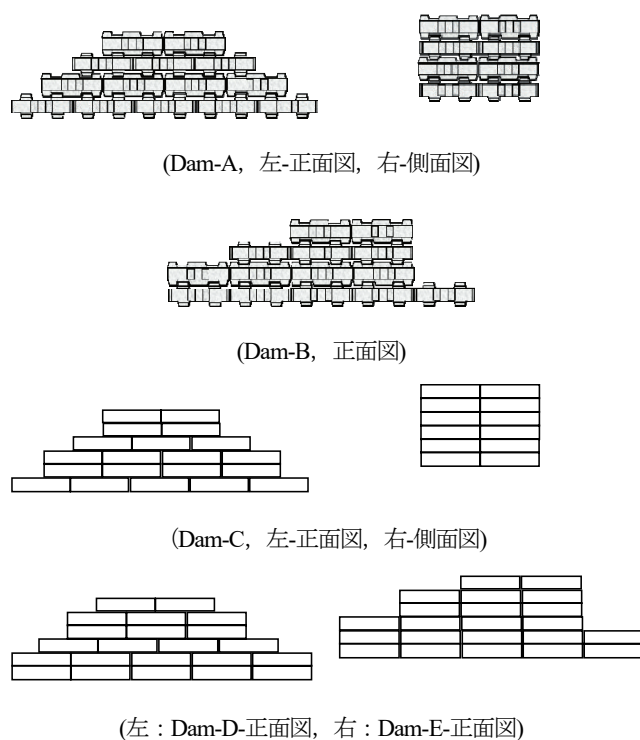


図-10 ブロック積砂防堰堤の形状

3. 変形地盤上における屈撓性能に関する基礎的な実験

実施した実験の概要を図-9 に示す。図-9 に示すとおり、1/25 程度の縮尺を想定し、高さ 10 cm、幅及び長さ 50 cm の水槽に一般的な珪砂（2 及び 5 号）を敷き詰めた後、その地盤上にブロック積砂防堰堤（堰堤）を構築した。そして、ブロック堰堤の基礎部の変形に伴うブロック堰堤の挙動（ブロック天端高さの機能確保：沈下量 $\Delta\delta_1$ ）について把握するため、敷き詰めた土砂を水槽底部に設けた穴（Hole-in, out）より排出させて、その挙動を観察した。なお、計測した沈下量 $\Delta\delta_1$ は、変形前のブロック天端高さ、土砂排出後の天端高さであり、この値が小さいほど、ブロック堰堤の捕捉機能が維持されていることを示している。

ブロック堰堤の本体を構成するブロックの種類や積み方での堰堤形状等の違いによる影響を把握するため、同様に、表-1 に示す 2 種類のブロック（a, b）を用いた。なお、ブロック a は、ブロック上下面に設けられた凹凸による噛み合わせと、その隙間（余裕）による屈撓性や変位抵抗性能が期待される汎用性のある二次製品ブロッ

ク¹⁸⁾（図-3）とした。一方、ブロック b は、ブロック a とほぼ同じ重量及び平面形状となるように、高さを調整させて構築した直方体のブロック b とし、ブロック間においては噛み合わせが期待できない凹凸の無い構造体

表-5 実験結果

Case	Block type	Dam type	Sand; silica	h_1 (mm)	Hole	$\Delta\delta_1$ (mm)
6-1	Block-a	Dam-A	No.2	80	In	18
6-2			No.5	80		12
6-3			No.2	50		11
6-4		Dam-B	No.2	80		41
7-1	Type-b	Dam-C				35
7-2		Dam-D	No.2	80	In	41
7-3		Dam-E				48
8-1	Type-a	Dam-A			Out	19
8-2		Dam-A'	No.2	80	In	18

A': Rotate the arrangement of A blocks at right angles



図-11 観察されたブロック積砂防堰堤における屈撓性能等の状況

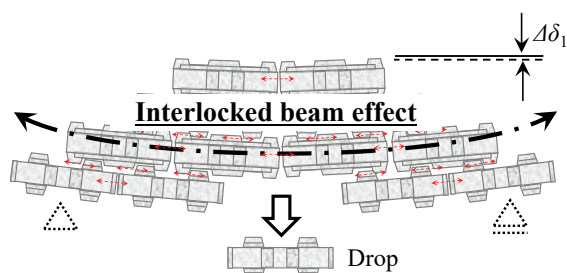


図-12 ブロック積砂防堰堤のインターロック・ビーム効果による変形地盤上における柔軟で粘り強い屈撓性能と変位抵抗性能

としている（表-1：下）。

また、ブロックを用いて構築した堰堤の形状を、それぞれ図-10に示す。本実験では、図-10の上半分に示す堰堤（堰堤；A、B）は、噛み合わせが期待できるブロック a（表-1：上）を用いて、堰堤の上下流における法勾配や天端の厚みを変化させて積み上げた。ここで、堰堤 A は横断方向（図-9：上）のみに噛み合わせが期待できる形状（積み方）とし、堰堤 B は噛み合わせを有

しない積み方とした。また、図-10の下半分に示す堰堤（C、D）は、直方体のブロック b（表-1：下）を用いて、同様に、堰堤の天端の厚み等を変化させて積み上げた。また、参考として、ブロック a における凹凸平面形状の違い（図-3）を考慮して、堰堤 A に対して各ブロックを 90 度回転させて積み上げた堰堤 A' を対象とした。さらに、基礎部の条件による影響を把握するため、土砂の材料（silica；No. 2 or 5）、土層厚 h_1 及び水槽底面の穴の位置（hole、図-9 参照）を変化させた。なお、実験は同じ条件にて 3 回実施して平均値を用いた。

実験条件に対してそれぞれ得られた堰堤天端高さの沈下量 $\Delta\delta_1$ に関する結果を表-5に示す。表-5に示すとおり、ブロック a を用いた噛み合わせによる変位抵抗が期待できる堰堤 A は、噛み合わせの無い堰堤（C、D）と比較して、顕著に沈下量 $\Delta\delta_1$ が低減する傾向であることが分かった。ただし、Case 1-4（ブロック a の噛み合わせが無い場合：堰堤 B）については、ブロック b を用いた堰堤の傾向と同じ程度に沈下していることがわかり、沈下に対する噛み合わせの重要性が確認された（図-11）。また、Case 3-1 や 3-2 の実験結果に示されるとおり、底面穴の位置（基礎変形位置：Hole）の変化や個々のブロックの平面向きの違い（堰堤 A'）による影響については、殆ど見られないことが分かった。

これらの結果より、凹凸を有したブロック間の噛み合わせにより、変形する地盤上における屈撓性能と、今回新たに提案するインターロック・ビーム効果（図-12）による最上段ブロックの変位抵抗性能が期待できることが分かった。このインターロック・ビーム効果とは、ブロック間の僅かな隙間による変形地盤への追従機能と、噛み合わせによって発揮される梁構造によるブロック堰堤の天端高さの維持機能を期待したものである。なお、今回実施した実験は、概略的に把握するための基礎的な実験であり、今後、更なる検証を行う予定である。

最後に、凹凸を有したブロック間の噛み合わせを期待したブロック堰堤を上下流に床止め工群として連続的に配置し、その上流側から流水を供給した場合の河床の安定化に関する実験状況を図-13に示す。図-13に示すとおり、変形地盤する地盤に追従しながら河床の安定化が図られていることが示唆された。

4. おわりに

本研究は、近年に期待されている二次製品ブロックを活用したブロック堰堤と海域で用いられている消波工（ブロック）を併用させた堰堤形式を新たに提案し、捕捉時における安定性能に関して、基礎的な実験等に基づいて考察したものである。なお、ブロック堰堤における



図-13 連続 sabo ダム群における屈撓性に関する実験

ブロック間の噛み合わせや透過性能の違いが土石流捕捉時における安定性能に与える影響について基礎的な実験により検証したところ、これらの特徴を有するブロックは、2 倍程度のコンクリート総質量を低減できる可能性が分かった。また、堰堤の上流側に、海域において一般的に用いられている消波工を併用したところ、更に 20～40 %程度の質量を低減できる可能性が分かった。更に、凹凸を有したブロック間の噛み合わせによる変形地盤上における追従機能と、梁効果によるブロック天端高の維持機能が期待されることが示唆された。

参考文献

- 1) Nishimoto, H.: A study on changes in the names of sediment transport phenomena and debris flows, Ph.D. Thesis, Tokyo University, 2010.
- 2) <http://www.cc.kochi-u.ac.jp/~matsuoka/nankai/18yamatsunami.html>, 参照 2023-05-19.
- 3) Kanno, M., Minami N., Shimizu, T. and Nakata, K.: Demonstration experiment on construction of large block stacking erosion control dam by ICT unmanned backhoe, Proceedings of annual conference of Ministry of Land, Infra-structure, Transport and Tourism, Hokuriku Regional Development Bureau Business Research Presentation, 2021.
- 4) 一般社団法人 建設コンサルタンツ協会：ブロック積砂防堰堤 活用事例集, 2023 (公開予定).
- 5) 砂防堰堤のコンクリートブロック自動設置事例, https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00142/010_85/, 参照 2023-05-19.
- 6) Takahashi, K., Ikeda, A., Hashiniki, T. and Maedera, M.: Consideration of external forces for emergency countermeasures against sediment movement phenomena associated with volcanic eruptions, Proceedings of annual SABO conference, Vol. 71, 2022.
- 7) 原田紹臣・藤本将光・里深好文・水山高久他：透過性を有するブロック積砂防堰堤の捕捉機能に関する基礎的な研究, 砂防学会誌 (投稿中).
- 8) Matsumura, K., Baba, K. and Yoshida, H.: Analytical study on detachment/ failure of fill-up concrete blocks for Sabo dams, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol.54, No.4, pp.43-53, 2001.
- 9) Matushima, Y., Ookubo, H., Katsushima, M. and Rokugo, K.: Application of light-weight HPFRCC to drop-type concrete blocks and evaluation of impact resistance performance by specimen drop test, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.36, pp.1123-1128, 2014.
- 10) Kotake, T., Kinoshita, A., Kanno, T., Kondo, K., Hashiguchi, S., Sato, T., Asari, S. and Akino, J: A study on the meshing effect of multipurpose blocks, SABO conference, Vol. 69, 2020.
- 11) 国土交通省砂防部：砂防関係施設点検要領, 2022.
- 12) 木下篤彦, 石田孝司：土石流発生箇所での応急対策工の損傷事例, 第 72 回 砂防学会研究発表会概要集, 2023.
- 13) Anno, K., Iwazuka, Y., Nishihata, G. Komaki, D., Mo-rioku, Y. and Ino, D.: The experimental study of stability of wave absorbing block caused by tsunami, Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser.B3, Vol.28, No.2, pp. I_90-I_95, 2012.
- 14) Mitsui, J., Kubota, S. and Matsumoto, A: Stability of armor units against tsunami-induced current, Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser.B2, Vol.73, No.2, pp. I_1027-I_1032, 2017.
- 15) Doi, Y. and Mizutani, N.: Experimental study on tsunami re-sistance stability of high-density wave-dissipating blocks: Proceedings of annual conference of the Japan Society of Civil Engineers, Vol. 69, II-28, pp.56-56, 2014.
- 16) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：土石流・流木対策設計技術指針 解説, 国総研資料第 905 号, 78 pp., 2016.
- 17) Takahashi T.: Debris Flow, mechanics, prediction and countermeasures, 2nd edition, CRC Press, 572p., 2014.
- 18) 芦田和男：河川の土砂災害と対策 (防災シリーズ 5), 森北出版, 260p., 1983.
- 19) https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/details?Reg_No=CB-150012%20, 参照 2023-05-19.
- 20) http://www.ryowa-concrete.jp/seihin_d_link/cl_1.htm, 参照 2023-05-19.
- 21) 土木学会 海岸工学委員会海岸施設設計便覧小委員会：海岸施設設計便覧 (2000 年版), 582pp., 2000.
- 22) Yang, H., Fukumoto, Y., Hosoyamada, T. and Ohtsuka, S.: On the similarity of a hydraulic model experiment for a river including seepage flow through saturated porous riverbed

materials, Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser.A2,
Vol.76, No.2, pp. I_411-I_422, 2020.

ジオセルの地盤補強効果の解析法

Analysis method for the reinforcement effect of geocell reinforced soil

宮本慎太郎*, 宮田喜壽**, 野々山栄人***

MIYAMOTO Shintaro, MIYATA Yoshihisa, NONOYAMA Hideto

*博（工）防衛大学校准教授，システム工学群建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

**博（工）防衛大学校教授，システム工学群建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

***博（工）防衛大学校准教授，システム工学群建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

キーワード：ジオセル，地盤補強効果，解析法

(Geocell, reinforcement effect, analysis)

1. はじめに

災害時の復旧道路や建設現場での仮設道路など，短期間での施工性や使用性が重要になる土工構造物は多い．時間的な制約のある中で道路施工を考えると，現地土の活用や重機利用を最小限にした施工など，様々な現場状況に柔軟に対応できる地盤技術の開発が重要になる．筆者らは，そのような考えに基づき，ジオセル¹⁾³⁾による地盤補強技術に着目して研究を進めている⁴⁾⁶⁾．一連の研究では，まずジオセル補強地盤に対する剛性車輪の移動載荷模型実験を行い，ジオセルによって地盤の沈下量を抑制できることを明らかにした．この実験によって，ジオセルを道路復旧や仮設道路で活用することで，車両走行性が向上することを検証することができた．この成果に基づき，本研究では，ジオセル補強地盤の材料仕様や設計・施工技術の高度化を図る上で重要になる補強メカニズムの解明や移動輪荷重が作用する際の地盤沈下量の評価モデルについて検討した．本文では，模型実験結果を元に，ジオセルの移動輪荷重作用時の沈下量の抑制効果を表現するための力学モデルを構築した成果を報告する．模型実験の概要を示すとともに，提案する力学モデルの概要およびその妥当性を実験結果との比較により検証した結果を示す．

2. 剛性車輪の移動載荷模型実験の概要

移動載荷模型実験の詳細については，既報告⁵⁾を参照いただきたい．本文では実験および結果の概要のみを紹介する．

車両走行時のジオセルによる補強効果を明らかにするために，剛性車輪（以下，単に「車輪」）を移動させて車輪の鉛直・水平変位を計測する移動載荷模型実験を行った．

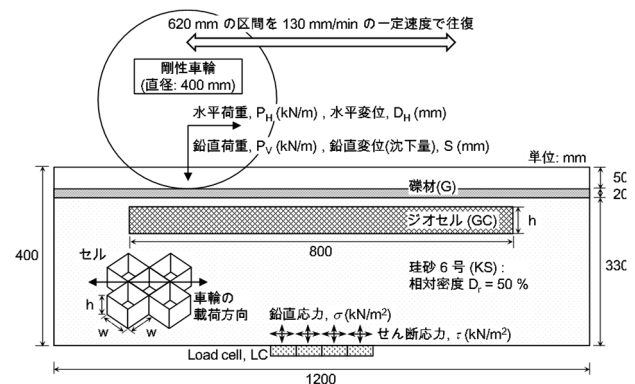


図-1 剛性車輪の移動載荷模型実験装置の概要

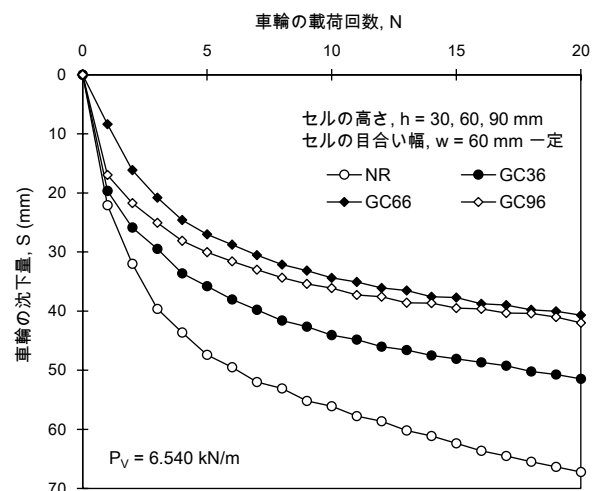


図-2 模型実験結果：車輪の載荷回数と沈下量の関係

実験装置の概要を図-1 に示す．本装置は土槽と車輪を載荷・移動させる載荷枠から構成される．土槽寸法は長さ1200mm，幅305mm，高さ400mm，車輪寸法は直径400mm，

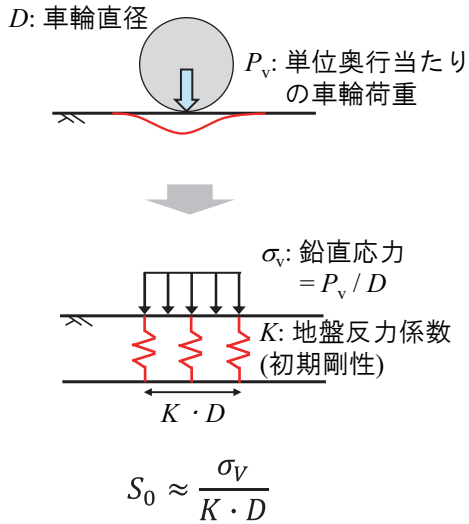


図-3 車輪の荷重による影響の評価

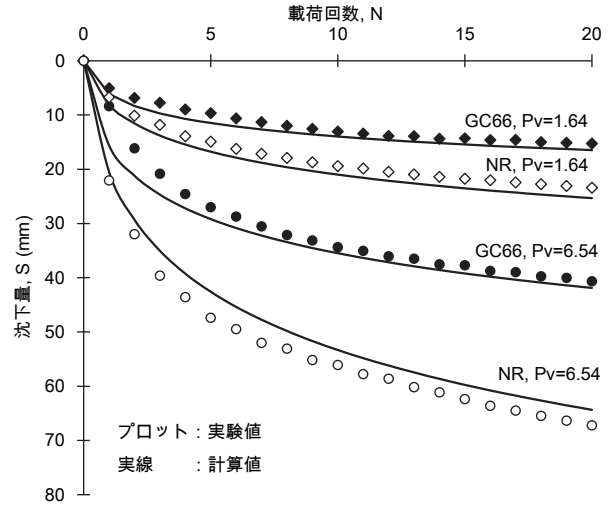


図-4 実験結果と解析結果の比較

幅 300mm である。土槽と車輪の幅が同等であるので、実験は平面ひずみ条件となる。車輪の鉛直荷重と移動速度は、それぞれベロフラムシリンダとモータにより制御する。実験では、一定の鉛直荷重状態で、一定の移動速度で車輪を水平移動させ、車輪の水平・鉛直変位を計測した。

移動載荷模型実験の結果として、土槽長さ方向の中心位置における車輪の載荷回数と沈下量の関係を整理した。結果の一例として、車輪の鉛直荷重 $P_v = 6.540 \text{ kN/m}$ における結果を図-2 に示す。実験結果より、無補強、ジオセル補強ともに載荷回数に伴い沈下量が非線形に大きくなることがわかる。具体的には、載荷回数 5 回目での沈下量が顕著で、10 回目以降の沈下量の増加はそれほど大きくない。今回の実験ではジオセル補強ケースでは無補強ケースに比べて、車輪の沈下量が 0.5~0.8 倍程度に抑制された。ユニットセルの高さの影響については、セル高さが大きくなると沈下抑制効果は大きくなり、今回の実験では、 $h = 60 \text{ mm}$ 以上で沈下抑制効果がおおよそ一定になる傾向を示した。

3. 移動輪荷重作用時の地盤沈下量を評価する力学モデルの提案

模型実験の結果より、ジオセルの有無にかかわらず、車輪の載荷回数と沈下量の関係は近似的に以下の式で表現することができると仮定する。

$$S = S_0(\sigma_v, K) \times g(N) \quad (1)$$

ここで、 S_0 は車両の荷重による影響を表す項、 $g(N)$ は繰返し移動載荷による影響を表す項である。このようなモデルは一般に現象論的モデルと分類され、今回のモデルの特徴な静的沈下に関する項と繰返し効果を表す項を分離したことに特徴がある。

$S_0(\sigma_v, K)$ は、図-3 に示すように、車輪の鉛直荷重と地盤の支持力に大きく相関があり、以下の式で評価できると仮定する。

$$S_0(\sigma_v, K) = a \left(\frac{\sigma_v}{K \cdot D} \right)^b \quad (2)$$

ここで、 σ_v は単位奥行き当たりの車輪荷重を車輪直径 D で除した車輪の鉛直応力、 K は地盤反力係数である。今回の実験結果を元に、 S_0 と $\sigma_v / (K \cdot D)$ の相関を解析したところ、 S_0 と $\sigma_v / (K \cdot D)$ の関係はジオセルの有無に関わらず累乗の式で表現でき、そのパラメータは $a = 756$ 、 $b = 0.67$ と求められた。

$g(N)$ は、載荷回数に応じた沈下量の増加傾向を示す項であり、以下の式で表される。

$$g(N) = \log(cN + 1) \quad (3)$$

パラメータ c によって沈下量の増加傾向が異なる結果を表現できる。模型実験結果を元に、パラメータ c を逆算した。無補強とジオセル補強でパラメータ c は異なるが、載荷荷重の大きさには独立になることが明らかになった。今回の実験では、無補強では $c = 2.4$ 、ジオセル補強では $c = 3.9$ と算定された。なお、このパラメータ c は、ジオセル補強ケースでは、ジオセルの寸法によらずに一定の値として評価できるという知見が得られた。

以上より、提案モデルと実験結果を比較して妥当性を検証した。結果の一例として、無補強(NR)とジオセルの高さ $h = 60 \text{ mm}$ のジオセル(GG66)における車輪の鉛直荷重 $P_v = 1.64$ および 6.54 kN/m での、車輪の載荷回数と沈下量の関係を図-4 に示す。プロットが実験結果、実線が解析結果を示している。結果より、提案モデルは車輪の載荷回数に応じた沈下量の増加傾向を比較的良好に表現していることが明らかになった。車輪の鉛直荷重、無補強および高さの

異なるジオセルの全ケースにおいても同様であり、提案モデルは実験結果をよく評価できることを検証した。

Resources for Environmentally Sustainable Technologies,
Paper ID B2959, 8 Pages, 2023.

