

一般社団法人防衛施設学会主催

年次フォーラム2024

(令和5年度年次研究発表会論文集)

令和6年2月



(一社)防衛施設学会

Japan Society of Defense Facility Engineers

<https://www.jsdfe.org/>

一般社団法人防衛施設学会年次フォーラム 2024 論文集目次

「維持管理」

座長：市野宏嘉（防衛大学校 建設環境工学科）

- ① 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概要
黒田一郎（防衛大学校）・・・ 1
- ② AI・デジタル打音技術を用いた防衛施設のコンクリートの浮き、剥離調査
歌川紀之（佐藤工業（株）），黒田一郎（防衛大学校），
勝木太（芝浦工業大学），山田悠二（山口大学），
網野貴彦（東亜建設工業（株）），
関和彦（アイセイ（株）），西敏臣，古賀美智恵（（株）九検）・・・ 3
- ③ 防衛力整備を考慮した国土強靱化に向けた防衛施設の維持管理に関する提案
原田紹臣（（一財）災害科学研究所），堀口俊行（防衛大学校），
水山高久（京都大学），河野克明（エースコンサルタント（株））・・・ 9
- ④ 建築物の新設や補修に利用可能な高耐久セメントシート工法の開発
－ 波長制御・剥落防止機能および耐爆性能の追加 －
辻孝弘（恵和（株））・・・ 17

「建設技術 1」

座長：宮本慎太郎（防衛大学校 建設環境工学科）

- ⑤ 堅牢な防衛施設を造る新たな地盤改良技術「SST 工法」
菊地稔，飯田哲夫（（株）エスエスティー協会）・・・ 23
- ⑥ ジオグリッドと金網を併用した地山補強土工法の法面工低減係数に関する実験的研究
國領ひろし，石垣拓也（日鉄建材（株））・・・ 29
- ⑦ 供用中の既設構造物直下の液状化対策事例 — 静的圧入締固め工法（CPG工法） —
小西武，足立雅樹，渡邊将美，文野隆行（（一社）圧入締固研究機構）・・・ 35
- ⑧ 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
市野宏嘉（防衛大学校）・・・ 43

「防災・環境」

座長：副島正睦（環境省 水・大気環境局）

- ⑨ 「水」の視点から見た避難所（Shelter）の生活の質に関する課題と対策案
～「給水支援」「入浴支援」との連携～
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）・・・ 47
- ⑩ 有機フッ素化合物（PFAS）汚染土壌・地下水の処理技術の開発
日野良太，鎌田明秀，西川直仁（（株）大林組）・・・ 53
- ⑪ ジオシンセティックスを活用した重金属汚染土の浄化システムに関する室内試験
宮本慎太郎，宮田喜壽，野々山栄人（防衛大学校）・・・ 59
- ⑫ 限界状態設計法構築のためのアンカー補強材の引抜き抵抗モデルに関する研究
野々山栄人，宮田喜壽（防衛大学校）・・・ 61
- ⑬ 津波災害における救助能力の把握と自衛隊派遣規模の推定
嶋原良典，多田毅（防衛大学校），有賀海老蔵（防衛省沖縄防衛局）・・・ 63

「建設技術 2」

座長：堀口俊行（防衛大学校 建設環境工学科）

- ⑭ 杭式土石流対策工アーバンガードの開発について
速水七海，山本満明（(株)プロテックエンジニアリング）・・・65
- ⑮ 全自動装薬発破技術による安全性と生産性の向上
小笠原裕介，水谷和彦，坂下誠，浅井秀明（前田建設工業（株））・・・69
- ⑯ 透過型フィルムディスプレイ「透彩」を用いたXR コックピットシステム
森守正，董佳文（(株)竹中土木），
藤田奈津木（加賀電子（株）），
中桐賢二（(株) Delight Global）・・・75
- ⑰ レーザーピーニングによる金属材料の残留応力と疲労特性の改善
佐野雄二（(株) LAcubed），小林祐次（新東工業（株））・・・79

「維持管理」

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概要

RESEARCH SUMMARY ON INVESTIGATION FOR CONCRETE STRUCTURES APPLYING AI TECHNOLOGY

黒田一郎*

Ichiro Kuroda

* 博（工） 防衛大学校建設環境工学科 教授（〒219-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）

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

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おり、それに沿うべく自衛隊の各部署においては強い意欲と熱意をもって多大な努力が重ねられている。

老朽化した施設の蓄積が懸念される昨今の状況を鑑みればその実現のためには、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、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いる。本稿は、AI技術の期待されるメリットと、本研究部会で取り組んだ現地調査の概要について解説するものである。

2. AI技術活用のメリット

AI技術の分類は視点によって様々ではあるが、文章や画像の生成、機械制御、言語処理など多岐にわたり急速に発展を遂げている。本研究部会で扱うAI技術は診断に重きを置き、収集したデジタル情報から特徴を抽出し、それを基に識別・分類する技術である。これをコンクリート構造物の維持管理での点検に適応した際のメリットを従来の人間の感覚に依存する点検との比較を軸として次のように整理する。

(1) 省力化

我国においては高度経済成長期に大量に建設されたコンクリート構造物が建設後50年となる時代を迎えその維持管理上の問題が顕在化している。防衛施設の量的な蓄積は平成に入ってから山場を迎えるので、一般の構造物に比べて多少の猶予はあるものの、維持管理をめぐる状況が逼迫するのは時間の問題であり、老朽化した多数の構造物を前にしての点検の省力化が欠かせない。

AI技術に基づく点検は、取得データと点検結果のデジタ

ル化が可能となり、データ整理における省力化が期待できる。測量で警えるなら、紙の野帳への手書き記録に対する、電子野帳へのデータ入力のリットに相当する。

データ整理だけでなく点検作業の工程においても省力化が期待される側面はいくつもある。例を示すと、高所を対象とした検査は足場の設置や高所作業車の導入がなされない場合は双眼鏡による目視観察に限られてしまうが、近年、ドローンを用いた撮影や遠隔の打撃応答試験の技術発展は目覚ましい。AI技術はこれらの新しい技術発展の中核として位置している。

(2) 熟練技能の省略

人間の感覚に依存する点検では、実施する技能者の熟練度によって点検結果が左右され、技能者の習熟度の維持が必須である。しかしながら、昨今の日本社会での人手不足の現状を鑑みれば、熟練技能者の確保が困難であろうことは論を待たない。しかも、管理が厳重な施設において内部の人員だけでの点検が必要な箇所を想定すればその困難はさらに増大する。AI技術に基づく点検は実施者の技能に依存することなく、従来よりも遥かに簡単なインストラクションだけで点検結果を得ることができるため、この問題の解決に寄与すると期待される。

(3) 記録性

防衛施設に限らず一般の構造物でも従来の点検手法での点検結果は表-1に例を示すような2~5段階のランク分けでなされており、評価(表-1の例ではa~d)が記録される。これらの評価を記録として残しデータベース化することは維持管理の基礎として重要である。

これらの評価の難点を挙げるとすれば定性的で実施者の感覚で左右され得ることである。実施者1と実施者2の間で評価が一致するとは限らず、また、同じ実施者1による評価であっても昨年度の評価と今年度の評価とで尺度が同じ出る保証はない。AI技術に基づく点検では、デジタル化したデータを入力として機械的に定量的な点検結果が出力され

表-1 点検結果の評価
(4段階の場合の例)

評価	点検結果
a	広範囲に異常を認める
b	限定的に異常を認める
c	異常はないが変状あり
d	異常なし

表-2 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



写真-1 調査対象の例

るため、この定量的な出力を、従来の定性的な評価(表-1)と併せて記録することによって記録データベースの有用性を高めることに繋がる。

3. 現地調査の概要

様々なメリットが期待されるAI技術を実構造物に適用するためのケーススタディとして現地調査を実施した。その概要を紹介する。

調査対象は某基地のRC造建築物3棟(表-2, 写真-1)である。築年36~62年の範囲の比較的古い建物を選択している。全て供用中である。海岸から極めて近く潮風の影響を受けているが手厚い管理がなされている。

次の(1)~(5)を点検手法として採用している。

(1) 目視AI

デジタルカメラで撮影した画像を用いてAI技術で分析・評価する手法である。画素情報を特徴量として扱い、ひび割れ、破損、エフロッセンスなどの変状を定量出力する。ひび割れは、その位置と配向方向だけでなく、ひび割れ幅も把握し、一本一本のひび割れを個別にカタログ化して一括した記録が可能である。ひび割れ幅には、従来のクラックゲージのように読み取りの個人差が現われない。

エフロッセンスや錆汁はコンクリート内部の状態を知る上で活用すべき情報であるものの、視力や写真の観察による手法では汚れや陰影との判別が困難であったが、高度な機械学習によってその問題を解決している。

目視AIは、従来の視力に頼る目視点検と比べて一度に手に入る情報の量が遥かに多く、しかも定量的である。また、広い範囲を一度に捉えることができるため、他の点検項目の実施位置を絞り込む際の1次点検手法としても威力を発揮する。

(2) 打音法(打音AI)

打音法としているが、打音以外にも打撃力や振動などの打撃応答を利用する各種手法を今回は採用している。

従来の聴覚による打音点検は専らタイルなどの剥離調査や、コンクリート片落下による2次被害が懸念される箇所の点検に利用されてきたが、今回採用した手法はそれらに限らず内部の欠陥、損傷を検出することも目標に開発が進められてきた。外部刺激である打撃に対する応答を取得するので、目視AIでは捉えられなかった内部の情報を得ること

が期待される。

評価結果だけでなく、打音や振動の時刻歴波形やスペクトルをデジタルデータとして記録することができるので、年月が経過した後の測定結果との比較も容易に行なえる。打音法は点でのデータを取得する手法が主力であるが、今回の調査ではそれに加えて線状に連続して打音を取得する最新の手法も投入している。

(3) 赤外線

構造物から発せられる赤外線を画像として記録して分析することによって内部の状態を捉える点検手法であり、日射を利用するパッシブな方式と熱源を用いるアクティブな方式がある。打音法と同様に内部の欠陥などをターゲットとするが、赤外線画像として面的に捉えるために、欠陥や剥離の範囲、形状なども評価することが可能である。

赤外線を用いた点検は、AI技術としてはまだ完成していないが、今回の調査では目視や打音のAI技術と同じ点検箇所点検を実施して出力をレイヤーとして重ね合わせることで評価結果を向上させることを狙っており、今後は赤外線を用いた点検のAI技術化に繋げていくことも期待される。

(4) 点群データ

レーザー光の照射とその反射波の観測によって夥しい数の点の群れとして構造物の3次元的な表面形状を把握する技術である。

表面の不陸、不整を把握して欠陥が推定される箇所を割り出すことその他、経年的なデータの蓄積からたわみや変形を見つけることもできる。それだけでなく、得られた3次元形状モデルを仮想空間上に展開し、その上に他の技術で取得したデータ(勿論、従来の定性的評価データも)を張り付けていく立体キャンパスとしての活用も可能であり、点検データベースの高度化にも資すると期待される。

(5) 聴覚打音

従来の聴覚による点検も比較対象として実施している。

4. おわりに、謝辞

この原稿を準備している段階では、現地調査の結果は充分整理されていないが、講演時には一部を披露する予定である。また、令和6年度には、現地調査の結果を含めて研究部会の成果を報告書としてまとめる予定である。

最後に、ご協力いただいた関係各位に謝意を表します

AI・デジタル打音技術を用いた防衛施設のコンクリートの浮き、剥離調査

INVESTIGATION ON FLOATING AND PEELING OF CONCRETE AT DEFENSE FACILITIES USING AI/DIGITAL HAMMERING TECHNOLOGY

歌川紀之*, 黒田一郎**, 勝木太***, 山田悠二****, 網野貴彦*****, 関和彦*****, 西敏臣*****, 古賀美智恵*****
Noriyuki Utagawa, Ichiro Kuroda, Futoshi Katsuki, Yuji Yamada, Takehiko Amino, Kazuhiko Seki, Toshiomi Nishi and Michie Koga

- * 博（工） 佐藤工業株式会社技術センター（〒300-2658 茨城県つくば市諏訪 C30-1）
- ** 博（工） 防衛大学校建設環境工学科 教授（〒219-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
- *** 博（工） 芝浦工業大学工学部土木工学科 教授（〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5）
- **** 博（工） 山口大学大学院創成科学研究科 講師（〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1）
- ***** 博（工） 東亜建設工業株式会社技術研究開発センター（〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町 1-3）
- ***** 博（工） アイセイ株式会社技術開発部（〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 2-40-3）
- ***** (株)九検（〒849-0932 佐賀県佐賀市鍋島町八戸溝 166-35）

キーワード：コンクリート構造物、浮き・剥離欠陥、打音法、AI 技術
(concrete structures, lifting/peeling defects in concrete, hammering test, AI technology)

1. はじめに

建設された防衛施設を長寿命化させるためには、メンテナンスサイクルを着実に実施することにより、事後保全から予防保全への転換を一層推進し、もって中長期的な維持管理・更新のコストの縮減及び予算の平準化に取り組むことが必要となり、これまで実施されたきた点検方法の精度を向上させること、点検データを残すこと、点検コストを縮減させることが必要となっている。さらに、秘密保持の観点からは、施設管理に係っていない人が入れない区域の施設の点検については、経験が乏しい技術者による点検も必要となってくる。

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、上記のような要望に応えるため、AI 技術を用いることにより、従来の目視点検や打音点検の精度向上、省力化を図り、熟練した点検者ではなくても、一定の調査水準を維持できるようなデジタル技術に着目し、それらを用いて実際の防衛施設を対象に点検を行って、適用性を調べた。本報告では、打音点検に着目し、いくつかの AI やデジタル技術を用いた打音法（以下、「打音法」¹⁾と呼ぶ）を基地内の建築物の外壁や壁に適用した結果を示す。また、本稿では、従来のハンマー打撃による発生音を耳で聞き欠陥箇所と健全箇所を判別する方法を「叩き検査」と呼ぶこととする。また、「打音法」とは、ハンマーによる打撃音、打撃振動をセンサーで収録し、物理的手法、AI などを用い分析を行い、欠陥、健全を判別する技術を指すこととする。

「叩き検査」と「打音法」の違いを表-1 に示す。各手法の違いは、結果の評価の方法の違いであり、叩き検査では、検査者が音や振動から、欠陥、健全を判別するのに対し（主観的判断）、打音法では、測定された音圧や振動から、判別とともに欠陥規模を分析評価（客観的判断）する手法である。今後の点検の合理化を考えると、機械で判別できる打音法的な手法が必要となると考えられる。また、維持管理データの整備という観点からは、正確な位置情報を残すことも重要である。（打音法で測定をして、コンクリート面に記録を残し、叩き検査のような方法でデータを残すことも可能）これについても将来、合理化、機械化が進めば、簡単に位置情報を残すことも可能と考えられる。一方、叩き点検のように、検査者の判断で、測定エリアや測定点を定めるよりも、測定点のある間隔で設定し、その点で測定することは、維持管理データの整備という観点からは必要と考えられる。さらに、打音法は、表層の浮き、剥離の検知（第三者被害の軽減）に加え、定量的な評価により、アスファルト、コンクリート間の剥離、腐食した鉄筋位置でのひび割れ、鋼-コンクリート間の剥離など、内部欠陥の抽出（より深い位置の情報の抽出）も可能である。ただし、叩き検査、打音法に共通する課題は、高所作業車や足場を用いて構造物に近づいて、人が測定しないと結果が得られないことである。今後は、遠隔でも打音点検が可能となる、打音ロボット、赤外線法、音響探査法などの遠隔探査技術が求められる。

表-1 叩き検査と打音法の比較

	叩き検査	打音法
検査の目的	健全部と欠陥部（浮き、剥離）部を判別する。 欠陥の規模（広さ）を調べる。	健全部と欠陥部（浮き、剥離）部を判別する。 欠陥の規模（広さ、深さ）を調べる。
対象	コンクリート タイル、モルタルなどの仕上げ材 断面修復材などの補修材 鋼材腐食によるひび割れや浮き・剥離 アスファルト	コンクリート タイル、モルタルなどの仕上げ材 断面修復材などの補修材 鋼材腐食によるひび割れや浮き・剥離 アスファルト
手順	領域設定	領域設定
	叩き検査	測定点マーキング
	欠陥部のマーキング	打音法による検査
	位置情報（写真 or スケッチ）	データまとめ
	データまとめ	
長所	浮き、剥離を手軽に検査ができる。その場で、剥離箇所の叩き落としが可能。（補修を同時にできる）	客観的な評価で、より深い位置の情報も得られる。位置情報を正確に記録し、調査領域内を測定可能
短所	主観的な調査のため、微妙な欠陥の評価が難しい。調査箇所の位置情報にブレがあるため、領域内のすべてを測定できたのが不明確。	位置情報を残すために手間がかかる。

2. 対象とした構造物

対象とした構造物は、Y 基地内のRC造の低層建築物3棟で、A棟は1961年（旧耐震基準）、B棟は1978年（旧耐震基準）、C棟は1978年（新耐震基準）に建設されたものである。

検査の対象とした部位は、内壁2面（写真-1,2）、外壁2面（写真-3）、耐震壁・2面（写真-4）、柱2本（写真-5）である。測定は内壁、柱については10cm間隔で、外壁、耐震壁については20cm間隔で実施した。

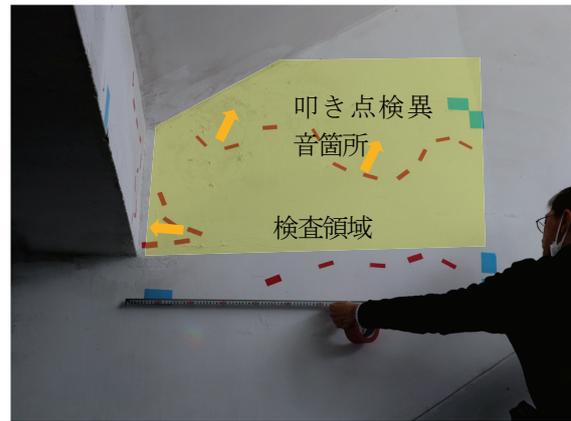


写真-1 階段部内壁-1 (A棟) : 階段の壁部で、仕上げモルタルの塗布箇所。赤色のテープで囲まれている部分の上側、下の部分は左側で異音があり、浮きが生じているものと考えられる



写真-2 階段部内壁-2 (A棟) : 階段の天井梁部で、仕上げモルタルの塗布箇所。赤色のテープの右、上部分で異音があり、浮きが生じているものと考えられる



写真-3 外壁-1 (B棟北側) : 表面は凹凸がある仕上げモルタルが施工されており、2m間隔で水平方向の継ぎ

目、4m 間隔で垂直方向の継ぎ目が設けられている。南面(外壁-2)も同様なモルタル面で継ぎ目がある。ひび割れ補修跡も見られる。

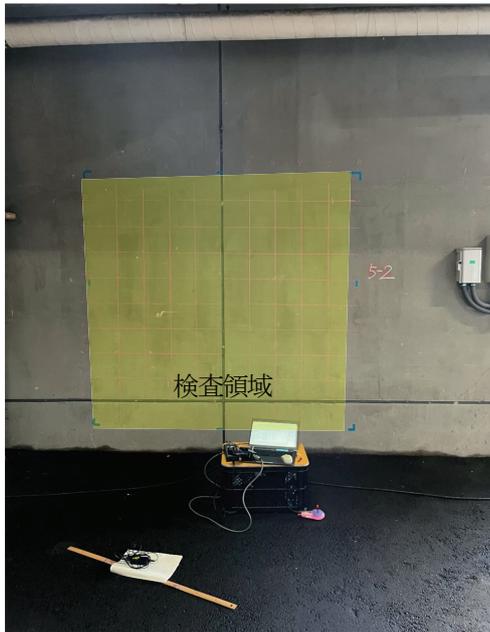


写真4 耐震壁-2 (C棟内側駐車場) : 厚さ190mm (現地測定) のRC壁で中央部に継ぎ目がある。写真は駐車場側面で、表面はモルタル仕上げになっている。また、写真の裏面(耐震壁-1 : C棟外側)でも同じ位置で測定を行った。

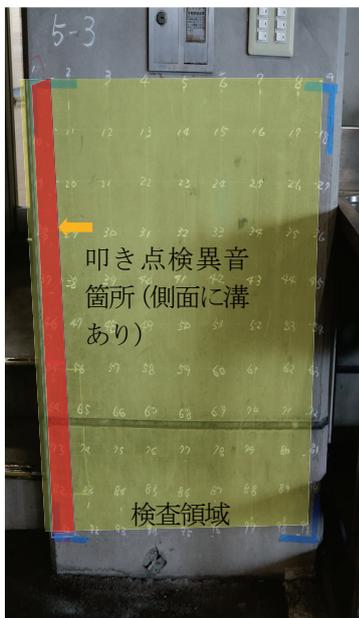


写真5 柱-1 (C棟駐車場) : 柱の表層はモルタル仕上げ面になっている。2本の柱(柱-1,2)の測定を行った。柱-1左側の側面に、シャッター用の溝があり、叩き点検で赤色の箇所が異音となった。



3. 適用した打音法と現地調査で得られた結果

機器A~機器Fの6種類の打音法を上述した部位へ適用した。ここでは、各手法の概略を述べ、部位の一つに適用した結果を示す。

3.1 機器A²⁾

打撃力を測定できるインパクトハンマーとノイズをカットできるフード付マイクロフォンからなるシステムである。結果の評価は、打撃1波目の最大振幅と打撃力から求められた振幅値比からコンクリート厚さを評価する手法である。



写真6 機器Aの外観

耐震壁-2 (C棟内側駐車場)へ適用した結果を図-1に示す。結果は厚さ評価で示した。厚さ評価では、健全であれば測定部材の厚さを示す。なお、本部材の厚さは190mmであり、厚さを的確に評価されているものと考えられる。中央の黄色の部分、ピンク色の部分は鉛直方向の継ぎ目位置であり、継ぎ目の広がりや評価されているものと推定される。

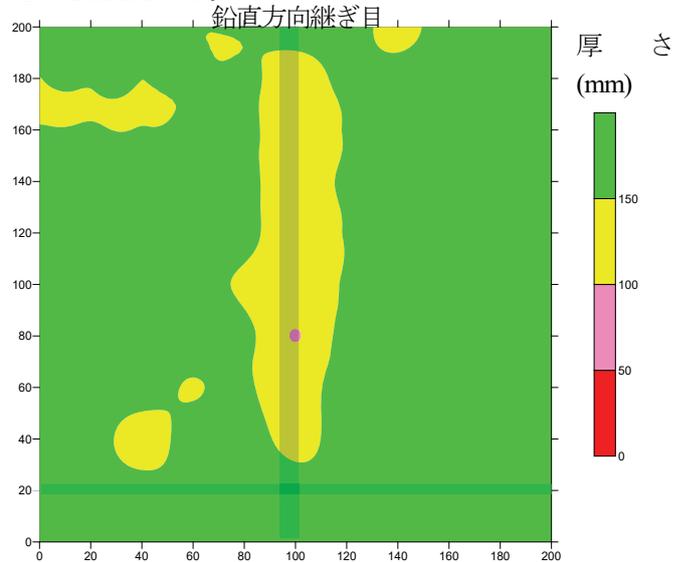


図-1 耐震壁-2 (C棟内側駐車場) への適用結果(写真-4)

3.2 機器B³⁾

3.1の機器AにAI機能を追加したシステムである。ディープラーニング法や自己組織化マップなどのAI手法の結果および厚さ評価の結果を用い、評価することが可

能である。なお、学習では、広さとかぶり深さが異なる円形空洞試験体を用いている。

階段部内壁-1 (A 棟) に適用した結果を厚さ評価の結果とともに図-2 に示す。ここで、厚さ評価 100mm 以下の評価点に対し、欠陥の種類を、円形空洞欠陥の大きさで示す。数字 50-40 は円形欠陥の直径 50mm、かぶり深さ 40mm を示す。この結果から、規模が広い欠陥は上部に集中しており、厚さ評価の結果から得られた剥離のかぶりも 40mm 程度となっており、浅い欠陥であることが分かる。今後、この欠陥の規模などを調べることにより、精度の確認をしていく予定である。

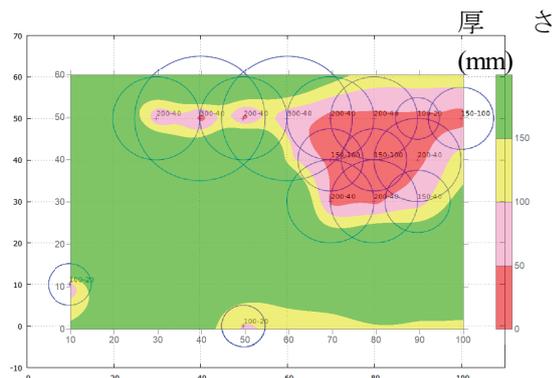


図-2 階段部内壁-1 (A 棟) の測定結果 (写真-1)

3.3 機器 C⁴⁾

電磁式のハンマー (加力値が測定できる) とマイクロフォンが一体化したシステムである。打撃力や 1 波目、2 波目など反射波の振幅を表示でき、それらを用いて評価する。本検討では、機器 A と同一のハンマーの加力値と 1 波目の音圧振幅の比を用いた。



写真-7 機器 C の外観

柱-1 (C 棟駐車場) の測定結果を図-3 に示す。結果はハンマー加力値と 1 波目の音圧振幅の比 (振幅比) を等高線で示した。左端部はやや振幅比が大きく、その中で左下部はさらに振幅比が大きく、前述したように左側の側面内部に溝があることが予想される。

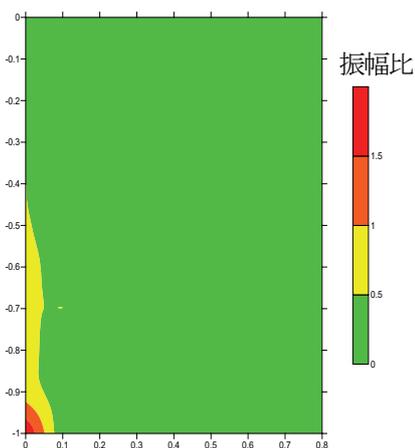


図-3 柱-1 (C 棟駐車場) の測定結果(写真-5)

3.4 機器 D⁵⁾

球形ハンマー (打診棒) とマイクロフォンからなるシステムである。局所外れ値因子法 (LOF: Local Outlier Factor) を用いており、健全部における FFT データを学習データとし、測定されたデータ (ベクトル) との離れを調べ、欠陥部と健全部を判定する手法である。



写真-8 機器 D のシステム構成

階段部内壁-2 (A 棟) の測定結果を図-4 に示す。測定結果は、健全部の学習データの距離の平均値と測定されたデータと最も近い学習データの距離の比をスコアと呼び、1 前後であれば健全データとみなされる。すなわち、右側の赤色の場所は健全データとかなり離れており、欠陥箇所の可能性が高いことを示している。

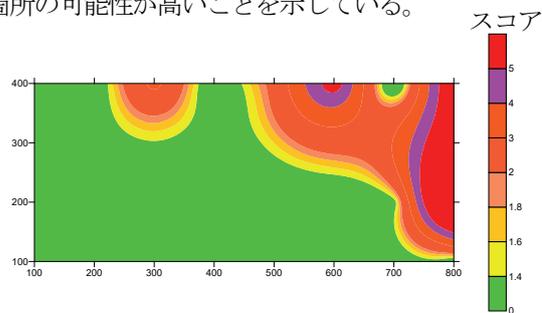


図-4 階段部内壁-2 (A 棟) の測定結果(写真-2)

3.5 機器 E⁶

一体化した電磁式ハンマーと磁歪式センサーからなるシステムである。打撃後 5msec 間の最大振幅値で欠陥部と健全部を 4 段階で判別する。6 種類の中で、唯一、音圧ではなく、磁歪式センサーから得られる振動で評価している。



写真9 機器 E の外観

外壁-1 (B 棟北側) の測定結果を図-5 に示す。図では最大振幅値の大きさで色分けした結果を示しており、緑色は健全部、黄土色、ピンク、赤に従い、振動が大きく計測され、欠陥部である可能性が高いことを表している。この結果から、水平継目の上下で色が異なっていることから、調査した外壁は継目の下部 (緑色) より上部 (黄土色) は壁厚は薄かった可能性があると考えられる。上部では薄い壁のため、振幅値が大きくなっているところがみられる。

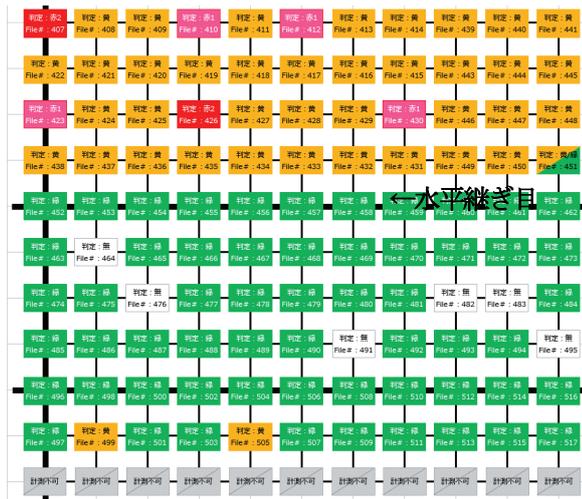


図5 外壁-1 (B 棟北側) の測定結果

3.6 機器 F⁷

回転式ハンマーにマイクロフォンが内蔵されているシステムである。回転式ハンマーの各角部で打撃されて発生した音圧の FFT 結果を円形空洞試験体で学習された

FFT 結果と比較することにより、欠陥部と健全部を判定する。

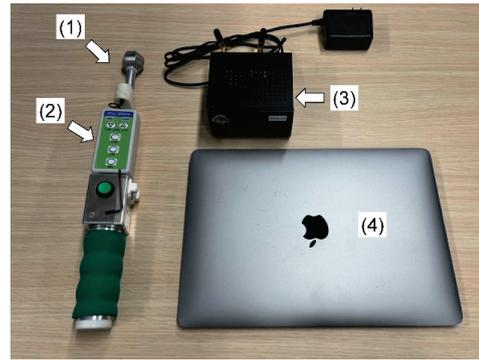


写真10 機器 F の外観

階段部内壁-1 (A 棟) の結果を図-6 に示す。図では AI により、欠陥部の可能性が高い箇所を黄色、健全部に近いと判定された箇所を緑色で表示している。本手法では、回転式打音装置により、連続的に測定できるため、これまでの打音法に比較し、細かい測点において測定されていることである。

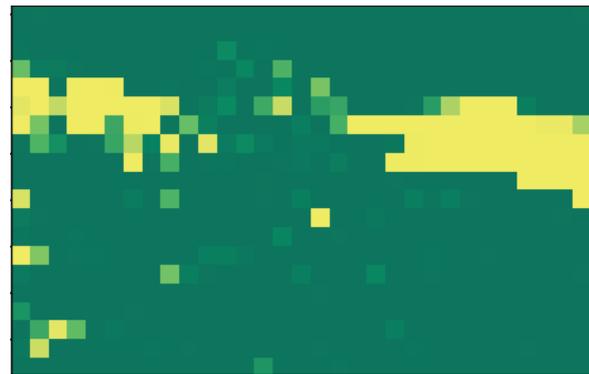


図6 階段部内壁-1 (A 棟) の測定結果

4. 結論

Y 基地の RC 建築物の壁や柱に対し、打音法による浮き・剥離の調査を行った。AI やデジタル技術を用いた打音法として、6 種類のシステムにより、柱、壁など 8 か所の部位の調査を行った。その結果、いずれの方法でも、叩き点検で、人が判別できる内部欠陥については、欠陥と評価することが可能であることが分かった。また、打音法の適用によって、従来の熟練度によらない点、探索性能が高く、かつ客観性を有するデータを得ることが分かった。本稿ではすべての調査結果を掲載できなかったが、今後報告書にまとめ、論文などで公開していく予定である。

本稿は、防衛施設学会の「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」の中で実施された現地調査の結果をまとめたものである。

現地調査の際に多大な協力をいただいた、基地の施設関係の方々、装置を提供し、現地調査に参加をいただいた以下の方々に謝辞を表します。

芝浦工業大学勝木研究室一同様
オンガエンジニアリング(株) 殿
(株)シスミック 殿

参考文献

- 1) 非破壊検査協会：コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第3部 打音法 (NDIS2426-3-2009)
- 2) 北川真也, 鍋谷雅司, 高橋浩, 伴享, 歌川紀之：健康診断ポータブルの開発—打音法によるコンクリート診断技術—, 佐藤工業研究所報, No.34, pp.9-15, 2009.
- 3) 黒田千歳, 歌川紀之, 安永守利：複数の機械学習の手法を用いた打音診断 (その3), 佐藤工業研究所報, No.48, pp.9-15, 2023.
(機器 A,B : マルチ打音システム
<https://www.ee-tohoku.jp/2021/search.cgi?pg=A261>
NETIS: QS-180023-A)
- 4) 添田智美, 三上貴正：打撃応答第一波振幅値を利用したタイル剥離診断装置の設計・試作および装置の有効性に関する基礎的検討、日本建築学会構造系論文集, 第 83 巻, 第 752 号, pp.1401-1410, 2018.
(機器 C : 非破壊打音解析装置 New Evotis
<https://sysymic.co.jp/new-evotis>)
- 5) 西敏臣, 古賀美智恵, 廣重幸, 黒田一郎：RC 部材補修における局所外れ値因子法に基づく樹脂充填判定手法に関する基礎的研究, 土木学会, AI・データサイエンス論文集, Vol. 3, No. j2, pp. 879~888, 2022. 11.
(機器 D : AI 打音検査器 PDC-200A
<https://www.kk-kyuken.jp/121767.html>
NETIS 申請中)
- 6) 野崎 峻, 内田慎哉, 松橋貴次, 栗原陽一, 神田利之：電磁ハンマと磁歪センサを搭載したユニットを3台連結した平地走行ロボットによる RC 床版の欠陥検出方法、コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 17 巻, pp.665-668, 2017.
(機器 E : コンクリート構造物変状部検知システム BLUE DOCTOR <https://oec-hp.com/blue-docor/>
NETIS: QS-180009-VR)
- 7) 梅原智浩, 椋橋遼馬, 勝木太：回転式連続 AI 打音検査装置によるコンクリート浮き部検出のために学習モデル構築、芝浦工業大学修士論文, 2023.
(機器 F: 回転式連続 AI 打音検査装置
<https://www.shibaura-it.ac.jp/faculty/laboratory/001>)

防衛力整備を考慮した国土強靱化に向けた防衛施設の維持管理に関する提案

PROPOSALS REGARDING THE MAINTENANCE AND MANAGEMENT OF DEFENSE FACILITIES AIMED AT BUILDING NATIONAL RESILIENCE WITH CONSIDERATION FOR DEFENSE BUILDUP

原田紹臣*, 堀口俊行**, 水山高久***, 河野克明****

Norio HARADA, Toshiyuki HORIGUCHI, Takahisa MIZUYAMA and Katsuaki KAWANO

- * 博（工/農） 一般財団法人 災害科学研究所 研究員（〒541-0043 大阪市中央区高麗橋4-5-13）
** 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）
*** 農博 京都大学名誉教授（〒606-8502 京都市左京区北白川追分町）
**** エースコンサルタント株式会社 企画担当執行役（〒673-0028 兵庫県明石市硯町3-4-7）

キーワード：防衛力整備，インフラ施設，トータルコスト，維持管理，数量化
(Defense buildup, infrastructure facilities, total cost, maintenance, quantification)

1. はじめに

人類最初のロケットは、宋（中国）の火箭（火薬入筒ロケット）であり、十二世紀において、モンゴルがアジアやヨーロッパにおける征服戦争でこれらの武器を利用したことにより普及したり。さらに、英国軍のW. Congreveにより改良されたロケットが、対ナポレオン戦争や米国の南北戦争等の勝敗に対して顕著に影響を与えた。

令和4年12月、新たな国家安全保障戦略²⁾、国家防衛戦略³⁾、防衛力整備計画⁴⁾が閣議決定され、防衛省における今後の具体的な取組目標（スタンド・オフ防衛能力や無人アセット等の防衛力強化等）が示された⁵⁾。また、継戦能力を確保するための持続性や強靱化の取組目標の一つとして、防衛施設の強靱化が示され、防衛力の基盤となる自衛隊施設の機能確保に向けた取組が期待されている。特に、自衛隊施設の約4割は、旧耐震基準時代に建設されているため、平素においては自衛隊員の安全性を確保し、有事においても容易に作戦能力を喪失しない施設へ変容させることが重要である⁶⁾。具体的には、自衛隊施設の抗たん性の向上や施設の構造強化、再配置・集約化、災害対処拠点となる駐屯地・基地などの機能維持・強化等が挙げられており、今後、防衛力整備を考慮した防衛施設の機能や性能強化（強靱化）に向けた防衛施設の維持管理が急務な課題であると考えられる。

一方、令和5年6月、「強くしなやかな国民生活の実現を図るための防災・減災等に資する国土強靱化基本法」（平成25年法律第95号）の一部が改訂され、今後、こ

の改訂に伴った国土の更なる強靱化が期待されている。なお、国土強靱化は、大規模自然災害から国民の生命・財産・暮らしを守り、サプライチェーンの確保など経済活動を含む社会の重要な機能を維持するための政策であり、国民生活や社会経済活動の礎となる国土基盤の高質化にとっても、また、我が国の持続可能な発展を遂げる上でも、欠かすことのできないものである⁷⁾。なお、インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議を踏まえて、平成25年11月に策定されたインフラ長寿化基本計画において、国民生活をあらゆる社会経済活動を支える各種施設をインフラとして幅広く対象とし、戦略的な維持管理・更新していく方向性が示された。これを受けて、インフラ施設を管理している各省庁において、

表-1 他省庁における国土強靱化に向けた主な取組目標

分野	主な取組目標
港湾 ⁷⁾	・港湾における津波対策 ・港湾の耐災害性強化対策 (地震, 高潮津波, 走錨, 埋塞対策)
	・港湾における老朽化対策
空港 ⁸⁾	・護岸嵩上げ, 排水機能強化による浸水対策 ・滑走路等の耐震対策 ・電源設備等の止水, 浸水対策
	・ダブルネットワーク等による道路ネットワークの機能強化対策
道路 ⁹⁾	・道路施設の老朽化対策 ・ITを活用した道路管理体制の強化対策

様々な取組目標（例えば、減災・防災対策、インフラの老朽化対策：表-1）が挙げられている。ここで、防衛省において目標としている自衛隊施設の強靱化の考え方⁹⁾、¹⁰⁾、¹¹⁾を図-1に示す。図-1に示すとおり、大規模自然災害や武力攻撃・テロ行為等、老朽化（時間的な脅威）への対策に向けた様々な目的の取組が挙げられており、今後、具体的に実践していくために、防衛施設に類似する施設の取組（例えば、表-1）が参考となると考えられる。

本稿では、防衛力整備²⁾、³⁾、⁴⁾や国土強靱化⁶⁾に向けて、防衛力向上やコスト縮減（トータルコスト¹¹⁾最適化）等を考慮した防衛施設の維持管理手法に関して、近年の説明責任の観点より、客観性が高いと考えられる筆者らの先行研究¹²⁾、¹³⁾、¹⁴⁾を参考に、今後の方向性や取り組むべき内容について提案する。

2. 防衛力施設の維持管理における課題

政府全体の取組としたインフラ長寿命化基本計画を受け、令和5年4月、防衛省インフラ長寿命化計画（行動計画）¹¹⁾が策定された。その際、防衛整備力計画⁴⁾では、「大規模災害時等における自衛隊施設の被災による機能低下を防ぐ」ことを目的に、「被害想定が甚大かつ運用上重要な駐屯地・基地等から、津波等の災害対策等の推進」を実施していく方針を示している。また、「今後、気候変動に伴う各種課題へ適応・対応し、的確に任務・役割を果たしていけるよう、駐屯地・基地等の施設及びインフラの強靱化や老朽化対策等を進める」としている⁹⁾。さらに、根本的に強化された防衛力の新たな目標が示され、「主要な防衛施設の強靱化への投資を加速する」としている。その際、各駐屯地・基地等の施設の更新については、最適化されたメンテナンスサイクルの構築等により、事後保全から予防保全への転換を一層に推進し、中長期的な維持管理・更新等のコスト（トータルコスト）の縮減や予算の平準化を目指している¹¹⁾。

ここで、防衛省のインフラ長寿命化計画¹¹⁾や防衛力整備計画等²⁾、³⁾、⁴⁾において定義された用語に関して、表-2に整理する。表-2に示すとおり、現在の維持管理において、これまで整備されてきている保全台帳や DFIS 等を活用（更新・拡張）した施設毎における個別の詳細な維持管理における活用が有効であると考えられる。さらに、国家防衛戦略³⁾においては、自衛隊（海上、航空、陸上）毎に目標とする防衛力の体制整備（表-2）がそれぞれ示されており、今後、これらの求められる防衛力に整合させた施設毎の要求性能や機能確保に向けた検討手法の立案が重要であると考えられる。

また、防衛省インフラ長寿命化計画¹¹⁾において、対象となる施設（国有財産）¹⁵⁾、¹⁶⁾を表-3に示す。表-3に示

すとおり、各自衛隊において多種の大型施設（例えば、岸壁等の港湾や鋪床等の空港施設）が存在しており、幅広いインフラ維持管理に関する工学的な知見が求められている。さらに、これらの施設の日常的な利用環境や、求める防衛力の体制整備等の違いに伴う施設の機能や性能の変化より、施設毎に最適なメンテナンスサイクル時期が異なると考えられる。

一方、前述に示すとおり、これらの施設の一部については表-1に示す他省庁等で管理する施設と類似するため、点検や診断等に関する基準の整備において、これらの維持管理の知見¹⁷⁾、¹⁸⁾、¹⁹⁾、²⁰⁾、²¹⁾、²²⁾、²³⁾等が参考になると考えられる。そこで、防衛施設に要求される機能や性能（健全度）について、これらの知見を参考に、表-4に定義する。しかしながら、各省庁が示しているインフラ長寿命化計画においては、施設の機能や性能を考慮した施設毎のメンテナンスサイクル時期の最適化に関する知見について、具体的に示されていないため、新たな検討手法の立案が必要である。

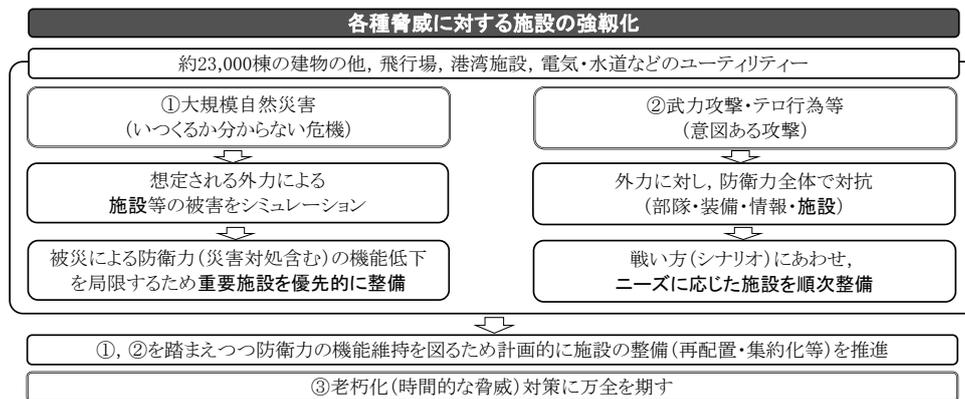
そこで、これらの防衛施設の特性や防衛力整備を考慮した施設の維持管理におけるこれらの課題解決に向けて、以降に提案する。

3. 防衛力整備を考慮した施設の健全度評価手法の提案

自衛隊毎に目標とする防衛力の体制整備（表-1）に対して有すべき施設毎の機能や性能を確保していくため、説明責任の観点より、客観性が高いと考えられる筆者らの先行研究¹²⁾、¹³⁾、¹⁴⁾を参考に、以降に提案する。

3.1 定期的な点検結果に基づく施設の健全度評価の提案

防衛省が管理する施設において求められる機能や性能等の健全度（表-4）を確保していくためには、定期的な施設点検に基づく現状の把握や客観的な評価が重要である¹¹⁾。そこで、一般的な点検計画に基づく定期的な施設点検に基づく運用^{例えば、23)}を図-2に示す。図-2に示すとおり、対象施設や施設周辺の点検、更に日常的な維持管理や詳細点検等の結果を踏まえて、部位単位の変状レベル（a、b、c：表-5）などについて把握するとともに、それらの程度に応じた施設の健全度（A、B、C：表-6）を評価する。その際、施設毎で発生が懸念される変状を抽出し、その変状に対する段階的な評価方法や適用限界に対する定量的な指標等の客観的な整理が、重要であると考えられる¹²⁾。ここで、表-5や表-6に示す評価区分の分類は、国土強靱化で着目されている防災に関する施設（施設の機能不足が保全すべき人命等への影響に直接的に影響を与える施設）等において、比較的に簡素化



図一 自衛隊施設インフラ長寿命化基本計画における基本的な考え方^{5), 10)}

表一 防衛施設のインフラ長寿命化に向けた用語等の定義^{2), 3), 4), 11)}

用語	解説
各自衛隊等	防衛大学校、防衛医科大学校、防衛研究所、統合幕僚監部、陸上幕僚監部、海上幕僚監部、航空幕僚監部並びに陸上自衛隊、海上自衛隊及び航空自衛隊の部隊及び機関、情報本部、地方防衛局並びに防衛装備庁をいう。
駐屯地・基地等	防衛省市ヶ谷庁舎、駐屯地及び基地並びに各自衛隊等が管理する施設及び区域をいう。
メンテナンスサイクル	施設の点検・診断及び修繕の情報を記録することにより、これらの情報を次期の点検・診断及び修繕に活用するための業務サイクルをいう。
保全台帳	施設に関して、関係法令等に基づき実施した点検の結果等を記録するものをいう。
D F I S	防衛施設の現状と維持、管理・更新等に関する情報を共有できる情報基盤として、施設のメンテナンスサイクルや維持管理・更新等に係るトータルコストの縮減・平準化を実現するために整備したシステムをいう。
対象施設	防衛省が管理するすべての施設(防衛省が所管する国有財産であつて、国有財産法施行細則別表第1の区分欄に定める建物及び工作物をいう。以下単に「施設」という。)を対象とする。ただし、借受施設を除く。
防衛力	防衛力は、我が国の安全保障を確保するための最終的な担保であり、我が国を守り抜く意思と能力を表すものである。また、宇宙・サイバー・電磁波領域を含む全ての領域における能力を有機的に融合し、平時から有事までのあらゆる段階における柔軟かつ戦略的な活動の常時継続的な実施を可能とする多次元統合防衛力をいう。
陸上防衛力の体制整備	領域横断作戦能力の強化及び利点の多い地上発射型スタンド・オフ防衛能力の強化による遠方からの侵攻部隊の阻止、持続性・強靱性の保持、南西地域の島嶼部への迅速かつ分散した機動展開能力の強化、無人アセットの導入、ドローン等への対処を含む統合防空ミサイル防衛能力の向上、分散展開した部隊に必要なシステムを含む指揮統制・情報関連機能を重視した体制を整備する。
海上防衛力の体制整備	近年のミサイルの脅威の高まり等を踏まえ、防空能力の強化及び省人化・無人化の推進、情報戦能力の強化、水中優勢の確保、スタンド・オフ防衛能力の強化、洋上後方支援能力の強化、持続性・強靱性の確保を重視し、高い迅速性と活動量を求められる部隊運用を持続的に遂行可能な体制を整備する。特に、領域横断作戦の中でも重要な水中優勢を獲得・維持し得る体制を整備することとする。
航空防衛力の体制整備	高脅威環境下における強靱かつ柔軟な運用による粘り強い任務遂行のため、航空防衛力の質・量の見直し・強化、効果的なスタンド・オフ防衛能力の保持、実効的なミサイル防空態勢の確保、各種無人アセットの導入に必要な体制を整備する。また、宇宙作戦能力を強化し、宇宙利用の優位性を確保し得る体制を整備することにより、航空自衛隊を航空宇宙自衛隊とする。

表一 自衛隊毎における国有財産^{15), 16)}としての対象施設

	主な対象施設
海上自衛隊	(事務所建等の)建物、岸壁、貯槽、電信等通信、水道・下水、雑工作物等
航空自衛隊	建物、鋪床(舗装)、電信等通信、貯槽、水道・下水、雑工作物等
陸上自衛隊	建物、電信等通信、水道・下水、雑工作物等
その他	建物、射場、ドック等

表一 防衛施設において有すべき健全度の定義案

用語	用語の解説
健全度	目標とする防衛力に対して有すべき機能及び性能に対して、当該防衛施設が有している程度
機能	防衛施設が防衛力確保のために、有すべき施設の働き
性能	当該防衛施設が機能を発揮するために必要となる構造上保持すべき強度、安定性等

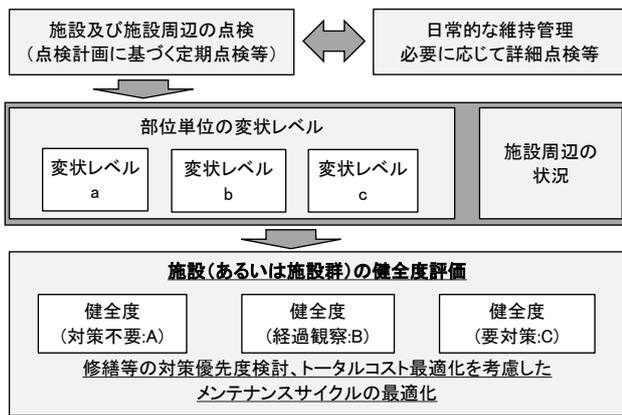


図-2 点検時の健全性診断の流れ²³⁾加筆

表-5 部位や部位グループの変状レベル評価と表記²³⁾

変状レベル	損傷等の程度
A	当該部位に損傷等は発生していない、もしくは軽微な損傷が発生しているものの、損傷等に伴う当該部位の性能の低下が認められず、対策の必要がない状態
B	当該部位に損傷等が発生しているが問題となる性能の低下が生じていない。現状では早急に対策を講じる必要はないが、今後の損傷等の進行を確認するため、定期巡視点検や臨時点検等により、経過を観察する必要がある状態
C	当該部位に損傷等が発生しており、損傷等に伴い、当該部位の性能上の安定性や強度の低下が懸念される状態

表-6 健全度評価と表記²³⁾

健全度	損傷等の程度
対策不要 (A)	当該施設に損傷等は発生していないか、軽微な損傷が発生しているものの、損傷等に伴う当該施設の機能および性能の低下が認められず、対策の必要がない状態
経過観察 (B)	当該施設に損傷等が発生しているが問題となる機能および性能の低下が生じていない。現状では早急に対策を講じる必要はないが、将来対策を必要とするおそれがあるので、定期点検や臨時点検等により、経過を観察する、または、予防保全の観点より対策が必要である状態
要対策 (C)	当該施設に損傷等が発生しており、損傷等に伴い、当該施設の機能低下が生じている、あるいは当該施設の性能上の安定性や強度の低下が懸念される状態

されていると考えられる区分²³⁾を参照している。

また、点検や診断に際して、既存施設の機能や性能を確保していくための一般的な着眼点を、他省庁の知見^{例えば、22)}を参考に、表-7に示す。表-7に示すとおり、一般的に、施設毎の各構造物の形状や環境において、目標とする防衛力に対する機能や性能を明確にし、健全度や安定性について評価するとともに、発生している変状の進行性や影響などについて考慮することが重要であると考えられる。一方、健全度に関して、当該施設において期待される機能や性能低下が懸念される場合（要対策C：

表-7 点検時における診断の着眼点²²⁾加筆

着眼点	評価内容
構造物の健全性	<ul style="list-style-type: none"> ・構造物の形状や位値における目標とする防衛力に対する機能や性能を保持発揮しているか ・構造物の部材における期待する形状や機能を保持発揮しているか ・想定を超える作用や影響は生じていないか
構造物の安定性	<ul style="list-style-type: none"> ・構造物の形状や位値における目標とする防衛力に対する機能や性能を保持発揮しているか ・想定を超える作用や影響は生じていないか
変状の進行性	<ul style="list-style-type: none"> ・発生している変状における現在および将来において進行しているか ・発生している変状の将来における発展した形態に発展しているか ・発生している変状の新たな変状を誘発する恐れはないか
施設機能への影響	<ul style="list-style-type: none"> ・発生している変状における施設機能や性能に影響を及ぼしているか

表-8 一般的なインフラ施設における対応方針

方針	対応内容
維持	インフラ施設における構造物機能や性能を確保するために行う軽微な作業(対象となる判定区分:健全全度)
修繕	既存の構造物の機能や性能を確保、回復するために、損傷または劣化前の状況に補修(経過観察)
改築	構造物の機能や性能を確保、回復すると共に、さらにその向上を図る(経過観察、要対策)
更新	既存の構造物を用途廃止し、既存施設と同等の機能および性能を有する施設を、既存施設の代替として新たに整備(要対策)

表-6)や、予防保全の観点より対策が必要である施設(経過観察B)については、表-8に示す一般的な対応(修繕や改築、更新)が望まれる。その際、修繕や改築の工事中における防衛力の低下有無については重要な観点であり、新たな代替施設の新設(更新)が必要となる場合が考えられる。

これらを踏まえて、今後の既存防衛施設における維持管理の流れを、図-3に新たに提案する。その際、防衛力整備計画等^{23),4)}において施設(海上、航空、陸上自衛隊毎)に求める機能や性能を整理し、明確にする必要がある。図-3に示すとおり、先ず、これらの目標に対する機能や性能に対して不足する施設について、対策(要対策C)を講じる必要がある。なお、これらの評価については、机上において当初設計時の耐荷力(例えば、抗たん性)等の耐荷性能や、構造物形状等の機能(例えば、施設の建築限界)不足について評価する。次に、当初設計時において期待している機能や性能が十分であると考えられる場合には、現存する既存施設の健全度に対して、近年の異常気象²⁴⁾や周辺環境の変化に伴う変状の発生や老朽化等の有無について評価する。

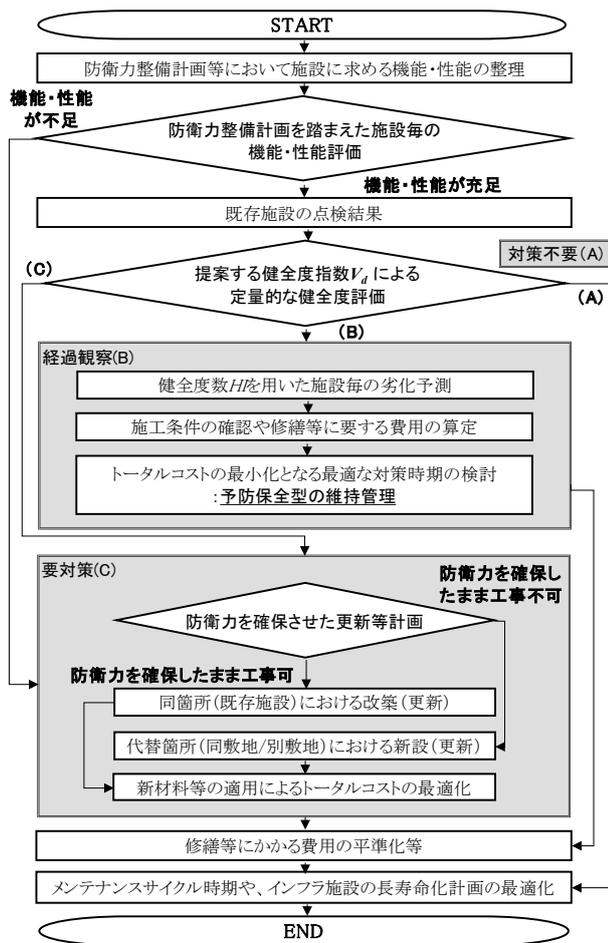


図-3 防衛力確保を考慮した防衛省インフラ施設の維持管理・長寿命化に関する提案

なお、要対策(C:表-6)として評価された施設については、表-8に示す対応方針に向けて更新計画の策定が必要であり、その場合、前述にも示すとおり、防衛力を確保させた状態での工事の実施が重要である。なお、防衛力を確保させた現位置での工事が可能であれば、一般的に、用地の観点より、当該箇所(同箇所)での改築(更新)が有効であることが多いと考えられる。しかしながら、防衛力確保が困難な場合においては、同敷地内の別箇所や別敷地における代替施設の新設(更新)が必要であると考えられる。

3.2 定量的な既存施設の健全度評価手法の提案

防衛力整備を考慮した具体的な健全度評価手法について、以降に提案する。なお、防衛施設については、表-3に示す様々な施設が対象となるとともに、図-1や表-4に示す様々なシナリオや整備体制の目標(水準)が、自衛隊毎にそれぞれ異なっている。さらに、説明責任の観点より、これらの施設に用いられている材料や変状特性等の違いを踏まえた合理的かつ客観性の高い評価が重要である。

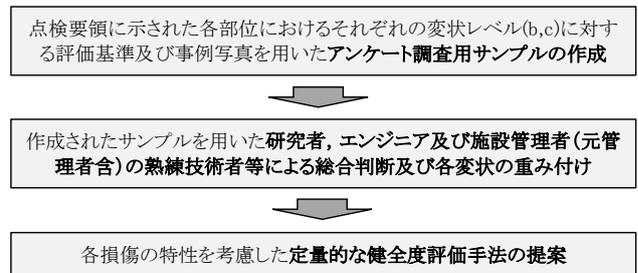


図-4 先行研究における検討手法の概要とその流れ¹²⁾

表-9 防災施設における変状毎に対する健全度指数例¹²⁾

部位	変状レベル(概要)	指数 V_d
ひび割れ	b: 部分的なひび割れ等	44
	c: 広範囲な連続したひび割れ等	78
湧水	b: 部分的な湧水等	44
	c: 広範囲な湧水等	66
擁壁工変形	b: 微細な変形(はらみ出し等)	55
	c: 顕著な変形(はらみ出し等)	78
沈化	b: 微細な沈化	52
	c: 顕著な沈化	87
待受空容量	b: 土砂堆積(空き容量の顕著な減少は無し)	34
擁壁工減少	c: 土砂堆積(空き容量の減少が有り)	78
落石損傷防護柵工変形等	c: 支柱の変形(折れや曲り)等	93
	c: アンカーの抜け等	79
落石損傷防護柵工変形等	c: 損傷・変形、腐食・劣化による使用不可	88
	安全設備 防護柵等	不可

そこで、海外の維持管理²⁵⁾において用いられている手法を参考に、筆者らが、防災に関する施設(土砂災害防止施設)を対象に提案している定量的な手法¹²⁾を参考に、以降に提案する。本検討手法¹²⁾は、図-4に示す流れで分析した結果を踏まえて、各部位の変状毎の健全度に対応する定量的な指数(例えば、表-9や表-10)を用いて、評価するものである。ここで、老朽化した既存施設の健全度や対策優先度に対する意思決定において、有効であると考えられる指数として、複数の学識経験者やエンジニア、施設管理者のアンケート調査によって得られた総合判断結果を用いて、健全度評価に必要なそれぞれの部位における変状レベルに対する重み係数(定量化指標: V_d)を提案している(図-4)。なお、実施したアンケートは点検要領²⁶⁾で示されている説明概要図や変状事例を用いて、施設に求める機能や性能を想定した健全度指数として、0から100までの値(0: 対策不要、50: 経過観察、100: 要対策までを指標とした間隔尺度法による分析)についてヒアリングし、平均化している。また、ヒアリング結果の平均値を用いるため、得られた最大評価値の平均値(例えば、82)に対して、後述する対策優先度や劣化予測における指標として用いることを目的に、

表-10 健全性の判定区分に対応する定量化指標の閾値¹⁾

健全度判定区分	評価式
対策不要	$V_m = 0$
経過観察	$0 < V_m \leq 61$
要対策	$61 < V_m$

あらかじめ、最大値が 100 となるように補正（例えば、補正係数 1.22 : $100/82$ ）する。具体的には、得られた平均値や閾値（経過観察：50）に補正係数を乗じている（例えば、表-10）。その他の詳細については、筆者らの先行研究¹²⁾を参照されたい。

これらの定量的な健全度指数 V_d の導入により、施設毎に求める機能や性能に対して、合理的かつ客観的に既存施設の健全度を評価できるとともに、この指数の変化に着眼した対策優先度の検討が可能である。今後、これらの手法を用いて、他省庁の点検要領^{20), 21), 22), 23)}等を参考に施設毎における変状等の着目点を抽出するとともに、図-4 に示す分析を踏まえた防衛施設の点検マニュアル等の基準整備が望まれる。その際、自衛隊毎の施設に求める防衛力整備を考慮するため、人間中心設計¹⁴⁾の観点より、防衛施設のユーザ（各自衛隊の施設利用者）も対象としたアンケートによる健全度指数 V_d の分析による評価が有効であると考えられる。

4. メンテナンスサイクル時期の最適化手法に関する提案

今後、点検や診断（健全度評価）の結果に基づき、必要な防衛施設の修繕・更新等を適切な時期に着実かつ効率的・効果的に実施するためのメンテナンスサイクルを構築し、事後保全から予防保全へ転換することにより、中長期的な維持管理・コスト縮減が求められている¹¹⁾。一方、防衛施設の強靱化（図-1）においては、「時間的な脅威（老朽化）」対策が必要であり、劣化予測等による検討が必要である。また、一般的に、長寿命化における施設の予防保全にあたっては、各施設や部位の劣化予測を行って施設における健全度の低下を把握し、修繕等のメンテナンスサイクルの時期や方法を検討することが重要である^{11), 18), 19)}。しかしながら、現在の防衛省インフラ長寿命化計画（行動計画）¹¹⁾においては、それらの検討手法に関して具体的に示されておらず、これらを考慮した手法の提案が必要である。そこで、筆者らの先行研究¹³⁾を参考に、メンテナンスサイクル時期の最適化に関する具体的な検討手法について、以降に提案する。

4. 1 点検結果に基づく施設の劣化予測手法の提案

劣化予測は、一般的に、経過年数と健全との関係の予測²³⁾を目的としており、定性的に評価された健全度（表-6）を定量化させて議論する必要がある。そこで、時間

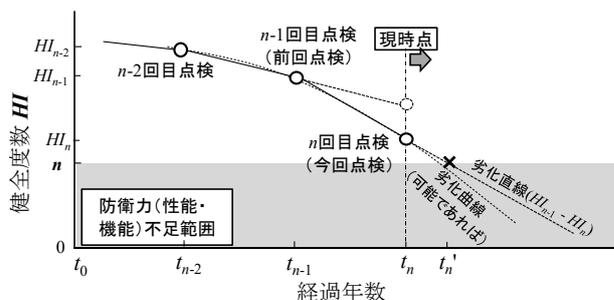


図-5 変状進行に対する評価のための劣化予測手法¹⁰⁾加筆

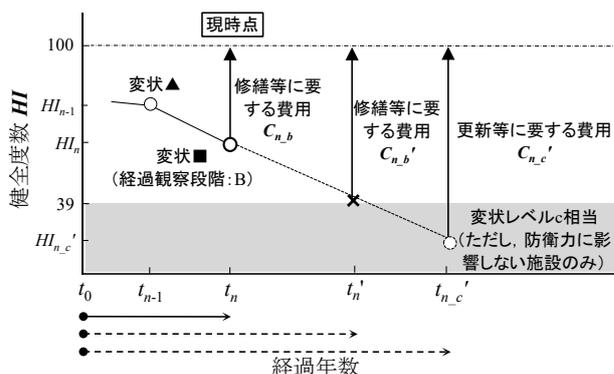


図-6 変状の進行性を考慮した必要な措置に要する費用算出の概念図¹³⁾加筆

的に変化する健全度（健全度数 HI ）として、前述までの変状レベルの健全度指数 V_d （例えば、表-9）を用いる。ここに、標準的な劣化予測に対応させた健全度数 HI は、

$$HI = V_{d,max} - V_d \quad (1)$$

で表される。なお、 $V_{d,max}$ は、健全度指数 V_d における最大値（100）である。

また、インフラ施設における変状は、建設時（または、修繕等の対策時）からの経過年数や、使用頻度などの違いに伴って、進行または他の変状に遷移や拡大することが知られている^{20), 21), 22), 23)}。一方、変状発生後の進行性の鈍化や停止することも知られている（例えば、地盤の変状による過度な部位への応力集中と部位の変状発生に伴う応力解放による変状進行の停止¹³⁾）。特に、防衛施設は、表-2や表-3に示すとおり、自衛隊毎に各施設の材料特性や使用頻度（訓練頻度含）、環境条件等が異なることが予想されるため、施設毎の定期的な点検結果に基づいた劣化予測が重要であると考えられる¹³⁾。

これらの施設の特性などを考慮したメンテナンスサイクルの基本となる劣化予測の概要について、図-5や図-6に提案する。その際、各行動計画^{10), 17), 18), 19)}等において示されているとおり、予防保全（例えば、経過観察段階における早めの修繕等）によるコスト縮減における有効性が示唆されており、これは予防保全と事後保全の工事費用において顕著な差があることによるものと推測される。一方、防衛戦略上、施設における機能や性能の不足段階（要対策期 C）での施設利用が許容されない施設

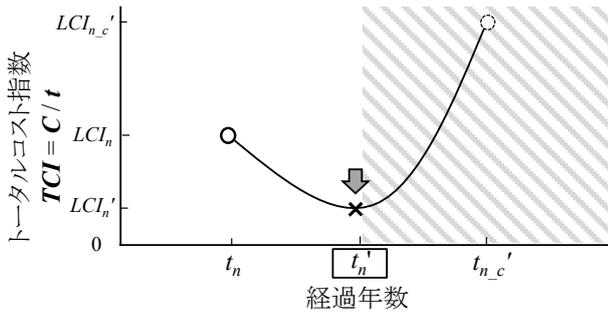


図-7 最適なトータルコスト時期の概念図¹⁰⁾加筆

も多く存在するため、経過観察段階から要対策期への遷移時期について予測し、確実な予防保全を講じることが重要である。

そこで、現時点で確認されている変状（ただし、「経過観察B」が将来に亘って、現時点（ t_n ）と同じ速度（現時点の健全度指数 HI_n と前回点検時の HI_{n-1} との関係）で劣化すると仮定し、「要対策C」（例えば、変状レベルc）の健全度指数 HI_{n_c} までの進行に要する期間（時期： t_{n_c} ）や、要対策への「遷移期」（ t_n' ）を予測するとともに、各評価時における修繕等に要する費用をそれぞれ算出する手法を提案する（図-6）。なお、劣化予測に際して、過去における複数年の点検結果が存在する場合は、それらの結果を踏まえた近似曲線等による予測が望まれるが、不足する場合は、現時点（ t_n ）の点検結果（ HI_n ）と前回（ t_{n-1} ）の点検結果（ HI_{n-1} ）との関係を用いて予測する（図-5）。

4.2 劣化予測に基づくトータルコスト最適化手法の提案

中長期的な維持管理・更新等のトータルコストを最適化（最小化）させるため、新たに、トータルコスト指数 TCI を提案する。

$$TCI = C / t \quad (2)$$

ここに、 C は修繕等に要する費用、 t は各評価時までの経過年数（修繕サイクル）である。なお、この TCI を最小化することで、効率的な対策時期の設定や、施設毎のメンテナンスサイクル時期の最適化が可能となる（図-7）。ただし、前述に示す施設の劣化が防衛力に対して、直接的に影響を与えることが予想される施設（要対策C段階での施設利用が不可）については、要対策遷移期（ t_n' ）までの期間（予防保全：経過観察B）内における TCI による検討が重要である。その他の詳細については、筆者らの先行研究¹³⁾を参照されたい。

4.3 メンテナンスサイクル時期や中長期計画の検討事例

これまでに提案した手法を用いた具体的な検討事例について、参考として以降に例示する。

表-11 「経過観察B」施設に関する検討結果事例

施設名	現時点 t_n	要対策遷移前 t_n' (経過観察B)	要対策時 t_{n_c}	対策時期
	$C_{n,b} t_0 - t_n$	TCI_n	$C_{n,b}' t_0 - t_n'$	TCI_n'
	$C_n t_0 - t_{n_c}$	TCI_{n_c}		
				T 年後 ($t - t_n$)
施設②	10	50	0.20	20
施設④	2	10	0.20	5
施設⑤	40	30	1.33	50
施設⑧	40	30	1.33	50
施設 n_2

C (百万円), t_0 : 建設当時期(または対策時), 各評価時期 t (年), TCI (百万円/年)

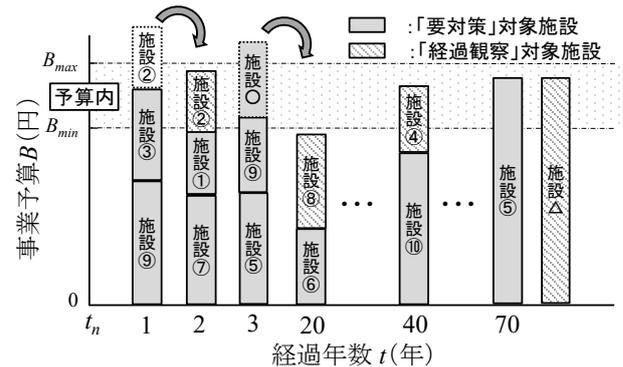


図-8 対策優先度と対策時期平準化に関する概念図

まず、図-3に示すとおり、防衛力整備計画等^{2),3),4)}において目標とする機能や性能が充足していると評価された既存施設を対象に、施設点検結果より得られた健全度指数 V_d を用いて健全度（表-4）を評価する。そして、「要対策C」の施設を対象に、更に健全度指数 V_d に応じて、数値の大きい施設から順に対策を講じていくことが考えられる。

次に、「経過観察B」として評価された施設を対象に、トータルコスト指数 TCI を算出（図-6、図-7）し、この TCI が最小となる修繕等の対策時期（メンテナンスサイクル時期）を決定する（表-11）。表-11に示すとおり、施設毎の各時期（現時点 t_n 、要対策遷移前 t_n' 、及び要対策時 t_{n_c} ）の修繕に要する費用 C 、経過年数（修繕サイクル t_0 からの経過年数）より、トータルコスト指数 TCI を算出し、最小となる対策時期（ T 年後：現時点から対策期までの経過年数）をそれぞれ決定するものとする。その際、前述にも示すとおり、施設の劣化により防衛力確保が困難であると考えられる施設（例えば、滑走路等の防衛戦略上において重要な施設④や⑧：表-11）については、要対策遷移期 t_n' までの間での検討とする（ t_{n_c} は検討対象外）。

さらに、これらの検討結果に対して、予算の平準化¹⁴⁾を行う必要がある（図-8）。なお、限られた予算で対策を講じていくことが求められるため、図-8に示すとおり、想定される事業予算内（最大予算額 B_{max} と最小額 B_{min} ）との間で、適宜に調整していくものとする。

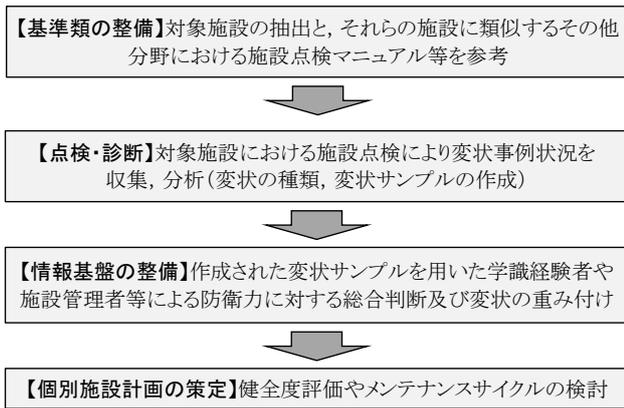


図-9 防衛力確保を考慮した防衛施設の維持管理に向けた今後の提案

最後に、これまでの提案を踏まえて、防衛省が今後において取り組むことが望ましいと考える提案を、図-9に示す。図-9に示すとおり、まず、関係法令等に基づいた点検や診断、更新の基準類（例えば、マニュアル）等の整備が必要である。次に、施設点検の実施や保全台帳やDFIS（表-2）の更新や拡張等により、変状事例（変状の種類やサンプル）を作成する。さらに、作成された変状サンプルを用いた学識経験者、エンジニア、施設管理者等による防衛力に対する総合判断や変状の重み付けを行った上で、防衛施設の定量的な健全度評価やトータルコスト最適化に向けた検討手法の立案が望まれる。なお、本稿では、紙面の関係より議論できていないが、図-3に示す新材料の適用に延命化に伴うTCIの更なる最適化や、防衛力確保に向けた定量的な材料特性を踏まえた構造物の抗堪性能評価などについて、更なる提案が望まれる。

4. おわりに

本稿では、防衛力整備や国土強靱化に向け、メンテナンスサイクル時期やトータルコストの最適化を考慮した国土強靱化に向けた防衛施設の維持管理手法に関して、新たに提案した。本研究で得られた成果を要約する。

- 1) 説明責任の観点より、防衛施設の施設点検時における定量的な健全度評価や劣化予測手法を、筆者らの先行研究を参考に提案した。
- 2) 防衛力確保およびトータルコスト（TCI）を考慮した効果的な防衛施設の長寿命化に向けた考え方を提案した。また、メンテナンスサイクル時期や予算の平準化に関する具体的な事例を示した。
- 3) 最後に、今回示した手法の運用に向けた今後の防衛施設の維持管理に向けて、望まれると考えられる実施内容を提案した。

参考文献

- 1) 的川泰宣：宇宙ロケットの本, 157p., 2022.
- 2) 防衛省：国家安全保障戦略, 31p., 2023.
- 3) 防衛省：国家防衛戦略, 29pp., 2023.
- 4) 防衛省：防衛整備力計画, 34p., 2023.
- 5) 防衛省：防衛白書, 510p., 2023.
- 6) 内閣官房：国土強靱化計画, 154p., 2023.
- 7) 森橋 真, 上原修二：港湾・海岸における「防災・減災, 国土強靱化」に向けた取り組み, 土木施工, Vol. 10, pp. 32-33, 2023.
- 8) 佐藤 敬：空港 BCP (A2-BCP) の実行性強化対策, 土木施工, Vol. 10, pp. 34-35, 2023.
- 9) 杵掛敏夫：道路局における防災・減災, 国土強靱化の加速化・深化に向けた取組状況, 土木施工, Vol. 10, pp. 30-31, 2023.
- 10) 扇谷 治：防衛力抜本的強化に関する取組, 土木施工, Vol. 10, pp. 86-89, 2023.
- 11) 防衛省：インフラ長寿命化計画（行動計画）, 6p., 2023.
- 12) 原田紹臣, 小杉賢一朗, 里深好文, 水山高久：老朽化した砂防関係施設の健全度および対策優先度に関する定量的な評価手法の提案, 河川技術論文集, Vol. 21, pp. 183-188, 2015.
- 13) 原田紹臣, 里深好文, 水山高久：ライフサイクルコストを考慮した砂防関係施設の長寿命化計画策定に関する提案, 砂防学会誌, Vol. 73, No. 2, pp. 183-188, 2020.
- 14) 原田紹臣, 山田菊子, 越健太郎, 畠田佐俊, 杉原良太郎, 宮内 泉：人間中心設計（HCD）に着眼した舗装の要求性能に関する基礎的な検討, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 67, 9p., 2023.
- 15) 防衛庁：防衛省所管国有財産の管理に関する訓令（昭和31年防衛庁訓令第43号）, 1956.
- 16) 大蔵省：国有財産法施行細則（昭和23年大蔵省令第92号）, 1948.
- 17) 内閣府：インフラ長寿命化計画（行動計画）, 15p., 2021.
- 18) 農林水産省：インフラ長寿命化計画（行動計画）, 32p., 2021.
- 19) 国土交通省：インフラ長寿命化計画（行動計画）, 75p., 2021.
- 20) 国土交通省 港湾局：港湾の施設の点検診断ガイドライン, 214p., 2014.
- 21) 国土交通省 航空局：空港内の施設の維持管理指針, 38p., 2014.
- 22) 国土交通省 道路局：道路土工構造物点検要領, 47p., 2018.
- 23) 国土交通省 砂防部：砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン（案）, 28p., 2019.
- 24) 原田紹臣, 里深好文：中小河川を横過する既存橋梁の上部工における被災リスクに関する一考察, 構造工学論文集 Vol. 70A, 2024（予定）.
- 25) Shepard, R. W. and Johnson, M. B.: California Bridge Health Index, Technical Report, Caltrans, 56p., 1998.
- 26) 国土交通省 砂防部：砂防関係施設点検要領（案）, 164p., 2022.