4. まとめ

本研究では、ジオセルを用いた道路の復旧および仮設技術を確立するために、車両走行時における無補強およびジオセル補強地盤の沈下量を評価する力学モデルについて検討した。提案モデルは、車両の荷重による影響と繰返し载荷による影響を数少ないパラメータで表現できることを示した。また、提案モデルは、無補強およびジオセル補強地盤の地盤反力係数、および繰返し载荷による影響を表すパラメータによって、無補強に対するジオセルの沈下量抑制効果をうまく考慮して、車輪の载荷回数と沈下量の関係を表現できることを示した。

本研究では限られた室内実験結果を元に車両走行時の地盤沈下量を予測する力学モデルを構築した。今後の課題として、より幅広い条件での室内および実大走行試験などのデータによって提案モデルを実規模の評価に拡張することが挙げられる。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京インキ株式会社より、ジオセルに関する情報提供を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Webster, S.L.: Investigation of beach sand. -Trafficability enhancement using sand-grid confinement and membrane reinforcement concept. Report GL-79-20, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1979.
- 2) 川俣さくら, 原田道幸, 大山亮貴, 宮本慎太郎: ジオセルの材料特性と適用例, 防衛施設学会年次フォーラム, 2021.
- 3) Bathurst, R. J. and Jarrett, P. M.: Large-scale model tests of geocomposite mattresses over peat subgrades, Journal of Transportation Research Board, Vol. 1188, pp. 28-36, 1988.
- 4) Miyamoto, S. and Miyata, Y.: Visualization of bearing capacity mechanism of geocell reinforced soil foundations, Proc. of Transportation Soil Engineering in Cold Regions, Vol. 2, pp. 3-12, 2019.
- 5) 宮本慎太郎, 宮田喜壽: ジオセル補強地盤の車両走行性に関する室内模型実験, 防衛施設学会年次フォーラム, 2023.
- 6) Miyamoto, S. and Miyata, Y.: Laboratory Evaluation of Geocell Reinforcement Technology for Road Restoration, Proc. of 2nd International Conference on Construction

1 km先を照らす可視光レーザー投光技術

VISIBLE LIGHT LASER PROJECTION TECHNOLOGY THAT ILLUMINATES UP TO 1 KM AWAY

石川功一*, 丸山広太郎**

Kouichi Ishikawa and Koutarou Maruyama

* 岩崎電気株式会社 商品開発部（〒361-8505 埼玉県行田市荻里山町 1-1）

** 岩崎電気株式会社 電材営業部（〒103-0004 東京都中央区東日本橋 1-1-7）

キーワード：レーザー照明，超狭角投光器，レーザー照明の安全に関するガイドライン
(*Laser lighting, Ultra narrow-angle floodlight, Laser Lighting Safety Guidelines*)

1. はじめに

LED 照明器具は、蛍光灯や HID といった従来光源と比較して発光素子が小さいため、配光制御がしやすく照明率が優れているといった特徴がある。一方で LED は、所望の光学特性(光量)を得るためには、照明器具の中に多数の LED 素子を並べる必要があり、出力の大きな照明器具になるほど配光制御が難しくなり、エネルギー損失が大きくなるといった課題がある。そのため、大出力のサーチライトのような超狭角投光器では、未だにキセノンランプなど、高輝度点光源を有する放電灯が使われているのが現状である(図 1)。そこで本開発では、レーザー光を蛍光体に集光することで、固体光源を用いた高輝度点光源を実現し、一般照明用途として、キセノンスポットライト代替品となる超狭角のレーザー投光器の製品化を実現した。本稿では、その概要、従来技術と比較した技術的な特長などについて述べる。

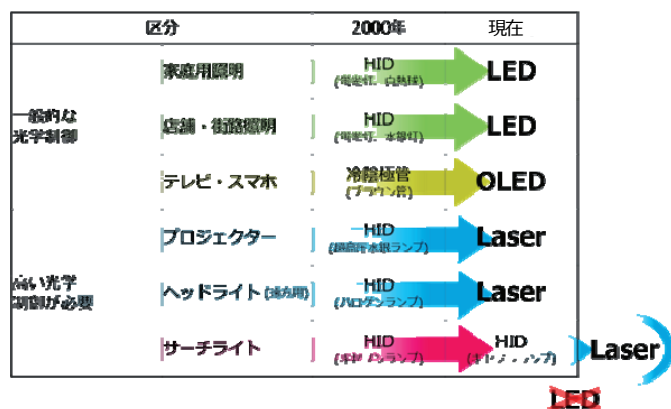


図 1. 光源の個体光源への置き換え

2. 開発品の概要

照明用の光源として、青色半導体レーザーと蛍光体を用いた高輝度の白色点光源を実現し、屋外常設に耐えうる、耐震性、耐衝撃性、耐雷サージ性能、防水性能などを有した軸光度が高く、遠方に光を届けることができる超狭角投光器を開発した。外観図を図 2 に、外形寸法図を図 3 に、配光性能を図 4 にそれぞれ示す。軸光度 1,800 万 cd を有するため、1 km 先を 18 lx で照らす事ができ、1 lx 到達距離は、4.2 km となる。

器具外部に射出される光は、青色レーザー光を蛍光体で白色光に変換することでレーザー光を含まない自然光(インコヒーレント光)に変換することで後述の安全性に関する認証をクリアしている。



図 2. 外観図

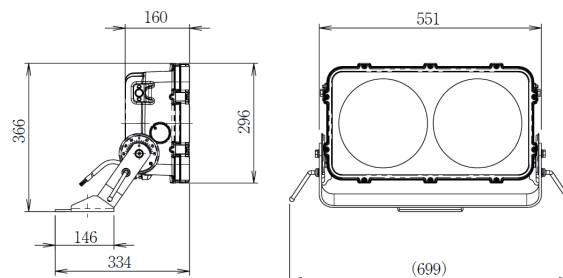


図 3. 外形寸法図

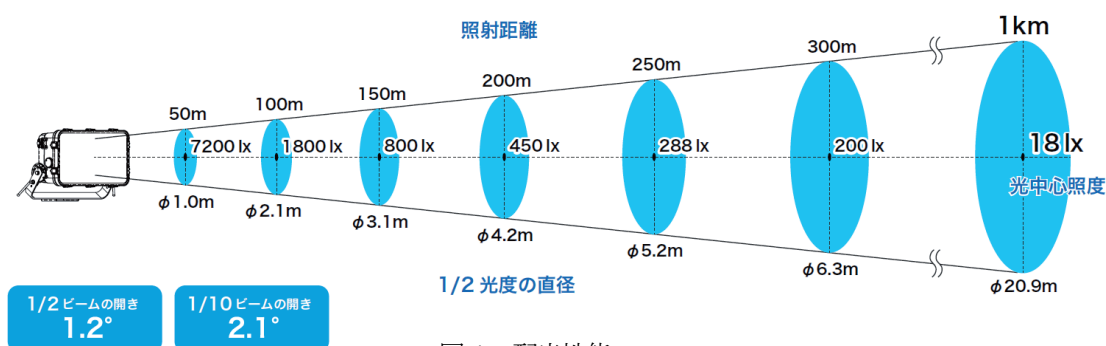


図4．配光性能

3. レーザー光源ならびに狭角投光器の技術動向

3.1 レーザー光源の先行技術

青色半導体レーザーを用いて蛍光体を励起する点光源技術については、主にプロジェクター分野で実用化が広がっている。従来の放電ランプから上記点光源技術に移行することで、プロジェクターの寿命が大幅に改善し、低消費電力化も実現した。しかしながら、レーザープロジェクターの光源は、蛍光体冷却用の回転ホイールなどの駆動部材から構成されており、屋外における長期的な風圧荷重や振動に光学系が耐えられず、耐衝撃性も低い。また、屋外相当の防水性と雷サージ対策もされていないため、長期的な屋外設置は不可能であった。

3.2 狭角投光器の現状

従来、遠方スポット照明としてキセノンスポットライトが、モニュメント照明や、陸橋などの大規模施設の照明、イベントの演出照明や、スタジアムなどにおけるヒーローインタビュー、災害時用の監視照明、船舶照明などの分野で使用されている。LEDの技術革新が進んではいるが、キセノンランプと同等の高輝度な点光源は実現できていない。そのため、現在でもLEDを用いた狭角投光器では、軸光度が100万cd程度であり、1,000万cdを超えるキセノンスポットライトへの置き換え製品は実現できていない。

4. 本開発品の従来技術との差異

4.1 キセノンスポットライトとの比較

本開発品（以下、レーザー投光器）と、キセノンスポットライトの特性比較を表1に示す。レーザー投光器は、固体光源を用いることで、キセノンスポットライトと同等の軸光度、及びビームの開きを、1/5の消費電力で実現した。

また、キセノンスポットライトは、光源寿命が600hと短く、頻繁なランプ交換が必要だったが、レーザー投光器の光源寿命は従来の10倍以上である10,000hとなることで、省メンテナンス性を実現した。さらに、キセノンランプはサイズが大きく、点灯電源も高圧パルス及び直流高電圧が必要になるため、灯具、電源ともに大型で重くなる。一方、レーザー投光器では、光源部が小さく、LED照明器具と同等の電源で点灯できることから、灯具、電源ともに、小型、軽量化を実現した。

表1．特性比較

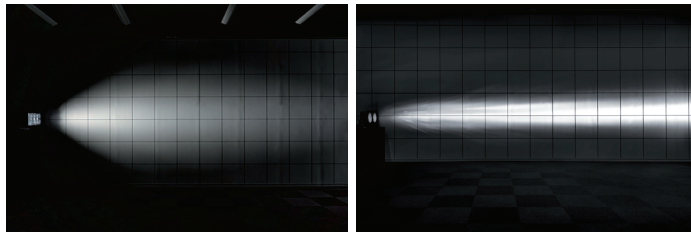
（ ）内は従来比

	レーザー投光器 LAXIS （開発品）	キセノンスポットライト （従来品）
軸光度	1,800万 cd（同等）	1,800万 cd
1/10ビームの開き	2.1°（同等）	2°
光源消費電力	220 W（78%減）	1,000 W
器具消費電力	236 W（85%減）	1,500 W
重量	27 kg（72%減） 灯具 15.5 kg、電源 5.2 kg	75 kg 灯具 55 kg、電源 20 kg
灯具寸法	551×296×160 mm（50%減）	300×300×600 mm
光源寿命 （光束維持率70%）	10,000時間（16.7倍）	600時間
冷却方式	自然空冷	ファンによる強制空冷

なお、LAXISの電源寸法は、351×141×101mmです。

4.1 光源の光束密度と配光の広がり

LED光源では、高輝度なもののでも素子1mm²あたりの光束は、28 lm/mm²である。そのため、大光束を実現しようとすると、光源サイズを大きくしなければならず、光学効率が低下し、狭角LED投光器では図5（左図）のように配光が広がってしまう。他方、レーザー投光器では、レーザー特有の集光性を利用し、707 lm/mm²と、LEDの25倍の光束密度の点光源を生成し、精度の高い配光制御を実現することで、図5（右図）のようなシャープな配光を実現することができた。



LED 狭角投光器

レーザー投光器

図 5. 配光比較

5. 本技術開発の概要

5.1 独自光学系ならびに安全機構の開発

青色半導体レーザーの射出光は、ビームの開きが横方向と縦方向で大幅に異なる特徴がある。そのため、一般的な非球面レンズで蛍光体に集光すると、円形状に集光されずに、投光面も歪となる。そこで本開発品では、ビームの開きに合わせた特殊レンズを設計し採用したことで、蛍光体面で集光された光を円形状とすることができた。また、耐熱性が高く色ムラがない特殊な蛍光体を採用し、放熱構造を最適化して駆動部材のない独自の自然冷却構造を実現することで、長期的な器具の信頼性と静音性を確保している。故障時の安全対策としては、青色レーザー光が外部に直接射出されないように、光学部材の2重固定や遮光板の設置など、多重フェールセーフ構造としている。上記の構造的な対策に加え、器具内のセンサーで白色光を常時監視し、レーザー光が外部に漏れるといった異常が発生した際にレーザー出力を遮断する安全機構を具備している。

5.2 規格及びガイドラインの策定

レーザー光源を用いたプロジェクターについては、安全性に関するガイドラインが存在していたが、レーザー光源を用いた照明器具についての安全ガイドラインは存在しなかった。そのため、119 団体からなる業界団体である、可視光半導体レーザー応用コンソーシアムにおいてタスクフォースを立上げ、レーザー照明に関する安全ガイドライン(図 6)を策定し、準拠する構成とした。また、レーザー製品としての評価は、国際規格 IEC60825 及び、IEC62471 の内容にて外部機関の認証を得た。

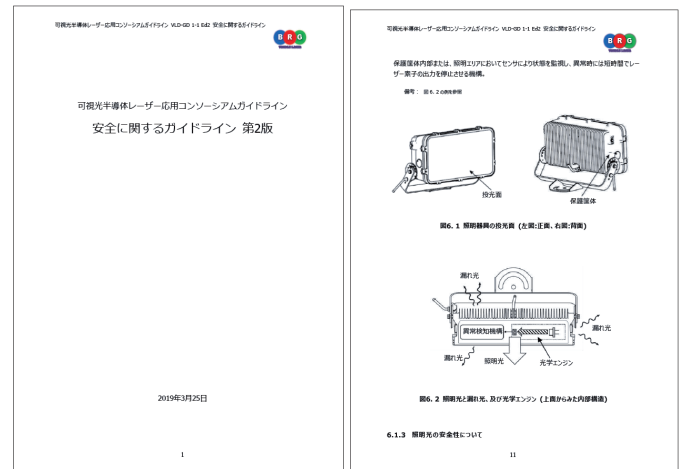


図 6. レーザー照明のガイドライン (一部抜粋)

5.3 施工例

レーザー投光器と、LED 投光器を組み合わせた構成とし、超狭角性能を用いたレーザー投光器の光芒（空気の散乱による光の筋）で、神秘的な演出を実現した(図 7)。射出光はレーザー光ではないため、航空法には抵触しないが、天空への光害を考慮し、レーザー投光器の照明光が天空に照射されないように設置した。



図 7. 和奏光夜 尾長天満宮ライティング(広島県)

また、プロサッカーチームのホームスタジアムで使用する多目的球技場に施工した様子を図8に示す。レーザー光の特性をいかした超狭角配光でヒーローインタビューなどの際に印象的にピッチを照らし出す照明演出を実現した。



図8. フクダ電子アリーナ(千葉県)

6. おわりに

本稿では、レーザー光源を用いた投光器について概説した。本開発技術は、社会に貢献が期待される業績として、照明学会より第18回照明技術開発賞を受賞した。

今後、「自衛隊施設の強靱化」に向けて最適化事業が計画されており、本開発技術は次のような場面での活用が想定される。

- ・夜間、遠方の目視監視用（1 km～4 km）
- ・夜間・災害時、遠方からの搜索や状況確認用
- ・防犯対策向けの威嚇用

この他にも自衛隊施設特有の用途に期待を抱いており、今後、照射実験などを通じて多様な視点や意見が重要であると推察される。

コルゲートアーキテクチャー

CORRUGATED ARCHITECTURE

揚原茂雄*, 遠藤秀平**, 李鍾和***

AGEHARA Shigeo, ENDO shuhei and RHEE Jongwha

* Structural NET（〒151-0053 東京都渋谷区代々木2-21-10 代々木パレス 501）

** 美術博士 神戸大学名誉教授（〒530-0052 大阪市北区南扇町7番2-210号）

*** ChungAm EnC（〒08584 A-1305 70 Doosan-ro Geumcheon-gu Seoul）

キーワード：コルゲート、鋼板、薄鋼板、ボルト接合、座屈、無柱大空間

(Corrugate, Steel plate, thin steel plate, Bolted joint, Buckling, Large space without pillars)

1. はじめに

近年の鉄鋼技術は、超高層建築などの重厚長大な構造物を可能にし、柱・梁の線材構成により多様な建築を実現してきた。一方で、地球環境を守るという視点から、鉄材本来の性能を合理的かつ機能的に発揮できる薄鋼板を利用して、最小限の鋼材料で無柱の大空間を創り出す手法を開発することは重要な課題である。薄鋼板とは、厚さ6mm未満の鋼板を指す。薄鋼板の接合には従来の溶接や高力ボルト摩擦接合（HTB）とは異なる接合技術が要求される。日本建築学会では、2024年に「軽鋼構造設計施工指針」を大改訂し、薄鋼板への注目も集まっている。

本研究では、コルゲート鋼板を用いた建物「コルゲートアーキテクチャー」の試設計と、実装を行う。コルゲート鋼板は、朝鮮戦争を契機として、アメリカ軍から導入された技術であり、土木分野で埋設管などに利用されてきた。建築分野では、コルゲートパイプの規格を利用した川合健二郎の自邸・通称「ドラム缶の家」（1966年）が有名であるが、建築構造体としての実装例は少ない。

コルゲートの規格は4種類ある（図1）。日本で流通している1型、2型のコルゲートは、波高が13mm、48mmで、10m以下のスパンに適している。3型、4型のコルゲートは、波高が140mm、237mmと大きく、20m～50mの大スパンが可能となる。本研究では、大波の3型、4型を使用する。コルゲートのユニット図を示す（図2）。長さ方向の接続は、波の山と谷をボルト接合し、軸力だけではなく、曲げモーメントも伝える。境界ボルトにより、隣り合うユニットに面内せん断力を伝える。面外方向にも曲率成形したユニットを組み合わせ、自由な建物形状をつくることができる。

コルゲートは外装材を兼ねるため、仕上材や受け材が要らない。単位重量は3型3.2mmで32kg/m²、4型6mmで68kg/m²と軽量で、重ねて運べるため、運搬性に優れている。ボルトの締め付けのみで架構を形成でき、熟練工に頼ることなく施工ができる。解体撤去が容易で、移設再利用が可能である。これらの特徴はSDGsへの対応として多くの面での親和性がある。倉庫や、大空間格納庫だけでなく、仮設住宅や避難住宅への利用が期待される。

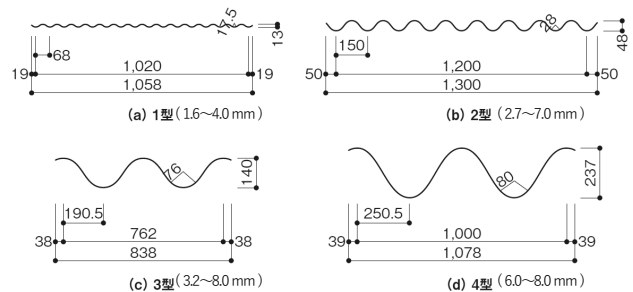


図-1 コルゲートの形状

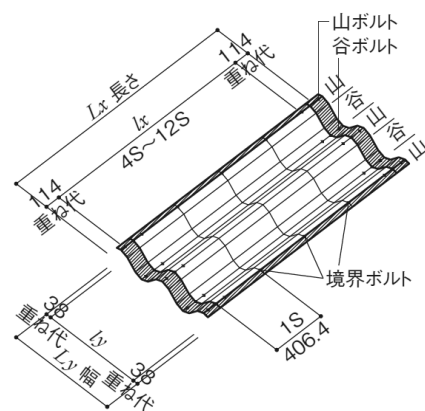
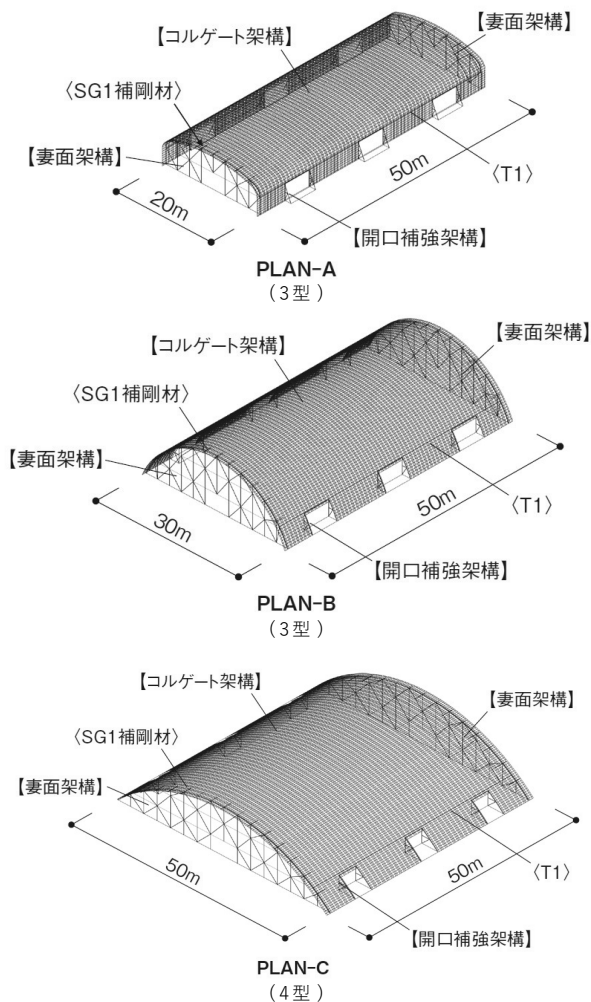


図-2 ユニット図

2. 「コルゲートアーキテクチャー」の試設計

2.1 構造計画

PLAN-A～C の3つの形状で試設計を行う（図3）。PLAN-A は梁間スパン 20m の箱型形状、PLAN-B は梁間スパン 30m の半円アーチ形状、PLAN-C は梁間スパン 50m の低ライズアーチ形状とする。桁行方向はどのPLAN も 50m とする。桁行方向の水平力はコルゲート架構が、梁間方向の水平力は妻面架構が負担する。コルゲート面内には開口を設ける。コルゲート脚部はピン支持とする。