建築物の新設や補修に利用可能な高耐久セメントシート工法の開発

— 波長制御・剥落防止機能および耐爆性能の追加 —

REPORT ON HIGHLY DURABLE CEMENT SHEET CONSTRUCTION METHODS THAT CAN BE USED FOR NEW CONSTRUCTION
AND REPAIR OF BUILDINGS
- ADDITION OF WAVELENGTH CONTROL FUNCTION AND PEELING PREVENTION FUNCTION -

辻 孝弘
TSUJI Takahiro

恵和株式会社 執行役員 VC本部 本部長（〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台1-7
けいはんなプラザ ラボ棟203号）

キーワード：高耐久、セメントシート、屋根補修、波長制御、繊維シート、C4爆薬、クレータ、スポール
(High durability, cement sheet, roof repair, wavelength control, Fiber Sheet, C4 Explosive, Crater, Spall)

1. はじめに

わが国では、1960年代の高度経済成長期におけるインフラ建設ラッシュから50年が経過しており、構造物の老朽化が切実な問題となっている。さらに、①施工に関わる建設業人口は2002年以降100万人以上が減少、②建設業に占める55歳以上の割合は全体の35%に増加、③29歳以下は11%程度にまで減少、といった状況にある。すなわち、建設業の労働生産性は他の産業よりもかなり低い状況にあると言わざるを得ない。

このような背景にあって、今後はインフラ延命のために簡単で早くて長持ちする材料・工法の開発・推進の必要性が求められている。そこで当社では、土木用途で長年実績がある高耐久性塗料を基礎として当社独自に様々な改良を加え、塗料をシート化し開発した製品・工法が高耐久セメントシート工法「KYŌZIN（キョージン）」である。

KYŌZINは建築物、構造物など様々な補修ニーズへの展開を進めており、特に経年劣化した屋根の補修・保護用途として「高耐候」「薄い」「軽い」という特徴を有した「KYŌZIN Re-Roof（キョージン リルーフ）」は、屋根等の建築物に負荷をかけない補修工法として一般住宅、企業、工場、倉庫、施設などへの採用が急増している。

2. 屋根補修の課題

屋根補修の方法は、一般的に以下の4種が主流である。ただし、いずれの方法も一長一短があり、定期的なメンテナンスや大量な廃棄物の処理が必要になる場合もある。

① 塗装工法

・安価であるが、塗膜の劣化により、約10年おきに再

塗装が必要。

・塗装前に劣化した塗膜の除去、ケレンなど下地処理が必要。

・何層も重ね塗りが必要、塗布ムラになりやすい。

・ひび割れや穴を塞ぐことはできない。

② シート防水等のかぶせ工法

・部分補修も可能だが、劣化が進むとクラック、ウキ、剥がれが生じる。施工できない場合は撤去が必要となる。

・上に重ねる工法であるため補修のたびに重量が重くなる。

③ 鋼板によるカバー工法

・屋根全体を覆う必要があるため、屋根が重くなる。

・鋼板表面の塗膜は約10年おきに再塗装が必要。

・鋼板カバー工法が劣化した場合、葺替え以外に選択肢がない。

④ 葺替え

・廃材の処分も含め、最も高額な費用が掛かる。工場などの場合、操業を停止する必要がある

・葺替えた場合も表面の塗膜は約10年おきに再塗装が必要。

当社は屋根の補修工法について、長らく「あたりまえ」と考えられていた工法が本当に施主が求めているものなのかという疑問を課題として、開発を進めてきた。

3. 高耐久セメントシート工法による課題の解決

KYŌZIN Re-Roofは高耐久性セメントシートに粘着機能が一体化されており、補修する屋根材の表面に各屋根材に応じた専用のプライマーコートを塗布し、貼るだけ

で高強度・高耐久の屋根とすることができる屋根修繕の
新工法である (図-1 参照)。

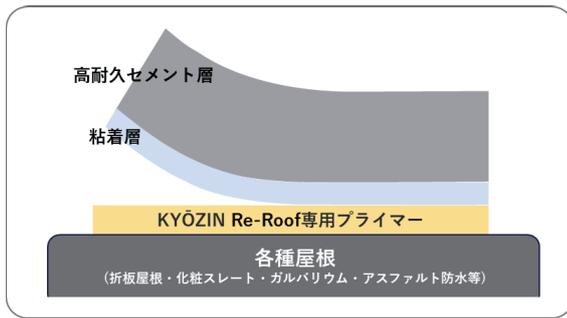


図-1: KYŌZIN Re-Roof の構成イメージ図

KYŌZIN Re-Roof の5つの特長、を下記に示す。

① 「耐久力」

使用するシートの種類によって 30 年 (保証年数: 15 年) ~50 年 (保証年数: 30 年) と極めて長寿命である。50 年耐久を支えるプライマー剤やシーリング材も取り揃えている。

② 「柔軟性」

多種多様な屋根の形状にも、施工が可能である。企業施設に多くみられる折板屋根、アスファルト防水屋根、コンクリート、瓦棒屋根、および一般住宅に採用されているコロニアルなどの化粧スレート、金属屋根、アスファルトシングル (瓦屋根、一部特殊屋根を除く) など、幅広いタイプの屋根の修繕に対応可能である。いずれの屋根でも、専用プライマーの使用により、下地補修は大幅に簡素化できる。また、屋根全体だけでなく、部分補修も可能である。

③ 「軽量化」

鋼板カバー工法と比較して非常に軽く、重量は約 1/10 程度に抑えられる。屋根の重さを現状に近い状態のまま補修できるので、建物の耐震性、耐久性を損ねる心配がない。

④ 「低コスト」

既存の屋根にシートを貼るだけのシンプルな施工であるため、従来工法と比べて工期の短縮化による工事費用の削減ができる。屋根材を交換する必要がないので、廃材処分費が不要。工場などの場合、施工中も作業を停止する必要がないため生産性維持が可能。また、従来工法より将来的なメンテナンス頻度が格段に少なくなることから、修繕費の予算管理が容易になる。さらに、カラーバリエーションの「SHIRO (遮熱タイプ)」は、太陽光を効率よく反射して従来の遮熱塗料と比べて熱貫流量を約 1/6 程度に抑えることができる。したがって、夏場の冷房費用を抑え、コスト削減につながる。

⑤ 「環境配慮」

原材料の 50 %以上に、セメントなど天然由来の無機物を使用している。施工時に不要となる剥離フィルムの

回収と再資源化も可能である (現在、システムの構築中)。

また、アスベスト入りの建築資材を使用している場合は、屋根材の解体・撤去には通常よりも高額な費用がかかるため解体時の切断や粉砕による健康被害も懸念されるが、屋根材を破壊せず粘着力の高いシートで屋根全体を覆う工法でありアスベストの飛散を防止し、長期間にわたって健康面での安全性を確保できる。

4. KYŌZIN の波長コントロール機能

KYŌZIN は、異なる種々の波長を制御する機能を有する製品の開発を行っている。例えば、光の波長領域の反射や吸収をコントロールすることで紫外線劣化を抑制して高耐久性や長寿命化を図り、赤外領域の日射反射や熱伝導性をコントロールすることで、快適な室内環境を創出できる。

また、光の波長よりも長波長の電波領域において、電磁ノイズによる機器の誤作動問題、ワイヤレス機器の急増による通信障害、情報漏洩対策、健康問題など電磁波の侵入対策、漏洩対策に適用できる。

(1) レフランプを用いた KYŌZIN Re-Roof 「SHIRO」の遮熱効果、断熱効果検証

KYŌZIN Re-Roof の遮熱特性を把握するため、白熱電球を用いたレフランプ法 (JIS L 1951 : 2019 生地 の遮熱性試験方法) に準拠して、ガルバリウム鋼板表面に照射した時の裏面の温度を測定し、遮熱性能を比較した (図-2 参照)。

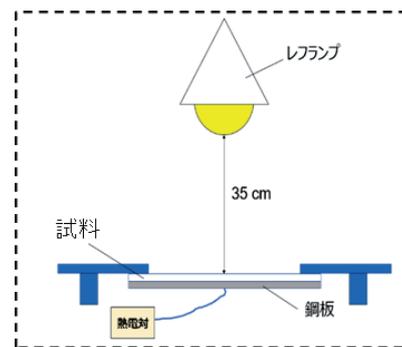


図-2: レフランプ法による実験

(2) 実験方法

測定対象材の裏面に熱電対温度センサーを取り付け、太陽光を模した赤外線ランプ (レフランプ) を 35 cm の高さから測定対象の試験体表面に照射し、15 分~180 分照射し、測定対象の上昇温度をそれぞれ測定する。

測定試料は、次の 3 種類である。

- ① Reference として未処理のガルバリウム鋼板
- ② KYŌZIN Re-Roof 「SHIRO」を施工したガルバリウム鋼板

③ 一般遮熱塗料を塗布したガルバリウム鋼板

※ガルバリウム鋼板：サイズ 50×50 mm(厚さ 0.27 mm)

(3) 結果

測定結果を、表-1 および図-3 に示す。

レフランプにて 180 分照射したときのガルバリウム鋼板裏面の温度は 69.9 °C を示した。同じ条件で照射した場合、一般遮熱塗料では 68.2 °C であり、ガルバリウム鋼板のみの場合と比較して 1.7 °C 低い結果であった。

KYŌZIN Re-Roof 「SHIRO」は 65.1 °C であり、ガルバリウム鋼板のみの場合と比較して 4.8 °C 低い結果であり、最も温度上昇を抑制する効果がみられた。

照射時間 15 分までは一般遮熱塗料の温度上昇が最も小さいが、30 分以降は KYŌZIN Re-Roof 「SHIRO」の温度上昇が最も小さく、ガルバリウム鋼板裏面への熱伝導が抑制されていることがわかる。すなわち、日射による熱エネルギーを反射し、かつ熱伝導を抑制する効果が高いため遮熱効果が高いといえる。

表-1：屋根裏面の温度変化

経過時間 (分)	屋根裏面の温度 (°C)		
	①ガルバリウム鋼板	②KYŌZIN [SHIRO]	③一般遮熱塗料
0	33.6	35.1	31.7
15	68.6	64.2	59.6
30	71.0	64.6	68.0
60	69.0	64.4	67.4
120	71.0	64.7	68.5
180	69.9	65.1	68.2
温度差 ΔT	—	-4.8	-1.7

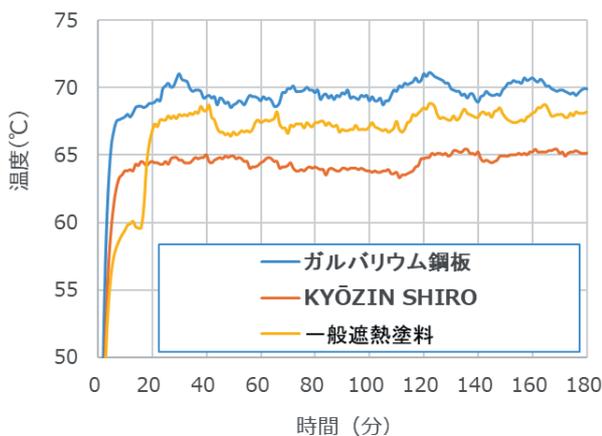


図-3：屋根表面の温度変化

KYŌZIN Re-Roof の防水層には、天然由来の無機物が 50 %以上含まれている。したがって、適度な空隙を含んで塗膜化するため、一般的な遮熱塗料に比べ断熱性能に優れる。

以上の結果から、遮熱効果は表面の日射反射率の性能だけでなく、ガルバリウム鋼板裏面への熱伝導を抑制する効果がある。

また、我々の身の回りにはあらゆる電磁波が飛び交っており、Wi-fi や Bluetooth など多くの機器が無線で通信するようになり、オフィスも家庭も電子機器や電化製品で溢れている。

今後、遠隔操作が必要なロボットやドローンの普及により、必要な電磁波は受容して不要な電磁波はシールドするという電磁両立性 (EMC 対策) が重要になる。また、機器同士のノイズ対策に加え、電磁波過敏等、人体への悪影響が懸念されている。

KYŌZIN への機能付与の一例として、図-4 に示すような屋根の補修を施すことにより、電磁波吸収や反射をコントロールする電磁波シールド機能が得られる。

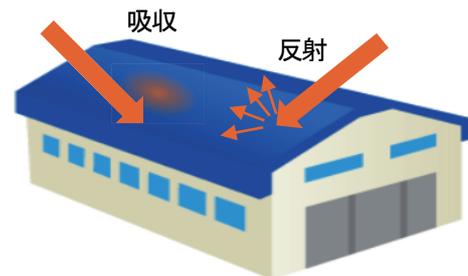


図-4：屋根補修と電磁波シールドのイメージ

電磁波シールド材料として、表-2 および図-5 に示す 6 種類の電磁波シールド材料がある。

- (1) ミリ波帯域での高いノイズ吸収性能
15 GHz~100 GHz の範囲で、電磁波ノイズを 20 dB 以上吸収し吸収波長をコントロールできる
- (2) 薄型・軽量・フレキシブル
厚さ約 200~1500 μm で高い柔軟性と追従性
- (3) 優れた加工性 高耐久な粘着シートで簡単施工
ハサミ等で加工可能

表-2：各周波数における波長吸収特性

	①	②	③	④	⑤	⑥
周波数 GHz	29.0	47.5	50.4	76.1	86.0	97.4
吸収量 dB	28.0	24.1	35.8	20.5	26.0	36.5

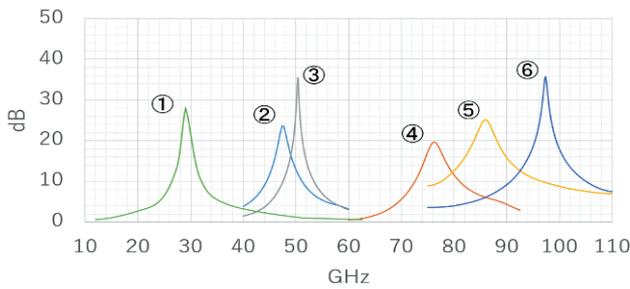


図-5：各周波数における波長吸収特性

5. C4爆薬の接触爆発におけるKYŌZINの耐爆補強効果

(1) シートの静的特性

KYŌZINの高耐久セメントシートの層内には、繊維補強材を組み込むことができ、かつ約1 t/m²の耐荷重がある。繊維補強材としてアラミド繊維、ガラス繊維、炭素繊維など要求特性に応じた材料を複合化することにより、より強度を向上させることが可能である。特に、コンクリート構造物の表面に被覆すると、衝撃により発生する亀裂や剥落の抑制に効果がある。シートの強度は、図-6に示す表面被覆材の押抜き試験において、変位10 mmにおける最大荷重は2 kN以上であり、高い剥落防止性能を有している。



(a)強度不足により破断 (b)最大荷重2 kN
図-6 押抜き試験の様子

(2) シートの耐爆強度性能

コンクリート板の表面をKYŌZINで補強することによるコンクリート板の耐爆性能の向上効果について検討した。

爆発から構造物や建物を防護する目的は、それ自体の破壊防止や障壁として周辺の人々への危害を抑止・低減させることにある。人が建物内に存在する場合、外部からの爆発のエネルギーにより、破壊片が内部に飛散し、二次的な傷害をうけることになる。このような二次傷害から人々を守る手段として、KYŌZINの柔軟かつ高靱性な特性が、破壊や飛散防止、剥落の抑止等の有効性について爆発試験を行って評価する。

(3) 実験の概要

無筋コンクリート板供試体及び爆薬の設置状況および爆発実験の概要を、それぞれ図-7および図-8に示す。鋼板の上にH鋼を設置して、2辺支持状態とした。次に、H鋼の高さ200 mmの下から100 mmの位置まで砂を敷き詰めた。その後、供試体をH鋼上に設置し、供試体を支持幅50 mmで二辺単純支持した。供試体の表面中央にC4爆薬(30 g)を接触設置した。供試体の寸法は、縦500 mm×横500 mm×厚さ60 mmで、実験時のコンクリートの圧縮強度は32.3 N/mm²であった。C4爆薬は、高さ/径=1の円柱形に成形した。起爆は、6号電気雷管により行った。

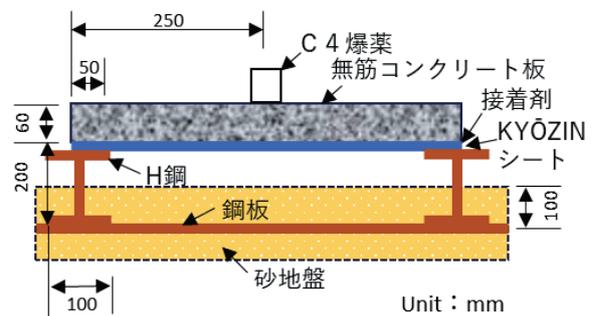


図-7 耐爆試験体の断面図



図-8 接触爆発試験の様子

実験に使用したアラミド繊維シートは、目付量180 g/m²、引張強度2060 N/mm²の2方向アラミド繊維シートである。

〔試験体1〕

上記のアラミド繊維シートを複合化したKYŌZIN(アラミド仕様)を予め準備し、コンクリート板供試体にエポキシ系接着剤200 g/m²を塗布した。その後、硬化する前に貼合してそのまま常温で約7日間養生した。

〔試験体2〕

コンクリート板供試体にエポキシ系接着剤500 g/m²を塗布後、硬化する前にアラミド繊維シートを貼合し硬化させた。その後、その上にエポキシ系接着剤200 g/m²を塗布後、完全硬化した後にKYŌZIN(一般仕様)の粘着面を貼合した。

各供試体に使用した KYÖZIN の物性を、表-3 に示す。

表-3 各供試体に使用した KYÖZIN の物性

試験項目	試験体 1	試験体 2
	KYÖZIN (アラミド仕様)	KYÖZIN (一般仕様)
シート厚 [μm]	1233	608
破断強度 [N]	1260	376
破断伸び [%]	7.9	15.4

5.2 実験結果及び考察

実験で得られた損傷状況を、図-9 に示す。

	試験体 1	試験体 2
表層	KYÖZIN (アラミド仕様) (破断強度：1260N) (破断伸び：7.9%)	KYÖZIN (一般仕様) (破断強度：376N) (破断伸び：15.4%)
接着 補強層	エポキシ系接着剤 200g/m ²	エポキシ系接着剤 200g/m ²
		アラミド繊維シート
		エポキシ系接着剤 500g/m ²
表面		
破壊 モード	シートの膨れ 約8mm	材破
裏面		
破壊 モード	スポールあり 貫通なし	貫通あり

図-9 供試体構成と損傷状況

〔試験体 1〕のアラミド繊維と複合化させた KYÖZIN シートで表面を被覆したものは、爆破の衝撃により 8 mm 程度シートが膨れていたものの、破壊されたコンクリート片の飛散を抑制する効果がみられた。裏面にはスポール損傷はみられたが、貫通はみられなかった。

〔試験体 2〕はコンクリート板を補強するため、アラミド繊維を接着補強層として貼合した上に、一般仕様の粘着タイプの KYÖZIN シートを貼合したものである。爆破により、コンクリート板は貫通し、表面の KYÖZIN シートは材破した。コンクリート板に直接接着したアラミド繊維は内部で破断している様子が確認できた。裏面のスポール損傷も試験体 1 よりも損傷が大きい結果であった。

ここで着目すべき点は、アラミド繊維シートの配置位置である。

〔試験体 1〕、〔試験体 2〕のいずれに対しても同じ強度のアラミド繊維シートを使用したが、KYÖZIN と複合化したほうが飛散防止の効果が高い結果であった。

KYÖZIN (アラミド仕様) は破断強度が高いだけでなく、KYÖZIN を構成する材料とアラミド繊維との界面強度も複合的に働いていると考えられ、一体化シートの粘弾性特性が爆破の衝撃を吸収し、コンクリートの破壊を低減し、飛散抑制に効果があるものと考えられる。

6. 緒言

- (1) KYÖZIN とアラミド繊維シートを複合化した KYÖZIN (アラミド仕様) で表面を保護したコンクリート板を C4 爆薬 W=30 g の条件で爆破させた場合、爆破による飛散を抑制することができた。
- (2) アラミド繊維シートを直接コンクリート板に接着したものは、爆破により貫通し、スポール損傷も大きく、表面に貼合した KYÖZIN (一般仕様) も材破し、爆破による飛散を抑制することができなかった。
- (3) 一般的な土木用途においてもアラミド繊維を補強材として使用する検討がなされているが、アラミド繊維単層でコンクリートに接着するよりも、KYÖZIN と複合化させることで、より高い効果が期待できる。
- (4) 本研究の範囲では、爆薬量が少ない実験を行った。今後は、高耐久セメントシートの耐爆性およびコンクリート板厚に対する爆薬量 (30 g < W) とシート厚の関係の評価と設計式の策定など、についてさらに検討する必要がある。

「建設技術1」

堅牢な防衛施設を造る新たな地盤改良技術「SST 工法」

A new ground improvement technology for building robust defense facilities "The SST Method"

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 東京支店 (〒101-0032 東京都千代田区岩本町 2-9-12 北村ビル 2 階)

** 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, 堅牢, 塹壕
(Replacement, Compaction, High Quality, High Strength, Robust, Trench)

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「異なる径の粒子を混合させること」と「強い力で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」ことを基本原則としたものであり、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



写真-1 SST 工法による施工の様子

「異なる径の粒子を混合」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で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構築することができ、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）。

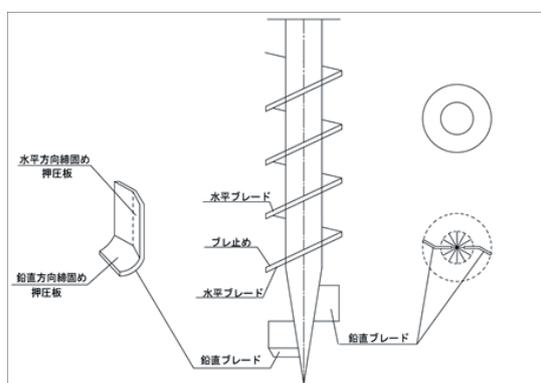


図-1 SST オーガーの締固め機構

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。

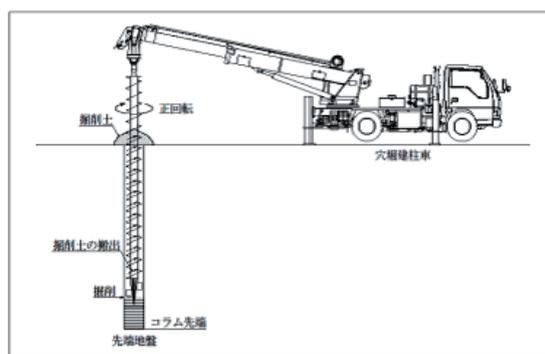


図-2 地盤の掘削

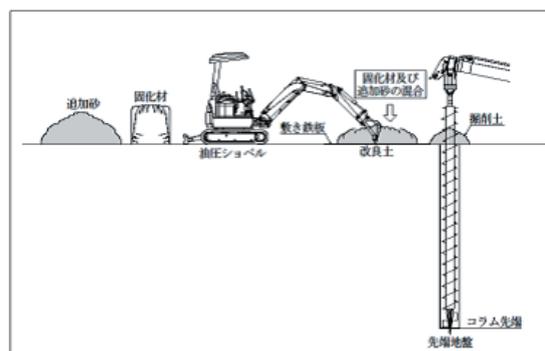


図-3 改良土の混合

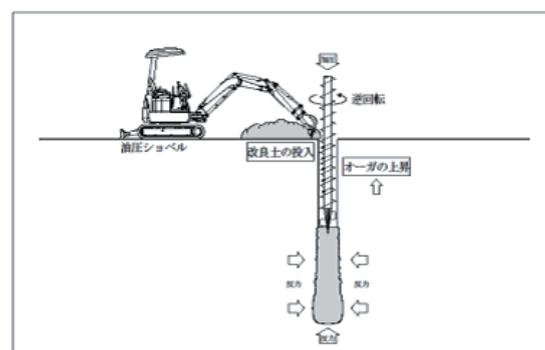


図-4 コラムの築造

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）。

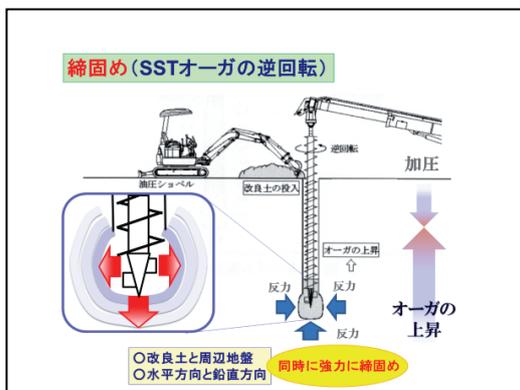


図-6 技術的特徴 (締固め方式)

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）。

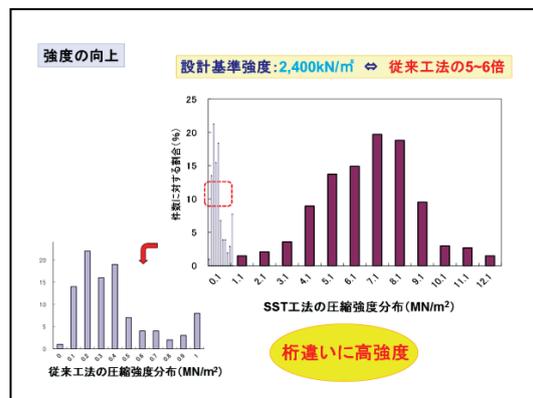


図-7 強度の向上

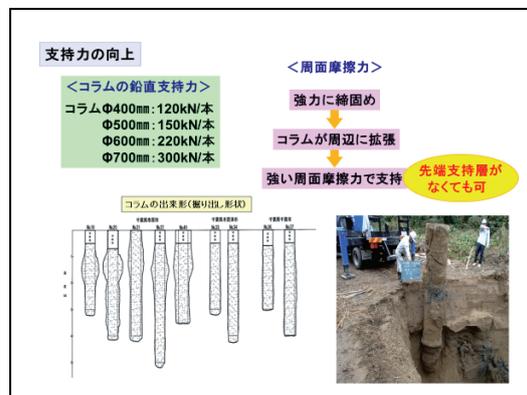


図-8 支持力の向上

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コストも安くなる。さらに、SST 工法では固化材

が固結する前であっても締固めによってすぐに圧縮強度が発現され、コラムを築造した翌日にはその上で基礎工事等ができるほどの実用的な強度に達することから、従来工法のような固化材の養生期間がほとんど必要なく、上物も含めた工事全体の工期も短縮できるという優位性もある。

2.2 SST工法の適用範囲

適用土質については、砂質土、粘性土、ローム、有機質土（腐植土、高有機質土を含む）であるが、地下水の流れが強い地盤、ガラや埋設物等がある地盤は必要な対策や撤去をしなければ適用できない。なお、従来工法では適用できないpH4以下の酸性土や固化材が固結しない土でも全て置換すれば適用できるし、N値が0の軟弱地盤や先端支持層がない地盤でも、コラムの周面摩擦力で必要な支持力が確保できれば適用できる。

最大接地圧は300kN/m²の重量物まで適用可能であり、従来工法の適用範囲を大幅に拡大している。

コラム径は400mm、500mm、600mm、700mmの4種類であり、改良深度は最大で12mまで施工できる。

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（0.06m³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、従来工法の大型機械や設備で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

従来から最も一般的に用いられているスラリー攪拌工法を比較の対象として、当社の実績工事では、SST工法によるコスト縮減と工期短縮の効果を試算した。

実績工事は、千葉県東金市市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



図-9 適用範囲の拡大

クリート造2階建て、上載荷重65kN/m²を建築するものであり、基礎面積829.54m²にコラム径600mm、コラム長5.78mのコラム279本を、2,326万円です工したものである。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/m²とするとコラム径1,000mm、コラム長5.08m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/m ²	2,400kN/m ²
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	

3. SST 工法による堅牢な防衛施設の建設

「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つ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する。

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場所である。

特に、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-10、写真-3,4,5 参照）。

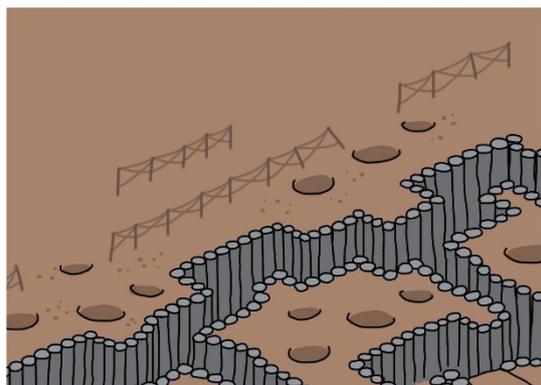


図-10 塹壕の構築イメージ

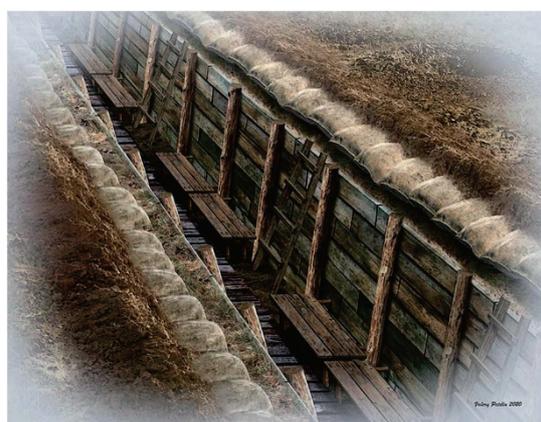


写真-3 塹壕の構築イメージ



写真-4 塹壕の構築イメージ



写真-5 塹壕の構築イメージ

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、防衛施設の堅牢化が促進され、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。

ジオグリッドと金網を併用した地山補強土工法の 法面工低減係数に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SLOPE REDUCTION FACTOR
OF NAILING METHOD USING GEOGRID AND WIRE MESH

國領ひろし*, 石垣拓也**
KOKURYO Hiroshi and ISHIGAKI Takuya

*博（工）日鉄建材株式会社 土木開発技術部（〒101-0021 東京都千代田区外神田4丁目14-1）

**日鉄建材株式会社 土木開発技術部（〒101-0021 東京都千代田区外神田4丁目14-1）

キーワード：斜面安定化，地山補強土工法，法面工低減係数，ジオグリッド
(Slope stability, Nailing method, Slope reduction factor, Geogrid)

1. はじめに

地山補強土工法は、自然斜面や切土斜面、既設盛土を対象に、地盤内に鉄筋等の棒鋼を芯材とした補強材を多数挿入し、地山と補強材、表面材（ここでは、法面工と称す。）の相互作用によって斜面の安定性を高める工法である。崩壊斜面の復旧や法面の表層崩壊防止、斜面の補強等に用いられ、これまで法面工には図-1に示すような鉄筋コンクリート製の梁部材を配した法枠工が多く施工されてきた。一方、近年では環境問題に対する意識の高まりや景観性、施工性に配慮して、金網やワイヤロープ等を使用した柔な法面工を有する工法も多く採用されるようになってきている。本研究で対象とした図-2に示すような格子状に配置したジオグリッドと金網を併用した地山補強土工法もその一つである。本工法は、法面工にコンクリート材料を使用しないことから施工性および環境性に優れ、全面緑化が可能で景観にも配慮できるといった特徴を有する。

地山補強土工法の斜面安定解析には、式(1.1)~(1.4)に示すスライス分割法による極限つり合い安定解析法が多く用いられている²⁾。

$$F_s = \frac{M_r + \Delta M_r}{M_d} \quad (1.1)$$

$$M_d = R \sum W_i \sin \theta_i \quad (1.2)$$

$$M_r = R \sum (c_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \varphi_i) \quad (1.3)$$

$$\Delta M_r = R \sum (T_m \cos \beta_i + T_m \sin \beta_i \tan \varphi_i) \quad (1.4)$$

ただし、 F_s ：計画安全率、 M_d ：土塊のすべりモーメント、 M_r ：土塊のすべり抵抗モーメント、 ΔM_r ：補強材による



図-1 地山補強土工法の一例（法枠工）



図-2 ジオグリッドと金網を併用した地山補強土工法（本工法）

抵抗モーメント、 R ：すべり円弧の半径、 W_i ：分割片の重量、 θ_i ：分割片で切られたすべり面の水平となす角度、

表-1 法面工タイプと低減係数 μ の目安²⁾

法面保護工タイプ	μ	備考
植生法面	0	
コンクリート吹付工	0.2~0.6	
法枠工	0.7~1.0	
擁壁類	1.0	連続した板タイプの法面工

c_i : 土の粘着力, l_i : 各分割片で切られたすべり面の弧長,
 φ_i : 土の内部摩擦角, T_m : 補強材の設計引張力 (= $\lambda T_{pa}/S_H$), λ : 補強材の引張力の低減係数, T_{pa} : 補強材の許容補強材力, S_H : 補強材の水平方向打設間隔, β_i : 補強材と分割片で切られたすべり面となす角度.

ここで, 補強材による抵抗モーメント ΔM_r を発揮する補強材の設計引張力 T_m , つまり補強材の許容補強材力 T_{pa} は, 斜面安定に寄与する補強材と法面工の効果により次式で与えられる²⁾.

$$T_{pa} = \min[T_{1pa}, T_{2pa}, T_{sa}] \quad (2.1)$$

$$T_{1pa} = \frac{1}{1-\mu} L_1 t_a \quad (2.2)$$

$$T_{2pa} = L_2 t_a \quad (2.3)$$

$$T_{sa} = \sigma_{sa} A_s \quad (2.4)$$

ただし, T_{1pa} : 移動土塊から受ける引抜き抵抗力, T_{2pa} : 不動地山から受ける引抜き抵抗力, T_{sa} : 補強材の許容引張力, μ : 法面工低減係数, L_1 : 移動土塊の有効定着長, t_a : 許容付着力, L_2 : 不動地山の有効定着長, σ_{sa} : 補強材の許容引張応力度, A_s : 補強材の断面積.

つまり, 地山補強土工法的设计では, 式(2.2)に示すように, 法面工の違いにより移動土塊から受ける引抜き抵抗力が変化し, 法面工低減係数は, 斜面安定化を図るうえで重要な設計因子となっている.

一般に, 剛な法面工の法面工低減係数は, 切土補強土工法設計・施工要領²⁾を参考に, 表-1 に示す値を目安としている. 一方, 柔な法面工では, 参考とする法面工低減係数が定められておらず, 設計にあたっては, 実験等により法面工低減係数を予め求めておく必要がある.

これまで, 柔な法面工の法面工低減係数に関する研究としては, 例えば, 長友ら³⁾が, 模型地盤を用いて地盤後方から水平載荷することにより強制的にすべりを発生させ, 支圧板と金網あるいは繊維敷設を施した場合の法面工低減係数を算出し, 変形を許容する法面工の有効性を示している. さらに, 寺岡ら⁴⁾は, 地盤特性の違いに着目した模型せん断試験を行い, 支圧板とワイヤロープを網状に加工した法面工の補強効果分担割合と法面工低減係数を確認している. また, 九田ら⁵⁾や阿部ら⁶⁾は, 勾配可変式の模型実験装置を用いて上部の土槽をスライドさせることにより, 支圧板とワイヤロープあるいはワイヤロープと金網を併用した法面工の補強効果や法面工低減係数を提案している. これらより, 法面工に金網やワイヤ

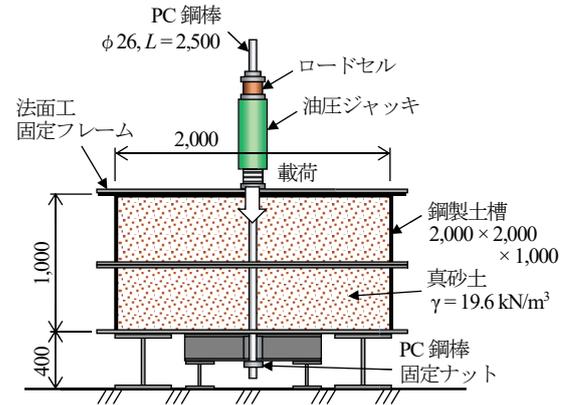


図-3 静的載荷実験概要図 (単位: mm)

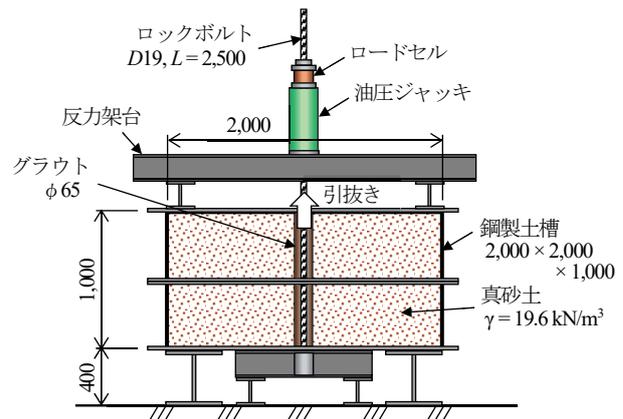


図-4 補強材引抜き実験概要図 (単位: mm)

ロープを用いた場合の法面工低減係数は明らかになりつつあるが, 本研究で対象としているジオグリッドと金網による法面工に関する研究は見当たらず, 設計時に必要な法面工低減係数は明らかになっていない.

そこで本研究では, ジオグリッドと金網を併用した法面工を対象に, 設計時に用いる法面工低減係数を実験的に検討するものである. まず, 実規模による静的載荷実験を行い, その耐荷性能と変形挙動を調べる. 次に, 補強材引抜き実験を行い, 法面工低減係数を直接的に求めるとともに, 本工法を設計で用いるための適用性 (法面工低減係数の妥当性) について検証する.

2. 実大静的載荷実験および補強材引抜き実験

2.1 実験装置

静的載荷実験および補強材引抜き実験で用いた実験装置の概要を, 図-3 および図-4 にそれぞれ示す.

まず, 図-3 の静的載荷実験は, 長さ 2,000 mm, 幅 2,000 mm, 厚さ 1,000 mm の鋼製の土槽を使用した. 土槽内の地盤には, 含水比 10% の真砂土を使用し, 湿潤密度が 19.6 kN/m³ (N 値 10 程度) となるように締め固めた. 地盤作製時, 載荷軸として直径 26 mm, 長さ 2,500 mm の PC 鋼

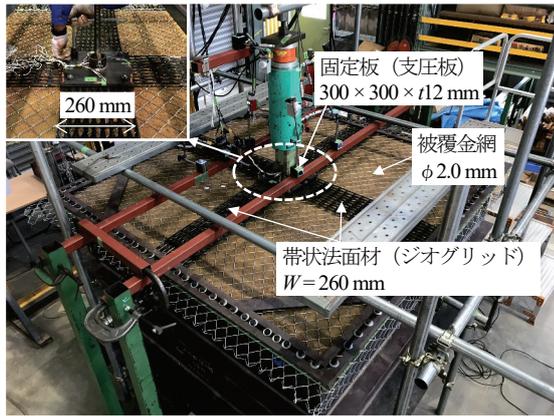


図-5 法面工概要図 (単位: mm)

棒 (SBPR 1080/1230, 引張強さ 1230 MPa) を土槽の中心に地盤を貫通するように配置し, 端部を土槽底部に固定した。法面工は, 地盤表面に敷設し, 法面工端部は土槽外縁にボルトにより固定するものとした。載荷は, センターホール型油圧ジャッキを使用し, 載荷軸に連結した法面工 (支圧板) を静的に載荷するものとした。

次に, 図-4 の補強材引抜き実験は, 静的載荷実験と同じ土槽を使用し, 土槽内の地盤は静的載荷実験と同条件となるように作製した。補強材は, 地盤作製の際, 地盤中央部に長さ 1,000 mm, 直径 65 mm の孔を設けておき, 地盤作製後, 直径 19 mm の異形棒鋼 (SD345, 引張強さ 490 MPa) を孔内に挿入して孔壁と異形棒鋼の隙間にグラウト材 (圧縮強度 $\sigma_{28} = 24 \text{ MPa}$, 水セメント比 50%) を注入することにより作製した。補強材の引抜きは, 鋼製土槽上部に引抜き反力用の架台を設置し, センターホール型油圧ジャッキにより鉛直に引き抜くものとした。

2.2 法面工

法面工の概要を図-5 に示す。法面工は, 地盤を全面被覆する金網と, 金網の上面に格子状に配置した带状法面材 (ジオグリッド), およびそれらを補強材 (ここでは載荷軸) に連結する固定板 (支圧板) で構成されており, それぞれの規格および寸法は表-2 に示すとおりである。本実験では, 実際の施工現場で使用する材料を用いるものとし, 被覆金網は, 線径 2.0 mm で素線強度 424 MPa のひし形金網, 带状法面材は, 芯材にアラミド繊維を挿入した幅 260 mm のポリエチレン製のジオグリッド, 固定板には, $\square 300 \text{ mm}$ の鋼板 (SS400) を使用した。

2.3 計測項目

静的載荷実験および補強材引抜き実験の計測項目は, それぞれ荷重および変位で, 荷重は, 油圧ジャッキに連結したロードセルにより計測し, 変位は巻取式変位計を用いて, 静的載荷実験の場合は固定板 (支圧板) の押し込み量, 補強材引抜き実験の場合は補強材の引抜き量を

表-2 法面工の規格・寸法

名称	材質	形状 (mm)	引張強さ ^{※2}	伸び ^{※2} (%)
带状法面材 (ジオグリッド)	アラミド繊維入り ポリエチレン	幅 260 目合 50×28	150 kN/m	4.5
被覆金網 ^{※1}	Z-GS3	線径 $\phi 2.0$ 目合 50×50	290~540 MPa	10
固定板 (支圧板)	SS400	300×300 板厚 12	400~510 MPa	17

※1: 金網は, 素線の引張強さおよび伸びを示す。

※2: 引張強さおよび伸びは規格値を示す。

表-3 実験ケース (静的載荷実験)

No.	支圧板 (mm)	法面工タイプ
Case1	300×300	ジオグリッド, 金網 $\phi 2.0$
Case2	300×300	- (支圧板のみ)
Case3	150×150	- (支圧板のみ)
Case4	150×150	金網 $\phi 3.2$ (素線強度 850 MPa)

それぞれ計測した。

2.4 実験ケース

静的載荷実験の実験ケースを表-3 に示す。実験は, 本工法である支圧板 ($\square 300 \text{ mm}$) にジオグリッドと金網を併用したケース (Case1) に加え, 法面工の効果を比較するため, 支圧板のみのケース (Case2 は $\square 300 \text{ mm}$, Case3 は $\square 150 \text{ mm}$) と, 支圧板 ($\square 150 \text{ mm}$) と金網 (線径 3.2 mm, 素線強度 850 MPa のひし形金網) を用いたケース (Case4) の 4 ケースとした。

補強材引抜き実験は, 異形棒鋼 D19 mm (グラウト径 65 mm), 補強材長さ 1,000 mm の 1 ケースである。

3. 実験結果と考察

3.1 荷重-変位関係

図-6 に, 静的載荷実験の荷重-変位関係を示す。図中の×印は, ジョグリッドあるいは金網が破断した時点を示している。まず, Case1 の場合, 荷重 200 kN 付近でジオグリッドの一部が破断し, その後, 変位のみが増加して変位 250 mm を超えた時点でジオグリッドがすべて破断した。さらに載荷を続けると, 再び荷重も増加し, 荷重 259 kN になると金網が破断し始める結果となった。ここで, ジョグリッドが破断するまでの荷重-変位関係の傾きは, ジョグリッド破断後から金網が破断するまでの傾きに比べて大きくなっている。これは, ジョグリッドの支圧効果が現れたものであり, ジョグリッドを有することにより支圧力が向上することを示している。次に, 支圧板のみの Case2 では, 載荷初期から荷重 90 kN 付近までは荷重の増加が顕著となり, それ以降は荷重と変位が緩やかに増加する結果となった。

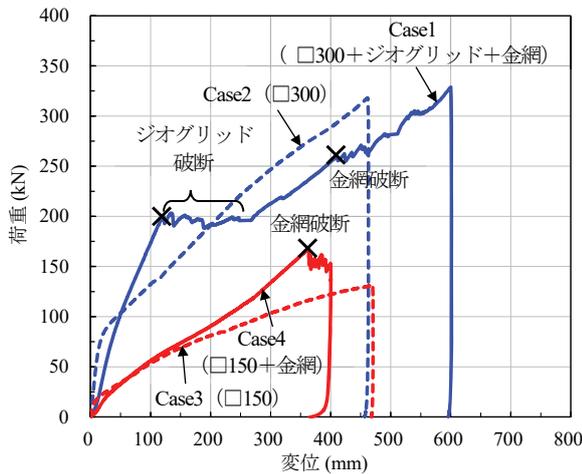


図-6 荷重-変位関係 (静的載荷実験)

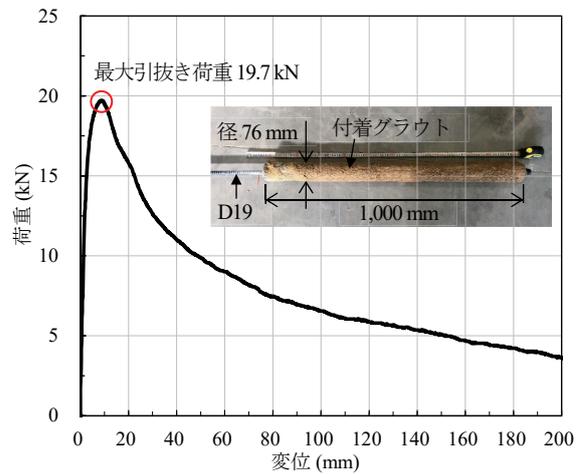


図-7 荷重-変位関係 (補強材引抜き実験)

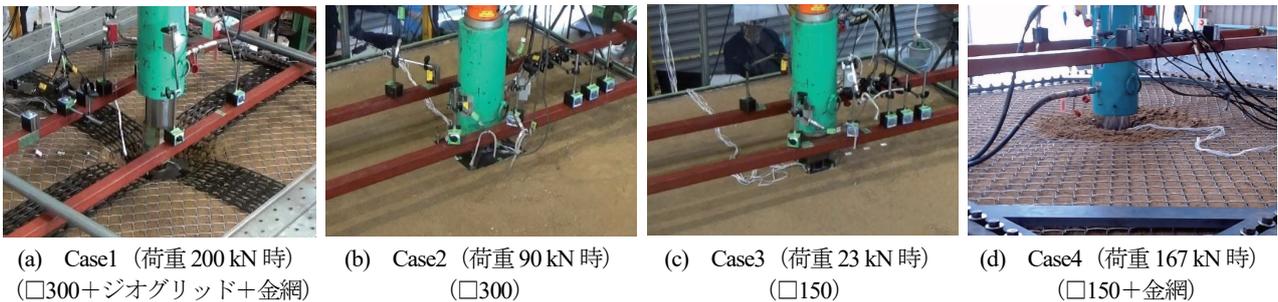


図-8 実験状況の一例 (静的載荷実験)

一方、支圧板が小さい□150 のケース (Case3 および Case4) では、まず、支圧板のみの Case3 は、荷重初期から荷重 23 kN 付近にかけて荷重が急激に増加し、その後、荷重と変位は緩やかに増加する。この傾向は、支圧板が大きい Case2 と同様であるが、急増時の荷重は Case2 に比べて小さい。これは、支圧板の大きさの違いによる支圧力の差が現れたものと考えられる。次に、金網を敷設した Case4 では、荷重 167 kN、変位 363 mm の時点で金網が破断する結果となった。Case3 と比べると、変位 65 mm 以降の荷重-変位関係の傾きが大きくなっており、金網による支圧力の増加が認められる。

図-7 に、補強材引抜き実験の荷重-変位関係を示す。これより、補強材の最大引抜き荷重は 19.7 kN となる。ここで、補強材引抜き後の異形棒鋼に付着していたグラウトの実測値 (直径 76 mm、長さ 1,000 mm) から周面摩擦抵抗を試算すると、0.08 MPa (= 19.7 kN / (76 mm × π × 1000 mm)) であり、文献 2) で示されている砂地盤の N 値 10 とした極限周面摩擦抵抗の推定値と同程度であった。

3.2 荷重時の地盤状況

静的載荷実験での実験状況の一例を図-8 に示す。Case1 はジオグリッドの破断時、Case4 は金網破断時の状況、Case2 および Case3 は、荷重-変位関係の勾配が緩やかになり始める時点の状況をそれぞれ示している。これより、法面工を設置した Case1 および Case4 では、支

圧板の沈下とともに法面工の影響により支圧板周辺の地盤にも皿状の窪みが生じていることがわかる。一方、支圧板のみの Case2 および Case3 では、支圧板周辺の地盤を乱すことなく、支圧板下面の地盤のみが沈下する (圧密されている) 状況が確認された。

3.3 法面工低減係数の算定

ここでは、静的載荷実験および補強材の引抜き実験の結果から、各ケースにおける法面工低減係数を算出する。一般に、法面工低減係数は、式(3)で定義されている²⁾。

$$\mu = \frac{T_o}{T_{max}} \quad (3)$$

ただし、 T_o : 法面工に作用する補強材引張力、 T_{max} : 最大引張力。

そこで、式(3)を参照し、法面工の支圧力と補強材の引張力の関係から式(4)のように法面工低減係数を求めるものとした。

$$\mu = \frac{T_s}{T_s + T_f} \quad (4)$$

ただし、 T_s : 法面工が発揮する支圧力、 T_f : 補強材の引抜き力。

ここで、法面工が発揮する支圧力 T_s は、Case1 および Case4 の場合は、法面工破断時の荷重 (Case1 はジオグリ

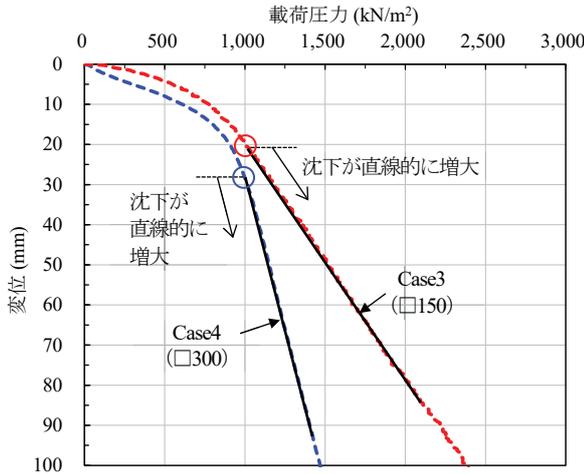


図-9 載荷圧力-変位関係 (支圧板のみ)

ッドの破断時で 200 kN, Case4 は金網の破断時で 167 kN) とし, 支圧板のみの Case2 および Case3 の場合は, 地盤の極限支持力の判定方法⁷⁾を参考に, 地盤破壊時の荷重で評価した. すなわち, 図-9 に示すような載荷圧力-変位関係において, 沈下量の増加が直線的に増加し始める載荷圧力を地盤が破壊状態に至った点とみなし, その時点の荷重を支圧力 T_s とした. その結果, 載荷圧力は Case2 および Case3 とともに 1,000 kN/m²であり, Case2 は 90 kN, Case3 は 23 kN となる.

表-4 に各ケースにおいて法面工低減係数を算出した結果を示す. 実験による法面工低減係数は, Case1 が 0.91 と最も大きく, 次いで Case4 (0.89), Case2 (0.82), Case3 (0.54) の順となる. つまり, 支圧板のみの場合 (Case2 および Case3) に比べ, 法面工を設置した場合 (Case1 および Case4) のほうが法面工低減係数は大きくなり, 特にジオグリッドと金網を併用した Case1 では, 他のケースに比べて法面工の支圧効果が顕著となる. また, 支圧板が小さい場合でも, Case4 のように金網等の法面工を設置することにより, 大きな支圧効果が得られることが認められた.

3.4 法面工低減係数の適用性の検討

前節で求めた法面工低減係数は, 法面工 (支圧板のみの場合を含む) の支圧力 T_s と補強材の引抜き力 T_f をそれぞれ個別の実験により求めたものであるが, 実際には, 補強材周面に作用する摩擦抵抗は, 支圧板から受ける土圧によって増加することが考えられる. つまり, 法面工が支圧効果を発揮すると, 支圧板直下にある補強材周辺の地盤が圧密されることにより, 補強材に作用する水平応力が増加し, 補強材の周辺摩擦抵抗が大きくなるものと考えられる. そこで, ここでは補強材の引抜き実験から得られた引抜き力 T_f を, 中本の研究⁸⁾を参考に, 式(5.1)~(5.3)を用いて法面工による支圧力が補強材の摩擦抵抗に与える影響, すなわち水平応力の増分を考慮した補強

表-4 実験による法面工低減係数

No.	法面工の支圧力 T_s (kN)	補強材の引抜き力 T_f (kN)	法面工低減係数式(4) μ
Case1	200	19.7	0.91
Case2	90		0.82
Case3	23		0.54
Case4	167		0.89

表-5 補正による法面工低減係数

No.	崩壊深さ 1.0 m		崩壊深さ 3.0 m ^{**}	
	補強材引抜き力 T_f' (kN)	法面工低減係数式(4) μ'	補強材引抜き力 T_f' (kN)	法面工低減係数式(4) μ'
Case1	21.5	0.90	60.9	0.77
Case2	20.6	0.81	60.0	0.60
Case3	20.2	0.53	59.6	0.28
Case4	22.0	0.88	61.4	0.73

^{*} $T_f = 19.7 \times 3 = 59.1$ kN と仮定して試算.

材の引抜き力 T_f' に補正して, 法面工低減係数 μ' を試算するものとした.

$$T_f' = \pi D \tan \varphi \left(\int_0^L \sigma_{x-1} dz + \int_0^L \sigma_{x-2} dz \right) \quad (5.1)$$

$$\sigma_{x-1} = Z \gamma_d K \quad (5.2)$$

$$\sigma_{x-2} = \frac{2q}{\pi} \left[\tan^{-1} \frac{B^2}{4z \sqrt{\frac{1}{2} B^2 + Z^2}} - \frac{B^2 Z}{4 \left\{ Z^2 + \left(\frac{B}{2} \right)^2 \right\} \sqrt{\frac{1}{2} B^2 + Z^2}} \right] \quad (5.3)$$

ただし, D : グラウトの直径 (0.076 m), φ : 地盤の内部摩擦角 (三軸圧縮試験より 39.8°), L : 補強材長さ, Z : 地盤の崩壊深さ, σ_{x-1} : 地盤の自重により補強材が受ける水平応力, σ_{x-2} : 支圧応力の伝播による水平応力増分, γ_d : 土の単位体積重量 (19.6 kN/m³), K : 土圧係数 (実験での補強材引抜き力 T_f より逆算), q : 支圧板による圧力, B : 支圧板幅 (0.30 m および 0.15 m).

表-5 および図-10 に, 補正した補強材引抜き力 T_f' を用いて法面工低減係数 μ' を算出した結果を示す. ここでは, 実験と同じ崩壊深さ 1.0 m の場合に加え, 文献²⁾を参考に, 本工法の地山補強土工法としての適用範囲として, 崩壊深さを 3.0 m とした場合についても試算した.

まず, 崩壊深さ 1.0 m の場合, 補正後の法面工低減係数 μ' は, Case1 で 0.90, Case2 で 0.81, Case3 で 0.53, Case4 で 0.88 となり, すべてのケースにおいて実験での法面工低減係数に比べてやや小さくなった. これは, 水平応力の増分を考慮した補強材の引抜き力 T_f' が, 実験での補強

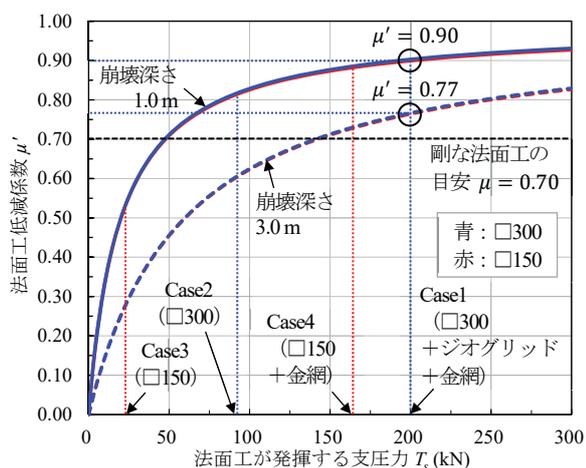


図-10 補正した補強材引抜き力 T_f' より求めた法面工低減係数 μ'

材引抜き力 T_f より大きくなるためであるが、Case1, Case2 および Case4 の法面工低減係数 μ' は、表-1 に示す剛な法面工（法枠工）の法面工低減係数 0.7~1.0 と同程度となることが認められた。

次に、崩壊深さを 3.0 m とした場合、法面工低減係数 μ' の推定値は、Case1 で 0.77, Case2 で 0.60, Case3 で 0.28, Case4 で 0.73 となり、崩壊深さ 1.0 m の場合に比べて小さくなる。これは、崩壊深さが深くなると、補強材の引抜き力（ここでは、補正前の補強材引抜き力を実験値 T_f の 3 倍と仮定）は増加するが、地盤表面に配置された法面工の支圧力 T_s は変わらないものとしたためである。ただし、Case1 および Case4 では、崩壊深さ 3.0 m の場合においても法面工低減係数 0.7 以上を有し、特にジオグリッドと金網を併用した Case1 については、優れた支圧効果を有することが確認された。

以上より、本工法においては崩壊深さ 3.0 m 以下の斜面・法面であれば、安全側を考慮して法面工低減係数 0.7 を用いても差し支えないものと考えられる。

4. まとめ

本研究は、ジオグリッドと金網を併用した法面工を対象に、実規模による静的載荷実験を行い、その耐荷性能と変形挙動を把握するとともに、本工法を設計で用いるための法面工低減係数の検討を行ったものである。本研究の成果をまとめると以下のようになる。

- (1) ジオグリッドと金網を併用した法面工の静的載荷実験を行った結果、ジオグリッドは金網に先行して破断するが、支圧板のみ、および支圧板と金網を用いた法面工と比較して高い支圧効果を発揮する。
- (2) ジオグリッドと金網を併用した法面工の法面工低減係数は、崩壊深さ 1.0 m の場合、実験値で 0.91, 補正値で 0.90 となる。これは、剛な法面工の法面工



図-11 表層侵食防止工としての使用例

低減係数と同程度と評価できる。

- (3) 静的載荷実験を基に、崩壊深さ 3.0 m とした場合の法面工低減係数を試算すると 0.77 となる。よって、本研究の範囲では、崩壊深さ 3.0 m 以下において、本工法の設計に用いる法面工低減係数は 0.7 とし差し支えないものと考えられる。
- (4) 本研究は限定的な条件で実施したものであり、今後、地盤条件の違い等についても検証する必要がある。さらに、本工法は図-11 に示すような表層侵食防止工（抑制工）としても適用可能であることから、施設周辺の斜面や道路法面等、様々な現場の斜面对策工として防災・減災に貢献できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 公益社団法人 地盤工学会：地山補強土工法 設計・施工マニュアル, 2011.
- 2) 東日本・中日本・西日本高速道路株式会社：切土補強土工法 設計・施工要領, 2007.
- 3) 長友英洋, 奥園誠之, 松尾雄治：地山補強土工におけるのり面保護工の中抜け防止効果に関する模型実験, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp.985-986, 2005.
- 4) 寺岡克己, 近田勇樹, 楠見晴重, 片山辰雄：自然斜面を保全した斜面安定工法の法面工低減係数に関する一考察, 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp.165-166, 2008.
- 5) 九田敬行, 石川芳治, 荒木豪, 阿部真也：ES ネット工法ののり面補強効果に関する模型実験, 土木学会第 69 回年次学術講演会, pp.517-518, 2014.
- 6) 阿部真也, 石川芳治, 正木聡, 歳藤修一：DC ネット工法ののり面補強効果に関する実験, 土木学会第 71 回年次学術講演会, pp.657-658, 2016.
- 7) 公益社団法人 地盤工学会：地盤調査の方法と解説 一二分冊の 2-1, pp.697-735, 2013.
- 8) 中本詩瑤：支圧板付きロックボルト補強斜面の変形・破壊メカニズムと補強効果に関する基礎的研究, 東京工業大学博士論文, 2017.

供用中の既設構造物直下の液状化対策事例

— 静的圧入締固め工法（CPG工法） —

Examples of liquefaction countermeasures directly under existing structures in case-compaction grouting method-

小西武*, ○足立雅樹*, 渡邊将美*, 文野隆行*,
KONISHI Takeshi, ADACHI Masaki, WATANABE Masami and BUNNO Takayuki

* 一般社団法人 圧入締固め研究機構（〒108-0014 東京都港区芝四丁目6番12号）

キーワード：既設構造物，静的圧入締固め，液状化対策
(Existing structures, compaction grouting, liquefaction countermeasure)

1. はじめに

災害に強い安全な国土づくりとして各種施設の耐震化が推進されている。特に、港湾施設や空港施設等では、大規模地震発生時に避難者や緊急物資等の輸送の拠点としての役割を果たす必要があるため、重点的に耐震化が行われている。しかし、既設構造物が存在する施設では、構造物自体が支障となることから液状化対策等が困難な場合が多かった。

本論文は、供用中の既設構造物直下にCPG工法を用いた液状化対策を実施した事例を紹介する。

2. 工法の概要

2.1 CPG工法¹⁾

CPG工法は、流動性の極めて低い注入材を地盤中に静的に圧入して、固結体を連続的に造成することによる締固め効果で、周辺地盤を圧縮強化する工法である。その特長は、以下の通りである。

- ①スランプの極めて小さい低流動性材料を使用するため地盤に浸透することなく、ほぼ計画通りの場所に固結体を形成できる。つまり、砂と粘土のような互層からなる複雑な地盤では改良が必要な砂層のみを改良（中抜き施工）することが可能である。
- ②計画位置に注入された注入材は、周辺地盤を静的に圧縮し、密度を高めて、地盤を強化する。
- ③小型機械のため、既設構造物周辺、構築物内部等の狭い作業場所でも、現状維持のまま施工が可能である。
- ④施工機械の車載化が可能であることから機動性が良い。
- ⑤無振動、低騒音のため市街地、住宅地でも作業が可能である。

2.2 注入材料

注入材料は、固化材（高炉B種セメント等）、CPG骨材（再生骨材+砂+細粒分）および水を一定量配合したモルタル状の注入材を用いる。

2.2 主な使用機械

主な使用機械は、以下に示すとおりである。

削孔については、外径φ73mmのロッドによるボーリングマシン(写真-1)を使用する(アスファルト舗装の削孔が必要な場合は、φ100mmのコアドリルを使用)。



写真-1 ボーリングマシン



写真-2 注入管リフト装置



写真-3 CPG ポンプ



写真-4 CPG プラント

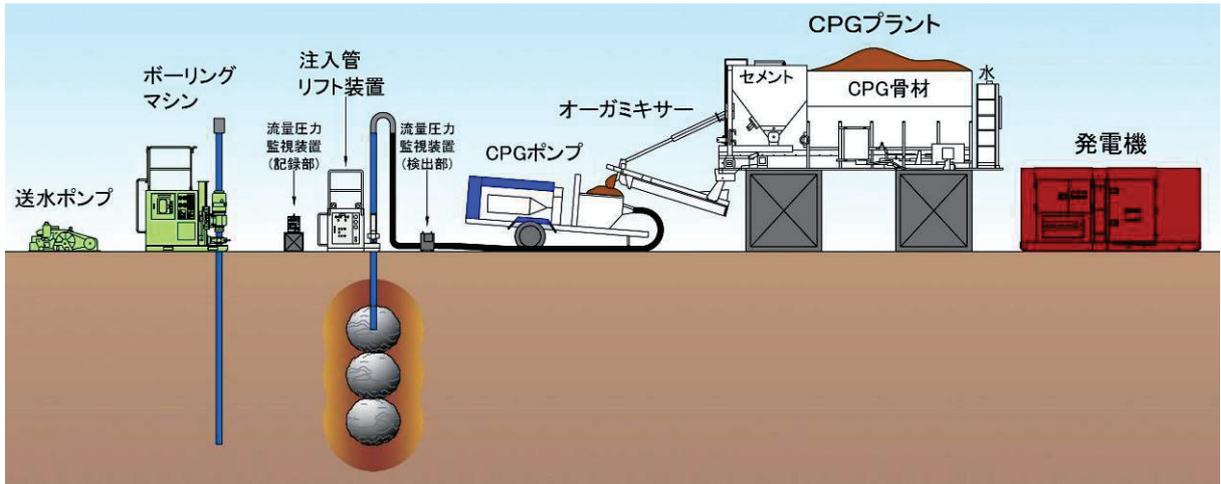


図-1 CPG工法の施工システム (定置式プラント)

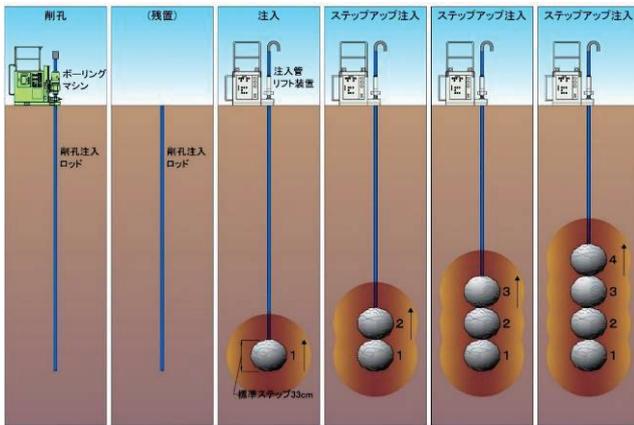


図-2 ボトムアップ方式

注入については、注入管リフト装置 (写真-2)、注入ロッド、ロッド引抜用ジャッキ、CPG ポンプ (写真-3) および CPG プラント (写真-4) を使用する。

2.3 施工方法 (注入方法)

CPG 工法の施工システム (定置式プラント) は、図-1 に示す。まず、ボーリングマシンにより注入ロッドを用いて削孔を行う。所定の深度まで削孔が完了した後、注入ロッドは地中に残置しておいてボーリングマシンと注入管リフト装置を入れ替える。その後、CPG プラントで作られた流動性の極めて小さい注入材料を CPG ポン

プにより圧送し、ロッド先端より注入材料を地盤中に圧入する。所定量の注入が完了した後、注入管リフト装置により 1 ステップ 33cm 分を引き上げ、次のステップの圧入を行う、このロッドの引き上げと注入材の圧入の作業を所定深度分が完了するまで繰り返す。この注入方法は、ボトムアップ方式と言う。(図-2)。

2.4 施工管理

2.4.1 注入材料管理

注入材料の品質管理は、使用する注入材料についてスランプ試験を行う (写真-5)。スランプ値は 5cm を標準として、管理値を 0~7cm としている。



写真-5 スランプ試験

3. 施工機械の特徴

CPG 工法で用いる専用の機械には、CPG プラント、CPG ポンプ、流量圧力監視装置、注入管リフト装置がある。

CPG プラントは、セメントサイロ、CPG 骨材サイロ、水タンクを一体型にまとめ、オーガー式のみキシング装置により連続的に注入材を供給することができる。製造能力は、 $4\text{m}^3/\text{h}$ で CPG ポンプ 2 セット分の供給能力がある。また、20 t クラスのトレーラーに車載することが可能で、毎日機材を撤去する必要がある現場でも施工が可能である。

CPG ポンプは、電動モーターにより油圧ポンプを作動させる 2 連式のピストンポンプで、常用最大圧力 $8\text{MN}/\text{m}^2$ 、吐出量 $1.8\text{m}^3/\text{h}$ の能力を有している。操作系統がコンパクトにまとめられ、遠隔操作も可能である。また、トラックなどの車両により牽引できる構造となっていて、CPG プラントと同様、毎日機材を撤去する必要がある現場に対応できる。

流量圧力監視装置は、注入量（単位吐出量、積算量）、注入圧力、を連続的に計測しデータファイルとして記録する。専用のソフトにより図表化でき、綿密な施工管理が可能である。また、CPG ポンプの遠隔操作はこの流量圧力監視装置でできるように工夫され、施工位置における状況にすばやく対処できる配慮がなされている。

注入管リフト装置は、注入ロッドをステップアップするためのジャッキで、ストロークは標準ステップ長に合わせて 33 cm としている。

台船式プラント設備で行った事例、その他の施工例を紹介する。

4.1 供用中の空港施設（車載式プラント設備）^{1),2)}

供用中の滑走路および誘導路で適用した事例を紹介する。これらの既設舗装直下では、航空機の運航がない夜間に施工を行い、翌朝、航空機の運航に支障がないよう日々復旧を行う必要があることから、CPG 工法が採用された。

供用中の滑走路および誘導路における CPG 施工の特徴として、以下の 2 点がある。

- ・車載式プラント設備
- ・防護キャップの使用

4.1.1 車載式プラント設備

図-3 に車載式プラント設備、写真-6 に施工状況を示す。車載式プラント設備は、28t クラスのセミトレーラ上に、CPG プラント、発電機、高圧洗浄機を積載したものである。CPG ポンプは、注入機材を運搬する注入機材車や、削孔用の削孔車により牽引し、施工エリアに設置する。

車載式プラントにすることにより、日々の夜間制限時間内での作業が可能となる。また、作業時間内であっても緊急着陸時には、施工機材を退去させ、早急に開放することも可能である。