図－3 試設計モデル

コルゲートアーキテクチャーは、梁間方向に静定次数が低い構造体となる。そのため部材の塑性化は考えず、すべての荷重条件で弾性設計とする。

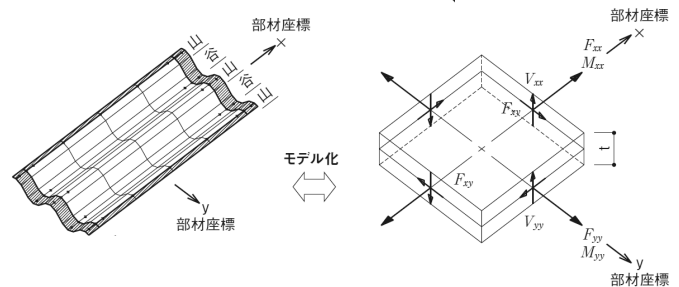
「コルゲートアーキテクチャー」の実装のため、解析モデルを単純化し、汎用性のある構造設計手法の標準化を目指す。

2.2 設計荷重

コルゲートの自重は、コルゲートの重ね代を考慮し、1.2 倍とする。積雪荷重は、等分布荷重と、曲げモーメントが増える雪解けや落雪時の偏分布を考える。塑性域を考慮しない設計のため、地震荷重は 1G とする。風荷重は、円筒形屋根の風力係数を用いる。外装材を兼ねるコルゲートは、直射日光を受ける。温度荷重は、長期的な年変化と、短期的な温度変化を考える。

2.3 解析モデル

コルゲートの断面性能を示す（表1）。波形状をしたコルゲートを平板にモデル化する（図4）。コルゲートには方向性があり、各方向の軸剛性、曲げ剛性、面外・面内の剪断剛性、ねじれ剛性を、一つの板要素にモデル化する必要がある。板剛性に増減係数を与えることで、適切にモデル化する。波型の詳細モデルと比較し、モデル化の妥当性を検証する。平板要素モデルなら、各方向の軸力・曲げ・せん断力成分を個別に知ることができ、設計上扱いやすい。



図－4 板要素置換

表－1 コルゲートの断面性能

	H	B	t	Axx	Ayy	tAxx	tAyy	wAxx	Axy	lxx	lyy	Zxx	Zyy	ixx
	mm	mm	mm	cm ² /m	cm ² /m	cm ² /m	cm ² /m	cm ² /m	cm ² /m	cm ⁴ /m	cm ⁴ /m	cm ³ /m	cm ³ /m	cm
3形	143	762	3.2	41.5	32.0	37.1	31.4	14.2	32.0	956	0.3	134	1.7	4.8
	144	762	4.5	58.3	45.0	52.1	44.4	19.8	45.0	1350	0.8	187	3.4	4.8
	146	762	6.0	77.7	60.0	69.5	59.4	26.0	60.0	1807	1.8	248	6.0	4.8
	148	762	8.0	103.5	80.0	92.6	79.4	34.0	80.0	2424	4.3	328	10.7	4.8
4形	243	1000	6.0	86.6	60.0	73.2	59.3	39.6	60.0	5485	1.8	451	6.0	8.0
	245	1000	8.0	115.6	80.0	97.7	79.3	52.3	80.0	7346	4.3	600	10.7	8.0

2.4 全体座屈と局部座屈

薄板構造の場合、全体座屈と局部座屈を同時に考える必要がある。全体座屈と局部座屈から求まる耐力を比較し、小さい値を採用する。

全体座屈については、コルゲート架構の座屈解析より座屈応力度を算出する。

「鋼構造許容応力度設計規準」では、圧縮材の許容応力度を座屈応力度に座屈安全率を含んだ形で次のように与えている。

$$f_c = \sigma_{cr} / v \tag{1}$$

ここに、 f_c : 許容圧縮応力度
 σ_{cr} : 座屈応力度
 v : 座屈安全率 (=2.17)

コルゲートの局部座屈耐力は、波形状をフランジとウェブに見立て算出する(図5)。①、③をフランジに、②をウェブに割り当てる。「鋼製薄板架構の設計例」の、デッキプレートの基準強度の算出式より基準耐力を求める。

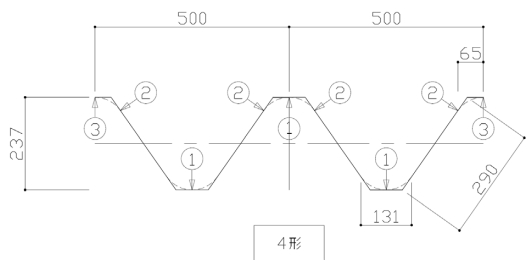


図-5 フランジとウェブの割り当て

下表に長期許容圧縮応力などの結果一覧を示す。

表-2 長期許容圧縮応力度							
SS400	コルゲート		fc			fb	fs
	形	板厚	fc1	fc2			
		mm	N/mm2	N/mm2	N/mm2		
PLAN A	3	3.2	29	131	29	157	90
		4.5	29	157	29	157	90
		6.0	29	157	29	157	90
		8.0	29	157	29	157	90
PLAN B	3	3.2	6.9	131	6.9	157	90
		4.5	6.9	157	6.9	157	90
		6.0	6.9	157	6.9	157	90
		6.0	6.9	157	6.9	157	90
		8.0	6.9	157	6.9	157	90
PLAN C	4	6.0	8.8	157	8.8	157	90
		8.0	8.8	157	8.8	157	90

2.5 接合部の設計

薄板の接合部耐力は、ボルト耐力で決まらず、母材の支圧耐力で決まる。また、3型、4型のボルトクリアランスは施工性を考慮し、+6mmと大きいため、ボルトクリアランスによる初期変形後の形状でも解析を行う。

2.6 解析結果

- ・箱型形状のPLAN-Aは曲げ応力成分が支配的で、アーチのPLAN-Cは軸力成分が支配的となる。
- ・コルゲート架構と妻面架構の変形量が違うため、コルゲートの桁方向にも応力が発生する。
- ・コルゲートが軽量なため、地震時の影響は小さい。
- ・妻面架構の地震せん断負担率は、70～88%となった。
- ・風荷重時の応力は、引張荷重が支配的となり、コルゲート架構への影響は小さい。
- ・ボルトクリアランスによる初期変形後の結果は、変形前とほぼ同じで、クリアランスによる影響は小さい。
- ・座屈解析結果から得られる圧縮応力度を座屈長さに換算してみると、コルゲート梁間方向全長の半分となる。
- ・温度による変形は、梁間方向はアーチ効果、桁方向はコルゲートの蛇腹効果で吸収され、小さい。

3. 「コルゲートアーキテクチャー」の実装

3.1 構造計画

大阪市平野区の下町工場内に、「コルゲートアーキテクチャー」(設計・監理/遠藤秀平建築研究所)を実装する。3型を構造体とした工場である。

梁間スパン 20m の円筒アーチ形状で、桁方向は 30m である。両側に妻面架構を配置する。コルゲート面に搬入用の開口部を設ける。試設計に沿って、実施設計を行う。

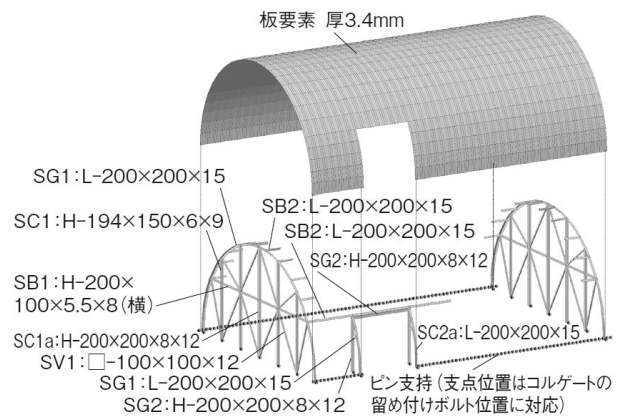


図-6 解析モデル図

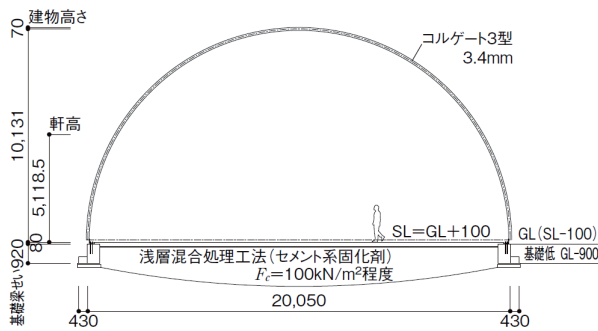


図-7 軸組図

3.2 施工

コルゲートの加工手順と、建方手順を写真に示す。工場で加工された約280枚のコルゲートが、コンテナで現場に届く。同封された指示書に従い無支保工で建て方を行うため、コルゲート架構の施工は1週間ほどで終わる。使用するコルゲート3型3.4mmの単位重量は、重ね代を考慮した単位重量は40kg/m²で、建築面積当たりの単位重量は、約64kg/m²となる。



波形規格製品の生産

設計図に準じたオーダーメイド曲率成形



事前組立品質検査

バンドル包装とコンテナ輸送

写真-1 加工状況



写真-2 建方状況

4. まとめ

試設計を行い、「コルゲートアーキテクチャー」の計算手法の標準化を示した。実装を行い、加工性、運搬性、施工性を確認した。

謝辞

試設計に御協力頂いた照井構造事務所、実施設計に御協力頂いた坂田建築工学研究所、評定取得や、制作、施工に御協力いただいた各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鋼構造許容応力度設計規準- 2019 年 編集：一般社団法人 日本建築学会
- 2) 期限付き構造物の設計・施工マニュアル・同解説 1995 年 編集：一般社団法人 日本建築学会
- 3) 建築技術 2023 年 2 月号：軽鋼構造の新たな可能性を探る



写真-3 外観写真



写真-4 内観写真1



写真-5 内観写真2

「基地維持・管理」

GMS3（地中レーダ3次元モバイルマッピングシステム）による 埋設管マッピング及びインフラ管理技術

BURIED PIPE MAPPING AND INFRASTRUCTURE MANAGEMENT TECHNOLOGY WITH GMS3
(GROUND-PENETRATING RADAR MOBILE MAPPING SYSTEM 3D)

篠原潤*
SHINOHARA Jun

* （一社）日本インフラ空間情報技術協会（〒136-0071 東京都江東区亀戸1丁目5-7）

キーワード：地中探査，モバイルマッピングシステム，埋設物調査，埋設管マッピング，インフラ管理
(Subsurface exploration, mobile mapping system, buried object survey, buried pipe mapping, infrastructure management)

1. はじめに

高度成長期以降に整備された道路橋、トンネルや下水道などのインフラは今後20年で建設後50年以上経過する施設の割合が加速的に高くなる。インフラの老朽化は人命に関わる事故やライフラインの寸断といった深刻な問題を引き起こすため、喫緊の課題である一方、多額の費用を要する悩ましい課題である。また、上下水道など埋設管の老朽化による更新工事や近年激甚・頻発化している災害の際の人命救助・支援物資輸送に重要な輸送道路を中心に無電柱化も進められており、いかに効率的に工事を進めるかといった課題もある。

我が国では、昭和60年代初頭から電線類を地中へ埋設するなど無電柱化について計画的に取り組まれてきており、一定の整備が図られてきたが、その水準は、欧米はもとよりアジアの主要都市と比較しても大きく立ち遅れている状況である。ヨーロッパの主要都市や香港などアジアの主要都市では、無電柱化が概成しているのに対して、日本の無電柱化率は東京23区で8%、大阪市で6%に過ぎない¹⁾。無電柱化の推進を阻んでいる要因はコスト高と事業期間の長期化となるが、近年は災害の激甚化・頻発化により電柱倒壊による停電長期化や緊急車両の通行を妨害することが問題視され、緊急輸送道路を中心に無電柱化が進められている²⁾。

一方で、老朽化した埋設管の補修や更新の設計・工事において、既設埋設管の高精度な位置特定や深さ情報が必要不可欠であるが、現状は各占有管理者から台帳を収集して現地でマンホール等を確認したり、試掘を行うことで埋設管位置などを把握している。しかし、この方法では台帳の精度自体に限界があり、実際の施工時には予期せぬ埋設物

により修正設計や移設調整など必要となり事業遅延が生じる。このように既設埋設管の位置特定の正確性を上げることは期間を短縮させて、事業コストの削減につながる。

国土交通省が経済財政諮問会議において示した推計³⁾によれば、インフラに不具合が生じてから修繕を行う「事後保全」の方法で保全を行う場合、2048年度には年間10.9兆円～12.3兆円の維持管理・更新費がかかるとされている。一方、インフラに不具合が生じる前に修繕やメンテナンスを行う「予防保全」を行う場合、2048年度にかかる維持管理・更新費は年間5.9兆円～6.5兆円と約47%抑えることができる⁴⁾と見積もられている。予防保全の実現には点検・調査をいかに効率的に行えるかが鍵となってくるが、この点、昨今注目を集めているのが電磁波を使用した地中レーダをはじめとする非破壊検査技術である。

本論では、3次元地中レーダシステムとモバイルマッピングシステムを融合したGMS3（地中レーダ3次元モバイルマッピングシステム）を用いた地下情報の埋設管と地上情報（Google ストリートビューのような360°全周囲映像）を組み合わせて可視化した埋設管マッピングについて紹介する。

2. GMS3 技術

GMS3（図-1）は3次元地中レーダシステムと全周囲カメラを用いたモバイルマッピングシステムを融合させた地下と地上情報の高精度に一元管理する3次元調査システムである⁴⁾。車両に搭載したGMS3（図-2）は最大速度80km/hでデータ取得が可能⁵⁾なため、交通規制をかけずに探査可能である。我々日本インフラ空間情報技術協会では、GMS3技術の信頼性・効率性が向上するよう技術開

発と技術普及に取り組んでおり、特許取得及び国土交通省が運用する新技術情報システム NETIS への技術登録を行い、主に国や地方公共団体の発注する路面下空洞調査や埋設物調査に活用している。

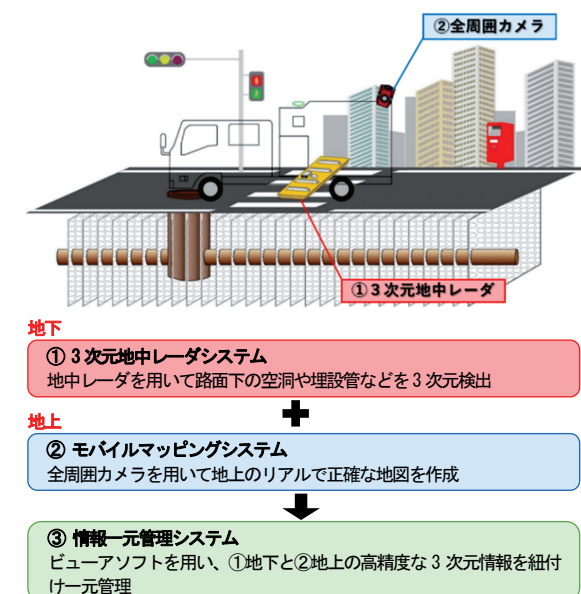


図-1 GMS3 概要



図-2 GMS3 探査車両

2.1 3次元地中レーダシステム

電磁波は地中を透過するため、路面下の非破壊検査として地中レーダ探査が用いられる。地中レーダは送信機から電磁波を発信し、電気的な性質（比誘電率）の異なる境界面で反射した電磁波を受信機で捉える探査手法である。埋設物や空洞と土の比誘電率が異なることから、その境界からの反射波が測定される。埋設物と空洞は波形の形状と極性の違いから判別できる。空洞まで浅い場合は往復伝搬時間が短く、一方深度が大きな空洞からの往復伝搬時間は長くなる。また土質中における電磁波の減衰率は周波数に依存し、周波数が高く波長の短い波は路面下の浅い部分の探査に向き、周波数が低く波長の長い波は地中深くまで到達することから深い部分の探査に向いている。GMS3 で使用している地中レーダは、複数の電磁波を一度に測定するマルチチャンネルアンテナ（図-3）を採用している。

マルチチャンネルアンテナは送受信機を複数持つアンテナで、列に沿った方向について一度に測定できるため、

高速走行しながらアンテナ幅の一括測定が可能となり 3次元地中情報が得られる。

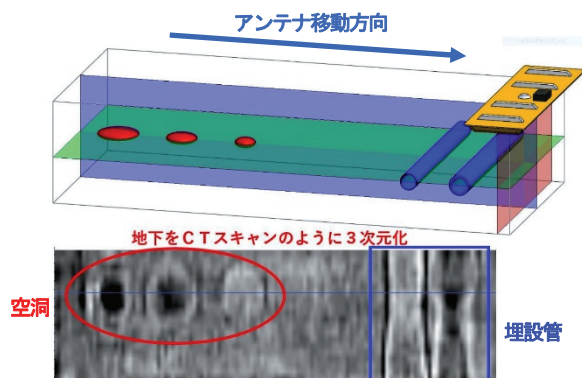


図-3 マルチチャンネルアンテナのイメージ

2.2 モバイルマッピングシステム

GMS3 で使用するモバイルマッピングシステムは、全周囲カメラで周囲と後方路面を撮影する。取得された全周囲画像から画像の特徴点を抽出し、各映像フレームで特徴点を追跡した解析によりそれぞれの時刻におけるカメラの位置と姿勢（カメラベクトル、以下CV）を求める。図-4 のように各映像フレームにおける CV を計算し、映像内で任意の 2 点間の距離・高さ測定や座標の取得が可能となる。Google ストリートビューと類似した映像であるが、本システムでは1秒間16フレームの映像を取得しており、より高精度でデータを取得することが可能である。

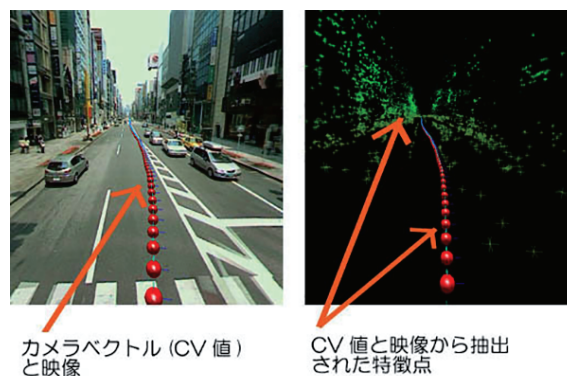


図-4 全周囲映像とカメラベクトル（CV）解析

車両に搭載した 3 次元地中レーダは交通規制をかけずに探査可能であるため、非常に長い距離を探査することができる。しかし、波形解析で空洞と推定される異常信号を検出しても、どの位置に空洞があるか正確に把握できなければ、実際に削孔して空洞の有無・規模を確認する 2 次調査を円滑に行うことができない。また、過去の空洞との比較で、信号履歴の管理を行う上で位置情報の比重は大きい。すなわち定点の時系列変化を捉えることでこれまで以上に陥没リスクの推定が効果的に行える。従来のラインスキャンカメラでは、地中レーダ位置の基準を決めるため標識

またはマンホールなどの構造物が必要である。また、周囲の画像と対応させるのは難しい。さらにカーブでは画像に歪みがあるため、異常信号箇所的位置把握が困難である。また、図-5(a)のように高架下周囲では GNSS 信号の位置精度が悪くなる課題があった。GMS3 ではカメラベクトル解析を行うことで、それぞれ 2 回走行した水平断面図を実際に走行した軌道へ補正可能なため、図-5(b)のように走行した軌道が逸脱することなく空洞や埋設物形状等を正確に捉えられる。

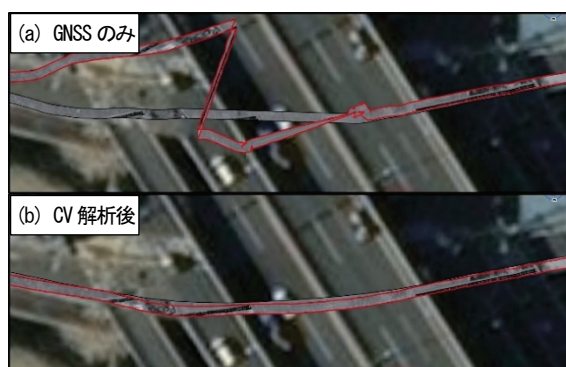


図-5 高架下周辺の探査車軌跡と
地中レーダ反射映像水平断面図

2.3 情報一元管理システム

GMS3 は 3 次元地中レーダシステムとモバイルマッピングシステムを融合したシステムであり、同時に取得した地下情報（地中レーダ信号）と地上情報（映像等位置データ）を紐付けし、専用ビューアソフトの GMS3 Viewer（図-6）で管理・表示する。

GMS3 Viewer はオルソ画像上に異常信号箇所を表示することで地下情報と地上の周辺画像が結びついており周囲の状況を把握しやすく、動画パネルとオルソパネルは周辺の構造物からの距離測定機能をもち現地での位置特定の時間を短縮できる。また高精度の位置情報を持つため、交差点等測線が直線でない場合でも位置を把握しやすい。オルソ画像は直接 GIS ソフト上で表示および管理が可能である。埋設管情報、過去の調査や陥没情報、補修工事情報などの時系列管理も可能である。また地上情報からマンホール等の埋設管位置情報や吸出を受ける可能性がある水路やひび割れなどの周辺状況を確認し、地下の空洞発生のメカニズムの解明、埋設管情報の管理に役立てることができる。



図-6 GMS3 Viewer による異常信号位置管理

- ① 地中映像パネル(3次元地中情報)
3次元地中レーダの取得データを縦横断面で表示。
- ② オルソパネル(路面鉛直画像)
全周囲カメラ映像から解析出力される路面フルカラー映像。(高精度な Google アース)
- ③ 動画パネル(全周囲カメラ映像)
3次元地中レーダのポイントとリンクした全周囲カメラ映像。映像内で距離・座標計測などが可能。(高精度な Google ストリートビュー)
- ④ 地図パネル

3. 埋設管マッピング

現在、地中レーダを用いた埋設物調査は、道路・歩道整備や改良や電線共同溝などの無電柱化、地下埋設管の新設・更新、ビルや工場などの建築の設計・工事に際して、採用されており、調査結果から 2 次元 CAD での平面図・断面図の作成、近年であれば、BIM/CIM の取り組みから 3 次元 CAD のモデリングが行われている。