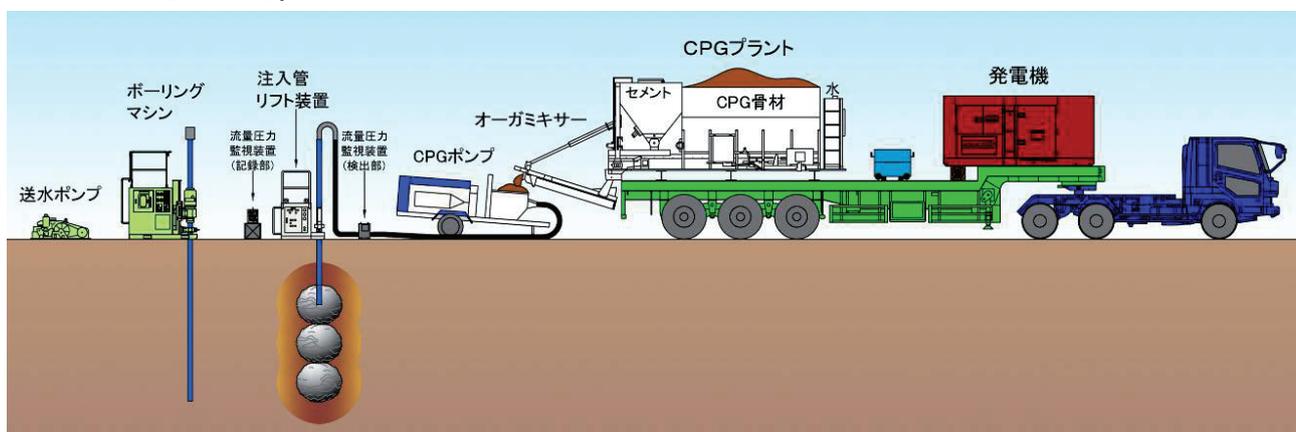


図-3 車載式プラント

4. 施工例

図-1 に示したように、CPG 工法では定置式のプラント設備を標準としている。しかし、既設構造物に対する液状化対策を行う場合には、さまざまな施工上の制約を受けることが多く、標準的なプラント設備では対応できないことがある。CPG 工法は、このような条件下においても現場に見合った施工形態で対応することが可能である。

そこで、ここでは車載式プラント設備で行った事例、



写真-6 施工状況

4.1.2 防護キャップ

通常、舗装版や床版がある個所では、事前にφ100mmのコアカッターによる削孔を行う。しかし、日々開放する必要がある滑走路や誘導路においては、舗装に孔を開けた状態にしておくことはできない。また、削孔した注入ロッドをそのままの状態に残置することも不可能である。そこで、ここではφ190mmの防護キャップと呼ばれる鋼製の蓋を用いて施工を行っている。

防護キャップは、航空機荷重に耐用できる鋼製のふたで、開閉できる構造となっている（写真-7）。設置手順は、φ200mmのコアカッターにより舗装版の削孔を行った後、超速効性の無収縮モルタルにて基面調整を行い、エポキシ樹脂を用いて防護キャップを固定する。



写真-7 滑走路用防護キャップ

4.1.3 改良効果

改良効果の一例として改良前・後の等価N値の比較を図-4に示す。ここで等価N値は、現場で得られたN値に対して土被り圧の影響を補正した値である。改良率5%および8%において全体的にN値の増加が認められる。N値と改良前・後の孔内水平載荷試験より求めた静止土圧係数K値の関係を図-5に示す。図には、空港滑走路の結果(本施工)と他施工の結果もプロットしているが、改良率 $a_s=15\%$ では、7年経過後も1.0を保持していることがわかる。一方、本施工のK値(●)は、改良前0.5~0.6に対して、改良後は0.77~0.95と上昇が確認された。しかし、本施工の結果は、他施工の結果よりも小さい値

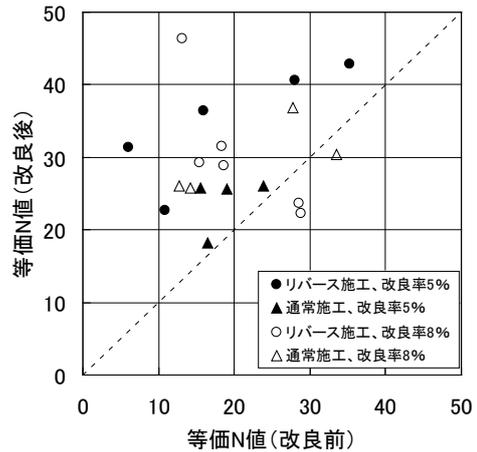


図-4 改良前・後の等価N値の関係

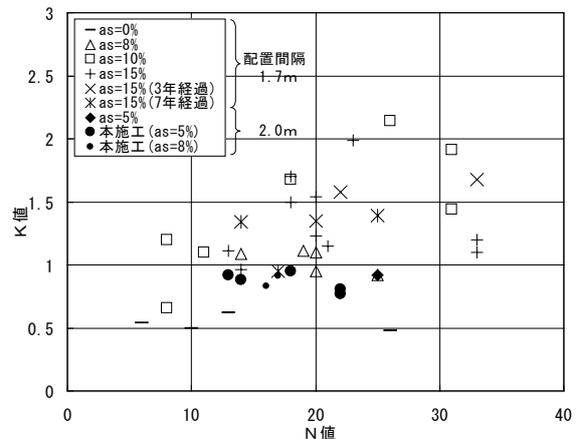


図-5 N値とK値の関係

であった。この理由として、配置間隔が、他施工に比べて広いことが考えられる。

4.2 海上施工（台船式プラント設備（図-6））⁴⁾

海上から施工した事例を紹介する。この現場では、港内にある護岸前面の液状化対策として採用された。港内は、狭いスペースの中に漁船やプレジャーボートが数多く係留されており、船舶の出入りも考慮する必要があった。また、護岸後背地に病院や民家が存在しており、P

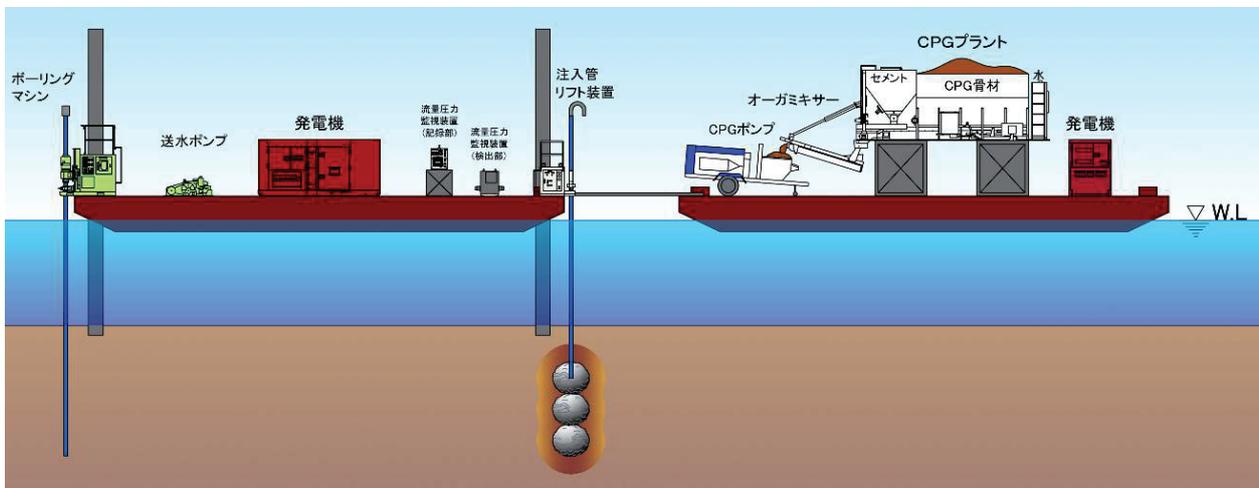


図-6 台船式CPGプラント

ラントヤード等の用地が確保できない状況であった。そこで、台船施工が選定された。

台船は、プラント台船、注入台船、削孔台船からなる(写真-8)。プラント台船は、プラント設備および濁水処理設備を備えており、注入材料や残モルタルの仮置き場としても使用している。注入台船には、注入管リフト装置、流量圧力監視装置および発電機を備えている。削孔台船には、ボーリングマシンおよび発電機を備えている。

注入台船および削孔台船には、スライド架台およびスライドベースを設備しており、施工位置の微調整を可能にしている(写真-9)。

施工は、以下の手順で行った。

- ①施工位置に削孔台船を誘導し、削孔を行う。
 - ②削孔完了後、削孔台船を次のポイントに移動する。
 - ③先行削孔で残置したロッド位置へ、注入台船を誘導し、注入を行う。
 - ④注入が完了後、注入台船を次のポイントに移動する。
- 以上のように、注入台船が削孔台船を後追いする形で施工した。



写真-8 施工状況



写真-9 スライド架台

4.3 斜め施工

斜め施工を実施した事例を紹介する。写真-10 に斜め施工機械を示す。削孔角度は水平を0°とした時、15°程度から90°程度までの実績がある。

図-7 の施工断面図に示すように、既設護岸の背後地盤を鉛直で施工するとともに、護岸に沿って斜めに施工を行った。



写真-10 斜め施工機械

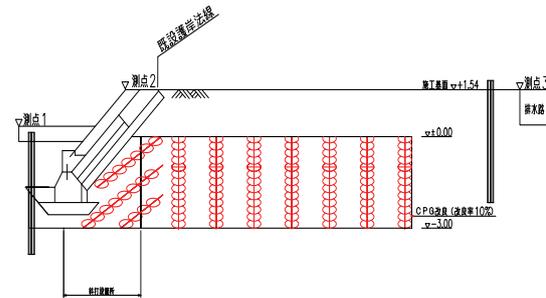
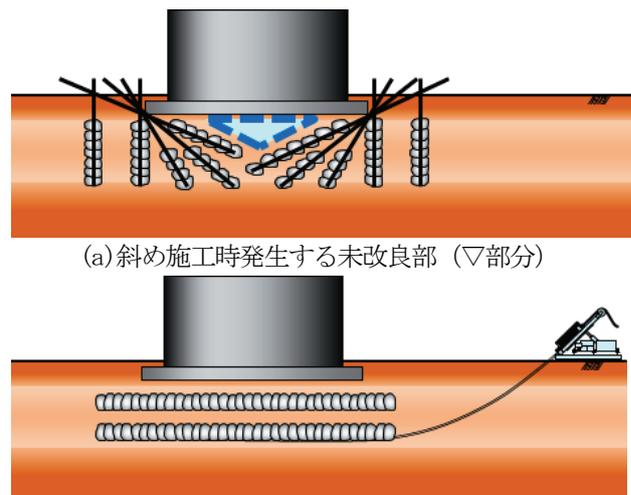


図-7 施工断面図

4.4 水平施工⁵⁾

水平施工を実施した事例を紹介する。既設構造物直下を改良する場合、通常は構造物に穴をあけての鉛直施工や構造物周辺からの斜施工で対応している。しかし、構造物や施工条件によっては構造物を削孔することができない場合や斜施工では構造物直下に死角が生じ、未改良部が発生する場合がある。このような条件下においては、曲線ボーリングにより削孔を行い、水平に低流動性のモルタルを圧入し締め固め効果を利用して固結体を造成する曲線ボーリングを併用する必要がある(図-8 参照)。



(a) 斜め施工時発生する未改良部 (▽部分)

(b) 水平施工

図-8 施工イメージ

削孔・圧入兼用の施工機を写真-11に、施工状況を図-9に示す。

- ①削孔は、外径 73mm、長さ 3m の削孔注入ロッドを継ぎたしながら所定の位置まで掘進する。削孔管理はジャイロを搭載した内挿式計測システムにて、曲線部では削孔長 3.0m 毎に直線部は削孔長 6.0m 毎に実施した。
- ②削孔完了後、圧入は平均毎分 30 リットル以下の注入速度で、1 ステップ 33cm とし、1 ステップ分の注入量に達するとポンプ圧送を止め、ロッドを 33cm 引き抜くことを繰り返して固結体の造成を行った。注入作業中は注入量と注入圧力とを流量圧力監視装置で常時確認しながら施工を行った。
- ③改良範囲外の地盤部分には、削孔で生じた空隙に注入で使用したモルタルを、ロッドを引き抜きながら充填した。

図-10に、削孔線形の計画と実施を示す。また、写真-12に、固結体の出来形を示す。



写真-11 削孔・圧入兼用機



図-9 施工状況

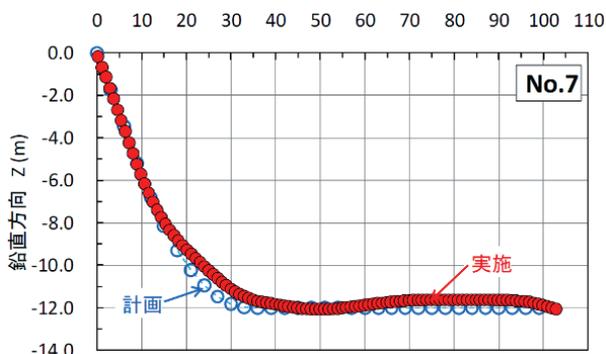


図-10 削孔線形の一例



写真-12 固結体出来形

4.5 その他の施工例

その他の施工例を以下に紹介する。

4.5.1 施工途中に巨石が存在する場合の施工

施工範囲内に巨石があり、通常使用する削孔機械では施工が不可能であった。そこで、ロータリーパーカッション式ボーリングマシンによって巨石を貫入して削孔を実施した(写真-13)。



写真-13 ロータリーパーカッション式ボーリングマシンによる削孔状況

4.5.2 歴史的建造物周辺の施工

4.5.2.1 横浜税関(写真-14)⁶⁾

既存建築物の耐震性を高めるため、建築物内部から液状化対策した事例を紹介する。

図-11に示すとおり、増築棟は、新築のため特殊石灰パイル工法で、改修棟下は建物内部から施工のため CPG 工法で施工を行った。

写真-15に、建築物内部での施工状況を示す。

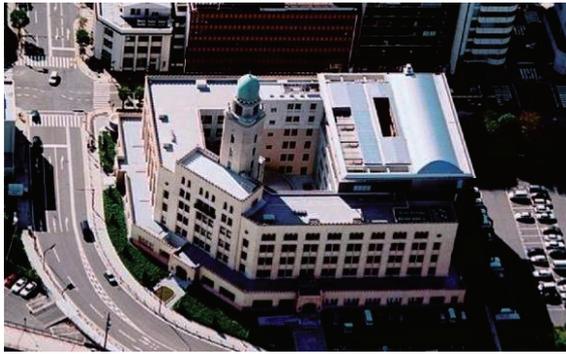


写真-14 歴史的建造物（横浜税関）

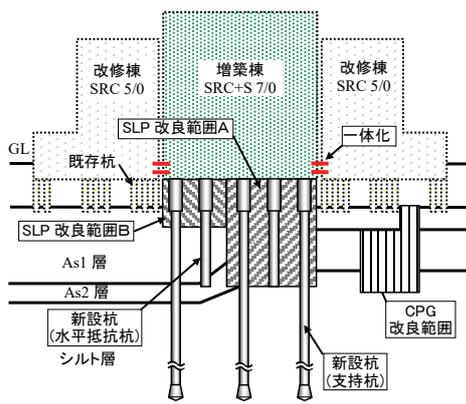
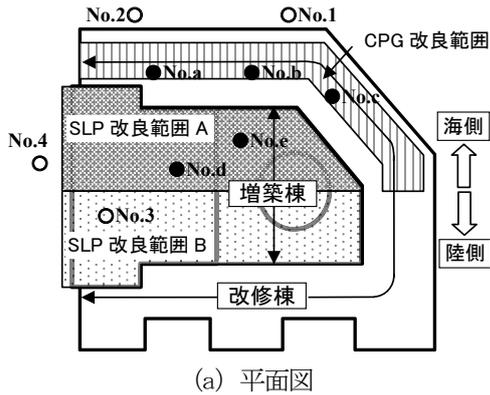


図-11 施工図



写真-15 建築物内部での施工状況

4.5.2.2 愛知県庁本庁舎（写真-16）

既存建築物の耐震性を高めるため、建築物の狭隘部および建築物内部から液状化対策した事例を紹介する。

図-12 に示すとおり、プラントから建築物内部の施工場所まで距離があるため、途中に中継ポンプを通して施工を実施した。

写真-17 に中継ポンプ、写真-18 に屋外狭隘部での施工状況、写真-19 に建築物内部での施工状況を示す。



写真-16 歴史的建造物（愛知県庁本庁舎）

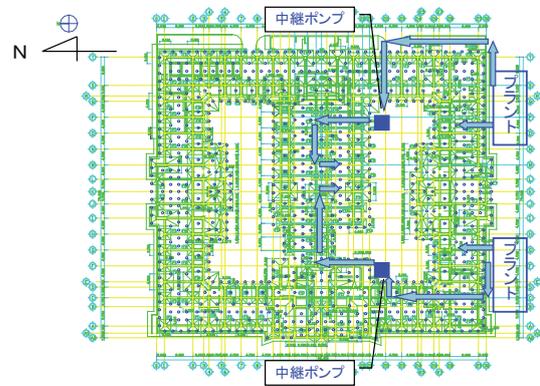


図-12 プラントから施工場所までの配管ルート



写真-17 中継ポンプ



写真-18 屋外狭隘部での施工状況

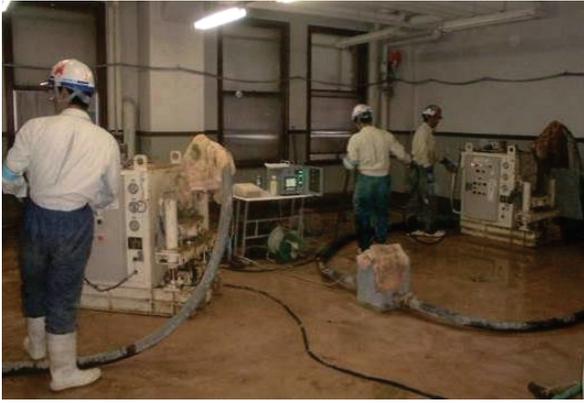


写真-19 建築物内部での施工状況

4.5.3 沈下修正および地盤強化

CPG 工法を有効上載圧の小さい地表付近に施工すると地盤隆起が発生する。この現象を利用して、沈下した構造物の計画的な沈下修正にも用いられている。沈下修正の一例として、2005年福岡県西方沖地震により沈下した便益施設の沈下修正および地盤強化事例について紹介する。写真-20に、地震後の便益施設の状況を示している。写真-21に、建物内部での施工状況を、図-13には、事前・事後の地表面変位量を示す。



写真-20 地震後の便益施設



写真-21 建物内部での施工状況

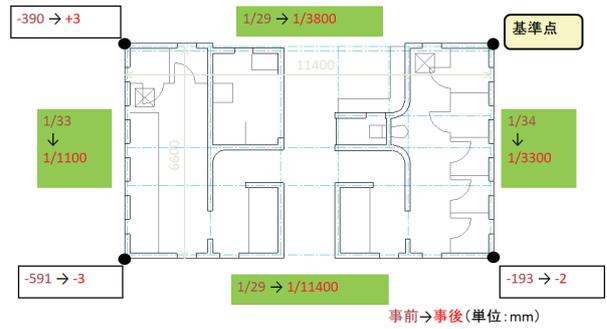


図-13 事前・事後の地表面変位量

5. まとめ

本論文は、供用中の既設構造物直下に CPG 工法を用いた液状化対策事例について述べた。その結果、いずれの施工においても確実な効果が認められた。

リニューアルにより既存設備の耐久性向上をはかる事例は、昨今の経済環境を反映して急増している。本論文がこうしたケースの参考となれば幸いである。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、みらい建設工業株式会社、三信建設工業株式会社ならびに東興ジオテック株式会社の方々には写真や図の提供等、多大のご協力を頂いた。記して謝意を述べさせていただきます。

参考文献

- 1) 一般社団法人沿岸技術研究センター：液状化対策としての静的圧入締固め工法技術マニュアルーコンパクショングラウチング工法ー，pp.1～230，2013.
- 2) 山口孝一：滑走路および誘導路の液状化対策-コンパクショングラウチング工法の適用事例，基礎工，Vol.34，No.4，pp.55～57，2006.
- 3) 白根公成：東京国際空港における誘導路地盤改良(CPG 工)工事，土木施工，Vol.50，No.4，pp.60～66，2009.
- 4) 上村哲也・小西武・花田哲：コンパクショングラウチング工法(CPG 工法)における海上台船施工-富田港地区護岸(補強)工事一，土木技術，Vol.61，No.9，No.9，pp.22～28，2006.
- 5) 足立雅樹・渡邊英雄・入澤一明・斎藤正幸：曲線ボーリングを併用した静的圧入締固め工法の液状化対策事例，土木施工，Vol.55，No.9，pp.76～79，2014.
- 6) 伊勢本昇昭・金子治：歴史的建造物の保存・再生のための液状化対策事例(横浜税関本館)，基礎工，Vol.34，No.4，pp.62～64，2006.

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

EXPERIMENTAL STUDY ON IMPROVEMENT OF PROTECTABILITY AND ENDURABILITY OF PROTECTIVE STRUCTURES BY PREPACKED METHOD

市野宏嘉*

ICHINO Hiroyoshi

* 博（工）防衛大学校 システム工学群建設環境工学科 准教授（〒162-0845 東京都新宿区市谷本村町4-1）

キーワード：プレパックド固化体、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、その隙間にセメントと細骨材を主成分とするプレミックス材と水を混合したモルタルを流し込み、コンクリートに類似した固化体を得る「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挙げられる。

本研究も含めて一連の研究では、プレパックド固化体を用いた各種の防護構造物の設計法の確立を目的とし、プレパックド固化体の力学的な性質の把握、プレパックド固化体が衝撃的な作用を受けた場合の性能の検討を行っている。これによって各種の防護施設の抗たん性を向上させる資を得るものである。ここでは、プレパックド固化体が爆発を受けた際の損傷について実験により調べた成果の一部を報告する。

2. 実験方法

2.1 プレパックド固化体の製造

本研究で使用したプレパックド固化体は、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、水、砂、混和剤などで構成され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り、プレパックドコンクリートあるいはTwo-stage concrete の一種といえる。

本研究で使用したプレパックド固化体の配合を表-1に示す。表-1に示すうち、水以外の材料をあらかじめ混合したもの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、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

実験にあたり、実験場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50、60、80、100および120mmとし、D10鉄筋を試験体の外周に配置した。粗骨材には最大寸法20mm、最小寸法10mmの砂岩碎石を用いた。試験体と同ロットの円柱試験体の一軸圧縮強度は17.6N/mm²または24.9N/mm²であった。試験体の爆破にあたっては、直径/高さ=1の円柱形に成型したコンポジションC4爆薬を図-2に示す位置に設置し、6号電気雷管により起爆した。爆薬の質量は板厚により変化させ、6~60g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、部材には局所的な破壊が生じる。図-3に示すように、爆発面（表面）側にはクレータと呼ばれる損傷が生じる。板厚はそのまま爆薬量を増すと、爆発面と反対側（裏面）にスポールと呼ばれる損傷が生じ、さらに爆薬量を増すとクレータとスポールが連続して板に貫通孔が生じる。本研究では、局所破壊の性状を観察するとともに、クレータおよびスポールの直径および深さを計測した。直径は4箇所計測し、その平均値で議論する。

表-1 プレパックド固化体の配合

水結合材比 W/C	単位量(kg/m ³)				
	水 W	結合材 C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 M
0.53	170	320	478	1455	1.93



図-1 試験体の製造

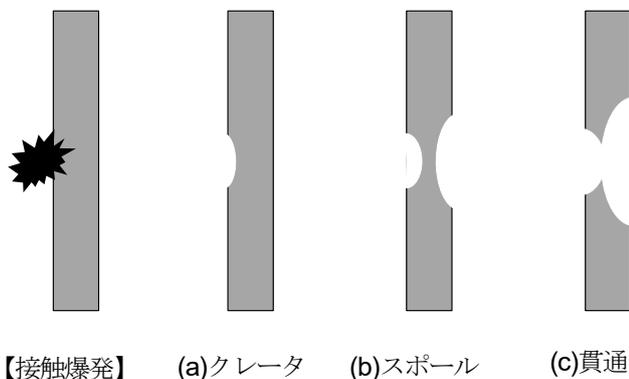


図-3 接触爆発による局所的な破壊の例

3. 実験結果

3.1 実験後の試験体の外観

図-4~6 に、板厚 100mm の試験体を爆薬 20g、40g および 60g で爆破した際の外観を示す。爆薬量 20g の場合、試験体の表面にクレータが生じ、裏面のスポールは生じなかった。ただし、断面を見ると、試験体内部の裏面付近では粗骨材とグラウト材の界面でひび割れが生じていた。すなわち、試験体の裏面にスポールは生じなくとも、内部では損傷が進展していたことがわかる。なお、切断中に裏面の爆薬直下の位置付近で粗骨材が剥離して脱落したため、図中の断面の写真では試験体の裏面の一部が欠損している。爆薬量が 40g の場合、試験体の裏面にも顕著なスポールが生じた。図のクレータを観察すると、爆発による高温・高圧の作用でグラウト部分が白く変色して粉末状となるとともに、粗骨材が割れ、あるいはグラウト材から剥離していた。スポールを観察すると、粗骨材の割れによる損傷も認められるが、スポールの大

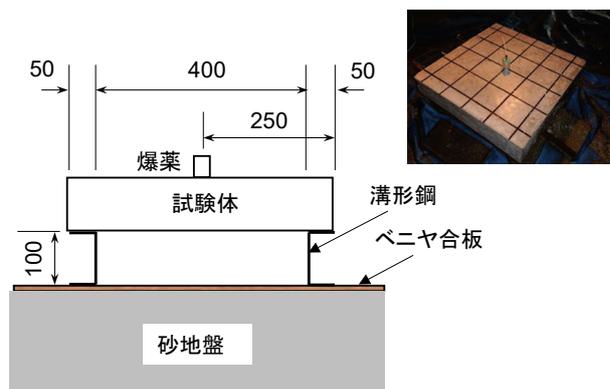


図-2 実験の概要

部分は粗骨材とグラウト材との剥離によって生じていた。プレパックド固化体は、あらかじめ粗骨材を詰めた状態でグラウト材を充填して製造する。このため、固化した後も粗骨材相互の接触点が諸所に存在している¹⁾²⁾。これらの接触点ではグラウト材による付着力が得られ難い。爆発によって固化体内部に引張応力が生じると、この接触点を起点として粗骨材とモルタルの界面に沿ってひび割れが進展して³⁾、スポール破壊が進むと考えられる。爆薬量を 60g に増すと、クレータとスポールが接続して貫通孔が生じた。さらに、板全体の曲げにより試験体が分割されるほどの破壊が生じた。

3.2 局部破壊の直径と深さ

図-7、8 に、クレータおよびスポールの直径と深さと爆薬量との関係を試験体の厚さ別に示す。図より、クレータの直径および深さは、概ね爆薬量の大きさに依存する。たとえば、爆薬量を 30g から 40g に増大させた場合、試験体の厚さが 100mm では、クレータの直径が 141mm から 163mm に増大する。試験体の厚さが 120mm の場合には、同様に 151mm から 164mm に増大する。クレータの直径および深さに及ぼす試験体厚さの影響は顕著ではなく、特にクレータの直径のグラフは試験体の厚さに関わらずほぼ重なっている。

図-9、10 に、スポールの直径および深さと爆薬量との関係を試験体の厚さ別に示す。スポールの直径および深さは爆薬量の増大に応じて大きくなる。クレータの場合と異なり、スポールの直径および深さは、試験体の厚さの影響をも受ける。たとえば、爆薬量を 30g から 40g に増大させた場合のスポールの直径は、試験体の厚さが 100mm の場合、91mm から 241mm に増大する。試験体の厚さが 120mm の場合は、0mm から 76mm に増大する。スポールの直径と深さは、クレータと異なり 10g 程度の爆薬量の増大で損傷の顕著な拡大が生じる。爆薬量をパラメータとして実験を行い、ある爆薬量でスポールがいったん生じると、以後は少量の爆薬量の増大でスポールが顕著に拡大する。これは前節で述べたようなプレパックド固化体におけるスポールの特徴、すなわち、

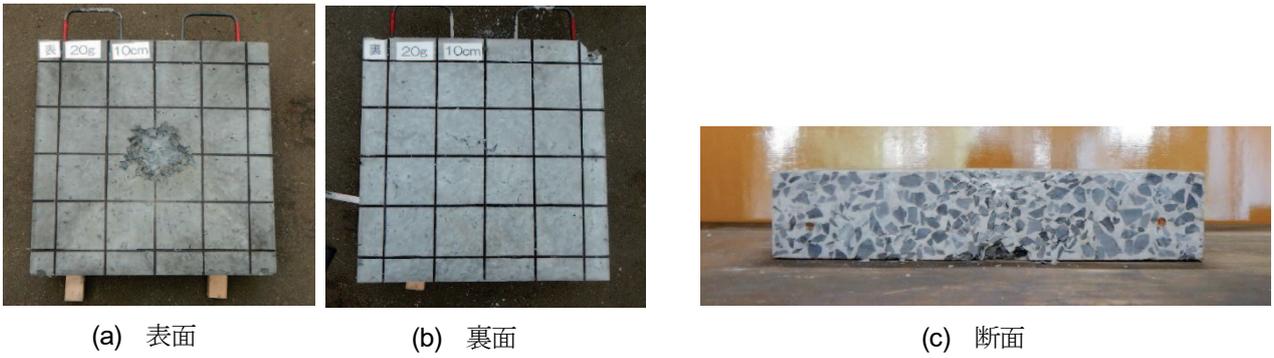


図-4 板厚 100mm 爆薬量 20g での結果

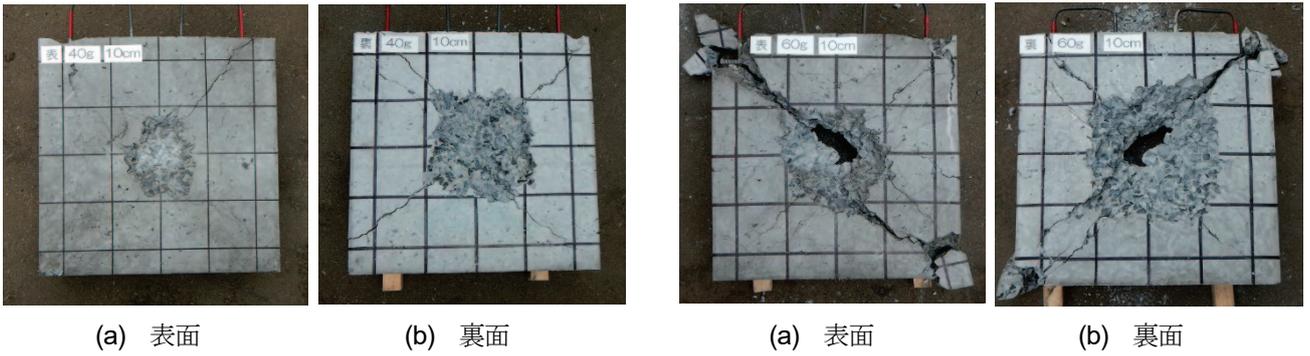


図-5 板厚 100mm 爆薬量 40g での結果

図-6 板厚 100mm 爆薬量 60g での結果

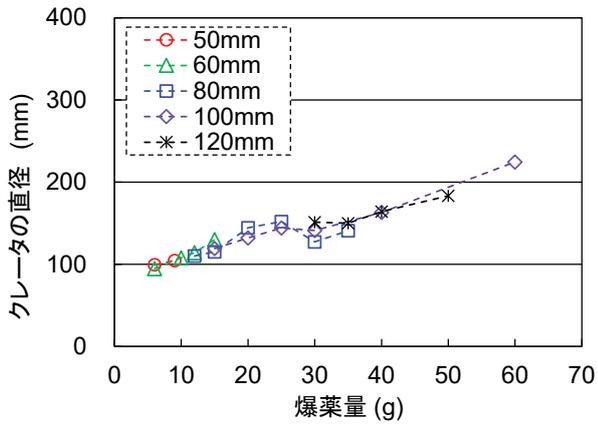


図-7 クレータ直径と爆薬量との関係

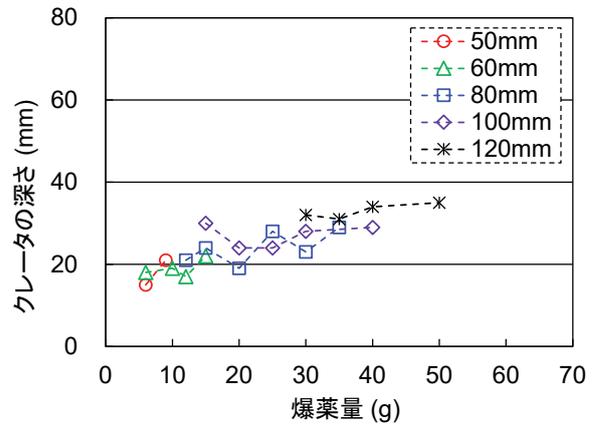


図-8 クレータ深さと爆薬量との関係

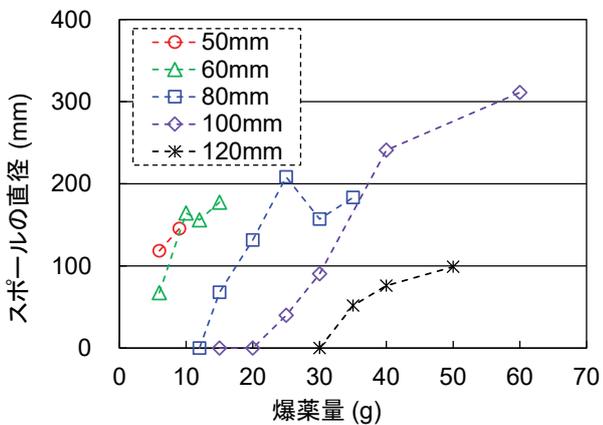


図-9 スポール直径と爆薬量との関係

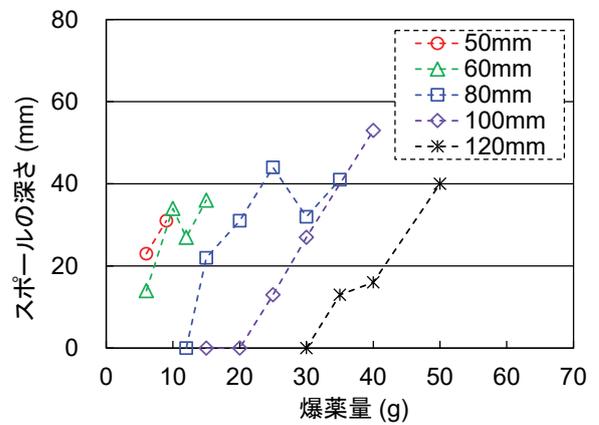


図-10 スポール深さと爆薬量との関係

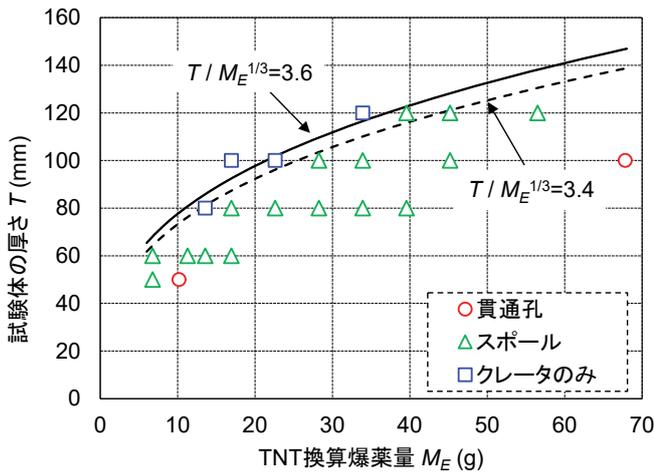


図-11 スポールの発生限界条件

粗骨材とモルタルの界面に沿ったひび割れの進展に起因すると考えられる。また、試験体の厚さが大きいほど、同等の爆薬量でもスポールの直径と深さは小さくなる。これは、スポールが試験体の裏面における圧縮応力波の自由端反射により試験体内に引張応力が発生して生じることから、試験体の厚さが大きいほど試験体の裏面に到達する応力波の減衰も大きくなるためであると考えられる。

4. プレパックド固化体のスポール発生予測

プレパックド固化体で構築した壁部材に対して壁の外側から爆発を受けた場合、壁の内側を防護するためには壁部材のスポールの発生を抑制することが重要である。このためには、スポールが発生する限界、すなわち「スポール限界」を予測して、壁厚を設計することが必要となる。ここでは、想定する爆薬量と部材の厚さからプレパックド固化体のスポールの発生限界を評価することを考える。

3.での検討により、スポールの発生は爆薬量に加えて試験体の厚さの影響を受けることがわかった。したがって、スポールの発生限界を試験体の厚さを爆薬量の3乗根で除した関数である $T/M_E^{1/3}$ 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 C4 爆薬では、文献3)に示された各爆薬の爆発エネルギーから換算し、 $M_E=1.13 \times M$ である。

各実験におけるクレータ、スポール、貫通孔発生の別と試験体の厚さ T 、TNT 換算爆薬量 M_E との関係を図-11に示す。図中には、 $T/M_E^{1/3}=3.4$ および $3.6 \text{ cm/g}^{1/3}$ を表す曲線を併記した。図-11から、 $T/M_E^{1/3}=3.4 \text{ cm/g}^{1/3}$ ではスポールが生じる場合と生じない場合があり、 $T/M_E^{1/3}=3.6 \text{ cm/g}^{1/3}$ 以上であれば、スポールが生じない。すなわち、プレパックド固化体でスポールが生じるかどうかの限界は、 $T/M_E^{1/3}=3.4 \sim 3.6 \text{ cm/g}^{1/3}$ の範囲内にある。安全側に評価すれば、プレパックド固化体におけるスポール限界は、 $T/M_E^{1/3}=3.6 \text{ cm/g}^{1/3}$ となる。

一方、森下ら⁴⁾は、コンクリートにおけるスポールが $T/M_E^{1/3}=3.6 \text{ cm/g}^{1/3}$ で発生し始めるとしている。したがって、スポールが発生する限界において、プレパックド固化体の耐爆性能はコンクリートとほぼ同等であるといえる。

5. おわりに

本稿では、プレパックド固化体が爆発を受けた際の損傷について実験により調べた成果の一部を報告した。得られた主要な知見を以下に要約する。

- (1) プレパックド固化体のスポールの特徴として、主に粗骨材とグラウト材が剥離するような損傷状態を示し、試験体の内部にもこのような剥離による損傷が生じた。
- (2) プレパックド固化体のクレータの直径および深さは、試験体の厚さにかかわらず爆薬量の増大に応じて増大する。一方、スポールの直径および深さは、爆薬量の増大に応じて増大し、試験体の厚さが大きいほど小さくなる。
- (3) プレパックド固化体の接触爆発時におけるスポール限界は、 $T/M_E^{1/3}=3.6 \text{ cm/g}^{1/3}$ とすると安全側に評価できた。これは、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った。

参考文献

- 1) O'Malley, J. and Abdelagader, H. S.: Investigation into the Viability of Using Two-Stage (Pre-Placed Aggregate) Concrete in an Irish Setting, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, pp.215-222, 2009.
- 2) Najjar, M. F., Soliman, A. M. and Nehdi, M. L.: Critical overview of two-stage concrete: Properties and applications, Construction and Building Materials, Vol.62, pp.47-58, 2014.
- 3) 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.
- 4) 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.