埋設物調査は、車道だけでなく歩道や工場などの敷地内でも実施する必要があるため、GMS3 は車両に限らず、現場状況に応じてカートタイプや手押しタイプ（図-7）で

の調査が可能である。使用する機材は車両と同等で品質の変わらないデータ取得・解析が可能である。

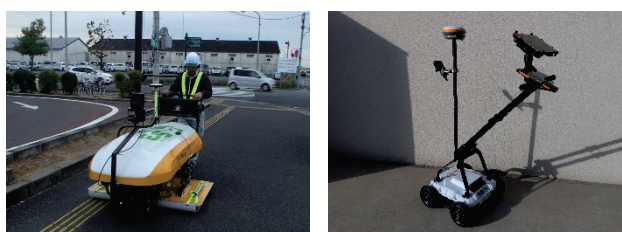


図-7 GMS3 カートタイプ (左)・手押しタイプ (右)

GMS3 でデータ取得・解析を行うことで、埋設管の変化点など各ポイントの高精度な位置情報を緯度・経度等の座標で得ることができ、地下と地上の位置情報もリンクしている。この位置情報を用いることで、平面図・断面図（図-8）、3D モデル（図-9）に埋設管情報を容易に入力することが可能である。

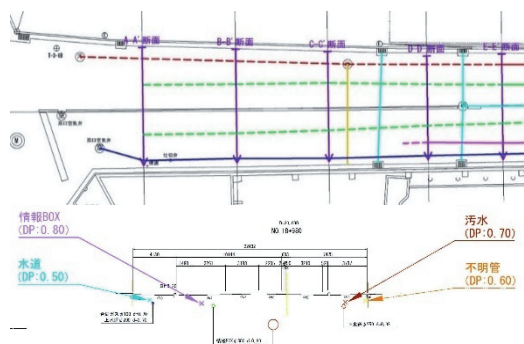


図-8 平面図（上）・断面図（下）

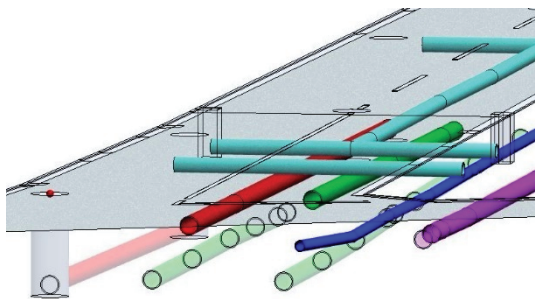


図-9 3D モデル

上述したとおり埋設物調査は、設計や工事に際して採用され、その調査結果を基に試掘や工事が実施されるが、試

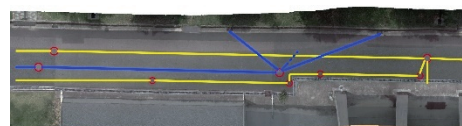
掘や工事を行う際に、2次元の図面では直感的に分かりづらい、3次元モデルはデータも大きくなりがちで専用のソフトウェアが必要で現場に持ち出しづらいというデメリットを有している。

これらのデメリットを解消するために、GMS3 の特徴を生かした3次元埋設管マッピング（図-10）を開発した。

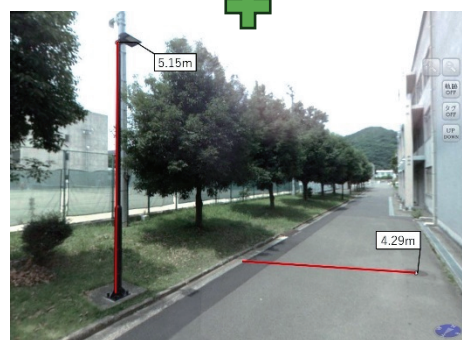
GMS3 は地下と地上の3次元データを同時に取得するため、別途地上の測量を実施する必要がなく、短時間で高精度かつ効率的なデータ取得が可能となっている。地下も地上も3次元座標を有しているため、GISソフトなどを使用してオルソ画像（路面鉛直画像）上へ埋設管位置を表示させることが可能（図-10 a）で、全周囲カメラの取得映像（図-10 b）は、画面内で距離や高さを計測が可能となっている。3次元埋設管マッピングは、データ取得・解析より得た埋設管情報を3次元モデル化し、全周囲カメラの動画データと合わせることで視覚的に埋設管位置を容易に把握することができるシステムである。

3次元埋設管マッピングは、PCやタブレット端末のブラウザ上で稼働する専用ソフトウェアのインストール不要なプラットフォームである。図-10 c 画面左は3次元モデル化した埋設管と周囲映像が同時に表示され、データを取得した軌跡上に移動でき、任意の地点で360°全周囲が確認可能である。画面右は地図上にオルソ平面図と埋設管位置、現在位置と映像の向きを表示している。画面が任意でカメラ映像のみ、地図のみの表示と切り替え可能である。

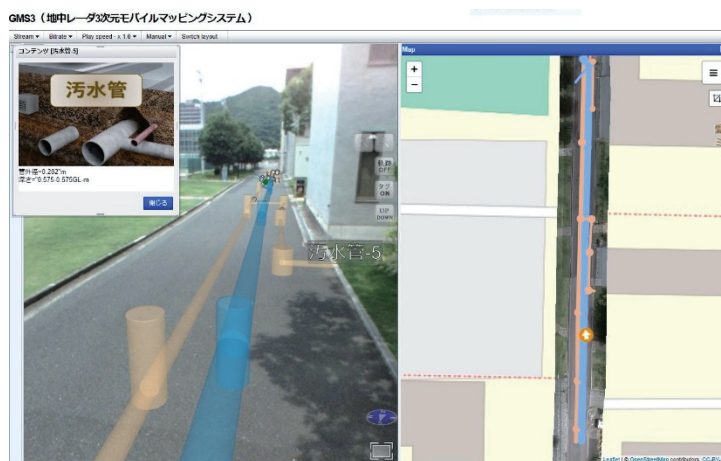
映像内にタグにより共有したい情報を登録可能で、タグにメモや写真・台帳などのJPEG・PDF ファイルを登録し、確認できる。



a : 埋設管解析結果（オルソ平面図）



b : 全周囲カメラ映像



c : 3次元埋設管マッピング画面

図-10 3次元埋設管マッピング

タブレット端末で稼働可能なため、現地に持ち出し周囲の状況を確認しつつ、映像により埋設管の位置・深さや複

数の埋設管の位置関係を地上から透過して視覚的に把握できる。映像内で指定したポイントの3次元座標や対象

物の長さ・幅・高さを公共測量精度（1/500）で計測することが可能で、その誤差は数 cm 内に収まる。また、デスクトップで使用することで事務所にいながら現場の状況を確認でき、タグを用いることで必要な情報を容易に共有することができる。

GMS3 で取得した結果を 3 次元表示することにより、高い位置精度の 3 次元埋設管マッピングを提供することで、視覚的に埋設管位置を確認することができるため、工事前の試掘の実施数を抑えることでコスト・時間を削減することができる。その結果、「無駄な試掘による工数増加」、「試掘時の埋設管損傷事故」、「予期せぬ埋設管などの発見による想定外の工期延期」などのリスク低減への寄与が期待できる。

4. インフラ管理への適用

3 次元埋設管マッピングのプラットフォームを活用することで、地下と地上情報の一元管理を容易に行え、総合的なインフラ管理が期待できる。道路標識や道路照明等の道路設備管理、路面のクラックや路面表示の点検・調査、路面下空洞の調査・補修状況の確認などのインフラ管理に活用することで以下のような効果が見込まれる。

- 全周囲カメラ映像を用いることで、現地へ赴かず視覚的に現地の状況を把握することができ、現地への移動時間・コストの削減・効率化。
- 地下と地上情報を一元管理可能。

- タグ登録を活用することで、情報共有が容易になり、情報の追加・更新の煩雑さを低減。
- 一元管理による情報の紛失・分散を予防し、必要な情報へ素早くアクセス可能。
- 補修・修繕履歴のデータベース構築

現在、インフラ管理に関係する建設事業者や建設コンサルタントは他業種にも増して人材不足問題が深刻化しており、維持管理業務の効率化、データベース化が喫緊の課題となっている。そのため、これまで紙台帳や写真台帳に頼り、何度も現地で確認を重ねる必要があった作業から解放される本プラットフォームは人材不足問題の解決手段の一助となりうる。

5. 今後の展開

3 次元埋設管マッピングのプラットフォームをベースに時間軸の概念を取り込み、異なる取得日時の映像を比較可能とする「4 次元マッピングプラットフォーム（GMS4）」の開発も進めており、異なる日時の映像を並べて表示して比較することで、より効率的なインフラの経時変化管理ツールとして活用可能と考えている。

平常時には地上のインフラ点検・保守や管理、地下の空洞調査、埋設物調査で利用し、大規模地震や津波など被災時には、被災状況の確認・調査や復興時の地元説明資料などに利用することで、災害からの早期復興に活用されることが期待される（表－1）。

表－1 4 次元マッピングプラットフォームの活用例

	平時	被災時	復興時
			
地上	・インフラ点検・保守 ・インフラ財産管理 ・観光資源管理 ・防災教育	・避難計画、実行 ・被災状況確認 ・被災度判定 ・復旧計画 ・保険査定	・復興計画 ・境界の確認 ・地権者説明 ・復興状況確認、記録 ・復興進捗管理
地下	・インフラ老朽化による空洞調査 ・埋設物調査	・地震により発生した空洞調査	・復興工事に伴う埋設管調査 ・地上ベンチマーク喪失時の境界の確認

近い将来発生が確実視される南海トラフ地震などの大規模地震の備えとして、予め平時の地下・地上情報の蓄積をすることで、発災時に被災前後の映像比較が可能となり、被害状況の把握や住民説明などに活用できる（図－11）。大規模地震時には、測量の基となる測量基準点がずれて

しまい、測量座標が役に立たなくなるケースもあり、この点においては、地下の構造物が地震の時でも相対的な位置が変動するケースが少ないことから、地下構造物の 3 次元情報をベンチマークとした上で、平時と被災時の地上映像を相対座標で位置を合わせるシステムとすることで、災

害時に基準点の絶対座標にズレが生じた場合でも速やかに正確な位置を把握できる。将来的には、比較映像の差異のAIによる自動抽出を導入予定である。

日本インフラ空間情報技術協会では、引き続き技術の活

用・普及、技術向上、技術情報交換を行うことで、広く担い手を育成しつつ、より信頼性が高く効率性が向上するよう技術開発・普及に取り組んでいく。



図-11 4次元マッピングプラットフォーム 画面イメージ

参考文献

- 1) 国土交通省：無電柱化の整備状況, 国土交通省ホームページ,
https://www.mlit.go.jp/road/road/traffic/chicyuka/chi_13_01.html,
参照 2025.01.11.
- 2) 国土交通省：無電柱化推進計画, pp.2, 2021.5.
- 3) 国土交通省：国土交通省所管分野における社会資本の将来の
維持管理・更新費の推計, pp.3, 2018.11.30.
- 4) 篠原潤, 中前茂之, 馬場務, 加藤祐悟：3次元地中レーダ探査
車による効果的な路面下空洞調査, 地盤工学会四国支部技
術研究発表会, pp.63-64, 2016.
- 5) 篠原潤：GMS3（3次元地中レーダ&全周囲カメラ）技術を用
いた路面下空洞探査事例, 基礎工, 12月号, pp.84-87, 2019.
- 6) J. Shinohara, Y. Kato, A. Okino, E. A. Shukla and T. Baba：GMS3 a
unified system of ground penetrating radar and camera vector for
efficient road infrastructure maintenance, 17th International
Conference on Ground Penetrating Radar(GPR), pp.144-148, 2018.
- 7) Kato, Y., Niizaki, T., Baba, T., & Shukla, E.：A Advancement of
GMS3 a unified system of ground-penetrating radar and camera
vector technology. In: 18th International Conference on Ground
Penetrating Radar. Society of Exploration Geophysicists, pp.152-155,
2020.

コンクリート構造物の自己治癒化によるメンテナンスフリーへのアプローチ ～防衛施設の基盤であるコンクリートの「超」高耐久化を実現するバイオマテリアル～

AN APPROACH TO MAINTENANCE-FREE CONCRETE STRUCTURES THROUGH SELF-HEALING TECHNOLOGY
～BIOMATERIALS THAT MAKE CONCRETE, THE FOUNDATION OF DEFENSE FACILITIES, "ULTRA" DURABLE～

青木涼*、酒井亨**、黒川翔太***
AOKI Ryo and SAKAI Toru and KUROKWA Syota

- * 會澤高圧コンクリート（株） 福島 RDM センター長（〒979-1522 福島県双葉郡浪江町大字請戸字北迫 1-3）
** 會澤高圧コンクリート（株） 専務取締役（〒065-0043 北海道札幌市東区苗穂町 12 丁目 1-1）
*** 會澤高圧コンクリート（株）「Basilisk」総括（〒065-0043 北海道札幌市東区苗穂町 12 丁目 1-1）

キーワード：コンクリート、自己治癒、バクテリア、メンテナンスフリー、高耐久化
(Concrete, Self-healing, Bacteria, Maintenance-free, Ruggedization)

1. はじめに

コンクリートは、現代の建設材料として不可欠である一方、ひび割れの発生を完全に防ぐことが難しいという課題を抱えている。ひび割れは、構造物内部への水分や酸素、有害イオンの侵入を許し、塩害や凍害、鉄筋腐食を引き起こすことで、コンクリート構造物の機能や耐久性を著しく低下させる原因となる。

防衛施設では、防空壕やシェルターなど鉄筋コンクリート構造物が多く使用されている。これらの施設は長期間の安定した機能が求められるため、ひび割れ対策が極めて重要である。ひび割れを早期に修復し、構造物の耐久性を維持することが、防衛施設の機能を確保するうえで不可欠である。

自己治癒コンクリートは、バクテリアの代謝活動を利用して発生したひび割れを炭酸カルシウムで閉塞する技術であり、防水性と耐久性を長期間維持する能力を有する。本研究で紹介する「Basilisk」は、この技術を実用化したものであり、ひび割れ閉塞による鉄筋腐食の抑制により、従来のコンクリート構造物の設計耐用年数である約 60 年を大幅に延ばし、100 年以上の耐用年数を実現する可能性を持つ。

本研究では、圧縮強度試験、長さ変化試験、促進中性化試験、凍結融解試験、ひび割れ透水試験などの実験結果を通じて「Basilisk」の性能を評価し、防衛施設の耐久性向上と経済性への寄与を明らかにする。

2. 「Basilisk」自己治癒材の概要

コンクリート製造時にバクテリアとその栄養源を混合

し、コンクリート硬化後に発生するひび割れをバクテリアの代謝活動によって閉塞するこの自己治癒コンクリート技術は、2010 年にオランダのデルフト工科大学でヘンドリック・M・ヨンカース博士らによって開発された¹⁾。

その後、2016 年から自己治癒コンクリートの開発に取り組んでいた当社は、博士らのチームとの交流を契機として、この技術の量産化を共同で進め、2020 年 11 月に世界で初めて自己治癒材製品「Basilisk HA」の量産化に成功した²⁾。(写真-1)



写真-1 「Basilisk HA」治癒材の外観)

コンクリート製造時に混入される自己治癒材は、バクテリア（Bacillus 属、枯草菌の仲間）とその栄養源であるポリ乳酸で構成される。このバクテリアは、硬化したコンクリート内部で孢子に守られながら休眠状態にあり、ひび割れの発生に伴い、ひび割れ表面の pH の低下や侵入する水、酸素などを刺激として活動を再開する。活動を再開したバクテリアは分裂を繰り返し増殖し、ひび割れ表面でその効果を発揮する。

バクテリアは練り混ぜ水によって分解されたポリ乳酸から生成される乳酸カルシウムを摂取し、その代謝活動により炭酸カルシウムを生成する。この過程では、二酸化炭素と水も同時に生成され、これらの生成物がひび割

れ中の未水和セメントと反応してさらなる炭酸カルシウムを形成する。こうして生成された炭酸カルシウムがひび割れを自然に閉塞し、有害因子の侵入を防ぐことで、鉄筋の腐食を長期的に防止することが可能となる。

ひび割れが完全に塞がると、水と酸素の供給が絶たれ、バクテリアは再び休眠状態に戻り、コンクリート内部でその存在を維持する。このプロセスが繰り返されることで、メンテナンスの必要性が大幅に低減し、構造物の長寿命化が実現する。また、このバクテリアは高アルカリ環境に耐性を有し、休眠状態で最大200年にわたる生存が確認されている。

バクテリアの顕微写真を写真-2に、ひび割れ自己治癒の概念を図-1に、生化学反応式を図-2に、自己治癒の様子を写真-3にそれぞれ示す。

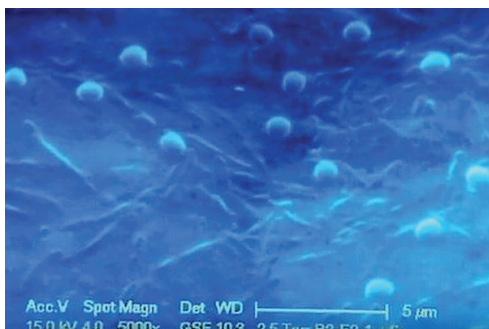


写真-2 バクテリアの顕微鏡写真 (5000倍)

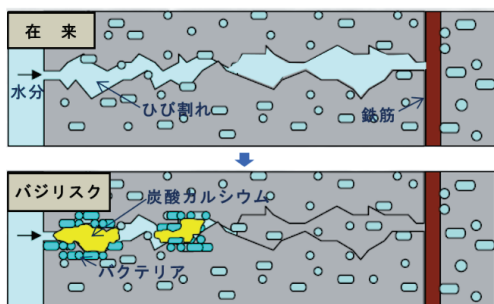


図-1 バクテリアによるひび割れ自己治癒概念

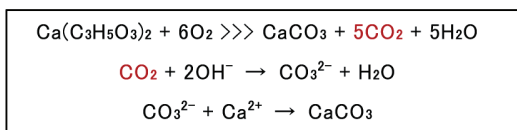


図-2 バクテリアの生化学反応式

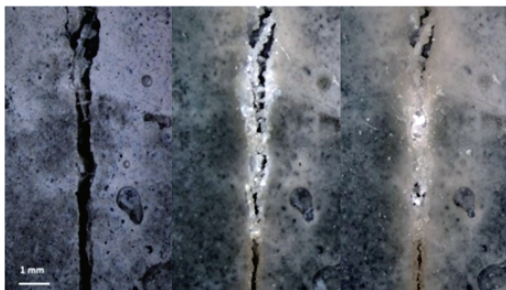


写真-3 水中養生による自己治癒の様子

3. 自己治癒コンクリートの物性試験

自己治癒コンクリート「Basilisk」の性能を評価するために、さまざまな物性試験を実施した。本章では、ひび割れの自己治癒性能だけでなく、フレッシュ性状や硬化後の耐久性に関する試験結果を報告する。試験には、日本工業規格 (JIS) に基づいた標準試験方法を採用し、従来の Base 配合と自己治癒材を添加した Basilisk 配合との比較を行った。

3.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。

表-1 使用材料

材料	種類又は品名	メーカー、産地	物性等
セメント	普通ポルトランドセメント	太平洋セメント(株)	密度 3.16g/cm ³
細骨材	陸砂	勇弘産	表乾密度 2.66g/cm ³ 粗粒率 2.91
粗骨材	砕石2005	峨朗産	表乾密度 2.70g/cm ³ 実績率 62.0%
混和剤	マスターポリヒード	ボソリスソリューションズ	密度1.07g/cm ³
自己治癒材	Basilisk HA	會澤高圧コンクリート(株)	—
水	地下水	工場敷地内	—

3.2 配合

配合条件を表-2に、配合を表-3示す。

表-2 配合条件

呼び強度 (N/mm ²)	スランブ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最大 寸法 (mm)
30	12±2.5	4.5±1.5	20

表-3 配合

配合の 種類	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	混和剤 (kg/m ³)	Basilisk (kg/m ³)
Base	311	149	854	1045	3.110	—
Basilisk	311	149	854	1045	3.110	5.0

3.3 試験項目

(1) フレッシュ性状

(a) スランブ試験

JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」に準拠した。

(b) 空気量試験

JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法-空気室圧力方法」に準拠した。

(2) 硬化性状

(a) 圧縮強度試験

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠

し、測定は、脱型時気中養生（材齢 1 日）後、20℃の水中養生（材齢 7 日、28 日）とした。

(b) 長さ変化試験

JIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法（ダイヤルゲージ法）」に準拠した。供試体は、10×10×40cm の角柱試験体を用いた。材齢 7 日まで 20℃の水中養生を行った後、測定を開始した。乾燥条件は温度 20℃、湿度 60%とした。測定材齢は、7 日、28 日、56 日、91 日、182 日とした。

(c) 促進中性化試験

JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠した。供試体は、10×10×40cm の角柱試験体を用い、脱型後材齢 4 週まで 20℃の水中養生を行った後、相対湿度 60%、温度 20℃の恒温恒湿室に材齢 8 週まで静置し試験を開始した。中性化の促進条件は、温度 20℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5%とした。測定材齢は、7 日、28 日、56 日、91 日、182 日とした。

(d) 凍結融解試験

JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」（水中凍結融解試験方法 A 法）に準拠した。供試体は、10×10×40cm の角柱試験体を用い、脱型後材齢 4 週まで 20℃の水中養生を行った後、試験を開始した。測定材齢は 300 サイクルとし、質量減少率及び相対動弾性係数を測定した。

(e) ひび割れ透水試験

内径 140mm、高さ 80mm の塩ビ管にコンクリートを詰め、材齢 4 週まで 20℃の水中養生を行い、縦に設置した塩ビ管に対し、圧縮試験機を用いて徐々に加圧し、塩ビ管内のコンクリートに強制的にひび割れを発生させた（写真－4）。なお、ひび割れ幅は $0.5 \pm 0.1\text{mm}$ とした。塩ビ管供試体上部に水頭圧が一定となるように水を張り、1 日 1 回 1 時間あたりの透水量を測定した（写真－5）。