「防災・環境」

「水」の視点から見た避難所（Shelter）の生活の質に関する課題と対策案
～「給水支援」「入浴支援」との連携～

Challenges and countermeasures related to the quality of life in shelters from the perspective of “water”
～Cooperation with "water supply support" and "bathing support"～

中根圭介*, 栗田恵子**
NAKANE Keisuke and KURITA Keiko

*（筆者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
**（筆者2）コアラボ代表、放送大学大学院文化科学研究科・修士選科生

キーワード：生活用水、災害、避難所、足湯、ろ過、災害関連死
(Living water, Disaster, Shelter, Footbath, filtration, disaster-related deaths)

1. はじめに

我が国では、近年自然災害が頻発している。この災害に遭った人々は、長期にわたる避難生活が避けられないものとなっている。

著者らは昨年の防衛施設学会年次フォーラムで、十分な生活用水、特に温水の供給は不便な生活の解消のみならず、被災者の健康確保、ひいては災害関連死の低減、復興の早期化などに、有効な一法であると報告を行った。¹⁾ 今回、避難生活における「水」、なかでも避難所における良好な生活環境の確保に寄与する「生活用水」に焦点をあて、その有効性を検討した。

なお、避難所は Shelter と訳されるが、一般に防護シェルターのイメージがある「緊急一時避難施設：ミサイル攻撃等の際に爆風等からの直接の被害を軽減するための一時的な避難先として有効なコンクリート造り等の堅ろうな建築物や地下施設（地下駅舎、地下街、地下道等）²⁾ は、滞在時間を数時間程度と想定しているため、本論文の「避難所」には含まないものとする。

(1) 先行調査

避難所で必要とされる「水」について、先行する知見を整理する。

a) 政府の取組み

政府の方針として「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4年4月改定）」には、図-1 に示すように飲料水および生活用水対策の重要性が明記されている。³⁾

4 避難所における備蓄等

(1) 食料・飲料水の備蓄

指定避難所として指定した施設には、あらかじめ応急的に必要と考えられる食料・飲料水の備蓄に努めること。また、指定した避難所に食料・飲料水を備蓄しない場合は、指定避難所が開設された場合に備えて、食料・飲料水の供給計画を作成すること。（以下略）

(2) その他備蓄品の備蓄等（略）

(3) 生活用水の確保

飲料水の他に、トイレや避難所の清掃、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。命の継続に不可欠な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、衛生的な水を早期に確保できるようタンク、貯水槽、井戸等の整備に努めることが望ましいこと。

図-1 避難所における備蓄等³⁾

また同取組指針では、避難所の機能として「被災者の避難所における生活環境の整備に必要な措置を講ずるため、(略)入浴及び洗濯の機会確保(略)」するため以下のように洗濯設備、入浴・シャワー設備

2 避難所の設置と機能整備

(2) 指定一般避難所の機能

①～⑥略

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、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、子どもの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ずること。

ア～ウ 略

エ 洗濯機・乾燥機、洗濯干し場

オ 仮設風呂・シャワー

以下略

⑧ 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-2 避難所の機能整備³⁾

の整備や、交流の場としての「足湯」の提供など、生活用水の提供のケースが具体化されている。(図-2)。

b) 指定避難所の防災機能設備等の確保状況に関する調査結果⁴⁾

内閣府が令和5年7月に公表した全国約82,000の指定避難所における、飲料水と生活用水の用途の一つであるトイレ洗浄水に対する対策の整備状況を表-1に示す。

表-1 指定避難所の機能整備⁴⁾

飲料水対策	確保している指定避難所数	指定避難所数(82,184)に対する割合
飲料水の確保対策済み	61,488	74.8%
うち耐震性貯水槽やプールの浄水装置、井戸等を指定避難所の敷地内に保有	10,361	12.6%
うちペットボトル等の備蓄により確保	49,403	60.1%
うち協定等による優先利用により確保 ※3	27,944	34.0%
断水時のトイレ対策済み	58,934	71.7%
うちマンホールトイレを設置	7,763	9.4%
うち断水時にプールの水や雨水等を洗浄水として使用できるトイレを設置	3,837	4.7%
うち携帯トイレや簡易トイレ等の備蓄により確保	50,383	61.3%
うち協定等による、簡易トイレや仮設トイレ等の優先利用により確保	23,231	28.3%

上記調査によれば避難所において断水時の飲料水の確保対策済みは74.8%、トイレ対策済は71.7%となっている。

しかし、十分な水量の確保が必要な際に学校プール等を利活用できる浄水装置等の整備率は飲料水用で12.6%(飲用井戸利用を含む)、生活用水(トイレ洗浄水)用では4.7%にすぎない。

c) 避難所となる公立学校施設の防災機能に関する調査結果⁵⁾

同様に文部科学省が令和5年7月に公表した全国約29,800の指定避難所に指定された公立の小中学校・高校・特別支援学校における、飲料水と生活用水の用途の一つであるトイレ洗浄水に対する対策の整備状況を表-2に示す。

前述 b)のように整備率をまとめると、飲料水の確保対策済みは80.8%、トイレ対策済は73.6%となっている一方、浄水装置等の整備率は飲料水用で28.7%、生活用水(トイレ洗浄水)用で8.5%(ともに井戸利用を含む)にすぎない。

表-2 避難所に指定されている公立学校の防災機能設備等の確保状況⁵⁾

公立学校の飲料水・トイレ対策	①小中学校			②高等学校		
	避難所指定学校数(校)	確保学校数(校)	割合(%)	避難所指定学校数(校)	確保学校数(校)	割合(%)
飲料水の確保対策(全体)	26,504	21,771	82.1	2,764	1,868	67.6
うち耐震性貯水槽やプールの浄水装置、井戸等を敷地内に保有		7,748	29.2		674	24.4
うちペットボトル等の備蓄により飲料水を確保		16,956	64.0		1,449	52.4
うち協定等による優先利用により確保		8,552	32.3		414	15.0
断水時のトイレ対策(全体)	26,504	20,187	76.2	2,764	1,420	51.4
うちマンホールトイレ設置		5,478	20.7		167	6.0
うち断水時にプールの水やプール等の洗浄水として使用できるトイレを設置		2,340	8.8		171	6.2
うち携帯トイレや簡易トイレ等によりトイレ対策を確保		17,384	65.6		1,065	38.5
うち協定等による簡易トイレや仮設トイレ等の優先利用により確保		6,648	25.1		332	12.0
	③特別支援学校			①～③合計		
	避難所指定学校数(校)	確保学校数(校)	割合(%)	避難所指定学校数(校)	確保学校数(校)	割合(%)
公立学校の飲料水・トイレ対策						
飲料水の確保対策(全体)	588	470	79.9	29,856	24,109	80.8
うち耐震性貯水槽やプールの浄水装置、井戸等を敷地内に保有		161	27.4		8,583	28.7
うちペットボトル等の備蓄により飲料水を確保		421	71.6		18,826	63.1
うち協定等による優先利用により確保		98	16.7		9,064	30.4
断水時のトイレ対策(全体)	588	373	63.4	29,856	21,980	73.6
うちマンホールトイレ設置		46	7.8		5,691	19.1
うち断水時にプールの水やプール等の洗浄水として使用できるトイレを設置		38	6.5		2,549	8.5
うち携帯トイレや簡易トイレ等によりトイレ対策を確保		325	55.3		18,774	62.9
うち協定等による簡易トイレや仮設トイレ等の優先利用により確保		72	12.2		7,052	23.6

2. 飲料水と生活水の「適材適所」

1) 飲料水と生活水のちがいが

避難生活に欠かせない水であるが、前記のように利用目的によって「飲料水」＝「給水支援」と「生活用水」⇔「入浴支援」に大別される。それぞれの特長等を表-3にまとめる。

両者の大きな違いとして、水質(清浄度)、必要量、調達方法がある。

水質面では飲料水は健康上の安全性のため水道法により災害時にも8項目の厳格な基準が設けられている(平常時は51項目)が、生活用水には規格等は無く、用途に応じて独自に管理することとなっている⁶⁾。

必要量としては、たとえば200人が滞在する避難所では3L/人・日×200人=600L/日、3日(72時間)で1,800Lとなり、2リットルのペットボトル換算で900本に相当する。

一方、生活用水については内閣府作成「避難所運営ガイドライン」が参考にして「スフィア基準(Sphere Standard):人道憲章の枠組みに基づき、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」によれば、「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(L)が適切な量であるかもしれない。」との示唆があり、これを準用すれば1人1日50L/人・日×200人=10,000L/日、3日で30,000L=約30トンが必要となる。⁷⁾

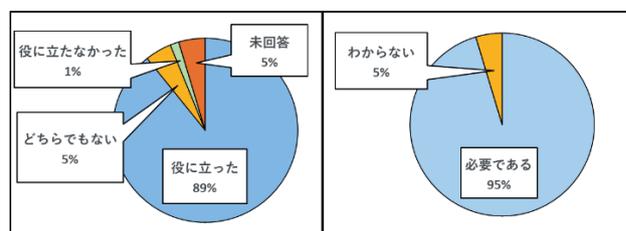
このように生活用水の確保のためには、容器による備蓄や給水車(積載水量2~4トンが主流)での搬送では制約が多く、別に水源との組み合わせを考慮する必要がある。

表-3 飲料水と生活用水の比較

	飲料水	生活用水
根拠法令等	水道法	明確な規定なし
水質基準	災害時： 濁度、遊離残留塩素、大腸菌、pH、味など8項目 ⁶⁾ (平常時は51項目)	参考として、浴槽水、遊泳プール水の基準では、濁度、菌類、有機物量、pHなど4~8項目
主な用途	飲用、料理等	洗濯、洗濯、風呂・シャワー、掃除・洗い物、手指衛生等
特長	・安全で衛生的な水質 ・1人1日3リットル目安	・肌に触れる程度の安全性が必要 ・1人1日50リットルとの目安あり ⁷⁾
調達の手やすさ	ペットボトルでの備蓄、給水車での配送が可能	井戸、貯水槽、プール、池等大容量の水源が必要



写真2 「ぼうさいこくたい2023」での来訪状況



Q1) 本日の非常用生活水浄化装置の実演は役に立ちましたか?

Q2) 災害時に非常用生活水浄化装置は、必要だと思いますか?

図-3 アンケート結果(1)

2) 飲料水と生活用水のニーズ調査結果

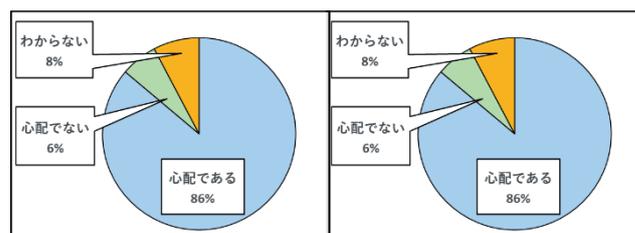
著者らは令和5年9月17~18日に神奈川県横浜市で開始された「ぼうさいこくたい2023」(主催:防災推進国民大会2023実行委員会〔内閣府、防災推進協議会、防災推進国民会議〕)に生活用水の供給装置を出展し、浄化処理を実演した。(写真-1, 2)

2日間で視察者500~600名が当ブースに来場し、その人たちに避難生活の水に関するアンケートを実施し、65名からの回答を得た。



写真-1 ぼうさいこくたい2023 出展の様子

アンケート質問と回答割合は以下のとおりである。



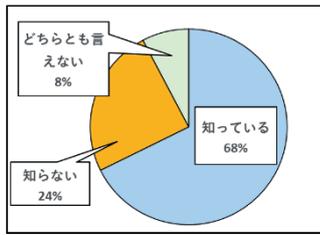
Q3) 飲料水の備蓄は心配ないですか?

Q4) 災害時の生活用水(トイレ、洗濯の水、シャワーなど)について、心配していますか?

図-4 アンケート結果(2)

この結果から生活用水についても飲料水と同じ割合の人が供給に不安を感じていることがわかった。

また会場で実演した装置を使っでの供給は有効と理解されたようである。



Q5) 災害時に生活用水が多量にあれば、食中毒などを含む感染症予防に役立つことをご存じでしたか？

図-5 アンケート結果(3)

飲料水の確保率は7~8割であるのに対し、生活用水を確保できる避難所は1~3割と推定され、飲料水と同じ程度の必要性が感じられている生活用水供給とのギャップが課題と考えられる。

3. 医療の立場からの意義

筆者2は、災害医療救護通信エキスパート、医療安全管理学の研究者である。昨年と同様に災害時の避難所生活の質の向上のために、特に生活用水の確保の意義について、医療の立場から述べる。

内閣府の資料によると、高齢者などの災害関連死の原因は、避難所生活で様々なストレス、(慣れない環境や特に水のないストレス; トイレを我慢することや肺炎等の感染症)や基礎疾患の悪化など様々な原因があると報告されている⁸⁾。

被災者の良好な避難所生活を送るためのストレス軽減を行う一方法として入浴があげられる⁹⁾。

入浴には、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^{10), 11)}。

しかし、大量の生活用水の確保が厳しい場合、足浴(俗にいう足湯)が効果的である。足浴は、看護や介護でシャワーや入浴ができない場合の代替え法として用いられる手軽な方法である¹²⁾。特に女性の冷え性などの改善に有効であるとされている¹³⁾。

また避難所での感染症の発生リスクを下げるためには、感染原因や経路を遮断することである。

例えば、調理の前に手を洗うことは、食中毒予防に効果的である。特に下着や衣類を洗濯することで清潔保持となり、避難所での感染症防止効果が期待できる¹⁰⁾。

4. 生活用水に求められることと対応策

1) 用途による必要事項

生活用水の特徴を理解し効率的に提供するため、生活用水に求められることを表4に整理する。

2) 大量水の確保

生活用水は、1日10トン規模の水量確保が必要となる。給水車は飲料水に限定した場合でさえも、大幅に不足する見込みが報告されている¹⁴⁾ので、水源が避難所近隣で確保できることが望ましい。

表4 用途と要求事項

用途	目的	必要事項
・風呂・シャワー ・乳幼児の沐浴	感染症対策、低体温症防止、ストレス低減	・お湯が必須 ・浴槽水基準並みの水質が必要
・足浴(足湯)	低体温症防止、ストレス低減	・同上 ただし足にビニール袋をかぶせることで水質浄化は省略可
・洗濯 ・掃除	感染症対策、生活環境回復	・浴槽水基準並みの水質が必要

3) 安定供給

長期にわたり安定的に供給できるために、以下が求められる。

- ① 処理水コストが安価なこと
- ② 消耗品が容易に入手できること(短納期、低コストなど)
- ③ 使い勝手が良いこと(操作が容易、機動性が高い、動力源が確保しやすい、など)

4) 対策と実施例

これらの必要なことを解決するため、本年度に実施したことは、以下のとおりである。

① シャワー給湯の確認

組立式シャワールームを製造するメーカーと協力し、浄化した水を灯油ボイラーで加温しシャワーとして供給できることを確認した。



写真3 組立図シャワーブースとの連携

② 足浴の提供確認

H大学で開催された、避難生活の代替案として大学キャンパスで野営する実証実験「CAMP in Campus」に参加し、生活用水をLPガス給湯器で加温し、足浴を提供した。

200リットル程度のビニールプールに40℃前後の湯を安定的に供給でき、参加者に安らぎを与えることができた。



写真4 LPガス給湯機を用いた足浴提供のセット



写真5 足浴での明るい表情

③ 操作の容易化のための自動化

避難所ボランティアとして高校生が操作を受け持ってくれることを想定し、非常用生活用水浄化装置を自動化し、操作を簡易化させた。

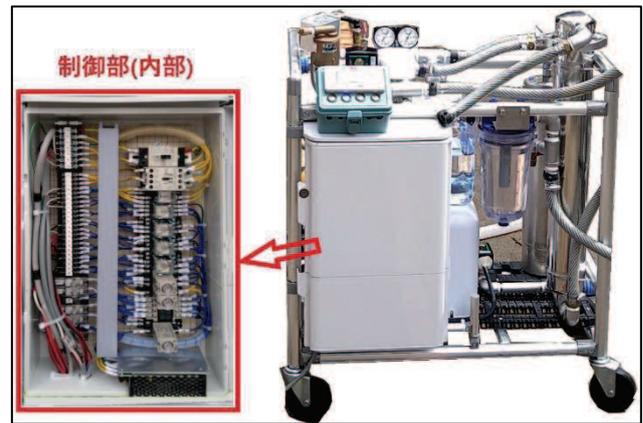


写真6 自動化装置の外観



写真7 操作スイッチ

5. 現時点の評価

1) 装置面の評価

1年前の執筆で、温水供給が必須と当時の課題を書いた。

この1年で、試行錯誤はあったものの灯油ボイラー、LPガス給湯器との組み合わせで、適温の湯を供給することが実証できた。

また、操作を簡易化することができ、専門性のない避難者でも扱える装置に改善ができた。

2) 医療の視点からの評価

避難者の感染症予防、低体温症予防、ストレス低減に対して湯の供給は不可欠であり、今回、各種給湯器と組み合わせることで「きれいなお湯」が得られることは「入浴支援」をサポートする有意義な方法と考える。

6. 結論

生活用水は飲料水と同程度に高い関心をもたれているが、その確保率は飲料水に比べ格段に低い。

本研究では「避難所における良好な生活環境の確保」につながる生活用水の温水化について、シャワー、足浴

という2つの用法を実証し良好な結果を得た。

また、避難所でだれでも扱えるよう、自動制御による簡易操作が可能な改良機を完成させた。

7. おわりに

令和6年正月早々に、石川県能登半島を中心として、M7級の地震（「令和6年能登半島地震」）が発生した。著者らは、令和6年1月2日に被災地支援のため本装置とLPガスの足浴セットを持ち込み、現在は支援体制を図っている。

NHKテレビの防災放送では、厳冬下の避難所での厳しい生活が連日のように報道されている。被災2日目には、給水車の前にポリタンクを持って並ぶ被災者の長い列があった。同じころ自衛隊の給水支援車が現地に向かうとのニュースが流れた。

アナウンサーが、被災者の人に話しかけるように、自宅や避難所での衛生管理や過ごし方（食中毒や感染予防のための手指衛生、トイレのこと、水分補給のこと、首や足を冷やさないことなど）を伝え、最後に、目をつぶるだけでもいいので横になって休んでくださいと伝えていた。

このアナウンスを聞いて、中越震災や東北震災の教訓は、避難所生活の質の向上に生かされてきていると感じた。

微力だが、私たちが生活用水を供給する機器と給湯装置の組み合わせた実用化を進めたことで、少しでも災害時の被災者の方々の避難生活を支えられると強く感じている。

7. 謝辞

本装置の開発を遂行するにあたり、多くのアドバイスを頂いたNPO法人貯水タンク防災ネットワーク(Chonet)様および装置化の協力をいただいたクリタック株式会社に、ここに深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中根圭介他：災害時の避難生活を支援する「非常用生活用水浄化装置」の開発，一般社団法人防衛施設学会年次フォーラム2023 論文集 33-40，2023
- 2) 内閣官房：国民保護ポータルサイト，<https://www.kokuminhogo.go.jp/hinan/index.html>
https://www.kokuminhogo.go.jp/pdf/2022_hinanSokushin.pdf (2024.01.05 閲覧)

- 3) 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4年4月改定)，<https://www.bousai.go.jp/taisaku/hinanjo/pdf/2204kankyokakuho.pdf> (2024.01.05 閲覧)
- 4) 内閣府政策統括官（防災担当）付 参事官（避難生活担当）消防庁国民保護・防災部防災課長：指定避難所における防災機能設備等の強化の推進について（通知），令和5年7月12日，https://www.fdma.go.jp/laws/tutatsu/items/230712_bousai1.pdf (2024.01.05 閲覧)
- 5) 文部科学省報道資料：避難所となる公立学校施設の防災機能に関する調査結果，令和5年7月12日，https://www.mext.go.jp/content/20230712-mxt_bousai-000030611_1.pdf (2024.01.05 閲覧)
- 6) 日本水道協会：震災等の非常時における水質試験方法（上水試験方法-別冊），2012.3
- 7) 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
- 8) 内閣府 HP：災害関連死事例集，https://www.bousai.go.jp/taisaku/hisaisyagyousei/pdf/jirei_r5_05_gaiyo.pdf (2024.01.05 閲覧)
- 9) 内閣府(防災担当)：避難所運営ガイドライン，2022.4 改定，https://www.bousai.go.jp/taisaku/hinanjo/pdf/2204hinanjo_guideline.pdf
- 10) 大規模自然災害の被災地における感染制御マネージメントの手引き：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，S1-77,2014
- 11) 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，2014.01，<https://core.ac.uk/download/196734737.pdf> (2024.01.05 閲覧)
- 12) 金子 健太郎：足浴が生体に及ぼす生理学的効果，日本看護技術学会誌 8(3), 35-41, 2009
- 13) 船藤 万誉：冷えを呈する若年女性に対する足浴後の保温の有効性の検証，看護理工学会誌 9(0), 201-210, 2022
- 14) 地震等緊急時対応特別調査委員会：応援体制検討小委員会報告書の解説（後編）
http://www.jwwa.or.jp/houkokusyo/pdf/ouentaisei/ouentaisei_kaisetsu_02_.pdf, (2024.01.05 閲覧)

有機フッ素化合物（PFAS）汚染土壌・地下水の処理技術の開発

DEVELOPMENT OF TREATMENT METHODS FOR PFAS-CONTAMINATED SOIL AND GROUNDWATER

日野良太*, 鎌田明秀*, 西川直仁*

HINO Ryota, KAMATA Akihito and NISHIKAWA Naohito

* 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, 原位置土壌洗浄, 化学処理

(PFAS, contaminated Soil and Groundwater; insolubilization treatment, in-situ soil washing, chemical treatment)

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）およびペルフルオロオクタン酸（以下、PFOA）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、末端がスルホン酸かオクタン酸の構造となっている。

環境中の PFOS および PFOA については、2020 年度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）（50 ng/L）が設定された。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 を含有し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で酸化剤の効果を促進する技術もある⁴⁾。その他にキャビテーションによる処理⁵⁾、活性炭による地下水の処理などが挙げられる⁶⁾。

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きた。また、一部の技術については、要検討項目に追加されたペルフルオロヘキサンスルホン酸（以下、PFHxS）を対象として検討を進めている。検討した技術は、より低コストな方法を目指し、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 の特性を考慮しながら検討した。

ここで、PFAS の地盤内における以下の特性を考慮した上で処理技術の開発を進めた。

①PFAS の多くが土壌から地下水に移行しやすいという特性⁷⁾を有する。

②PFAS で汚染された土壌の含有量を測定する際に、アルカリ条件下にすることで土壌から PFAS が剥離する⁸⁾。

本研究では、①に対して、汚染拡散防止対策である不溶化処理と地下水の流れを促進して土壌に吸着した PFAS を地下水へ移行・回収することで地盤を浄化する原位置土壌洗浄⁹⁾に対して適用可能性を検討した。また、②に対して、酸化剤とアルカリ資材を同時に添加し、アルカリ環境下で土壌から剥離した PFAS を液相中に移行させ、酸化剤で分解する化学処理について検討した。本稿では、各処理技術に関して模擬汚染土壌を用いた室内試験結果を報告する。

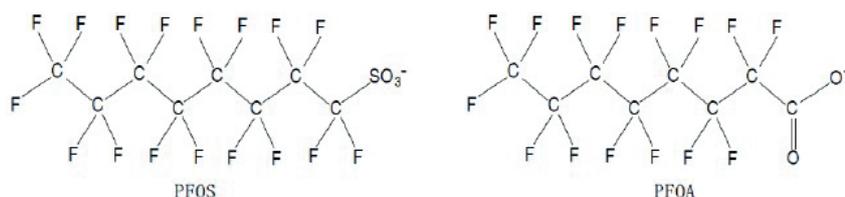


図-1 PFOS と PFOA の構造式（直鎖型イオン）¹⁾

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不溶化する現地不溶化処理と汚染土壌を掘削せずに不溶化する原位置不溶化処理(図-2)がある¹⁰⁾。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もしくは場外へ搬出する方法である。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¹¹⁾するか井戸や裸孔等から不溶化薬剤を浸透させるものである¹²⁾。

本研究では、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・積込などのトラフィシティ確保を考慮した。そこで、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、過去の事例もふまえて、難溶性のフッ化カルシウムに形態変化させて固化することによって不溶化処理を行う事例¹³⁾を参考として処理効果を高めるために吸着材として粉末活性炭を併用した場合の不溶化処理技術を開発した。

2.2 原位置土壌洗浄

原位置土壌洗浄は、注入井戸と揚水井戸をそれぞれ設置し、注入井戸から清水などを注入することで地盤内の地下水の流速を強制的に大きくする。地下水流れによってPFASで汚染された土壌からPFASを地下水へ移行することで、汚染された地下水を揚水井戸によって回収する技術である。

本技術は、土壌を掘削せずに稼働中の事業所等でも適用できるという長所があり、すでに汚染されているサイトにおいて濃度低減や敷地外への拡大防止に対しても適用可能である。類似した技術として現地で設置したプラントで掘削した土壌を水などで洗浄するものがある¹⁴⁾。当該技術は、一度に大量の土壌を処理することに利点がある一方で、プラント設置のために広大なサイトが必要となる。

本研究では、砂質系の土壌が多くを占めている場合において、清水のみを注入することによる原位置土壌洗浄に伴う土壌・地下水の浄化効果を確認した。

2.3 化学処理

化学処理は、地盤に井戸を設置して薬剤を注入する原位置処理と掘削土壌に薬剤を混合する現地処理がある。ここで、化学処理の留意点として、土壌のpH変化が挙げられる。土壌のpHが変化した場合、PFASの溶出挙動が異なると言われている⁷⁾。例えば、酸性域においては、土壌からPFASが溶出する土壌溶出量の低減は確認されるが、土壌に含まれたPFASの土壌含有量が低減していないことが挙げられる。そのため、地盤中のpHが変化することで土壌から再溶出する可能性もあるため、土壌溶出量だけでなく、土壌含有量の低下に伴うPFASの浄化を確認する必

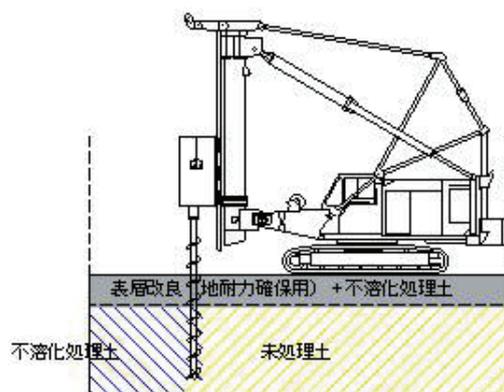


図-2 原位置不溶化処理 施工イメージ図

要があった。なお、既往技術⁴⁾において、土壌に吸着したPFASは、加温によって剥離しやすいという事例もある。

本研究では、地盤中をアルカリ環境にすることで土壌からPFASを液相に移行させた上で、同時に添加した酸化剤によって液相のPFASを浄化する技術を開発した。

3. 試験方法

3.1 模擬汚染土壌の作製

模擬汚染土壌は、所定量の土壌とPFASの試薬を用いて作製した。模擬汚染土壌は、土壌と所定濃度(合計300,000 ng/L、PFOS/PFOA/PFHxS:各100,000 ng/L)の溶液を振とうすることで作製した。ここで、検討技術によって振とう方法を変更した。不溶化処理に対しては、液固比10の条件において、環告18号の条件で24時間振とうした。一方、化学処理と原位置土壌洗浄に対しては、液固比2の条件において、92rpmにおいて4~5cmの水平振とうで5分間として、振とう後は7日間静置した。その作業を3回実施し、合計28日間養生した。振とうした後は、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)もしくは現地で採取した土壌を2mm未満に篩分けした。試薬は、WAKO製の純度95%を使用した。

3.2 不溶化処理

不溶化処理は、各種資材を混合および一定期間の養生を行った。資材は、カルシウム成分として消石灰、固化材およびカルシウム成分として高炉セメントB種もしくは半水石膏、吸着材として石炭殻を原料とした粉末活性炭を使用した。固化材に関しては、中性域での処理が望まれる場合の対応として半水石膏を使用した。ここで、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て決定した。

試験ケースを表-1に示す。模擬汚染土壌20gに対して所定のスラリー資材を混合し、屋内で7日間養生した後

に土壌の不溶化処理の効果を確認した。

強度発現試験は、不溶化処理と同様に2mm未満の真砂土および資材を使用した。ここで、強度発現の試料土は、2つの条件(飽和条件、不飽和条件)を想定して実施した。飽和条件は、地下水位以深をイメージして、試料土を水槽内で養生した。一方、不飽和条件は、地下水位位浅をイメージして、試料土を室内で養生する。7日間の養生後に、一軸圧縮強度を測定することで強度発現を確認した。

3.3 原位置土壌洗浄

原位置土壌洗浄は、カラム試験で適用可能性を確認した。カラム試験は、既往検討⁹⁾と同様の方法とした。試験イメージを図-3に示す。直径5cmの亚克力カラムに、高さが5cmとなるように汚染土壌もしくは非汚染土壌のいずれかを充填した。非汚染土壌は、真砂土および現地土をイオン交換水のみで振とうした試料である。充填土量は、表-2の湿潤密度から決定し、試料水を採取する頻度(PV)は、カラム内の間隙水の交換量とした。

試験では、対象とするカラム内の間隙水を汚染させるために模擬汚染地下水(各物質1,000ng/L)をカラム下部から浸透し、土壌の上部まで湛水して3日間静置した。その後、カラム下部から水道水を通水速度0.001cm/secで流した。カラムの上部から排出される浸出水を採取し、PV1~20でPFASを適時分析した。通水試験が終了した後に、カラムを解体して土壌の全量を用いて、土壌溶出量と土壌含有量を測定した。

3.4 化学処理

化学処理は、模擬汚染土壌に酸化剤およびアルカリ資材を混合し、一定期間の養生を行った。使用した資材は、酸化剤に過硫酸ナトリウム(SPS)、アルカリ資材に生石灰と消石灰を使用した。試験は、表-3の模擬汚染土壌(乾土)60gに対して水を27mL、20%溶液のSPSを9mL、生石灰か消石灰を9.6gで土壌に添加した。ここで、生石灰に関しては、水との水和熱によって土壌が昇温する。そこで、事前検討において添加量に応じた水和熱による土中温度の変化(70℃)が30分程度継続することを確認したため、資材の混合期間および恒温の期間(30分)は、試料体を恒温設備(ウォーターバス)内で養生した。その後は、室内で2週間養生した後に採取および土壌溶出量と土壌含有量の分析を行った。

3.5 分析方法

不溶化処理の土壌溶出量および原位置土壌洗浄の浸出水に対するPFOS/PFOAの分析方法は、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。一方、原位置土壌洗浄と化

表-1 不溶化処理の試験ケース

凡例名	消石灰	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	—	—	—	—	—
①	0.6	2.8	—	—	6
②	0.6	2.8	—	0.01	6
③	0.6	2.8	—	0.05	6
④	0.6	2.8	—	0.1	6
⑤	0.6	2.8	—	0.2	6
⑥	0.6	—	5.6	0.05	6.2
⑦	0.6	—	2.8	0.05	3.4

表中太枠：強度発現試験の実施ケース

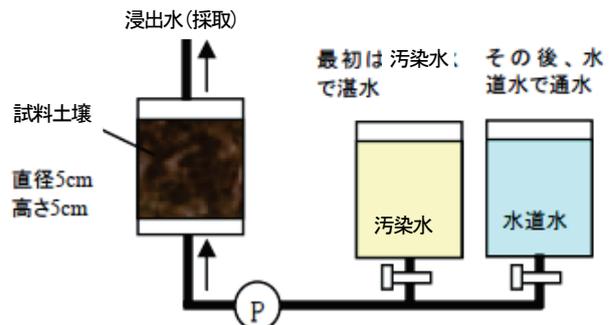


図-3 原位置土壌洗浄の試験概要図

表-2 原位置土壌洗浄の試料土

項目		単位	真砂土	現地土
土の粒度分布	2~75mm	%	11.9	0.6
	0.075~2mm	%	70.5	95.1
	0.005~0.075mm	%	10.4	3.0
	0.005mm未満	%	7.2	1.3
分類	—		礫混じり粘性土質砂	分級された砂
土粒子の密度		g/cm ³	2.73	2.72
湿潤密度		g/cm ³	1.87	1.96
間隙率		%	33.8	39.9
土壌溶出量	PFOS	ng/L	240	270
	PFOA	ng/L	170	220
	PFHxS	ng/L	220	140
土壌含有量	PFOS	ng/kg	1,800	1,700
	PFOA	ng/kg	1,600	2,000
	PFHxS	ng/kg	1,400	1,600

表-3 化学処理の試験ケース

試験ケース	酸化剤		アルカリ資材		温度
	種類	添加量	種類	添加量	
	—	g	—	g	℃
BL	—	—	—	—	20
SPS	SPS(20%)	9	—	—	20
SPS+生石灰	SPS(20%)	9	生石灰	9.6	70
SPS+消石灰	SPS(20%)	9	消石灰	9.6	20

学処理の土壌溶出量および土壌含有量は、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）⁸⁾を適用した。

4. 試験結果と考察

4.1 不溶化処理

図-4 と図-5 に試験ケース毎の土壌溶出量および BL に対しての抑制率の結果を示す。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 に対して PFOS が 64%、PFOA が 32%の抑制率となった。一方、消石灰と高炉セメント B 種に粉末活性炭を併用したケース②～⑤においては、粉末活性炭の混合率に応じて抑制率も高くなり、粉末活性炭の混合率が土量比の 0.05%のケース②でも BL に対して PFOS が 93%、PFOA が 90%の抑制率となった。粉末活性炭の混合率が土量比の 1%のケース⑤においては、BL に対して PFOS と PFOA のいずれも 99.9%の抑制率となった。以上のことより、粉末活性炭を少量混合することで、大幅な濃度低減を確認できた。

さらに、中性域の資材として半水石膏を用いた場合（ケース⑥、⑦）でも、同量の粉末活性炭を混合したケース③と同程度の不溶化効果を確認できた。また、処理土壌の pH（土壌環境分析法）は、ケース①が 12.4、ケース⑦が 7.8 であった。