写真－4 ひび割れ発生状況



写真－5 ひび割れ透水試験状況

3.4 試験結果と考察

(1) フレッシュ性状

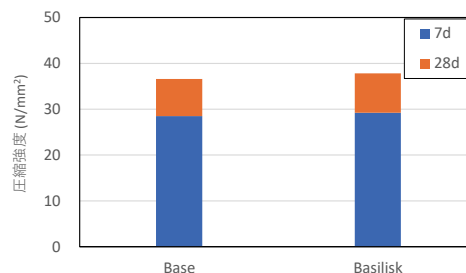
フレッシュ性状試験結果を表－4に示す。「Basilisk HA」を 5kg/m^3 添加した Basilisk 配合について、スランブと空気量は Base 配合と比較して有意な差は認められなかった。

表－4 フレッシュ性状試験結果

配合の種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
Base	13.0	5.5	27
Basilisk	13.5	5.5	27

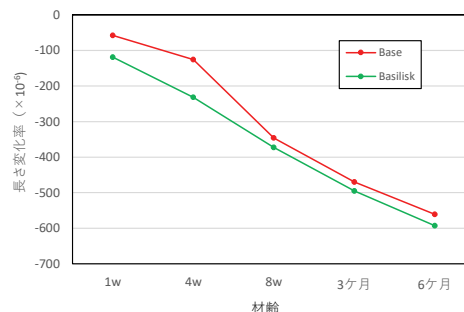
(2) 硬化性状

圧縮強度試験結果を図－3に示す。材齢 28 日においては、Base 配合が 36.6N/mm^2 、Basilisk 配合が 37.8N/mm^2 であり、自己治癒材「Basilisk HA」の添加による悪影響は認められなかった。

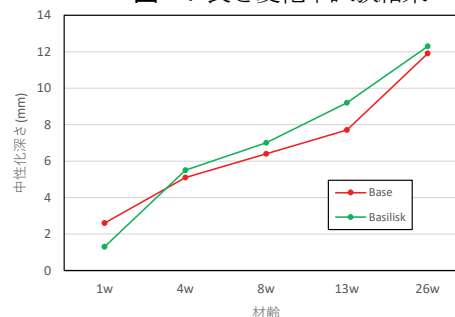


図－3 圧縮強度試験結果

図－4 に長さ変化率試験結果を、図－5 に促進中性化試験結果を、図－6 に凍結融解試験結果（質量減少率）を、図－7 に凍結融解試験結果（相対動弾性係数）を示す。これら全ての試験結果において、両配合間に顕著な差は認められなかった。



図－4 長さ変化率試験結果



図－5 促進中性化試験結果

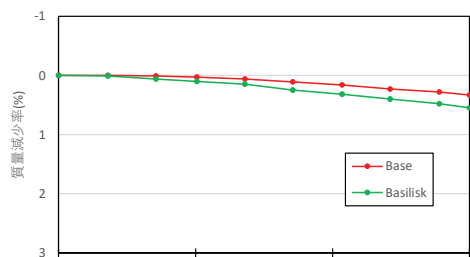


図-6 凍結融解試験結果（質量減少率）

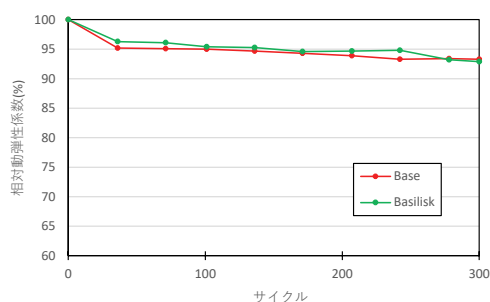


図-7 凍結融解試験結果（相対動弾性係数）

図-8 に、ひび割れ透水試験の結果を示す。この試験は、Base 配合および Basilisk 配合の両方で、3 か月間にわたり実施したものである。Base 配合では、透水量が緩やかに減少する傾向が見られたが、試験開始から2か月後には減少がほぼ止まり、試験開始時の約 1/2 の透水量で安定した。一方、Basilisk 配合では、試験開始時から透水量が急激に減少し、約1か月半で完全に透水が停止した。これらの結果から、自己治癒材料「Basilisk」が漏水対策として極めて有効であることが確認された。

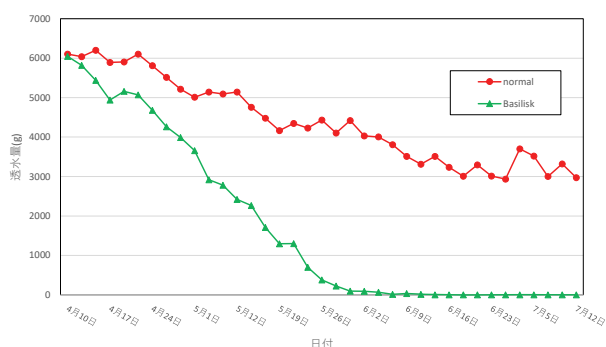


図-8 ひび割れ透水試験結果

4. 実構造物によるひび割れ修復実証実験

本技術の実証実験として、当社のコンクリート製品工場（北海道勇払郡むかわ町）内にある大型コンクリート水槽を自己治癒コンクリートで施工し、発生したひび割れの修復状況を観察した。その結果、約2週間でひび割れからの漏水が停止したことを確認した。（写真-6）

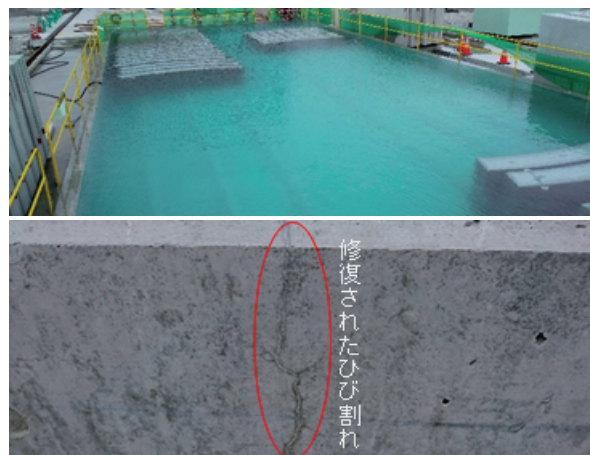


写真-6 実構造物ひび割れ修復実証実験

5. 自己治癒コンクリートによる超高耐久構造の実現

本技術は、コンクリート構造物のひび割れを自己治癒することで、コンクリート構造物の「超」高耐久性およびメンテナンスフリーを実現する。従来のコンクリートでは設計耐用年数が約60年であるのに対し、自己治癒コンクリートを適用することで、設計耐用年数を100年以上に延ばすことが可能となる。この長寿命化は、ひび割れからの水漏れや鉄筋腐食を効果的に防止することに起因する。また、長期にわたる耐用年数により、構造物の解体再建頻度が減少し、コンクリートの使用量が抑制されることで、CO₂排出量の大幅な低減も実現する。

また、本技術の導入は初期コストを一定程度増加させるものの、構造物の長寿命化や維持管理費用の削減により、ライフサイクルコスト（LCC）の削減効果が期待される。その概念を図-9に示す。

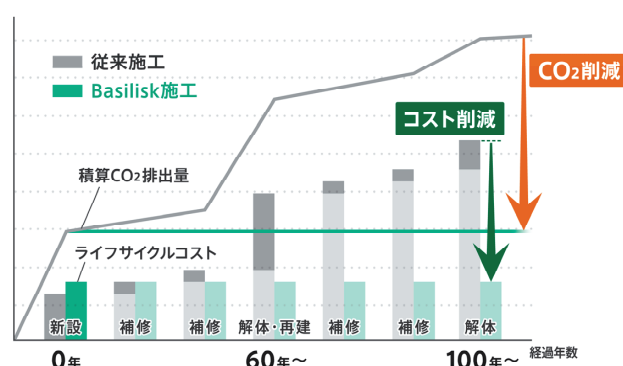


図-9 メンテナンスフリーと CO₂削減の概念図

なお、本技術におけるひび割れ治癒は、炭酸カルシウムの生成によって実現される。この炭酸カルシウムはひび割れを閉塞し、水密性を向上させる効果があるが、機械的な強度の回復は期待できない。そのため、設計段階で十分な構造強度を確保することが不可欠である。なお、

自己治癒材料内のバクテリアについては、EU 規格及び日本のデータベースに照らし合わせた結果、環境や人への影響が無害であることが確認されている。

6. 自己治癒技術の適用範囲と海洋環境下での有効性

本技術は、コンクリート全般に適用可能であるが、特に水関連の構造物、地下構造物、トンネルなど、維持管理が困難な構造物のひび割れ修復に高い効果が期待できる。また、海洋構造物においては、最も重要視される水密性が、ひび割れの自己治癒機能により確保されるため、同様に大きな効果が見込まれる。

なお、バクテリアの海水環境下での生存および活性については、海水に浸漬する実験を行い検証した。実際にバクテリアを海水に浸漬して観察した結果（写真-7）、長時間経過してもバクテリアの生存および活性に問題がないことが顕微鏡観察で確認された。

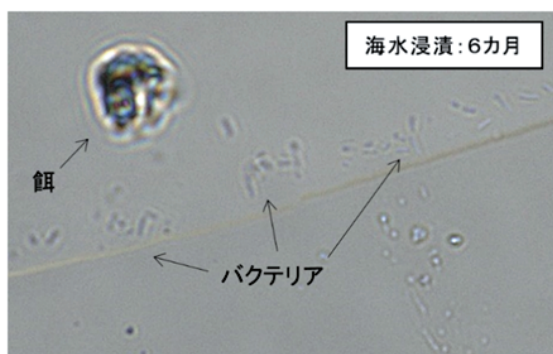


写真-7 海水中バクテリアの生存状況（5000 倍）

7. 自己治癒コンクリートの採用事例と市場拡大

本技術によって開発された自己治癒材は、実用化当初はプレキャストコンクリート製品への使用が中心だったが、近年ではレディーミクストコンクリートへの利用も増加している。2024 年 12 月現在、自己治癒コンクリートの出荷量は、レディーミクストコンクリートで 8,900 m³、プレキャストコンクリートで 87,000 トン（コンクリート量に換算して約 36,000 m³）に達している。案件数は増加傾向にあり、今後さらなる拡大が見込まれる。

大型コンクリート工事への採用も増加しており、2021 年 6 月 23 日にはレディーミクストコンクリートとして初めて自己治癒コンクリートが採用された。写真-8 は、札幌市水道局が発注した豊平川水道水源保全管理センター新設工事を示している。この工事では、水資源を貯える池状構造物 2 基のうち、1 基に自己治癒コンクリートを採用し、約 4,700 m³が打設された。

また、オランダでも自己治癒コンクリートの採用が進展している。写真-9 は、ゼーラント州の廃水処理プラント施設（2020 年）の施工事例を示しており、建築構造物や土木構造物における実績が確認されている。



写真-8 札幌市豊平川水道水源保全管理センター新設工事



写真-9 オランダ ゼーラント州廃水処理プラント工事

なお、本技術のメカニズムを生かして、コンクリート製造時に混入する自己治癒材の他に、既存コンクリートの大きな幅のひび割れを修復する自己治癒モルタル補修材「Basilisk MR3」や、既設コンクリート構造物の微細ひび割れを補修する液体治癒材「Basilisk ER7」の製品もそれぞれ開発している³⁾。



写真-10 自己治癒モルタル補修材「Basilisk MR3」



写真-11 液体治癒材「Basilisk ER7」

8. 防衛インフラを支える自己治癒コンクリート技術

防衛施設関連の構造物には、通常の構造物以上に高い耐久性、信頼性、そしてメンテナンスの容易さが求められる。これらの施設では、機能の中断が許されず、長期間にわたり安定した運用を維持することが不可欠である。このような厳しい要求を満たすため、自己治癒コンクリートが革新的な技術として注目されている。

自己治癒コンクリートは、防衛施設の耐久性向上や水密性の確保に寄与し、ライフサイクルコスト（LCC）の削減を実現する可能性を持つ。また、ひび割れの自己修復機能により、メンテナンスの頻度を大幅に低減し、構造物の長寿命化を促進する。この技術は、国内外における採用実績を踏まえ、防衛施設への導入を積極的に進めるべきである。

本章では、自己治癒コンクリートの適用例と技術的利点を挙げ、防衛インフラにおける本技術の有用性を具体的に示す。

8.1 防衛施設における自己治癒コンクリートの適用例

(a) 地下施設・シェルター

地下施設やシェルターでは、地下水や湿気によるひび割れの進行が問題となる。自己治癒コンクリートは、ひび割れを自己修復することで地下水の侵入を防ぎ、内部の防水性を長期間にわたって確保する。

(b) 滑走路や駐機場

滑走路や駐機場は、航空機の重量や振動、燃料などの化学物質にさらされるため、ひび割れが発生しやすい。自己治癒コンクリートを使用することで、ひび割れを迅速に閉塞し、構造物の表面劣化や損傷を防止する。

(c) 沿岸部施設（港湾・弾薬庫）

塩害が深刻な沿岸部の防衛施設では、塩分が鉄筋に浸透することで腐食が進行し、構造寿命が著しく低下する。自己治癒コンクリートは、塩分の侵入を防ぐ効果が高く、沿岸部施設の長寿命化に貢献する。

(d) 貯蔵施設（弾薬庫・燃料タンク）

貯蔵施設では、安全性確保のための水密性が重要である。自己治癒コンクリートは、ひび割れによる水漏れや外部物質の侵入を防ぎ、貯蔵物の保護に寄与する。

8.2 自己治癒コンクリートの技術的利点

(a) 水密性と耐久性の向上

自己治癒コンクリートは、ひび割れを炭酸カルシウムで閉塞することで、構造物の水密性を大幅に向上させる。これにより、鉄筋腐食や内部劣化が防がれ、構造物の耐久性が向上する。

(b) メンテナンスコストの削減

防衛施設は高頻度な点検や維持管理が必要とされるが、自己治癒コンクリートを使用することでメンテナンスの頻度を低減し、長期的なコスト削減が可能となる。

(c) 突発的損傷への対応力

防衛施設では突発的な衝撃や外力による損傷が発生する可能性がある。自己治癒機能により、これらの損傷によるひび割れを早期に修復し、施設の運用を継続できる。

9. 終わりに

自己治癒コンクリート「Basilisk」は、防衛施設の耐久性向上とメンテナンス負担軽減を実現する可能性を持つ革新的な技術である。本研究では、ひび割れ透水試験等の物性試験を通じて、ひび割れ閉塞機能の有効性と耐久性向上の可能性を確認した。この技術は、従来 60 年程度とされてきた設計耐用年数を大幅に延ばし、防衛施設の計画や設計思想そのものに変革をもたらす可能性を秘めている。

設計耐用年数の延伸により、構造物の更新頻度の低下、ライフサイクルコスト（LCC）の削減、さらにはコンクリート使用量と CO₂ 排出量の抑制といった、経済的・環境的なメリットが期待される。特に、長寿命化による持続可能なインフラ構築への貢献は、防衛施設において大きな意義を持つ。

今後は、防衛施設特有の環境条件や要求に対応した実証実験を進めるとともに、本技術を実際の防衛施設に導入し、その効果を実証していく必要がある。「Basilisk」は、防衛施設の設計と運用に新たな価値を提供する次世代の基盤技術として、大きな可能性を秘めている。

参考文献

- 1) R. M. Mors、 H. M. Jonkers Feasibility of Lactate derivative based agent as additive for concrete for regain of crack water tightness by bacterial metabolism (2016)
- 2) 日経クロステック／日経コンストラクション「バクテリアが直す自己治癒コンクリート、世界初の量産技術を確立」2020.11.25
- 3) 會澤高圧コンクリート（株）[Basilisk]
<https://www.aizawa-group.co.jp/>

AI 技術によるコンクリート構造物の診断技術

INVESTIGATION FOR CONCRETE STRUCTURES APPLYING AI TECHNOLOGY

黒田一郎*, 櫛原弘貴**, 西敏臣***, 古賀美智恵***, 関和彦****, 歌川紀之*****, 中島道浩*****
Ichiro Kuroda, Hirotaka Hazehara, Toshiomi Nishi, Michie Koga, Kazuhiko Seki, Noriyuki Utagawa and Michihiro Nakashima

*防衛大学校システム工学群建設環境工学科（〒219-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20）

**福岡大学工学部社会デザイン工学科（〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1）

***株式会社九検（〒849-0932 佐賀県佐賀市鍋島町八戸溝166-35）

****アイセイ株式会社（〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-40-3 横山ビル6階）

*****佐藤工業株式会社（〒300-2658 茨城県つくば市諏訪C30街区1）

*****八千代エンジニアリング株式会社（〒111-8648 東京都台東区浅草橋5-20-8 CSタワー）

キーワード：コンクリート構造物，非破壊検査，調査技術，AI 技術
(Concrete structures, Non-destructive test, Investigation technology, AI technology)

1. はじめに

我が国の社会全体では老朽化した土木・建築構造物の蓄積の問題が一層深刻となっており防衛施設もその流れの中にある。自衛隊の運用基盤である駐屯地・基地の機能が維持されていることは、自衛隊の活動の前提であるため、差し迫る老朽化に対応しつつ施設の長寿命化を図ることが求められる。防衛省インフラ長寿命化計画(令和5年)では、中長期的な維持管理の視点から事後保全から予防保全への転換が謳われているが、点検方法のコスト削減・省力化と精度の向上を両立させる必要に迫られる。

この状況を踏まえ、防衛施設学会「AI技術を用いたコンクリート構造物の調査技術に関する研究部会」では、AI技術の活用によってこのニーズに資することを目指して検討を行ってきた。本稿は、AI技術の活用によるメリットを説明した上で、その適用のために本研究部会で取り組んだ現地調査の結果の一部を紹介するものである。

2. 維持管理における点検・診断とAI技術

2.1 長寿命化計画における点検・診断

長寿命化の実現のためには点検とデータの蓄積が欠かせない。防衛施設の多くは各部隊などの施設担当部署が管理に携わっており、それらの元での点検・診断を着実にこなすための行動指針として長寿命化計画が定められ、「点検マニュアルの整備」、「データベース(DFIS)への記録」、「点検、診断、措置、記録の4過程を循環させるメンテナンス

サイクル(図-1)の構築」が示されている。これらの中で点検はそれ自体が労力と費用を要する行為であるものの、構造物の劣化が深刻化する前に補修などの処置を施すことが可能となるため、ライフサイクルコストの観点から全体の維持管理費用(労力を含む)の抑制に繋がることが期待される。

2.2 点検・診断でのAI技術の活用

上述の長寿命化計画に基づいてなされる点検は、従来から行なわれてきた人間の感覚に基づく目視点検と打音点検が中心である。本研究部会では、従来型の点検での問題点を克服することを目的としてAI技術に基づく点検を提案し、その適用性を現地調査を通して確かめんとしている。以下に、従来の点検と比較する形で、AI技術を活用することのメリットを整理する。

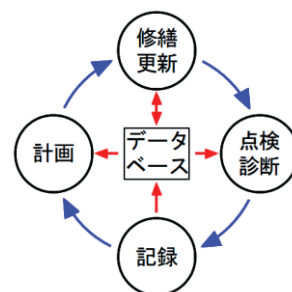


図-1 メンテナンスサイクル
(文献1から引用して加筆作図)

青の矢印：作業の流れ，赤の矢印：データの流れ

(1) 熟練技能への非依存性

従来の点検で必要となる技能は、熟練技能者が長年の経験を積み重ねて身に着けた個人のknow-howであり、各個人の言語化されていない知識(いわゆる暗黙知)に基づいている。このことに起因する課題について説明する。

最初に、結果の一意性の欠如である。点検結果は、同じ対象を同じ目的で点検すれば実施者が誰であるかに関わらず常に同じであること(一意性)が期待される。しかし、従来の点検では、たとえ熟練技能者であっても実施者毎に異なる結果となりがちである。これは熟練技能者の技能が個人のknow-howであることに原因しており、言語化されていない知識に基づいているので熟練技能者の間であっても共通化することは難しい。

次に、熟練技能者の養成の困難も指摘できる。従来の点検の技能はその養成に長い年月が必要であり、実務を通して学ばせる現任訓練に頼ることとなる。そこでは、言語化されていない知識(暗黙知)の伝授を伴うため訓練成果が両者の個性に影響を受け非効率である。しかも現在の我が国の労働環境は労働者不足に直面しており、時間のかかる熟練技能者の養成と確保は現状にそぐわない。

これら二つ以外に指摘できる課題としては、従来の点検では点検を実施するにあたって要求される技能のレベルを具体的に指定・設定できないこと、実施者個人の技能のレベルを客観的に評価できず点検結果にもその情報は残らないこと、など多くを並べることができる。

AI技術を導入した点検では、従来の実施者の暗黙知に基づいた点検から、論理的構造であるアルゴリズムで説明される知識(形式知)に基づいた点検へ切り替えることができ、上述の数々の課題を克服できる。具体的には、データの取得、分析、出力の各段階で、特性が規格化された器材を用いて、仕組みと動作が説明可能なアルゴリズムに従って作業が進められ、熟練度に依存せずしかも個人差の無い(一意性のある)点検結果を得ることが可能となる。

AI技術を導入した点検でも、点検の計画作成、結果の解釈、結果の管理などの各側面で点検者の判断が必要となるが、文章、数式、フローチャート、データベースなどを用いて言語化された形で実現可能である。

(2) コスト・労力の削減

点検対象の構造物は人体よりも遥かに大きく、セメントという接着剤で構成されているので分解もできない。また、対象には暗渠・地下空間などの危険・不衛生・不快を伴う箇所もある。その結果として、しばしば足場や高所作業車の設置や安全装備の必要に迫られ点検費用の増大を招き、実施者の肉体的・精神的負担も増大する。

AI技術を導入した点検で用いられるカメラやマイクロフォンなどの入力デバイスは、人間の感覚器よりも性能が優れている側面もあるのでそれを活用することによってこれらの困難を克服することが可能となる。たとえば、建物の壁面のひび割れを観察する際に足場を組まずとも地上で撮影した写真を用いて同等の点検結果を得ることが期待される。近

年はドローン類にこれらのデバイスを搭載する技術開発の発展が著しく、高所や地下空間での点検におけるコストと労力を大きく削減する道が拓かれようとしている。

(3) 点検のマニュアル化

AI技術を導入した点検では、その過程が熟練技能者に依存しないためマニュアル化が容易である。形式化された器材を用いた点検であるので、その詳細を具体的に指示可能である。従来の点検は、熟練技能者の感覚を脳で処理する官能試験なので、点検の詳細は現場での判断が欠かせない。打音検査であれば、どのように打診棒を握ってどれくらいの強さでどこを叩くかなどの決定は実施者本人がその場で下すことになる。それに対して、AI技術を導入した打音検査では、打音取得方法は使用する機材の特性を考慮して具体的に指定され、文章化されたマニュアルで指示される。その結果、経験の浅い実施者であっても点検の成果が高いレベルに維持可能である。

また、自衛隊の施設の中には、僻地に位置しているものも多くあり、それらのいくつかは少ない人員で運用されていて、施設関連の部署もなく土木・建築技術者がいないことも普通である。災害時や非常事態時において施設の機能を維持してオペレーションを継続するために自力での構造物の点検が必要になることが想定される。そのような事態では点検がマニュアル化されていることで点検に慣れていない人員による点検であっても品質を保つことが期待される。更には遠距離にある上位部隊と連絡を取ることで点検に関する指示を受けたり、(定性的指標ではない)定量的な点検結果を報告したりすることも容易となる。

(4) 定量的な点検結果の利用

AI技術を導入した点検では、出力である点検結果は定量的であるため、補修や維持管理のための情報としての利用価値が高い。例えば、従来の目視によるひび割れの観察であれば、ひび割れの記録は手書きによる図解や、ひび割れが観察される範囲を面的に示す程度である。AI技術を導入して写真を用いて分析すれば、人力による作図作業無しにひび割れはひび割れ幅や位置の情報を伴ってひび割れの一本ごとにカタログ化され、長さ、分岐などの分析も可能であり、結果の即時利用、結果を用いた即時判断に繋がる管理プロセスの構築が可能となる。

(5) 従来にはない新たな視点

AI技術を用いた点検では、画像認識、機械学習、深層学習などを用いて、従来技術では見逃されがちな微細なひび割れや内部損傷も検出できることが期待される。また、ドローン撮影された高解像度画像や各種センサーデータを集積、分析し、構造物の状態を詳細に診断することにも繋がる。点検は「行為」であり、それだけでは無意味である。最終的には診断をする必要があり、AI技術を用いた点検では、点検結果を診断に繋げることも期待されている。

また、AI技術を用いた点検の利点として、得られたデータや蓄積したデータを、クラウドストレージなどを利用することで関係者間での共有が容易になり、どこからでもアクセスが

可能となることが挙げられる(可搬性). 更に, 管理者が標準化したデータフォーマットにより, 異なるソフトウェアやツールを用いたデータ分析が容易になる.

3. 現地調査における活用例

本研究部会では, AI技術に基づく点検の実構造物へ適用するためのケーススタディとして現地調査を行なっている. 本章ではその一部を紹介する. 調査対象は某部隊のRC造建築物3棟(表-1)である. 築年37~63年の範囲の比較的古い建築物を選択している. 海岸近傍であるため潮風の影響を受けているが, 丁寧に手厚い管理がなされている.

3.1 目視AI

(1) 目的

点検, 補修設計, 補修工事といったさまざまな工程において, 画像処理技術を用いて損傷情報をデータ化し, 損傷図の作成などを支援するクラウドサービス型のシステムを利用し, 従前, 人が実施している損傷把握について, 自動化, 可視化, 効率化が可能か検討した.

(2) 使用した画像処理AIの概要

図-2に示す以下の処理が可能なクラウドサービスを活用した. ただし, 本検証で使用したシステムは, 無垢のコンクリート面に使用できるAIシステムであり, 塗装面に対しては対象外のシステムである.

- ・撮影した画像を自動で合成し, チョークまたはひび割れを自動検出
- ・自動検出したチョーク・ひび割れの幅と長さを自動積算
- ・自動検出したチョーク・ひび割れをCADデータ(DXFファイル)に出力

(3) 損傷の検出結果

結果の一例として, 建物B(表-2)北側壁面の結果について示す(図-2).

比較的精度が高く損傷を抽出できており, 特にひび割れ, 遊離石灰(汚れ)などの大きな損傷は概ね正確に抽出できた. また, 損傷の検出からCAD化まで可能であった(図-3).

(4) 考察

塗装面を対象とした技術でないことを前提の上, ケーススタディを実施したが, 塗装面であっても解析処理は精度高く検出した.

現地作業は, 通常の点検と同程度の90分程度で終了したため, 作業性としては, 大きな変更は発生しない. 現地実装には以下の点を考慮する必要がある.

- ・正確なAI解析には, 条件にあうカメラが必要となることに加え, 解析ソフトに合わせた撮影方法・撮影距離に留意する必要がある専門性が必要である.
- ・本検討では3.0mの高さで検証したが, あおりが発生し, 適切な結合ができない結果となった(システムのあおり補正は30° まで). これ以上の高さを撮影する場合は, 重機, 仮設材やドローンを使用した正対した画像が必要となる

表-1 現地調査の対象建築物 (名称は仮称)

名称	構造	建築年	点検箇所
A棟	RC3	昭和36年	内壁
B棟	RC2	昭和53年	外壁
C棟	RC3 (一部4階)	昭和62年	耐震壁, 柱

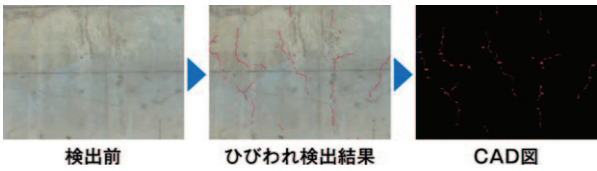


図-2 目視AIでのシステム処理の例

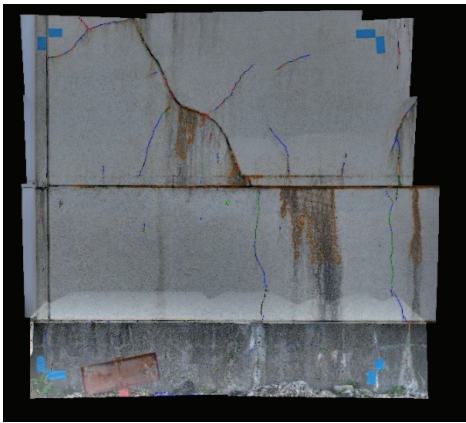


図-3 損傷の検出結果

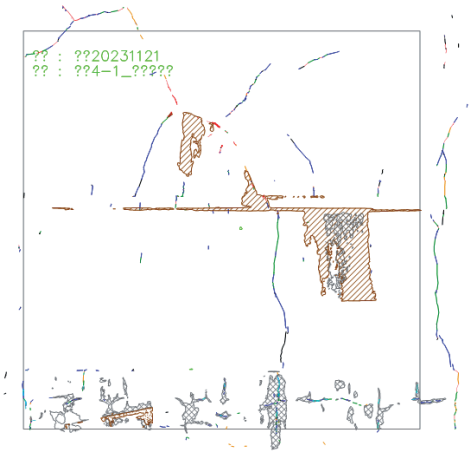


図-4 CAD図の作成結果

- ・ひび割れが細かく検出されるため, 不要なデータの処理が必要となり, 処理に時間を要する.
本検討はシステムの対応範囲外ではあったが, 塗装面のひび割れを学習させることでAIによるひび割れ検知は可能であることが確認された. 解析されたデータを基に点検

を実施することで現場作業の効率化、また正確な進展把握が可能となるため、施設の状態判断が適切に実施可能になると考える。

現状、無垢のコンクリートに対する損傷検知AIが主流であるため、火薬庫や土木施設に適用することで、早期に実装可能と考える。

3.2 打音AI

(1) 従来の叩き点検とAI・デジタル技術を用いた打音法の比較

コンクリート構造物の点検を行う際、目視点検と叩き点検は重要な検査項目である。叩き点検は、第三者被害、耐久性低下の原因となるコンクリートの浮きや剥離箇所を調べるために実施される。

「叩き点検」は、コンクリート面のハンマ打撃により発生する音を耳で聞き、浮き、剥離などのコンクリート表層の欠陥を検知し、調査図面に書き込む方法である。一方、「AI・デジタル技術を用いた打音法」は、ハンマ打撃により発生する音をマイクロフォンで収録、分析し、欠陥、健全の判別や欠陥の規模を出力し、図化する方法であり、分析手法としてAI技術が用いられている²⁾。これらの比較を表-2に示す。今後、ロボットなどによる測定で自動化を検討する際にはAI・デジタル技術を用いた打音法（特に分析のためには）が必要になるものと考え

表-2 叩き点検とAI・デジタル技術を用いた打音法

	叩き点検	AI・デジタル技術を用いた打音法
精度・探查性能	耳で欠陥（濁音）と健全（清音）を判別（検査者の主観による判別）	健全・欠陥の判別と欠陥の規模の推定（AIを用いた客観的な判別）
点検者の求められる能力	点検者の経験	点検者の経験によらない
手間・コスト	低い	やや高い
合理化・ロボット化	たくさんの点検者が点検を行うことにより広い測定範囲を短時間で測定できる	高所についてはロボットなどが対応できるために、合理化される。

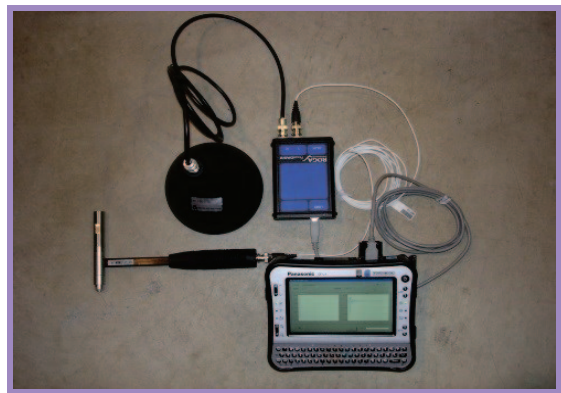


写真-1 フード付マイクロフォンとインパクトハンマ

られる。

(2) AI・デジタル技術を用いた打音法とそれを用いた測定事例

AI・デジタル技術を用いた打音法は、ハンマリング方法（ハンマーの大きさ、叩き方）、データ取得方法（マイクロフォン、フード付マイクロフォン、加速度計）、分析方法（健全と欠陥を判別する方法、欠陥の規模を調べる方法、AI手法、物理的手法）について各種の方法があり、本研究部会の報告書³⁾では6つの方法を紹介している。ここではそのうちの一つの方法を紹介し、建築物の内壁に適用した結果を示す。

・装置：写真-1に示すインパクトハンマとフード付マイクロフォンからなる打音測定装置でADコンバータを介して、音圧波形と打撃力波形をPCに収録し、分析する。インパクトハンマを用いることにより、点検者により異なった打撃力を正規化することができ、フード付マイクロフォンを用いることにより、コンクリート自体の振動音を捉えることが可能となる。

・分析方法：分析は、物理的手法とAI的手法からなる。物理的手法では1波目の最小音圧と最大打撃力の比（振幅値比）に着目し、振幅値比から、部材厚さを推定する。部材厚さは、コンクリート表面から、浮き・剥離や空洞面までの距離を表すため、浮き・剥離深さと分布が分かる。AI的手法では、打撃後に振動が終わるまでの時間のFFT分布から、欠陥規模である浮き・剥離部の広さと浮き・剥離部の深さを同時に推定することが可能である。それぞれのメリットを用いて、分析を行う。AI的手法では、自己組織化マップ(SOM)で欠陥判別までを行うが、欠陥、健全の区別ではサポートベクターマシン(SVM)、多層パーセプトロン(MLP)などを併用することも可能である。なお、これらのAI的手法は欠陥の規模が異なる空洞試験体で学習した結果を用いた。

・データ収録と表示方法：データ収録は、面的（格子状）に収録し、物理的手法である部材厚さについてはヒートマップ表示を行い、CAD画面に貼ることにより、面的な情報を表示する。細かい欠陥を調べるためには、格子の大きさを狭くする（細かく測定する）必要がある。一方AI的手法を用いることにより、広い範囲をランダムに測定し、欠陥の平面的規模を絞ることが可能となり、その結果から測定範囲や格子状の測定間隔を再検討することもできる。

・適用結果：1961年に建設されたRC造の低層建築物A棟の階段部内壁（写真-2）を本装置で格子状に測定し、その結果として厚さ評価とAI評価の結果を図-5に示す。AI評価は厚さ評価で100mm以下の部分の結果である。この結果は内壁の塗壁に50mm以下の剥離箇所があることを示し、叩き点検の結果と合致していることが分かる。

(3) まとめと課題

点検における打音法の探查精度・性能を向上させるた

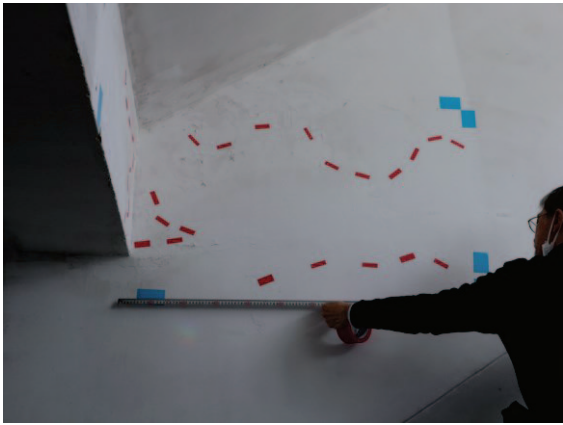


写真-2 測定箇所
RC造の低層建築物(A棟)の階段部内壁

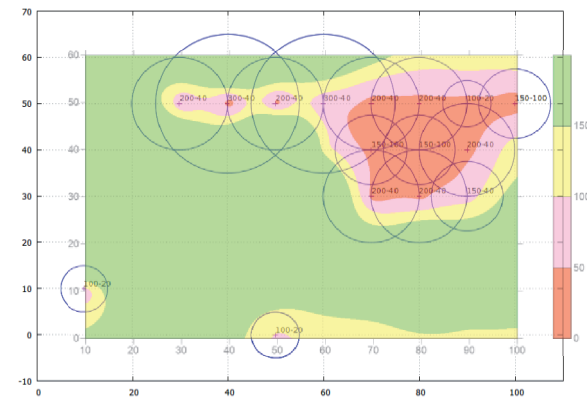


図-5 厚さ評価とAI評価の結果

めにAI・デジタル技術を用いた打音法の活用を検討した。本技術を基地の建築構造物の壁体を対象に適用し、剥離範囲と深さについては点検者の経験によらず、良好な結果が得られている。

今後の課題として、

- ・ 位置情報を簡易に得る方法が必要となる。点検データを蓄積するためには点検結果を正確な位置データと関連づける必要がある。そのためには検査位置の座標情報を残す必要がある。
- ・ 高所を含め、効率的に測定するためには自動測定技術を確立する必要がある。遠隔的な打音技術である赤外線法、音響探査法とともに、UAVや吸着型ロボット、関節型ロボット、吊り下げ型ロボットによる打音法の開発を進める必要がある。

3.3 3次元点群データの活用

(1) 目的

3次元点群データとそれに関連する技術を活用して、BIM/CIMの考えに従って蓄積することを試行し、3次元点群データが構造物の維持管理にどのように活用できるか実験的に検討する。具体的には、3次元点群データを以下の2つの着目点に基づいて活用できるか検証する。

表-3 使用機材

名称	性能	概観写真
TLS	範囲誤差：±1mm 測定範囲：0.6m～350m	
WHS	範囲誤差：±0.1mm 被写体距離3D精度（最大）：0.1mm + 0.3mm/m	



図-6 調査対象建物B棟、C棟の全体点群データ

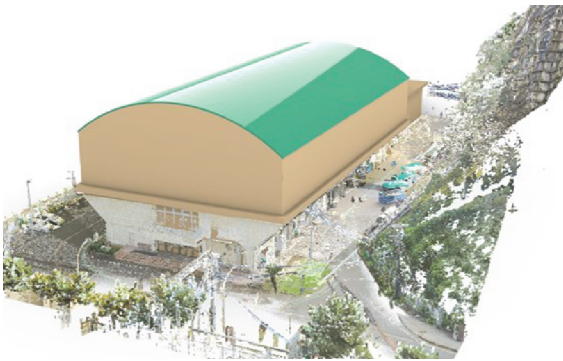


図-7 調査対象建物B棟、C棟の全体周辺環境(点群)とBIM/CIMモデルデータの重畳

[着目点1]打音検査AI、目視AI、赤外線の検査結果を保存・蓄積するためのBIM/CIMモデルデータ作成の有効性の確認

[着目点2]計測データから、異常箇所の抽出・定量化、並びに検査結果との比較による有効性の確認

(2) データ計測

対象の外壁は、B棟外壁1(北側)、外壁2(南側)およびC棟耐震壁(外側・内側)、C棟柱1、2の計6箇所を実施した。また、北側舗装の一部も対象とした。

使用した機材は、地上型レーザスキャナとハンドヘルド型

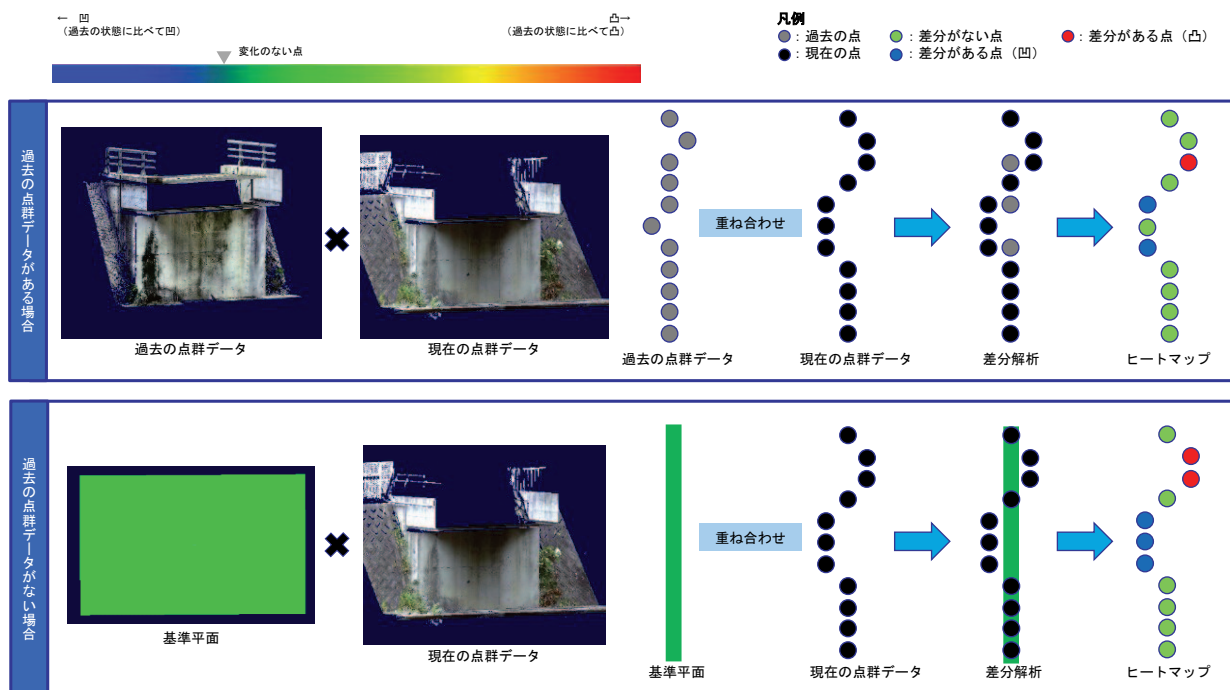


図-8 構造物表面の差分量とヒートマップのカラーとの関係

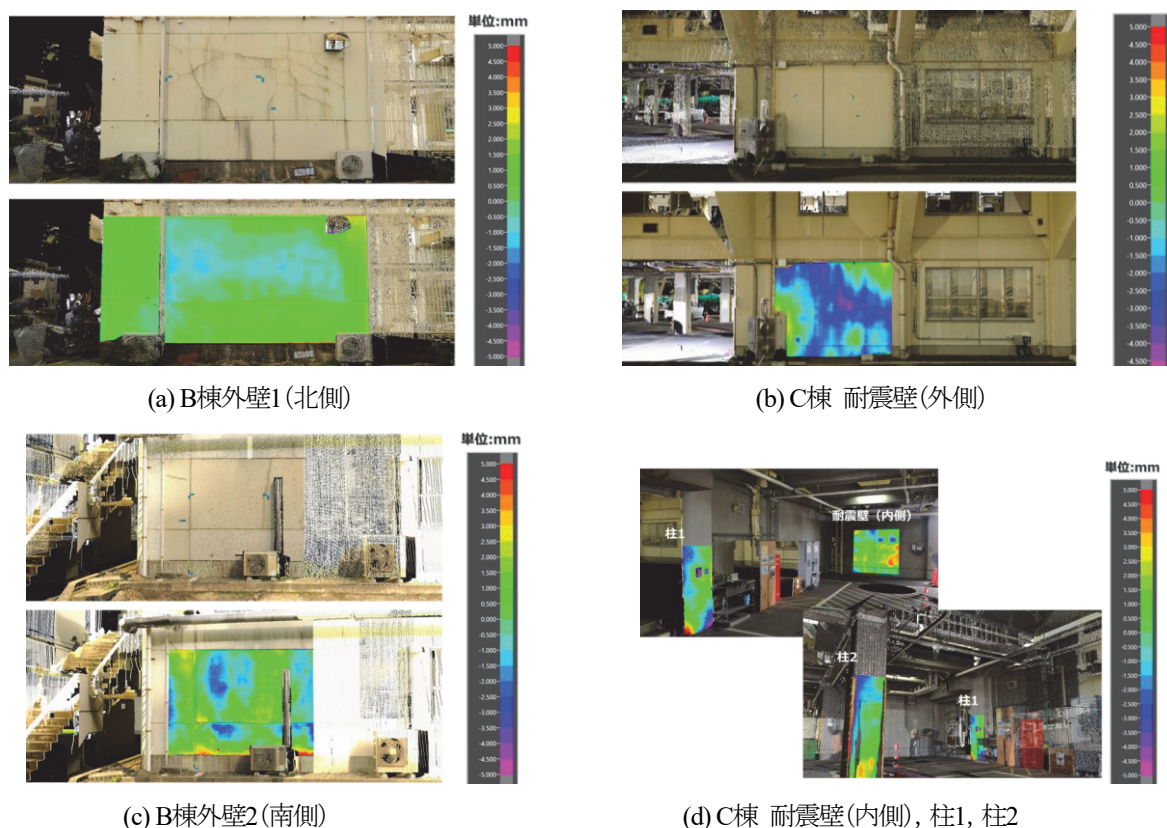


図-9 差分解析結果

のハンディスキャナを利用した。調査対象の外壁をTLSとワイヤレスハンドヘルドスキャナ (Wireless Handheld Scanner: 以下, WHSと言う) で計測する。それぞれの仕様を表-3にまとめる。また, BIM/CIMモデルデータを作成するため, TLS