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 2,306kN/m²、飽和条件で 1,326kN/m²、ケース⑦の不飽和条件で 165kN/m²、飽和条件で 205kN/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建設重機の作業地盤としては十分な強度を確保できることが確認した。

4.2 原位置土壌洗浄

原位置土壌洗浄の試験結果を図-6 から図-11 に示す。ここで、図-6 と図-7 は、非汚染土壌を用いた浸出水濃度の結果であり、図-8 と図-9 は、汚染土壌を用いた浸出水濃度の結果である。図-10 と図-11 は、汚染土壌の処理前後の土壌含有量の結果である。ここで、図中の 0ng/L (ng/kg) は、定量下限値 100ng/L (ng/kg) 未満を示している。

浸出水濃度の結果では、真砂土と現地土のいずれにおいても PV10 の通水量で大部分の PFAS がカラム内から除去されている。これは、汚染土壌の試験ケースでも同様の結果になっていることから、土壌に吸着した PFAS も液相へ移行することが示された。また、土壌含有量においても処理前後を比較すると PFAS が土壌から液相に移行することを確認できた。

そのため、本試験で用いた砂質系の土壌では、原位置土壌洗浄で土壌の間隙水に溶解および土壌に吸着している

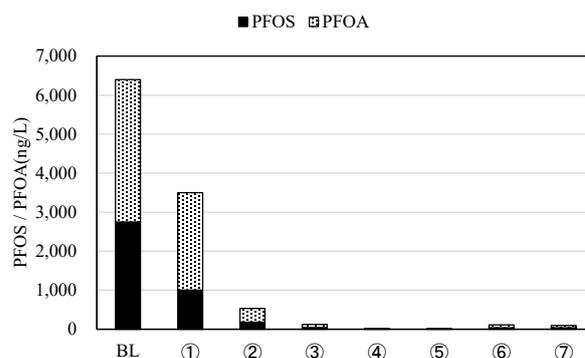


図-4 濃度変化 不溶化処理

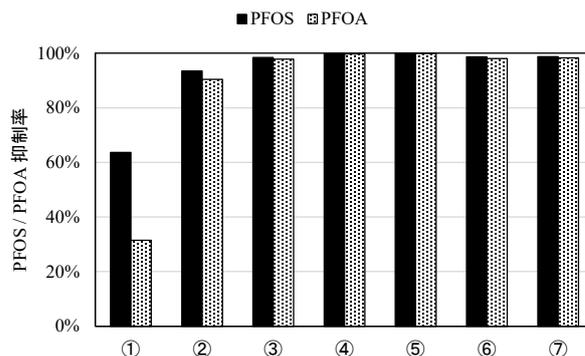


図-5 抑制率 (BL に対しての比率) 不溶化処理

PFAS を浄化できることが示唆された。

4.3 化学処理

化学処理の試験結果を図-12 と図-13 に示す。図-12 は、土壌溶出量の結果であり、図-13 は土壌含有量の結果である。化学処理に関しては、PFOS のみの試験結果を示す。PFOA に関しては、本処理方法で土壌含有量の低下が確認されなかった。ここで、PFOS の土壌溶出量は、BL の 630ng/L が SPS を混合することで 200ng/L まで低下し、SPS と生石灰もしくは消石灰を混合することで 100ng/L 程度まで低下することを確認した。一方、土壌含有量に関しては、BL の 11,000ng/kg が SPS を混合した場合でも 10,540ng/kg と濃度低下が微小であった。一方、SPS と生石灰を混合することで 7,800ng/kg、SPS と消石灰を混合することで 7,000ng/kg まで低下することを確認した。なお、生石灰の水和熱による浄化の促進に関しては、今回試験で確認されず、消石灰と同様にアルカリ環境下での浄化効果の向上となった。

本技術は、第 1 章の②に記載した通り、アルカリ環境下で土壌から PFOS が液相へ剥離することに伴い、土壌含有量が低下したと考えられる。一方、SPS のみの混合においては、酸化環境下において、分析時に土壌からの PFOS 溶出率が低減するため土壌溶出量が低い値となり、土壌から PFOS が溶出しなかったため土壌含有量が低下しない原因と考えられる。

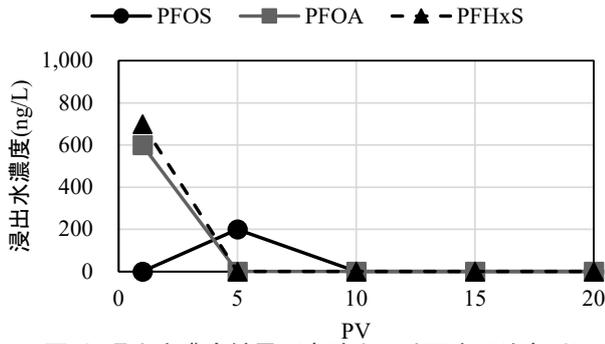


図-6 浸出水濃度結果 (真砂土、地下水汚染あり)

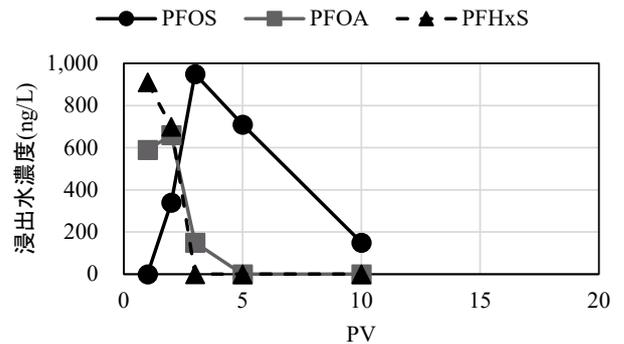


図-7 浸出水濃度結果 (現地土、地下水汚染あり)

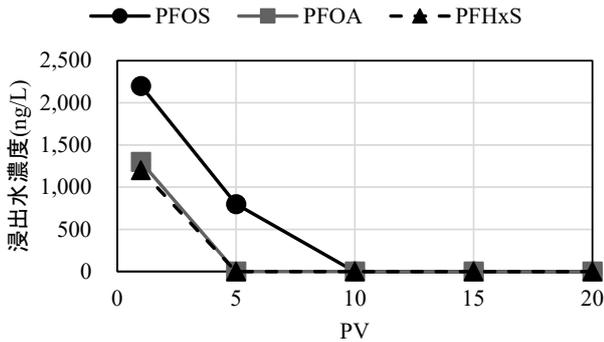


図-8 浸出水濃度結果 (真砂土、土壌・地下水汚染あり)

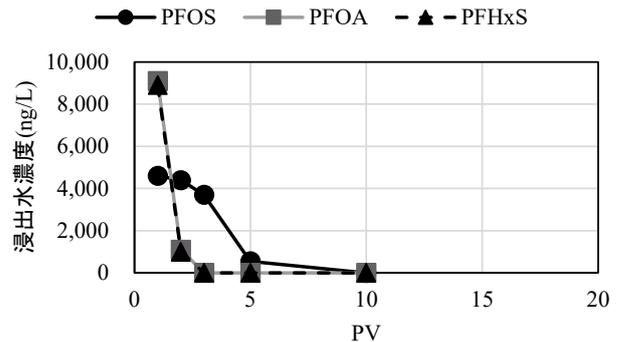


図-9 浸出水濃度結果 (現地土、土壌・地下水汚染あり)

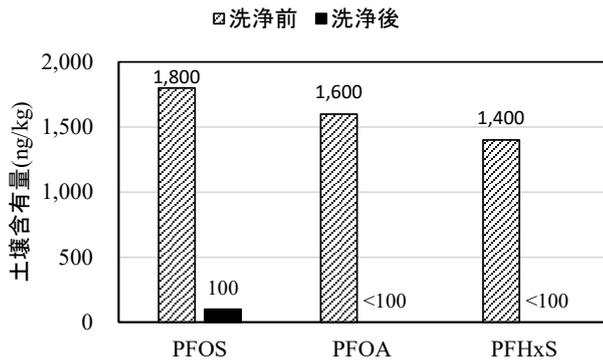


図-10 土壌含有量結果 (真砂土、土壌・地下水汚染あり)

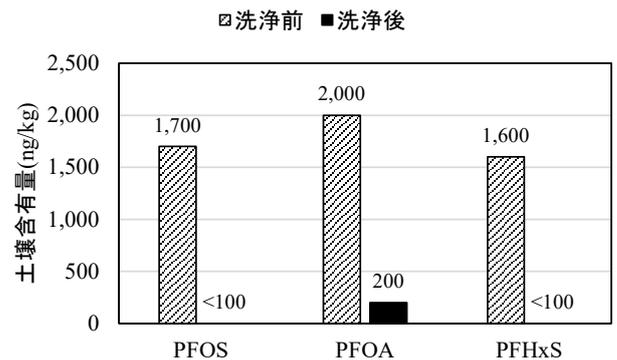


図-11 土壌含有量 (現地土、土壌・地下水汚染あり)

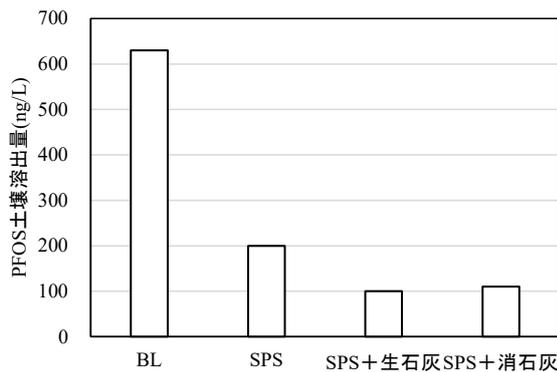


図-12 土壌溶出量 化学処理

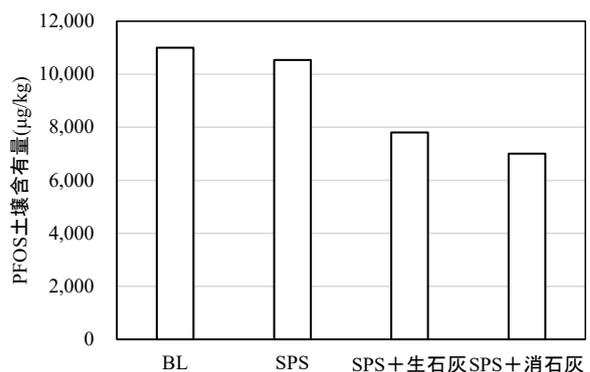


図-13 土壌含有量 化学処理

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、不溶化処理と原位置土壌洗浄、化学処理を記載した。PFAS の特

性は、①PFAS の多くが土壌から地下水に移行しやすいという特性を有する。②PFAS で汚染された土壌の含有量を測定する際に、アルカリ環境下にする事で土壌からPFAS を剥離する⁸⁾。という2点が重要と考えた。

不溶化処理に関しては、カルシウム系資材の消石灰と固

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、建設重機の作業地盤としての強度を得ながら PFOS/PFOA ともに土壤溶出量を 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。

原位置土壤洗浄に関しては、砂質系の地盤を想定した処理を検討した。その結果、土壤と地下水のいずれも汚染されている場合においても、通水速度を大きくした試験によって PV5~10 において土壤と地下水のいずれも浄化可能であることを確認した。つまり、当該範囲に存在する地下水を 5~10 倍量の水で交換することによって浄化が可能ということである。なお、試験で採用した通水速度は、環境省が想定している地下水実流速 (23m/年)¹⁵⁾の約 10 倍程度である。

化学処理に関しては、アルカリ環境下において酸化剤 (SPS) を添加することによる浄化方法を検討した。その結果、SPS のみでは土壤溶出量が低下する一方で土壤含有量が低下しない結果となった。その対応として、土壤から PFAS を剥離するためにアルカリ資材として生石灰か消石灰を混合することによって、土壤溶出量と土壤含有量の両方が低減可能であるという結果になった。土壤含有量では、SPS のみの混合において 4%程度の低減率だったが、消石灰を混合することで 40%程度の低減率となった。

以上のことから、PFAS 汚染土壤に対して、処理技術の開発と適用可能性を確認した。しかしながら、浄化効率の向上や処理土壤の長期安定性¹⁶⁾、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。そこで、今後も効率的な浄化方法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実施したいと考えている。

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：土壤洗浄・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・土壤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壤・地下水浄化技術の開発, 第 26 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.178-181, 2021.
- 5) 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・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.300-305, 2022.

- 6) 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フ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・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.103-108, 2022.
- 7) 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 による土壤・地下水汚染の調査・対策技術の現状, 第 27 回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.1-6, 2022.
- 8) 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 日報道発表資料, https://www.env.go.jp/press/press_01977.html.
- 9) 三浦俊彦, 井出一貴, 久保博, 藤井研介, 西田憲司：ほう素汚染地盤への原位置洗浄処理の適用, 大林組技術研究所報, No.71, 24, 2007.
- 10) 地盤工学会：土壤・地下水汚染の調査・予測・対策, 地盤工学会, pp.168-177, 2003.
- 11) 上岡誠一, 粕谷衛：土壤に含有する 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.
- 12) 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.
- 13) 福武健一, 三浦俊彦, 日野良太, 亀田健太郎, 日笠山徹巳：ふっ素汚染土壤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.
- 14) 三浦俊彦, 山崎啓三, 高田尚哉, 武田厚, 守屋洋一, 日笠山徹巳：硬質粘土に含まれる砒素を対象とした鉄粉洗浄技術の開発, 大林組技術研究所報, No.80,29, 2016.
- 15) 環境省：土壤汚染対策法ガイドライン第 1 編：土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン (改訂第 3.1 版) Appendix-1, 2022.
- 16) 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.

ジオシンセティックスを活用した重金属汚染土の浄化システムに関する室内試験

Material properties and applications of Geocell

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：ジオテキスタイル，浄化機能，透水特性
(Geotextile, Contamination, Permeability)

1. はじめに

工事現場から発生する掘削ずりや残土には、許容値を超えた重金属成分が含有されている場合がある。重金属汚染土の浄化は地盤環境問題のひとつの課題である。重金属成分を安全に効率よく固定化および分離する技術が確立されれば、環境に配慮した土木工事の遂行や、より良い地盤環境の創造に貢献することができる。

本研究では、重金属汚染土の浄化機能を有するように開発されたジオテキスタイル（以下、単に「ジオテキスタイル」と称す）に着目した。このジオテキスタイルは重金属を吸着できる粒状材料（吸着材）が材料表面に付着されており、発生土の仮置き場や発生土を活用した盛土下部に敷設することで、降雨などの浸透作用によって移動しようとする重金属対策に効果を発揮することが期待される（図-1）。このとき、ジオテキスタイルには、重金属の吸着性能と、浸透水の排水性能が求められる。現場で必要となる両性能を把握し、適切な材料選定および配置を行うことが重要になる。以上の背景を鑑みて、重金属汚染土の下にジオテキスタイルを敷設する対策を想定した条件で長期性能試験が行える試験装置を既存の透水試験装置をもとに開発し、吸着材の付着量の異なる4種類のジオテキスタイルに対して透水性能と吸着性能を調べた。

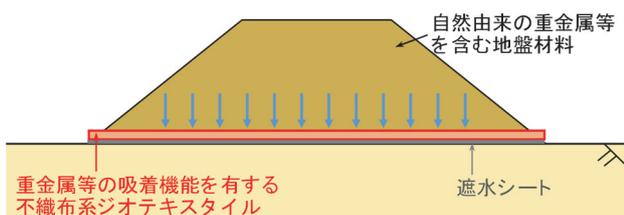


図-1 ジオテキスタイルの活用方法

2. 室内試験の概要と方法

土-ジオテキスタイル系の長期透水試験装置の概要を図-2に示す²⁾。本装置は、注水円筒、供試体円筒、供試体支持網、越流水槽から構成される。注水円筒および供試体円筒はアクリル製で、両者ともに内径100mmである。各円筒の高さは、注水円筒は1100mm、供試体円筒は110mmである。作用させることのできる水頭差は、最大で130cm程度である。この条件は、土中水の浸透条件でいえば動水勾配 $i = 11.0$ 程度に相当する。一連の実験では、ジオテキ

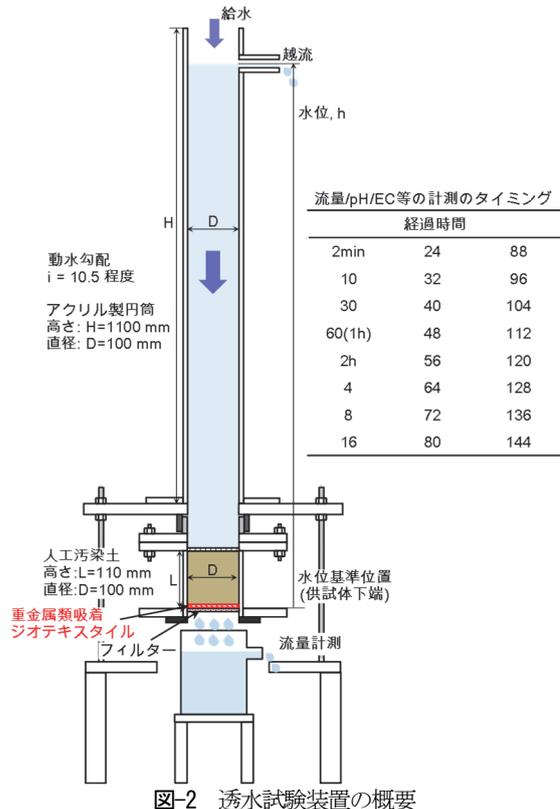


図-2 透水試験装置の概要

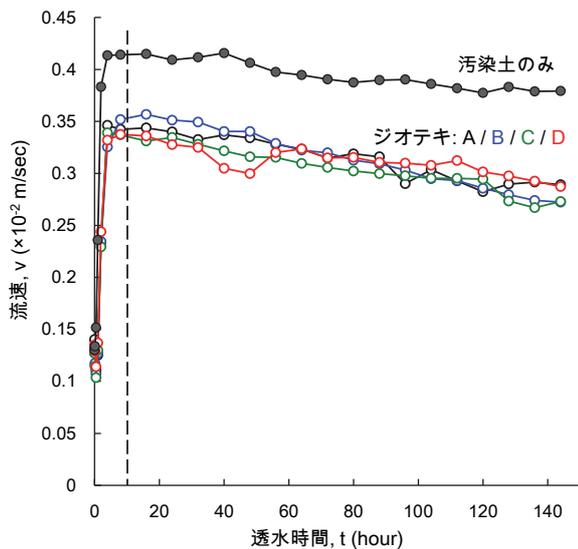


図-3 透水性能: 透水時間と流速の関係

スタイルを通過する総通水量が透水負荷量になるという考えと、水頭差（動水勾配）の大きさはジオテキスタイルの性能に大きな影響を及ぼさないという考えのもと、促進試験的な位置づけで、土-ジオテキスタイル系に作用させる水頭差を130cmとした。ジオテキスタイルは、汚染土の下に敷設した。試験では、注水円筒の水位を一定に保ち、図-2に示した所定の時間ごとに、供試体を通過した水量から透水性能を、浸透水の金属元素濃度から吸着性能を評価した。試験は、144時間（6日間）行った。

本試験では、4種類のジオテキスタイルを使用した。試料Aは吸着材なし、試料B,C,Dは、吸着材の付着量が、それぞれ52g/m²、118g/m²、178g/m²である。人工汚染土は、豊浦砂にリンを混合させて作製した。今回の試験では、リンを26.0mg/kg添加し、溶出量0.5mg/Lとなる条件とした。供試体はこの人工汚染土を締固め度85%相当の乾燥密度 $\rho_d=1.442\text{g/cm}^3$ となるように締め固めて作製した。

3. 室内試験の結果と考察

土-ジオテキスタイル系の長期透水試験結果として、透水時間と流速の関係を図-3に示す。ジオテキスタイルの有無や種類によらずに、透水開始から、30分程度まで流速が若干ではあるが低下し、その後、おおよそ4時間まで流速が上昇した。透水初期の流速の変動が大きく、その後は、時間の経過とともに徐々に流速が低下する傾向が観察された。汚染土のみの条件で、最も流速の上昇が大きく、その後の流速の低下も小さかった。ジオテキスタイルを敷設した条件では、ジオテキスタイルの種類の影響は小さく、土-ジオテキスタイル境界やジオテキスタイル内部に細粒土が流れ込むことで、徐々に流速が低下する。

供試体を流下した浸透水のリン濃度を計測した結果として、通過した流量を供試体の間隙体積で正規化した値

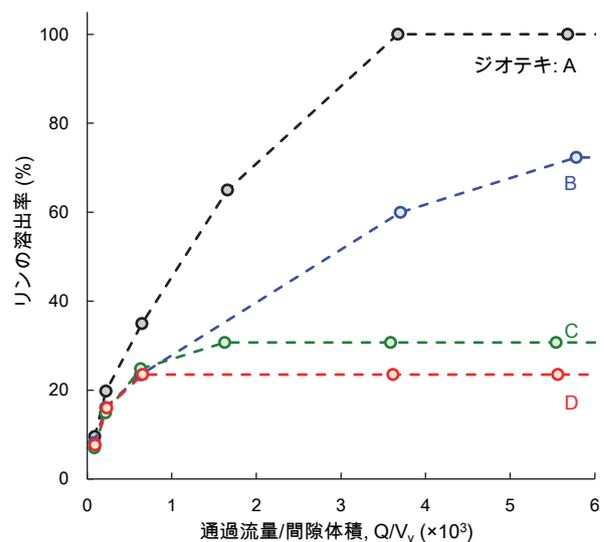


図-4 吸着性能: 通過流量とリンの溶出率の関係

Q/V_v とリンの溶出率との関係を図-4に示す。吸着材を付着していないジオテキスタイル試料Aを敷設した条件では、間隙体積に対して約4倍の水が流れたところで汚染土に含まれていたリンがすべて溶出した。吸着材を付着させた試料B,C,Dでは、試験終了時のリン溶出量は初期含有量の約70%、30%、20%だった。ジオテキスタイルへの吸着材付着量が多いときほどリンが吸着され、今回の条件では、最大80%程度のリンを吸着することができた。

5. まとめ

重金属汚染土の浄化機能を有するように開発されたジオテキスタイルに着目し、その透水性能および重金属の吸着性能を明らかにすることを目的に一連の検討を行った。吸着材の付着量の異なる4種類のジオテキスタイルに対して実験を行い、汚染土の下にジオテキスタイルを敷設する条件では、吸着材の付着量の違いが透水性能へ及ぼす影響は無視できる程度であること、また、吸着材付着量が多いほど吸着性能は高くなり、今回の条件では、最大80%程度のリンを吸着できることを明らかにした。

謝辞

本研究を行うにあたり、住友大阪セメント株式会社より、ジオテキスタイルに関する情報や材料の提供を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省: 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル(2023年版), 2023.
- 2) 大倉快友, 宮本慎太郎, 宮田喜壽, 板谷裕輝: 重金属類吸着ジオテキスタイルの長期性能に関する室内実験, 第50回土木学会関東支部技術研究発表会, III-58, 2023.

限界状態設計法構築のためのアンカー補強材の引抜き抵抗モデルに関する研究

PULLOUT RESISTANCE MODEL OF ANCHOR REINFORCEMENT FOR LIMIT STATE DESIGN

野々山栄人*, 宮田喜壽**
NONOYAMA Hideto and MIYATA Yoshihisa

*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）

キーワード：アンカー補強材，引抜き抵抗，模型実験，数値解析
(Anchor plate reinforcement, pull-out resistance, physical modeling, numerical simulation)

1. はじめに

様々な社会基盤整備で地盤補強技術が用いられている。特に補強土壁は道路や鉄道で大きな役割を果たしている。盛土材，アンカー補強材，壁面材とで安定を保つ多数アンカー式補強土壁は我が国で開発され，その有効性が明らかにされている。限界状態設計法へのスムーズな移行が課題となっている。

多数アンカー式補強土壁の設計では，主働土圧を基本に補強材に作用する引張力：補強材力を推定し，補強材の破断や引抜けが生じないように補強材の種類や補強材長が決定される¹⁾。限界状態設計法の構築にあたっては，個々の限界状態を精度よく再現できる荷重・抵抗モデルが必要になる。

本研究では，これまでにアンカー補強材の引抜き限界状態に対する解析モデルの高度化を目的に，三次元可視化模型実験を実施している²⁾。この実験では，土中の補強材の挙動を観察する方法として，透明土を用いる模型実験技術³⁾を用いた。この方法では，透明粒子の間隙を粒子と同じ屈折率を有する整合液で満たすことで，模型地盤を透明化し，地盤内部の構造物などの挙動を可視化できる³⁾。この実験を実施することで，例えば，**図-1**に示すような現行設計で仮定されている引抜き抵抗メカニズムの妥当性を検証したり，観察結果より新しい解析モデルを構築したりできる。

本報告では，模型実験で得られた引抜き抵抗に対し，現行設計の引抜き抵抗モデルとの比較を実施した。加えて，弾塑性理論に基づく空洞膨張モデルの適用性について検討した。

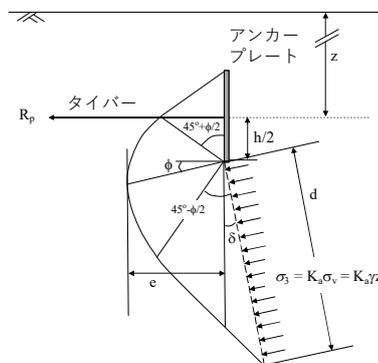


図-1 多数アンカー工法の設計で仮定している引抜き抵抗メカニズム¹⁾

2. アンカー補強材の引抜き可視化実験の概要²⁾

本研究で実施した可視化模型実験についてその概要を簡潔に説明する。実験の概要を**図-2**に示す。用いた装置は，模型地盤の三次元変位場を観察するためのアクリル製側壁を有する実験土槽とアンカー補強材の模型（以後，補強材）を所定の荷重条件で引抜くことができる荷重装置から構成される。実験土槽は，幅590mm，高さ360mm，奥行き290mmの寸法を有しており，**図-2**に示したように，鉛直上向きにワイヤーを引くことで，補強材を水平方向へ引抜くことができる。補強材は，一辺が50mm，厚さt=8mmの正方形版状プレートと，直径8mm，長さ218mmのロッドで構成される。ロッドの先端部の穴に直径2mmのワイヤーがつけられ，その末端は荷重装置に接続されている。実験では，1mm/minの荷重速度で補強材模型を引き抜いた。

実験ケースは**表-1**に示す通りで，相対密度80%（密な地盤）の地盤に対し，補強材の設置深さzを，Case1では50mm，Case2では75mm，Case3では200mmのよう

に3通り変化させて実験した。

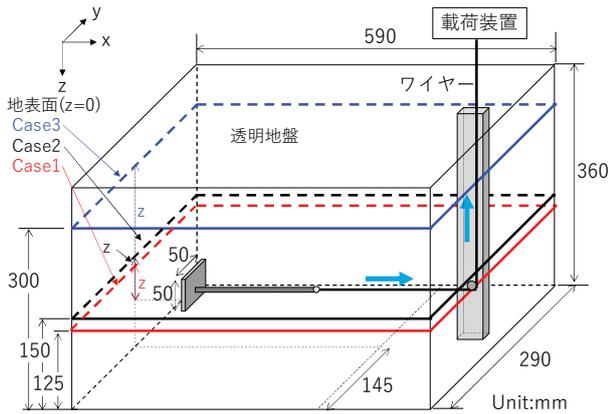


図-2 可視化模型実験の概要

表-1 実験ケース

Case	1	2	3
相対密度	D_r	%	80
プレート幅	B	mm	50
プレート高さ	h	mm	50
補強材設置深さ	z	mm	50, 75, 200

3. 空洞膨張モデルの引抜き抵抗評価への適用性

今回実施した模型実験²⁾で得られた引抜き抵抗と式(1)に示す現行設計の引抜き抵抗モデル¹⁾との比較を行った。その結果を図-3(a)(b)に示す。

$$R_p = [cN_c + K_a \sigma_v (N_q - 1)] B^2 \quad (1)$$

ここで、 c は粘着力、 K_a は主動土圧係数、 σ_v は土被り圧、 B はアンカープレートの幅、 N_c 、 N_q は支持力係数である。

補強材の設置位置が浅い Case1 および Case2 で得られた引抜き抵抗の実測値と、現行の設計モデルによる解析値は概ね良い一致を示した。一方、設置位置が深い Case3 については、観測された引抜き抵抗は、現行の設計モデルを用いた解析値に比べて過大となった。その原因として、地盤内部を観察した結果より、現行の設計モデルでは、地盤の圧縮変形を考慮していない点が考えられた。そこで、本研究では、弾塑性理論に基づく空洞膨張モデルで、引抜き抵抗を評価する方法を検討した。このモデルは元々すべり線が地表面に到達しない深い基礎の支持力を評価するために構築されたものである。今回検討に用いた解析式⁴⁾を式(2)に示す。

$$R_p = \alpha \left\{ \frac{(3 - \sin \phi) G}{3 \sigma_v \sin \phi} \right\}^\beta \sigma_v \quad (2)$$

ここで、 ϕ は残留時の内部摩擦角、 G はせん断剛性であり、 α 、 β はそれぞれ次式となる。

$$\alpha = \frac{3 + 3 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{4 \sin \phi}{3 + 3 \sin \phi} \quad (4)$$

補強材の設置位置が深い Case3 についての解析結果を図-3(c)に示す。上記の空洞膨張モデルを適用することで、実験で得られた引抜き抵抗を精度よく評価できることが明らかになった。式(2)は、計算も簡易で設計への適用性も有している。今後、モデルの精度を信頼性解析で評価すれば、限界状態設計法への適用性を有していると考えられる。

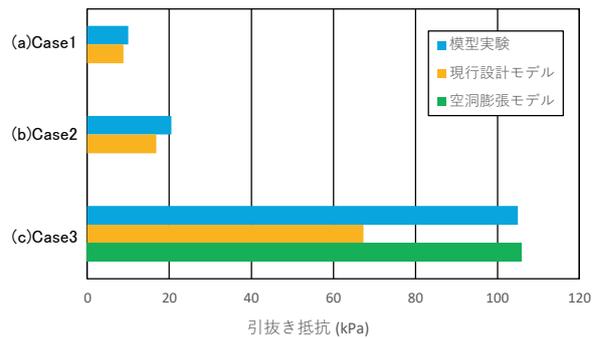


図-3 引抜き抵抗の評価

4. まとめ

本研究では、補強土構造物的一种である多数アンカー式補強土壁工法を対象に、補強材の引抜き抵抗メカニズムを三次元的に可視化するための模型実験を実施し、限界状態設計法の構築への貢献を視野に入れた解析的検討を行った。可視化実験では、抵抗メカニズムは補強材の設置深さに大きく依存することを明らかにした。そのうえで、現行設計モデルの改善すべき点を明らかにし、弾塑性理論に基づく空洞膨張モデルの適用を提案した。以上、多数アンカー補強土壁を対象に、限界状態設計法の構築に資する引抜き抵抗メカニズムの解明と評価法の構築において貴重な成果が得られた。

参考文献

- 1) 土木研究センター: 多数アンカー式補強土壁工法 設計・施工マニュアル, 第4版, 2014.
- 2) 野々山栄人, 宮田喜壽: 限界状態設計法構築のためのアンカー補強材の土中挙動解明に関する研究, 防衛施設学会令和4年度年次研究発表会, 2023.
- 3) Iskander, M., Bathurst, R.J. and Omidvar, M: Past, present and future of physical modeling with transparent soils, ASTM Geotechnical Testing Journal, 38(5), pp.557-573, 2015.
- 4) 山口柏樹: 弾塑性解析によるクイの先端支持力式とその適用性, 土と基礎, No.209, 23(7), pp.7-11, 1975.

津波災害における救助能力の把握と自衛隊派遣規模の推定

EVALUATING CAPACITY OF RESCUE AND ESTIMATING THE SCALE OF SELF-DEFENSE FORCES RELIEF IN TSUNAMI DISASTERS

鳴原良典*, 有賀海老蔵**, 多田毅***
SHIGIHARA Yoshinori, ARIGA Ebizo and TADA Tsuyoshi

- * 博（工）防衛大学校准教授 建設環境工学科（〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20）
** 防衛省沖縄防衛局調達部土木課 防衛技官（〒904-0295 沖縄県中頭郡嘉手納町字嘉手納 290-9）
*** 博（工）防衛大学校教授 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：自衛隊の災害派遣, 救助指数, 救助能力, 津波被害予測
(*Self-Defence Force disaster relief, Index of Rescue, Capacity of Rescue, Tsunami damage estimation*)

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震から十余年が過ぎ、我が国では地震・津波対策の議論が活発に行われ、次に生じうる地震・津波災害への備えを行ってきている。他方で、様々な防災・減災対策が進められても、今後来るすべての災害に対して被害をゼロにすることは困難である。実際に被災した場合には、速やかな被災者の人命救助が必須であり、自治体の救助能力を超えた被害が生じた際には、自衛隊による災害派遣による救援活動が必要となる。しかしながら、自衛隊の主たる任務が防衛出動であることに鑑みると、未曾有の大災害を前にしたとしても自衛隊は災害派遣に全人員を投入することは困難である。したがって、我が国を取り巻く安全保障環境を踏まえれば、発災時に災害派遣に投入される自衛隊の人員数は想定される被害に対して必要十分な程度に合理化される必要があると考えられる。本研究は、過去の災害対応時の実績に基づいて警察・消防・自衛隊の救助能力を把握した上で、今後想定される大規模な津波災害時に自衛隊の人員をどれほど投入する必要があるかを定量的に評価する手法を提案した。神奈川県の沿岸地域をモデルケースとして提案手法を適用し、津波浸水被害に対する警察・消防の救助活動が対応可能か、警察・消防のみでの救助能力が十分かについて評価を行った。さらに、隊員数が不足する場合に必要な自衛隊の派遣規模について推定した。

2. 手法

警察・消防・自衛隊の救助能力を数値化し、津波浸水計算に基づく被害推定手法と組み合わせることで、津波

災害時における自治体の救助活動の対応の可否について評価するとともに、自治体による救助活動のみでは対応しきれない場合の自衛隊による災害派遣規模を推定する。そのために、救助指数 IR (Index of Rescue) と救助能力 CR (Capacity of Rescue) という概念を提案する。

地震や津波などの自然災害により地域社会が被災するとともに要救助者が発生する場合において、救助隊により人命救助が可能な人数の割合として式(1)のような IR を定義する。

$$IR = \frac{CR \cdot RW}{SNR} \quad (1)$$

ここで SNR (Survivors Need Rescue) は要救助者、RW (Rescue Workers) は救助活動が可能な隊員の人数である。CR (Capacity of Rescue) は、救助隊員一人当たりが被災後の一定期間内に救助可能な人数として定義する。もし IR が 1 を上回っていればその自治体は頑健であり、救助能力が十分であると言える。そうでない場合は、自治体内での救助隊の増強や周辺自治体との連携、国への災害派遣要請を検討する必要がある。ここで式(1)中の CR は災害発生からの時間経過の関数として表現される。具体的な値は過去の地震・津波イベントにおける救助活動状況^{1)~3)}を整理することで推定した。

本研究では、南関東地域で発生が懸念されている相模トラフ地震 (M8.0~M8.7 の 8 イベント) で発生する津波⁴⁾を対象に、住民および行政機関 (警察・消防) の被害推定を行った。そして、上記の IR を求め IR < 1 となる場合について、その不足分から災害派遣に必要な自衛隊員数を求めた。

3. 結果と考察

三浦半島沿岸部の5市町(横須賀市, 鎌倉市, 三浦市, 逗子市, 葉山町)における津波浸水被害シミュレーション結果(例えば図-1)を用いて, 津波浸水による住民の被害を評価し, 要救助者数の推定を行った. その結果, マグニチュード(=地震の規模)が大きくなるにつれて発生する要救助者数も多くなる傾向にあることが分かった(図-2). 特に, M8.7の相模トラフ最大クラスの場合の要救助者は, 避難率90%であっても約13,000人に達する. 一方で, 対象地域に発災前から所在する地元警察および消防の人員が受ける被害について評価した. 救助活動が可能な人員の推定を行ったところ, マグニチュードが大きいと警察・消防庁舎の浸水被害も生じやすくなるため, 救助活動が可能な人員は減っていく傾向にあることが明らかになった. 式(1)によって各イベントの警察・消防に関するIRを IR_{FP} と称して評価する. 発災から72時間後, 避難率70%の場合を図-3に示す. これによると, M8.5の1ケースとM8.7において, 警察・消防のみの隊員数では救助部隊が不足していることが評価できる. この部分について自衛隊の災害派遣部隊を投入することを想定する必要がある.