で, B棟, C棟の外壁面を周回して合計18ショット(点群総数466,831,098点)計測した。

(3)[着目点1] BIM/CIMモデルデータとしての活用
維持管理で活用するために着目箇所の計測結果を, 適切

に保存することは、適切な補修・補強工事などの対策を実施するためには、非常に重要である。そこで、計測したデータをBIM/CIMの考えに準拠し、BIM/CIMモデルデータ作成のために活用する。

TLSにより計測した点群データを図-6に示す。地上からの計測のみ実施したため、天井・屋上部は点群データが取得できていないが、BIM/CIMモデルデータを作成するための外型を把握するには、十分な点群データが計測できている。計測した点群データを用いて、C棟のBIM/CIMモデルデータを作成した(図-7参照)。

(4) [着目点2]異常箇所の抽出・定量化としての活用

異なる2時期における構造物表面の3次元座標値を差分解析して算出される値に応じて色を変化させた表示方法を、ヒートマップ表示としている。このヒートマップ表示された情報をもとに、構造物の表面に発生している異常箇所の位置情報の探索を支援することと定量的な数値の把握が可能になり進行性の評価についても維持管理を支援することができる。図-8に差分と色の関係を示す。

本提案手法⁹⁾の差分解析は、異なる2時期のデータを重ね合わせることで、ヒートマップ表示する、もしくは計測した点群データと基準平面を作成して、その基準平面との差分を用いてヒートマップ表示することができる。本実証実験では、1時期の3次元点群データしか用いることができなかったので、基準平面を作成することでヒートマップ表示した。基準平面の作成は、設計図面を用いる方法や、計測した点群データから健全と思われる箇所を任意に選択して、仮想平面を作成する方法がある。今回は、後者の方法を用いて基準平面を作成する方法を採用する。

差分解析を実施した結果を図-9に示す。

点群データを定期的に取得・保存しておけば、異なる2時期の点群データを用いて差分解析をすることで、異常箇所の抽出や、異常箇所の進行を確認することが可能になることが指摘できる。

(5) BIM/CIMモデルデータに関連付けた維持管理データの保存・管理

さらに、BIM/CIMモデルデータに、計測した結果を関連づけて保存・管理することを検証する。BIM/CIMモデルデータに、維持管理データとして差分解析結果のヒートマップ画像を重畳したイメージを図-10に示す。

ここでは、3次元点群データを用いて維持管理データを簡易的に管理する仕組みを提案した。この方法のメリットは、点検・検査結果をBIM/CIMモデルデータに関連づけることで、異常箇所などのデータが、建物のどこで発生しているかを直感的に把握することが可能となる。また、別の箇所で発生している異常箇所について、3次元モデルデータに関連づけて管理することで、それらの異常箇所の関連性について、補修・補強工事をするときに、適切な診断を支援することが可能となる。例えば、外壁に発生している異常が、天井部などに発生している異常との関連を疑うことが可能となり適切な補修・補強工事が可能となる。また、点群データを

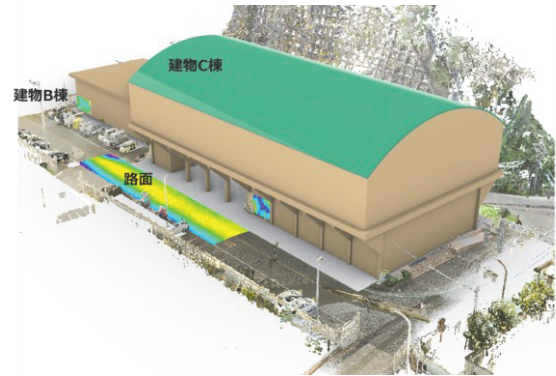


図-10 計測結果をBIM/CIMモデルデータへ重畳したイメージ

活用することで、対象物だけのBIM/CIMモデルデータだけでは、現場環境が把握することが難しい場合も、計測した点群データを利用して、重畳することで周辺環境も含めた認識が可能となる。

デメリットとしては、利用するソフトウェアを使うためには、一定のトレーニング期間を要することと、ソフトウェアの導入コストも利用する人数・体制とのバランスを要する。また、計測作業も、対象物を計測した際に取得するデータに死角が発生しないように、計測箇所を選定することが重要となる。さらに、膨大なデータを保管するためのストレージ確保、システムのランニングコストが必要となる。

(6) まとめ

本検証では、3次元点群データを用いてBIM/CIMモデルデータを効率的に構築できることが確認でき、その有効性を示すことができた。

3.4 赤外線技術

今回の現地調査では、赤外線技術の適用も実施したが、本稿では紙面の都合もあり、概要のみを紹介する。詳細は本研究部会の報告書⁹⁾を参照されたい。

これは、コンクリート部材中の欠陥部に存在する空隙、浮き等の熱的不連続部が、日射や人工的熱源の照射によってもたらされる表面温度の変動により、欠陥部と健全部の間に表面温度差が生じる時間帯があることを利用して、表面温度分布から欠陥を検出する手法である³⁾。

現地調査では、昼間の日照および気温上昇による加熱や、夜間の放射冷却および気温効果による冷却によって検出するパッシブ法と、強制的に熱負荷を与えることによって欠陥部に生じる温度変化を計測するアクティブ法の両方を実施している。アクティブ法での熱源はハロゲンスポットランプを使用した。

4. 研究部会の報告書の内容紹介

本稿では、防衛施設の長寿命化におけるコンクリート構造物の点検・診断へのAI技術の活用についてそのメリットを

整理し、適用性の確認のために行なった現地調査の一部を紹介した。

以下に、本稿のまとめに代えて2025年に刊行予定である本研究部会の報告書の構成を紹介する。

1章では、AI技術活用のメリット、現地調査の概要を序論としてまとめている。

2章では、防衛施設の維持管理の基本的な事項として、長寿命化などについて説明し、維持管理における用語を整理している。

3章では、点検・診断について考え方をまとめている。AI技術に依らない従来の点検手法を整理した上で、防衛施設で大きな数的ウェイトを占める建築物と、島国である我が国で維持管理上の重要ポイントとなるであろう港湾施設の点検の考え方を重点的に解説している。建築物の点検の考え方として、

- ・ 建築物の劣化・損傷の捉え方
- ・ リスク評価と環境影響評価の概念
- ・ スtock量を考慮した維持保全計画

他、様々な視点から論じ、解説している。港湾構造物の点検としては、幅広い構造物を対象に点検診断計画から総合評価に至るまで詳細に解説している。

4章では、AI技術による点検・診断と題して、AI技術導入のメリットと注意点から、今後の展望まで解説した上で、画像AI(目視AI)、3次元点群データ、打音AI、赤外線技術の詳細を説明している。

最後の5章では、本稿でもあらましを紹介した現地調査をケーススタディとして実施し、その結果の詳細を報告している。

5 おわりに

本研究部会の活動において、現状に関するヒアリングのためにご協力を得た各部署の担当者各位、現地調査においてご厚情を賜った部隊の施設担当者各位に謝意を表す。また、研究部会設立の当初から積極的なご支援を下された防衛施設学会の大野友則理事長(当時)、末永龍介理事、高橋芳彦理事に謝意を表す。

参考文献

- 1) 整備計画局施設計画課:防衛省インフラ長寿命化計画(行動計画)の解説, 防整施第12714号, 2022.(2024年7月11日閲覧)
- 2) 一般社団法人防衛施設学会:AI技術を用いたコンクリート構造物の調査技術に関する研究部会報告書、2024年7月
- 3) 防衛施設学会:AI技術を用いたコンクリート構造物の調査技術に関する研究部会報告書(仮題), 2025(予定)。
- 4) アイセイ株式会社: NuBas点群処理・モデリング・差分解析ができるソフト, (2025年1月17日閲覧)
<https://nubas3d.com/>

映像鮮明化技術と AI 技術を活用した外周警備システム～SOLPAK4～

THE PERIMETER SECURITY SYSTEM UTILIZING
VIDEO CLARIFICATION AND AI TECHNOLOGY -SOLPAK4-

横山雅俊*

YOKOYAMA Masatoshi

*工博（株）ユニバーサルコンピュータ研究所（〒542-0086 大阪市中央区西心斎橋 1-9-16）

キーワード：AI, 映像鮮明化, 防衛局面, 施設維持管理, 外周警備システム
(AI, Video clarification, Defense field, Infrastructure maintenance, Perimeter security system)

1. はじめに

防衛施設をはじめ港湾施設、空港施設などの外周を警備するシステムについて論ずる。

特にここでは、映像鮮明化技術と AI 技術の活用を取り上げている。

映像鮮明化装置として大規模な外周警備システムに適するよう、ネットワーク対応であり映像鮮明化装置自身に AI 機能が内蔵可能な装置を説明する^{1) 2)}。

AI 技術には広範囲な役割があるが、ここではセキュリティ強化のため「防衛省 AI 活用推進基本方針」による AI の活用分野として「①目標の探知・識別」「②情報の収集・分析」に属する機能について言及する³⁾。

2. 映像鮮明化技術

2.1 映像鮮明化処理

映像鮮明化処理は以下の機能をもっている。

- (1) 霧や煙などの空中の視界不良改善
- (2) 濁った水中の視界不良改善
- (3) 暗闇や逆光による視界不良改善
- (4) 肉眼では視認しにくいわずかな物体の変化を可視化して確認を支援
- (5) 鮮明化最適調整の支援

2.2 施設維持管理の活用例

まず、鮮明化の詳細を論述する前に、施設維持管理におけるわかりやすい鮮明化の活用例を示す。

図-1 に示すように、鮮明化技術を使用することにより、従来、目視や通常カメラ撮影では確認が困難であった施設や構造物の劣化や汚れ状況を的確に把握することができる。

小さな傷も強調して表示されるので、迅速に劣化箇所を発見することが可能になる。また、水中環境や夜間の監視映像にも有効な技術である。

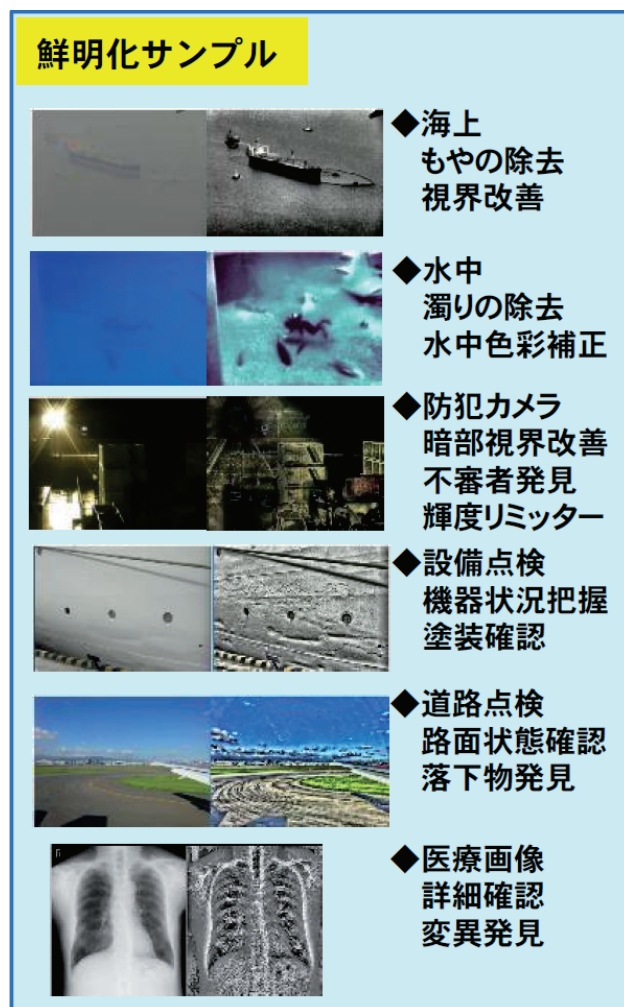


図-1 施設維持管理等における鮮明化の活用例

2.3 展開分野

ここでは、映像鮮明化装置の展開分野に列挙する。

防衛分野以外での利用分野の理解に参考になるものだが、本論文ではこれらの詳解は割愛する。

海事: 海上監視、船舶運航、港湾監視・ブイ搭載監視

警察:捜査支援、証拠映像解析、鑑識作業支援
放送:災害現場映像、一般放送映像、お天気カメラ
建設:構造物劣化診断、トンネル、橋梁、水中建造物、水中工事
土木:トンネル掘削切羽の地山性状把握、岩盤分類支援
水道:ダム点検、上水道点検、下水道点検、水質油膜発生点検
環境:ごみ焼却場監視、気象監視、大気汚染監視
発電所:発電所点検(火力、水力、原子力、太陽光、バイオ)、ダム水中設備
電気:鉄塔、配管、水中配管、発電機、判別困難部品識別
道路:施設劣化診断、路面劣化診断、空洞化予備調査
航空:航空機視界改善、ドローン航行支援、航空機点検
空港:滑走路点検、設備点検、気象判定、除雪作業支援
交通:運転時視界改善、監視カメラ視界改善
鉄道:列車劣化診断、線路劣化診断、保線作業支援
自動車:車両外観検査、内装点検・塗装検査、エンジンルーム点検
交通事故:交通事故現場検分、車両外傷検証、道路設備損傷検証・事故査定
捜査:防犯カメラ解析、遺留品検分、麻薬発見、水底の沈下物搜索
消防:現場搜索視界改善、消防士装備、消防車装備
防災:河川監視、津波監視、土砂崩れ監視、土石流監視、被害予測
印刷:透かしの表面チェック、紙幣確認、有価証券確認
文化財:遺跡発掘物の調査、古文書解読、遺物復元支援、遺物同定
考古学:発掘支援、水中考古学、破損部分の認識
医療:医療器具点検、X線、CT/超音波映像、内視鏡、術野カメラ支援
研究:顕微鏡、悪環境での観察カメラ
美容:お肌診断、化粧確認
不動産:住宅物件の査定、壁面状態管理、マンション経年管理
店舗:店舗物件の査定、店舗清掃判定、暗照明営業店舗の監視
保険:物損事故被害物の査定(海上、陸上、構造物)
食品:加工均一度判定、異物混入検査、鮮度判定
製造:外観出荷時検査精度向上、商品パッケージ検査、液晶パネル検査
素材:金属刻印認識、金属表面検査、樹脂表面検査、ゴム表面検査
養殖:水中養殖状態監視、魚種魚数管理、盗難防止
水産:魚介類生態観察、水質確認
潜水:水中状態の確認、水中探査支援、沈下物の識別
放送:映像欠陥の検査、古典映像の復元
農業:農作物の外観検査、土壌状態の判定
気象:雲種判定支援、観天望気の支援

2.4 映像鮮明化の基本

本論文は映像鮮明化活用を中心に論述するものであるので、以下では鮮明化技術処理の一例のみを挙げて、処理内容の理解を補助するものとする。

この説明は、ある設定条件での一例であり、あくまでも鮮明化処理の基本を理解いただくために簡単化して記述するものである。

図-3 のグラフは、Y 軸が輝度変化、X 軸は便宜上 1 次元で表現しているが映像内の模様を現わしているという前提に立って見ていただきたい。

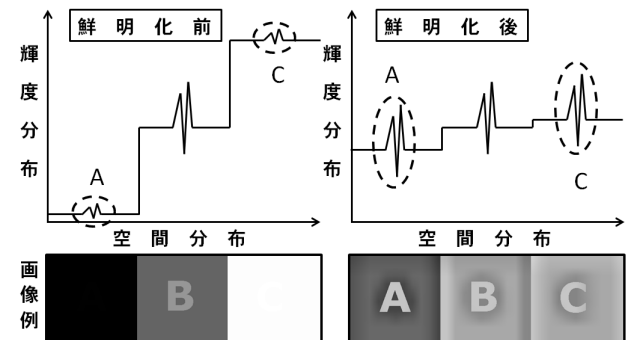


図-3 鮮明化における輝度分布の変化

鮮明化前の映像には、輝度レベル 1%を中心に 1%程度の違いの輝度で文字 A が、輝度 40%と輝度 60%で文字 B が、輝度 99%を中心に 1%程度の違いの輝度で文字 C が描かれているとする。

通常、この文字 A, C は輝度差が少ないため、肉眼では視認できない。

そこで、鮮明化処理を加えた後の鮮明化後映像を示すものとする。これは実際に、基本的な設定で鮮明化処理を加えた映像である。なお、グラフは説明用に抽象化したものである、

右の鮮明化後グラフでわかるように、輝度変化の大きな部分はほとんどそのままであるが、輝度変化の小さな部分だけが大きな輝度変化に変わっており、かつ全体が見やすい輝度中央に移動している。

このように、鮮明化処理は、映像中の輝度変化の小さな部分だけを大きな輝度変化に変えるものである。

なお、ここでは詳しくは説明しないが、画面全体をすべて対等に処理するものでなく、画面を細かい部分に分割しそれぞれ最適に処理するものである。

3. 映像鮮明化システム

3.1 システムのタイプ

今回、活用する映像鮮明化システムとしてサーバータイプに言及する。

映像鮮明化サーバーは、静止画や動画などをネットワーク経由で鮮明化でき、ライブ機能も備えておりさまざまな映像入力 (HDMI, NTSC, IP カメラ, 遠隔 HDMI) をリア

ルタイムで鮮明化可能である。ネットワーク機能では、業界標準である ONVIF プロトコルなどの映像入出力による鮮明化が可能である。

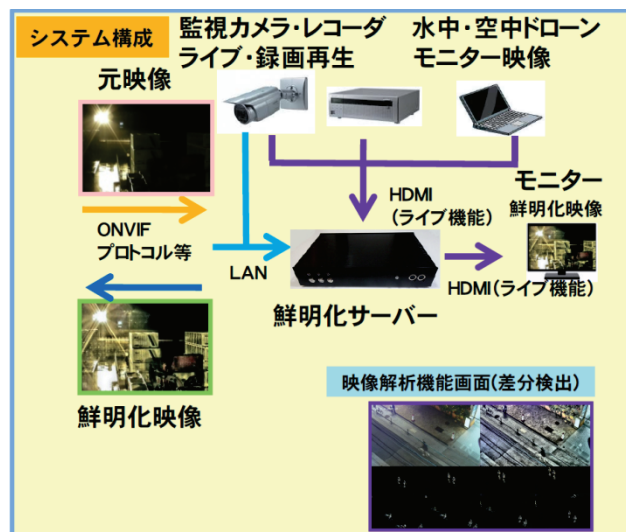


図-3 映像鮮明化サーバーの構成

3.2 映像鮮明化サーバーの機能

- ・静止画や動画ファイルまたは映像ストリームを LAN 接続された映像鮮明化サーバーで処理可能である。
- ・処理時に鮮明化設定を指定することができる。
- ・鮮明化結果には、元画像と鮮明化画像の横並び比較映像を自動的に作成できる。
- ・画像解析機能の基本として画像間の差分映像作成を指定できる。画像解析機能の拡張として AI 搭載が可能である。
- ・ONVIF 映像ストリーム方式の監視カメラやレコーダの映像が鮮明化可能である。
- ・鮮明化詳細設定として、鮮鋭化、色空間補正、水中色彩補正、輝度リミッター機能が指定できる。輝度リミッターは水中映像あるいは夜間映像等で視界を妨害する強い光源を消去できる機能である。

3.3 映像鮮明化機能の防衛分野展開

ここでは、特殊部隊対処の防衛局面における展開を論述する。

図-4 中、◆で始まる枠部分が本論文での論点である。

図-5 に陸上分野における鮮明化活用事例を示す。

・海中ダイバーの探査

鮮明化により、上空から低深度の海域における海中構造物を認識することができる。この機能を利用すれば、海中にある機雷・不審ダイバー・低深度の潜水艦の発見精度を向上させることができる。

・埋設地雷の探査⁹⁾

鮮明化により、地面の微細な状況を把握し、わずかな異変を検知できる可能性がある。

例えば地雷を埋設した場合、地面を掘り起こし再度埋設した際には、地中水分の変化による微細な地面の変化を鮮明化で認識して探査できる可能性がある。



図-16 特殊部隊対処の局面(令和6年版防衛白書
図表III-14-15 特殊部隊防衛のイメージ図より引用⁴⁾)

を鮮明化で認識して探査できる可能性がある。

・遠方監視の支援

遠方建物内に不審者が居る場合、建物ガラスによる外光の反射により建物内部は視認性が低下する。

そのような場合に、鮮明化で建物内部の人物を特定できる可能性がある。

・建物捜索の支援

建物に対し何らかの工作(爆破物の設置)がされた場合、建物壁面での微細な変化を鮮明化で検知できる可能性がある。

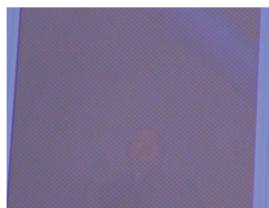
鮮明化前



鮮明化後



(a) 地面掘削痕跡の探査



(b) 遠方建物内の不審人物の探査



(c) 夜間逆光時の暗部領域の探査

図-5 陸上分野における鮮明化活用事例

4. AI 技術

4.1 研究の背景

AI 技術は現在 3 世代目の発展であると言われている。
筆者は、1980 年代ちょうど第 2 世代目の時代に大阪大学の人工知能研究室において人工知能・分散処理ネットワーク・画像認識の研究室で研究を行っていた⁹⁾。

第 2 世代は、ルールベースの人工知能でエキスパートシステムが研究の中心的なテーマであった⁷⁾。

当時はルール (if~then~型) を木構造あるいはリスト構造で表現するため、Lisp と呼ばれるリスト処理言語が主流であった。この世代は、対象分野のルールを人間が解析して、プロダクションシステムと呼ばれる判断システムを構築する必要があり、人工知能といいながら事前の人間による大きな労力を要した。そのため、第 2 世代は大きな発展にいたらず、AI 技術が世間の注目を浴びることがなかった。

しかし、その後、コンピューティングパワーの目覚ましい発展に押され、大量のデータを処理することによる機械学習が現実的になってきた。現在は、大量の学習データを投入することで分類や認識につながる深層学習 (ディープラーニング) が主流となっている。また、エッジデバイスの高性能化は AI 活用を場を拡大している。

4.2 警備システムにおける AI の活用

AI は人工知能と言われるように、人間のような知的能力を示す技術を意味する。

この処理は以下のように分解できる。

- ・学習 データを基にして知識を獲得する。
- ・推論 与えられたデータから論理的に結論を導く。
- ・認識 音声や画像の意味を理解する。
- ・意思決定 最適な選択肢を選ぶ。

警備システムにおいて AI が活用できる要素は以下の部分である⁸⁾。

・監視カメラ

現時点では、監視カメラ内部で AI 処理を行うことが主流となっている。本システムではこの監視カメラの AI 機能に対応している。

・センサー

各種センサー内部に AI 機能を含むことは望まれる手法ではあるが、現時点ではまだこの製品は多くない。

OPTEX Fiber Defender は光ファイバーフェンスセンサーであるが振動波形出力機能があり、波形を AI 解析することでより精度向上の可能性があると思われる⁹⁾。

・PC

複雑な制御を行う PC 内での AI 処理は期待されている機能である。

AI の役割は以下の通りである。

- ・自動化
監視映像やセンサー情報の分析処理を通じて人的作業の負担を軽減する。
- ・異常検知
通常のパターンから外れた動きを自動で検出する。
- ・データ分析
長時間の映像データを分析して必要な事象を抽出する。
- ・プライバシー保護
必要に応じてデータを匿名化しながらモニタリングを行う。

4.3 AI 対応カメラ

ここでは、i-PRO のセキュリティカメラを例に、AI 技術を活用した機能を整理する¹⁰⁾。

i-PRO の AI 対応カメラでは以下の機能をカメラが内蔵し、システム開発者は提供される SDK(ソフトウェア開発キット)によってセンサー機能として有効に活用することができる。

(1) 人・物体検出

映像内で人や物体を自動的に識別できる。

(2) 顔認識

特定の人物を識別することができる。

(3) 車両認識

車両種類やナンバープレートの識別ができる。

(4) 動体検知とアラート通知

対象の動きの検出に加えて、動体の「不自然な動き」を判断し、その場合にのみアラートを発することができる。

(5) 車両の速度計測

通過する車両の速度を測定することができる。

(6) 深層学習によるシーン認識

深層学習技術を活用し特定のシーンや状況を学習させ、それを識別することができる。

(7) 外部連携

MQTT¹¹⁾、ONVIF M プロファイル¹²⁾などを用いて外部の制御システムと連携ができる。

(8) 自動追尾機能

動いている対象を自動的に追尾する機能がある。

(9) 音声解析

音声解析機能が搭載されている機種がある。

5. 外周警備システム

5.1 開発の背景

図-6、図-7 に示す 2004 年の改正 SOLAS 条約発効に

伴う法律改正により、国際港湾施設における侵入者自動検知装置の設置が求められるようになった。SOLPAK は侵入者自動検知装置を実現する外周警備システムで2004年に初版が開発され、SOLPAK4はその4世代目にあたる。

本システムは港湾警備のために誕生したが、防衛施設をはじめ港湾施設、空港施設などの外周を警備するシステムとして広範な外周警備にも適するものである。



図-6 国土交通省 HP より「港湾における保安対策について」



図-7 国際船舶・港湾保安法及び関係法令

5.2 システム概要

侵入者保安対策の基本である、ゲート監視・フェンス監視・カメラ監視・音声警告・通報機能を備えている。

海中の不審ダイバー監視も対応可能である。

センサーには、赤外線方式、振動検知方式、光ファイバー方式（開発中）、電磁誘導方式、レーダー方式、レーザ方式など、水中光ファイバー方式、さらに画像解析による AI 活用侵入検知方式も含め各種方式に対応可能である。

人物や車両に対する警備機能として、AI 技術による不審者検知システム、行動解析システム、顔認証システム、車番認識システムにも対応可能である。

監視カメラ映像データ（映像、イベント）の長期記録

や証拠提出には、外部媒体（光ディスク、LTO テープ）に保存可能である。

5.3 基本監視画面

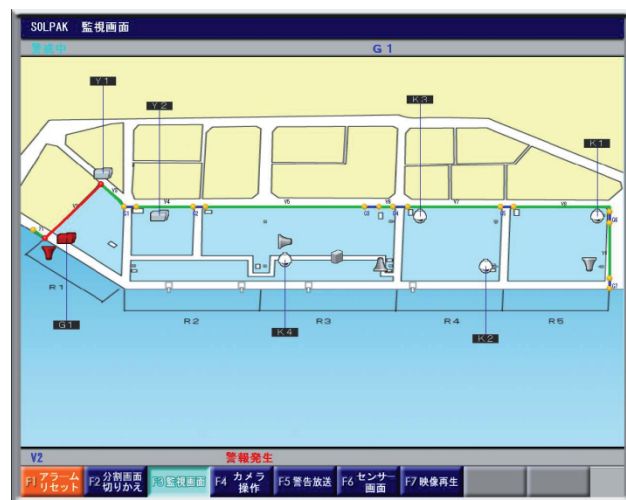


図-8 基本監視画面

外周警備を行う基本の操作画面を図-8 に示す。

警備すべき領域の外周には設置された侵入検知設備（センサー）が画面上に表示されている。

地図上には、監視カメラ・警戒放送設備（スピーカー）が表示されており、侵入を検知するとそれぞれ対応する区画が変色し警報状態を表現する。

5.4 システムの構成要素

システムの主な構成要素を図-9 に示す。

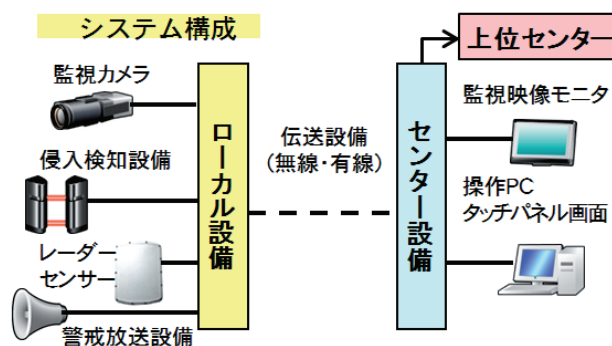


図-9 システム構成要素

(1) 監視カメラ

領域周辺部監視カメラ、領域内部監視カメラ、水際領域監視では水中監視カメラなどが使用される。

監視カメラの操作画面は図-10 のように現場の監視員が迅速に操作できる内容になっている。

本警備システムは監視カメラの AI 機能をセンサーとして対応している。

(2) 侵入検知設備

ゲート部では赤外線、マイクロ波センサーなどが使用される。フェンス部では、振動、光ファイバー、マイクロ波、レーザーセンサーなどが使用される。

(3) 警戒放送設備

音声放送用スピーカー、自動音声再生器などが使用される。

(4) ローカル設備

一つの監視対象領域ごとにローカル設備が置かれる。

カメラ制御装置、侵入検知制御装置、操作PC、映像録画装置、映像鮮明化装置から構成される。

(5) 伝送設備

有線伝送機器、無線伝送機器から構成される。

(6) センター設備

複数の監視対象領域がある場合、センターで集中管理するためにセンター設備が置かれる。

監視映像モニター、侵入検知映像モニター、映像録画装置、操作PC、システム機器状態監視装置、映像鮮明化装置から構成される。

さらに上位センターが存在する場合、センター配下の領域の警備状態を集約して伝送する装置が設置される。

なお、センター・ローカル・伝送設備には疑似機能があり設備保守や設備拡充の際に有効に活用される。



図-10 監視カメラ操作画面

5.5 水中監視機能

図-11 のように港湾における課題として水中からの侵入者の問題がある¹³⁾。

水中監視の手法としては、以下のようなシステムが存在する。

- (1) 固定設置された水中カメラと映像鮮明化による水中可視画像による監視システム
- (2) 水中ドローンによる水中移動体の監視システム
- (3) ダイバーの体内から発生し水中に浸透する生物化学物質を検知するシステム
- (4) 音響ソナーによる水中移動体の監視システム
- (5) 監視専用海底ケーブルに音響センサーや温度センサ

ーを組み込み、ダイバーの呼吸音や機器音またはダイバーの接近による温度変化を検知するシステム

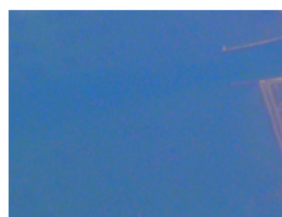
(6) 海底光ファイバーケーブルにおけるダイバーや船舶が発生する振動や圧力の変化を感知して接近を検知するシステム¹⁴⁾

SOLPAK4 では、これらの検知技術との連携に対応可能である。

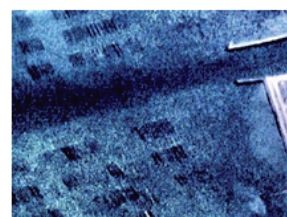


図-11 水中監視システムのイメージ (参考文献 13) より)

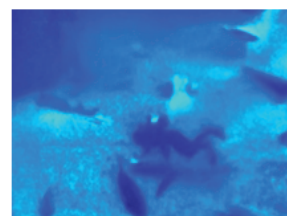
鮮明化前



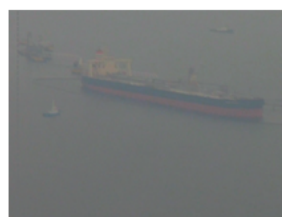
鮮明化後



(a) 上空からの水中構造物の探査



(b) 水中不審者・不審物の探査



(c) 海上の視界改善による船舶探査

図-12 水際監視における映像鮮明化事例

5.6 システムの機能

(1) カメラ制御

- ・手動制御 カメラを手動で旋回する。
- ・自動巡回制御 カメラの監視方向を自動的に巡回して広範囲を監視する。
- ・自動追尾 AI 機能と連携して移動体を追跡し複数カメラにわたる広域な不審者追尾に対応する。

・プリセット管理 カメラのプリセット設定および呼び出しを行う。

・ワイパー管理 ワイパーを制御する。

・センサー連動 センサーの侵入検知アラームに応じてカメラの監視方向を自動的にセンサー位置に旋回する。

(2) アラーム制御

・センサー信号入力 侵入検知設備のセンサーおよびカメラの AI 機能によるアラーム信号を入力する。

・複数カメラ連動 アラーム信号により同時に複数台のカメラの監視方向を自動制御して侵入者を捕捉する。

・自動複数モニター連動 監視センターにおける監視モニターを自動切替して侵入者を表示する。

・音声連動再生 侵入者のセンサー区画に応じて対応するスピーカーから自動で警告音声を連動再生する。

(3) 音声制御

・自動音声再生 事前に録音された多言語警告音声を自動再生する。

・マイク音声 センター監視員によるマイク音声放送を行う。

(4) ローカル制御

・ローカル機器連携 カメラ制御、アラーム制御、音声制御を連携する。

・AI 処理 監視カメラの AI 機能と連携して侵入検知の高度化を行う。

(5) センター制御

・ローカル対応 ローカル設備との伝送によりカメラ制御、アラーム制御、音声制御を連携する。

・アラームレポート アラーム履歴を管理して統計データを出力する。

・監視スケジュール 計画的な監視スケジュールの管理、グループ監視、パターン監視、監視状態の手動変更処理を行う。

・機器監視 機器の稼働状態監視、異常時アラーム、機器設定管理、機器ログ管理、停電対策を行う。

・外部映像出力 外部提出用に映像を出力する。

・自己障害回避機能 障害発生時に状況を診断し最適な動作復帰を支援する。

5.7 対象施設

ここでは主に港湾での論述を行ってきたが、基本的に特定領域に対する警備を行うもので、防衛施設全般、空港施設、プラント、発電所、浄水施設、寺社仏閣、刑務所、鉄道施設、学校、データセンター、通信施設、ダム、橋梁、メガソーラー施設などが対象となる。

5.8 海上ブイ警備システムへの応用

SOLPAK4 は各種センサーに連動して領域を監視する機能から、警備システムを海上に設置することも概念的に可能となる。

ここでは昨今の我が国近海における海上警備を強化す

る観点から、大型海上ブイにおける対応を検討することとする。

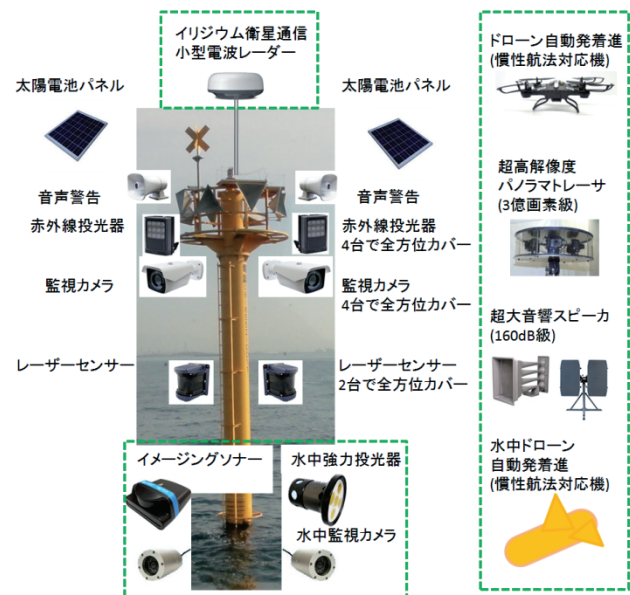


図-13 海上ブイ警備システム概念図

図-13 の海上ブイ警備システムは以下の機能を持つ。

- (1) 大型海上ブイ(海面上約 10m,直径約 2m)上に制御機能を含め自律設置する¹⁵⁾。
- (2) 太陽電池と第 4 世代リチウムイオンバッテリーで電源を確保する。
- (3) レーザーセンサーで全方位範囲中距離を監視する。
- (4) カメラは可視光・赤外線 2 眼カメラで全方位を監視する。
- (5) 夜間接近検知時に点灯する赤外線投光器（検知されにくい長波長光源対応）で全方位を照射する。
- (6) 通信機能はイリジウム衛星通信から HF 帯までマルチバンドで対応する。
- (7) 小型電波レーダーによる探査は電力面を考慮してインターバル動作で対応する。
- (8) AIS 電波受信による一般船舶認識を行う。
- (9) 水中監視カメラと映像鮮明化で水中監視に対応する。
- (10) 有事は音声警告に対応する。
- (11) さらに有事は超大音響警告に対応する。
- (12) ブイ上に待機する空中ドローンの自動発着進に対応する。
- (13) ブイ水中に待機する水中ドローンの自動発着進に対応する。
- (14) 以下についても搭載検討の可能な対象機器である。

PAR フェーズドアレイレーダー

RWR レーダー警報受信機（ミサイル照準電波感知）

ZQQ 複合ソナー（ダイバー、潜水艦感知）

SOSUS 水中固定聴音機（潜水艦感知）

MAD 磁気探査装置（潜水艦感知）

5.9 ONVIF プロトコル

ONVIF (Open Network Video Interface Forum) は、ネットワークビデオ機器 (カメラ、NVR、録画機、VMS など) 間の相互運用性を確保するために設立された国際的な標準化団体である。ONVIF の主な目標は、異なるメーカーの製品間での通信やデータのやり取りを円滑にし、システムの統合を容易にすることである。

オープンな規格 ONVIF はオープンな業界標準であり、誰でも参加・利用できる仕様である。これにより、異なるメーカーや製品の間で共通の通信方法を提供できる。

ONVIF の仕様に準拠した製品同士は、互換性を持ち、簡単に組み合わせて使用できる。

ONVIF には表-1 に示すプロファイルがあり、これらは特定の機能セットを提供する。

特にプロファイル M は AI と関係が深く、メタデータや分析イベント (顔認識、ナンバープレート認識、物体検出など) を取り扱うプロファイルで、AI 機能が強化されたカメラやデバイスで利用される機能である。

表-1 ONVIF プロファイル一覧(参考文献 16)より)

プロファイルA	・資格情報の付与/取り消し ・スケジュールの作成 ・アクセスルールの割り当て
プロファイルC	・サイト情報と構成 ・イベントおよびアラーム管理 ・ドアアクセス制御
プロファイルD	・ユーザー認証情報とアクセス要求の転送 ・ロック/ロック解除などのアクションを実行
プロファイルG	・録画の構成、リクエスト、および制御 ・オーディオとメタデータストリームの受信
プロファイルM	・メタデータの Analytics 構成と情報クエリ ・メタデータの構成とストリーミング ・一般的なオブジェクト分類のサポート ・地理位置情報、車両、ナンバープレート、人間の頭と体のメタデータ定義
プロファイルS	・ビデオのストリーミングと構成
プロファイルT	・H.264/H.265ビデオ圧縮 ・イメージング設定 ・モーションアラームと改ざんイベント ・メタデータストリーミング ・双方向オーディオ

6. おわりに

映像鮮明化技術、目標の探知・識別や情報の収集・分析を目的としたデバイスの AI 技術を活用した外周警備システム SOLPAK4 について論述した。

AI 技術で検知された情報を時系列に解析することで、事案予測を含めたさらに高度な警備システムに発展できる可能性がある。

AI 技術の活用は深層学習を中心にますます高度化されるものと考えられる。

今後、さらに多くの事例を通じ、本論文で論述した手法が外周警備システムとして有効に機能することを検証していきたい。

謝辞

本研究および論文執筆の機会を与えて下さった、大和探査技術株式会社の関係者に感謝いたします。

本論文で扱った映像鮮明化装置について貴重なご意見をいただいた、陸上自衛隊施設学校、陸上自衛隊水陸機動教育隊、陸上自衛隊富士学校、海上自衛隊佐世保総監部、海上自衛隊佐世保警備隊水中処分隊、防衛装備庁電子装備研究所、防衛装備庁陸上装備研究所、防衛装備庁艦艇装備研究所、三井造船株式会社 (現株式会社三井E & S)、株式会社 I H I、株式会社大林組の方々に感謝いたします。

本論文で扱った外周警備システムについて貴重なご意見をいただいた神戸市港湾局、株式会社神警エンタープライズ、阪神国際港湾株式会社、大阪港湾局の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 横山雅俊:防衛分野における映像鮮明化技術の活用,防衛施設学会平成 29 年度年次研究発表会,2018 年 2 月
- 2) 横山雅俊:IoT・映像鮮明化・AI 技術を活用した施設管理と防衛分野展開,防衛施設学会平成 30 年度年次研究発表会,2019 年 2 月
- 3) 防衛省 AI 活用推進基本方針,防衛省,2024 年 7 月
- 4) 防衛白書,防衛省,2024
- 5) 佐藤源之:人道的地雷検知・除去技術と国際貢献への道,科学技術動向,科学技術・学術政策研究所,2005 年 10 月
- 6) 田村進一,柳原圭雄,唐沢博:人工知能の世界,技術評論社,1985 年 9 月
- 7) Avron Barr,Edward A.Feigenbaum,田中幸吉,淵一博:人工知能ハンドブック,共立出版,1983 年 4 月
- 8) 映像セキュリティ委員会:調査研究報告書「画像解析と AI を活用した防犯カメラシステム」,2023 年 3 月
- 9) 光ファイバー振動検知センサー FD508,オプテックス株式会社,2024 年
- 10) i-PRO AI ネットワークカメラ用機能拡張ソフトウェア外部インタフェース仕様書,i-PRO,2024 年
- 11) Richard Coppen,MQTT v5.0 仕様書,MQTT.org,2019 年 3 月
- 12) 映像セキュリティシステムにおける標準化 (ONVIF) 動向と当社の取り組み,パナソニックシステムネットワークス,2013 年
- 13) 中野正規:水中からの脅威に対処する水中監視システム及びその関連技術,NEC 技報,Vol.66 No.1,2013 年 8 月
- 14) 福山洋介:水中セキュリティシステム,NEC ネットエスアイ,2024 年 2 月
- 15) ZSB シリーズゼニハイスパブイ,株式会社ゼニライトブイ,2024 年
- 16) ONVIF とは?,システムケイ,2023 年 3 月

年次フォーラム 2025 令和 6 年度年次研究発表論文集

発行所 一般社団法人 防衛施設学会
160-0003 東京都新宿区四谷本塩町 15 番 7 号 松原ビル 3F
TEL : 03-6273-0328 FAX : 03-3292-1485
E-mail : gakkai@jsdfe.org
<https://www.jsdfe.org/>

印刷所 株式会社大應
〒101-0047 東京都千代田区内神田 1 丁目 7 番 5 号
TEL : 03-3292-1488

ISBN 978-4-907956-65-3

当該出版物の内容を転載する場合は、必ず（一社）防衛施設学会の許可を得て下さい。