以上の結果を利用し, ある時点までに投入すべき自衛隊員の派遣規模の延べ人数を算出した. 結果として, 例えばM8.7のモデルで住民の避難率が90%であれば, 発災後72時間に延べ4万人を三浦半島周辺5市町に投入すれば津波による要救助者を全員救助することができることがわかった. 多くの場合において2011年東北津波における自衛隊の派遣実績を下回っているため, 理論上は自衛隊の災害派遣を行うことによって救助部隊が不足することはないと言える. ただしこれはあくまで派遣実績であり, 当時と比べ自衛隊の定員の削減や安全保障環境の変化を加味すれば, 将来の発災時にも同等の規模で災害派遣を行えるか保証されるものではないし, 三浦半島以外の被害や津波以外の被害も生じうるため注意が必要である. また, 避難率70%の場合では全期間にわたって必要派遣規模が2011年東北津波の派遣実績値を上回ることから, 自衛隊員を当時と同等程度に投入しても救助しきれないことが明らかになった. この結果は, 如何に住民の避難活動によって要救助者の発生を抑制するかが重要であるかを示した結果であるといえる.

参考文献

- 1) 内閣府, 平成23年版防災白書, pp12, 28, 2011.
- 2) 総務省消防庁, 東日本大震災記録集, pp.155-157, pp.231-238, pp.241, pp.383, 2013.
- 3) 防衛省, 平成24年版防衛白書, pp.198, 2012.
- 4) 内閣府首都直下地震モデル検討会, 首都直下のM7クラスの地震及び相模トラフ沿いのM8クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書, 2013.

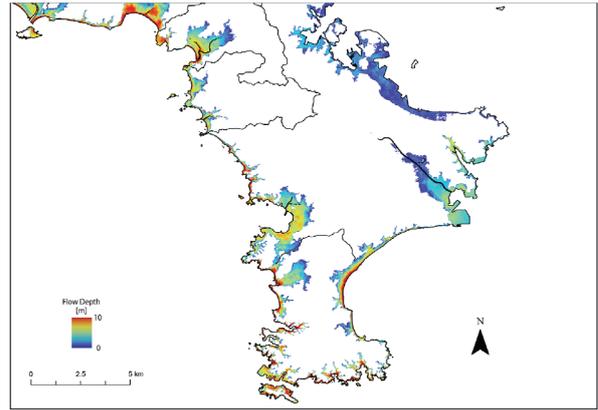


図-1 対象地域における津波浸水深分布の一例(M8.7最大クラスの場合)

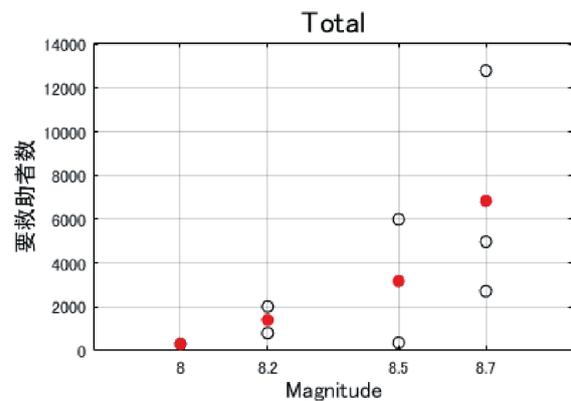


図-2 地震規模と要救助者数の関係. 白抜き丸印は各地震イベントに対する結果. 赤丸印は各地震規模の平均値を意味する.

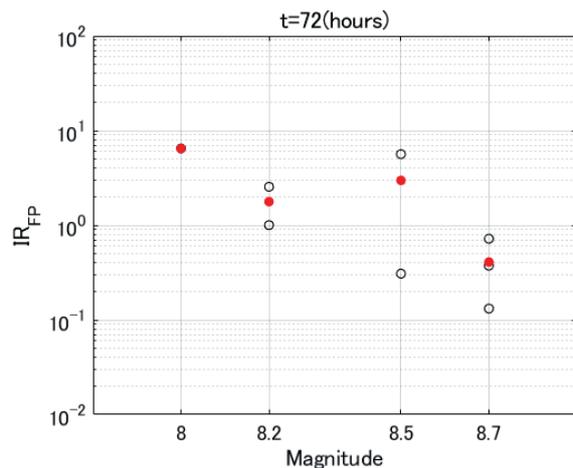


図-3 地震規模と警察・消防に関するIRの関係(避難率70%の場合). 凡例は図-2と同じ.

「建設技術2」

杭式土石流対策工アーバンガードの開発について

DEVELOPMENT OF URBAN GUARD, A PILE TYPE DEBRIS FLOW COUNTERMEASURE

速水七海*, 山本満明*

HAYAMI Nanami and YAMAMOTO Michiaki

* 株式会社プロテックエンジニアリング（〒105-0014 東京都港区芝 1-5-9 住友不動産芝ビル2号館6階）

キーワード：土石流，無流水溪流，透過型堰堤，杭基礎
(Debris flow, Small scale stream, Open type Sabo dam, Pile foundation)

1. はじめに

豪雨災害により土石流の発生が多発しており，対策の必要性が増加している。

特に近年は，「無流水溪流」による被害の拡大が目まぐるしくなっている。無流水溪流は，常時流水がなく，流域面積の小さい溪流である。常時流水がないため，谷出口まで宅地開発が行われている場合が多く，土石流が発生すると人的被害が発生する可能性が非常に高いことが特徴である。また，宅地開発の進展により施工箇所へのアプローチが難しい等の課題も報告されている。¹⁾

平成30年7月豪雨などでは，土石流による人的被害の約7割が流域面積5ha以下の小規模な溪流で発生しており，無流水溪流への対策の重要性が高まっている。

土石流のハード対策は一般的にコンクリート基礎を有した不透過型堰堤，透過型堰堤（中央に鋼製スリットを配置したもの）が挙げられる。これらは大規模な土石流の対策として非常に優れている一方，無流水溪流などの規模が小さい土石流に対して工期が長く規模も大きいことから，小規模な構造が望まれていた。

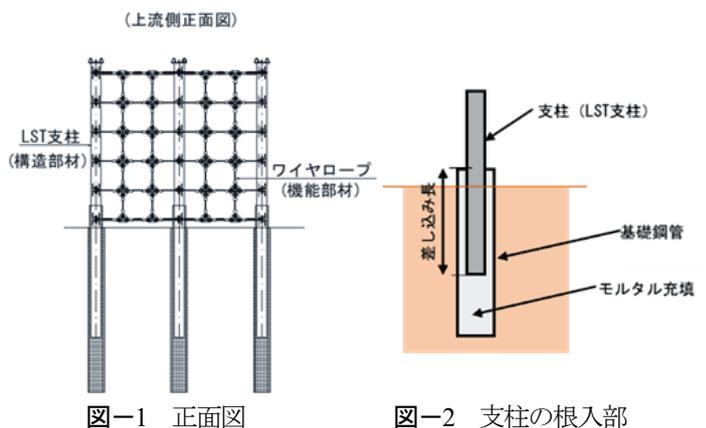
令和4年3月には国土交通省水管理・国土保全局砂防部から「無流水溪流対策に係る技術的留意事項（試行案）」が公開された。これにより，無流水溪流の特徴に応じた合理的な土石流対策の推進を図るため，無流水溪流の計画策定・設計手法に関する技術的留意事項が示されている。

これらから，本研究では従来構造に比べて工期が短く，土石流に対して効果の期待できる構造の開発を目的として土石流捕捉施設の性能を評価したものである。構造は杭式の高靱性・高強度の特殊構造鋼管支柱を用い，ワイヤロープおよび締結金具で格子状の阻止面を構成したものである。

本報告では，構造の概要及び性能と事例を述べている。

2. 構造概要

本工法の一般図は図-1に示す通り構造部材を高強度・高靱性とした特殊構造鋼管支柱，機能部材はワイヤロープを格子状とした構造である。



1) 支柱

局部座屈後の靱性を向上させるために「蓮根：Lotus root」構造（以下，LST 支柱という）を採用し，軽量部材で靱性と剛性を向上させた支柱である。鋼管内部に小口径鋼管を束ねて配置し，その周りを高強度モルタルで充填をした補強支柱であり，地中部にソケット構造の基礎鋼管を挿入後，支柱を挿入し充填材を注入する構造タイプである。構造の概要を図-2に示し，支柱の断面を図-3に示す。

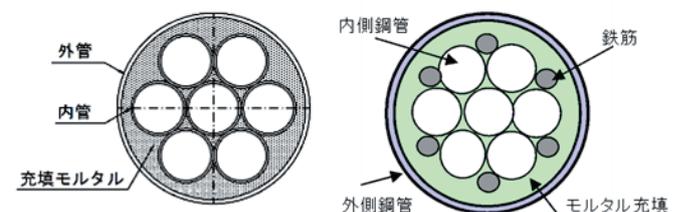


図-3 支柱の断面例

2) ワイヤロープ、締結金具

ワイヤロープは横、縦ワイヤロープからなる。これらは礫や流木を捕捉するための機能部材である。礫や流木などの衝突エネルギーをロープの弾性吸収エネルギーで対応する。土石流による流体力や満砂時の堆積土圧などの設計外力にも弾性範囲内で対応する。

3. 実験概要

性能を評価した実験は水理模型実験、実物大実験、および支柱の載荷実験（静的・衝撃）である。各実験と確認項目を表-1に示す。

表-1 確認項目とその実験

確認項目		調査・試験方法	
		対象項目	調査・試験内容
礫の捕捉性能	ロープの目合い	ロープの目合い間隔	実物大実験 水理模型実験
	締結金具の健全性	締結金具の強度特性	実物大実験
繰り返しの衝突への対応		弾性範囲の設計	部材の検討方法 実物大実験
支柱の粘り性能	支柱の強度特性	材料特性による曲げ性能	静的載荷実験 衝撃載荷実験
		モルタルの材齢による影響	静的載荷実験

1) 水理模型実験

本実験は集合運搬された土砂の捕捉性能の確認を目的とし、図-4に状況を示す。

二次元直線水路を使用し、土石流発生区間の勾配である20°、および土石流堆積区間の勾配である5°の勾配で1/30スケールの土砂流を再現したものである。ロープの目合いは33mm（最大粒径D95(41mm)×80%）と22mm（最多礫径D80(28mm)×80%）の2種類行った。

目合いの違いによる土砂捕捉率は同等であり、ロープの緊緩の違いに拠る土砂捕捉率の影響も見られなかった。土石流の実験では（水路勾配20°）、99%以上の土砂が捕捉され土石流に対する土砂捕捉率は非常に高いことを確認した。以上よりロープの目合いを最大礫径D95の0.8倍以下とすることで、透過型砂防堰堤（閉塞タイプ）と同等な土石流の捕捉性能を有することが確認された。

2) 実物大実験

本実験はロープ部材の性能検証を目的として行ったものであり、実規模のロープネットに対する衝撃実験から、捕捉可能な開口部のロープの目合いの適正な大きさを確認した。実験状況を図-5に示す。

供試体は反力梁上に設置し、重錘（15kN）を繰り返し

自由落下させている。落下高さは2.0m～10.0mまでの漸増載荷とした。ロープの目合いは750mm（重錘径940mm×80%）としている。

繰り返しの衝突に対し、重錘のすり抜けが発生しないとともに、各部材の破損は見られなかった。実験終了後の支柱の最大残留変形角は16°となっているものの、鋼管の破断はなく、耐力を保持したまま変形が増加した。図-6に入力エネルギーと残留変位の関係を示す。P1、P2、P3は順に端部支柱、中間支柱、端部支柱の変位を示す。P1の端部支柱の残留回転角は入力エネルギーが70kJを超えてから増加傾向にある。これは、残留変位4°程度で支柱に局部座屈が発生したものと推察される。



図-4 水理模型実験



図-5 実物大実験

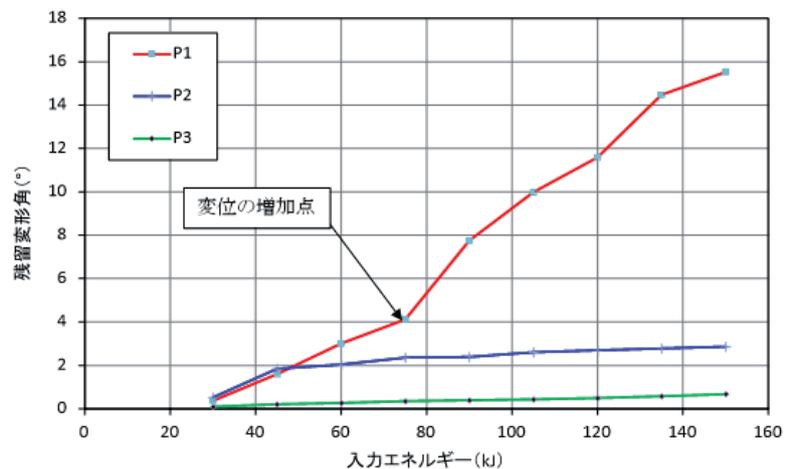


図-6 重錘エネルギーと支柱残留変形角の関係

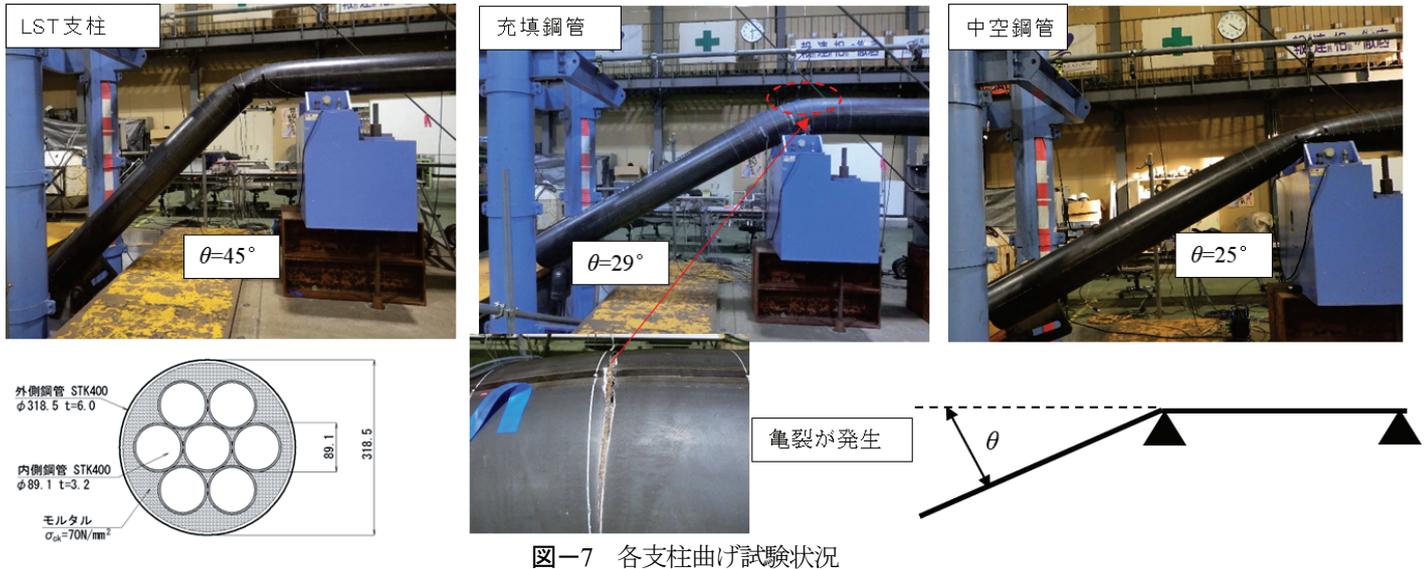


図-7 各支柱曲げ試験状況

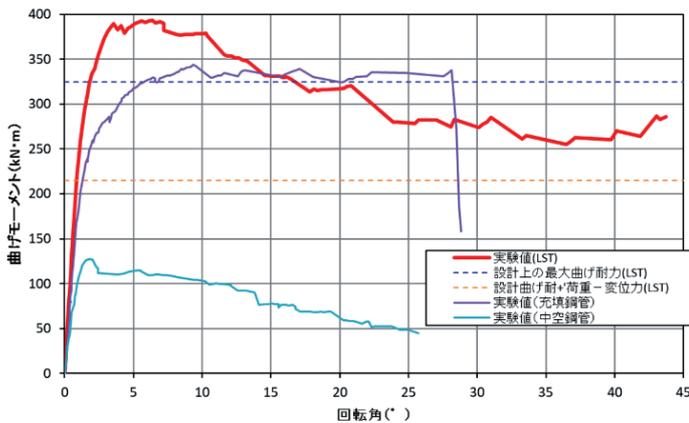


図-8 各支柱曲げ試験結果



図-9 LST 支柱切断面

3) 载荷実験 (静的・衝撃)

本実験はLST 支柱に対し、静的実験および衝撃実験を行い支柱の耐荷性能を確認したものである。

耐荷性能比較のために、外側の鋼管の規格を同一としたLST 支柱、充填鋼管、中空鋼管を用いて曲げ試験を行った。LST 支柱および充填鋼管のモルタル圧縮基準強度は70N/mm²である。実験状況を図-7に示す。

中空鋼管は亀裂を生じないが、降伏後に変形しながら耐力低下している。充填鋼管は変形角29°で外側鋼管に亀裂が発生し、耐力が急激に低下した。LST 支柱は、変形角が45°を越えても外側鋼管に亀裂は生じず、図-8に示すように設計曲げ耐力を保持していることが確認できた。図-9は、曲げ試験後のLST 支柱の切断面(別試験)の状況を示す。LST 支柱は内側鋼管が潰れることでエネルギーを吸収する機構であることが分かる。脆性破壊を生じず、想定外の衝撃にたいしても「ねばり(靱性)」性能を有した支柱であることが確認された。

また、本実験では、支柱内の充填モルタルの圧縮強度のばらつきが、支柱の破壊性状に影響が小さいことも確認している。

4. 技術認証

以上、各種実験より、砂防地すべり技術センターの技術認証では次に示す性能を有すると認められ、建設技術審査証明を取得した。

1) 礫の捕捉性能

ロープの目合いを礫径の0.8倍以下とすることで、透過型砂防堰堤と同等な土石流の捕捉性能を満足することが認められる

2) 繰り返しの土石流・流木の衝突への対応

弾性範囲の設計であり、満砂時の除石後も繰り返し使用可能であることが認められる

3) 支柱の粘り性能

支柱の変形角が45°に達しても設計曲げ耐力以上を保持しており、粘り強さに優れていることが認められる。

5. 施工事例

2023年12月末時点で全国に38箇所では本工法を設置している。

1) 千葉県での施工事例

2023年3月に施行が完了した本物件は、下流側にある道路を保護するために設置した。流木や土石流が多発する溪流であるため、施工期間が短い本工法で対応を行った。

施工後2023年9月に千葉県の広域豪雨により災害が発生し、対策を行った溪流から道路への土砂流出を防止したことを確認している。

現在、本構造物に関しては除石作業を行っていないものの、被害が拡大した他地域への復旧作業が完了した後に行われる予定である。



図-10 設置後の様子
(上) 設置直後 (下) 捕捉後

6. おわりに

計画流出土砂量が1000m³程度の無流水溪流に限定ではあるが、機能部材としてワイヤロープで格子状の阻止面を形成し、構造部材として杭式の高靱性・高強度の特殊構造鋼管支柱(LST支柱)を用いることによって、土石流・流木の外力に対し、「ねばりの機能」で捕捉対応が出来ることを示せた。また、杭式構造のため各種地盤にも根入長で対応が可能であり、堰堤のような大規模な掘削も生じず、無流水溪流における対策工として有効である。

実験結果より支柱の耐力モーメントから逆算した流速と水深の適用範囲を柵高ごとに図-11に示す。

最小スパン幅は、排土時にミニバックホウが上下流に移動可能な間隔である2.0mとし、最大スパンはロープのたるみ等を考慮して5.0mとしている。

今後は工事用道路の設置が困難な場合の施工方法の改良を行い、より条件が厳しくこれまでは設置が困難であった箇所での対策の実現を目指す。

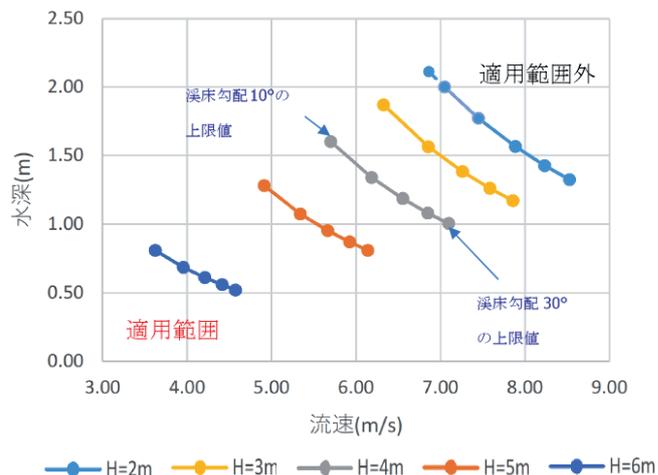


図-11 柵高別の適用範囲

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局砂防部：無流水溪流に関する技術的留意事項（試行案），令和4年3月
- 2) （一財）砂防・地すべり技術センター：令和4年度砂防・地すべり技術センター講習会報告

全自動装薬発破技術による安全性と生産性の向上

IMPROVING SAFETY AND PRODUCTIVITY WITH AUTOMATIC CHARGING TECHNOLOGY

小笠原裕介*, 水谷和彦**, 坂下誠***, 浅井秀明****

Yusuke Ogasawara, Kazuhiko Mizutani, Makoto Sakashita and Hideaki Asai

* 前田建設工業株式会社 本店 土木事業本部 土木技術部 自動化グループ 主査（〒102-8151 東京都千代田区富士見2丁目10番2号）

** 前田建設工業株式会社 本店 土木事業本部 土木技術部 自動化グループ グループ長（所在地同上）

*** 前田建設工業株式会社 本店 土木事業本部 機械部 部長（所在地同上）

**** 前田建設工業株式会社 本店 土木事業本部 機械部 機械技術グループ 主幹（所在地同上）

キーワード：自動装薬, 爆薬, トンネル施工, 自動化技術, 安全性・生産性向上

(automatic charging technology, explosive, automation technology, Improved safety and productivity)

1. はじめに

厚生労働省が策定した「山岳トンネル工事の切羽における肌落ち災害防止対策に係るガイドライン」によれば、山岳トンネルにおける労働災害は切羽で9割発生しており、その中でも鋼製支保工建込みや装薬作業時の被災事例が8割を占めている。これらの作業は切羽直下に作業員がやむを得ず立ち入る人力作業であり、この切羽立入作業を無人化できれば被災リスクを限りなく減らすことができる。そこで筆者らは、切羽立入作業を不要にする自動装薬システムの開発¹⁾、および装薬の全自動化を図るために、孔位置検出システムを開発²⁾している。

本稿では、山岳トンネル施工における装薬作業の安全性と生産性を向上させるために開発を進めている自動装薬システムの現場実証試験結果について報告する。

2. 自動装薬システムの概要

2.1 従来の装薬方法

一般的な装薬は切羽直下に立ち入り、ドリルジャンボで削孔した装薬孔の孔奥から①起爆用の親ダイ（紙巻含水爆薬と電気雷管）②増ダイ（紙巻含水爆薬を数個）③込物（粘土）の順に人力で挿入し（図-1）、込棒で突き固める（写真-1）。20年程前に機械装填技術が開発され、切羽より数m離れた場所からの遠隔装填が可能になったが、数m離れた場所から、小径装薬孔への長尺パイプ挿入は非常に難易度が高く、通常作業として定着していないのが現状である。



図-1 一般的な装薬の模式図



写真-1 一般的な装薬

2.2 自動装薬システムの概要と現状

そこで筆者らは切羽立入が不要な自動装薬システムを開発した。本システムはドリルジャンボのガイドセルに搭載し、

- ①位置合わせ機構
- ②親ダイ供給機構
- ③送出し機構
- ④増ダイ供給機構

で構成した（図-2）。

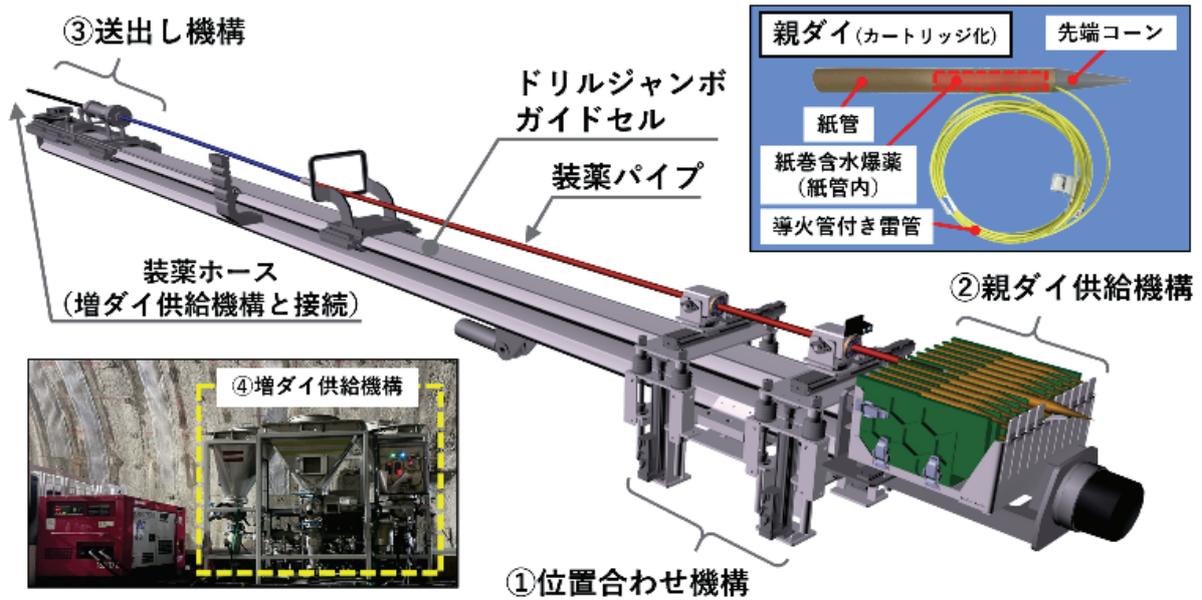


図-2 自動装薬システムの全体構成

親ダイは紙巻含水爆薬と非電気式雷管（導火管付雷管）の組合せとし、先端コーン（位置合わせ誤差・孔荒れ対策）と紙管（収納・把持機能）に内包してカートリッジ化し、増ダイは粒状爆薬（含水爆薬やANFO）にする事で、エア圧送による機械装填を可能とし、密装填効果により込物の省略を可能にした（図-3）。

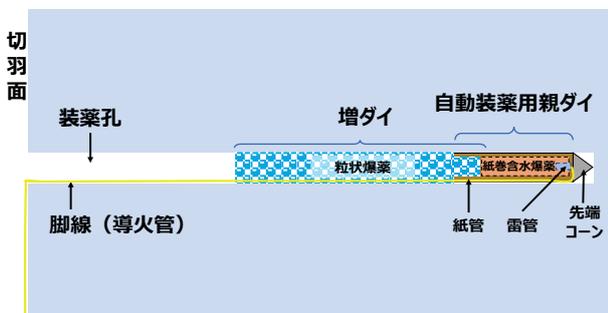


図-3 自動装薬の模式図

本システムは削孔用ドリルジャンボとは別に、ドリルジャンボをベースに改良した装薬専用機としているが、全自動ドリルジャンボの削孔データ（座標、角度、深さ）を同期することで対象の孔位置に自動でセットすることができる。しかしながら、座標データを基にセットしても装薬パイプと孔位置は上下左右で最大 50mm の誤差が生じることが後述する現場試験により明らかになったため、筆者らは座標を基にセットした後、パイプを正確に位置合わせするための孔位置検出システムを開発し、当社研究施設 ICI 総合センターの模擬トンネル内で実大検証試験を実施した。孔位置検出と一連の動作確認が完了した後に実際の山岳トンネル現場に本システムを導入し、現場検証試験を行った

2.3 孔位置検出システムの概要

本システムは、以下で構成している（写真-2）。

- a：距離画像カメラ
- b：ToF センサ
- c：レーザーサイト
- d：USB エクステンダー

専用の孔位置検出用ソフトウェアは独自のアルゴリズムでトンネル坑内の照度において孔を検出できるように検証を重ねて改良した（写真-3）。

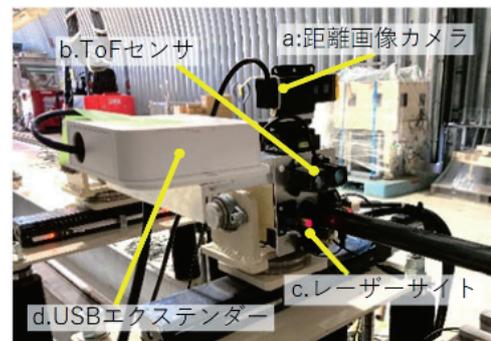


写真-2 孔位置検出システムの構成

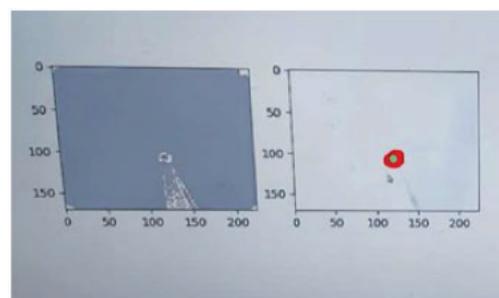


写真-3 検出時のモニター画面

孔の検出から装填開始までのフローを次に示す。

- ①距離画像カメラ(a)で孔を検出
- ②検出した孔のカメラ座標から孔位置を推定
- ③推定した孔位置を基に位置合わせ機構を制御し、装薬パイプの軸を孔位置に調整
- ④ToF センサ(b)で軸上の距離を計測し、孔があることを最終確認
- ⑤装填開始

また、レーザーサイト(c)は装薬パイプの軸と孔位置のズレを視覚的に確認するための補助機能、USB エクステンダー(d)は USB 機器を Ethernet ケーブルで距離延長するためのアダプタとして使用している。

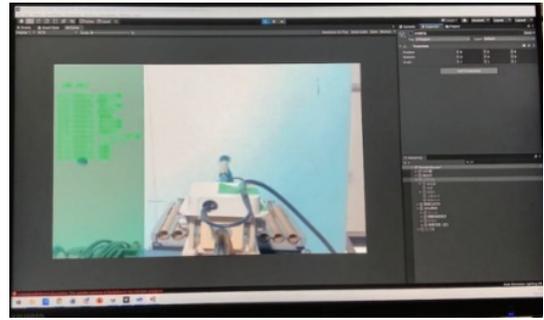


写真-6 システム画面(カメラ)

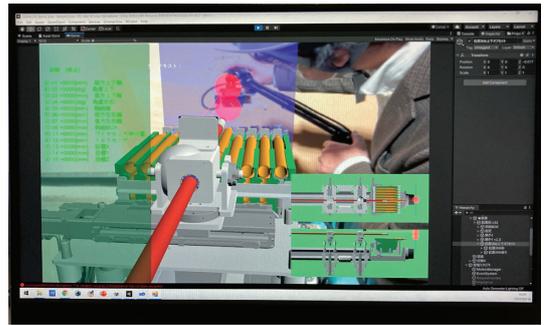


写真-7 システム画面(VR)

3. 試験概要

3.1 模擬トンネル概要

場 所：前田建設工業(株) ICI 総合センター
ICI キャンプ内 (写真-4)
仕 様：L=29.570m,切羽部断面積 A=55.2m² (図-4)



写真-4 ICI キャンプ内模擬トンネル

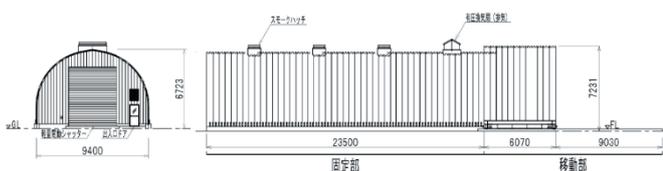


図-4 模擬トンネル 外観図

3.2 自動装薬システムの試験概要

上記で説明した模擬トンネル内に、本システムを搭載したドリルジャンボ実機を配備し、一連動作の実証試験を実施した(写真-8)。実証試験状況および装薬システム画面状況を写真-5~7に示す。



写真-5 実証試験状況

①孔位置を検出、座標取得	⑤孔奥まで親ダイを挿入
②親ダイをピックアップ	⑥パイプ後退+エアブロー
③検出した座標に位置合わせ	⑦増ダイ供給(エア装填)
④親ダイを挿入(装填)	⑧装薬完了一次の動作へ

写真-8 一連動作の実証試験

3.3 現場試験結果と改良試験概要

本システムの開発にあたって、実際の全自動ドリルジャンボの座標位置合わせ精度を確認するために現場で検証

試験を実施した(写真-9)。その後、室内試験でカメラやセンサなどの単体要素試験を実施し、模擬トンネルで自動装薬システムと併せて本システムの検証を実施した。

現場検証では、まず削孔データを収集し、その後、ジャンボ本体を少し移動させて再度設置し、本体座標を再取得後、削孔データを基に対象の孔位置座標にブームを移動させて装薬パイプを実際にガイドセルで送り出し、孔位置とパイプ位置を実測することで誤差の確認と挿入可否の検証を実施した(表-1)。

現場検証結果を基に、最大で100mm程度の誤差があっても孔位置を補正できるようなシステムを目指し、まずは室内で単体要素試験を行い、カメラやセンサの選定、ソフトウェアの基本アルゴリズムの確認を実施した(写真-10)。

模擬トンネル内の検証ではトンネル坑内の照度と一致するよう調整し、さらに切羽の凹凸と吹付の状態を再現した模擬切羽を製作して自動装薬システムの一連動作と併せて本システムの検証を実施した(表-2)。

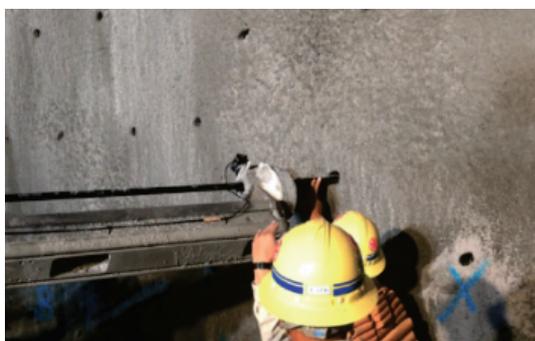


写真-9 現場検証

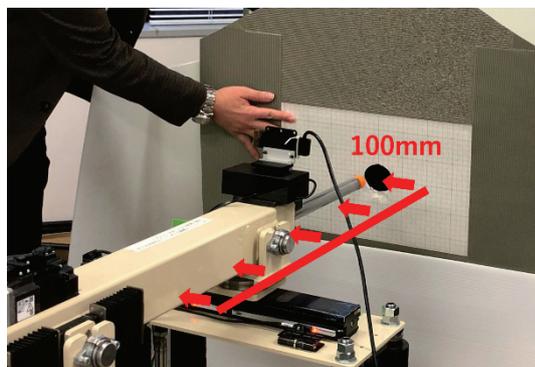


写真-10 単体要素試験

表-1 現場での検証結果

孔番号	横方向誤差 (mm)		縦方向誤差 (mm)		装薬パイプ挿入可否
1	左	30	上下	0	×
2	左右	0	下	10	○
3	左右	0	下	10	○
4	左右	0	上下	0	○
5	左	20	下	30	×
6	左	30	下	20	×
7	左	50	下	50	×
8	左	10	下	10	×
9	左	30	下	10	×
10	左右	0	下	20	×

表-2 模擬トンネルでの検証結果

回数	孔位置からの離隔	装薬パイプ挿入可否
1	左に100mm	○
2	左に100mm	○
3	左に100mm	○
4	右に100mm	○
5	右に100mm	○
6	右に100mm	○
7	上に100mm	○
8	上に100mm	○
9	上に100mm	○
10	下に100mm	○
11	下に100mm	○
12	下に100mm	○

3.4 模擬トンネルにおける試験結果

実証試験結果を以下に列挙する。

【自動装薬システム】

- ・位置合わせ機構：孔位置検出システムと連動し、パイプ位置合わせや角度合わせが可能。
- ・親ダイ供給機構：50本の模擬親ダイ(1~10段×5本)を供給可能(3ブーム×50本=150本供給可能)。
- ・送出し機構：親ダイ供給機構から自動装薬用親ダイの取出し、および孔奥への親ダイ装薬が可能。
- ・増ダイ供給機構：含水爆薬、ANFOを想定した模擬粒状爆薬を模擬装薬孔内に隙間なく装薬が可能。
- ・全体システム：各機構の連携により自動で模擬装薬孔(φ45mm,L=1.0m)に模擬親ダイと増ダイを装薬可能。

【孔位置検出システム】

- ・孔位置と装薬パイプ位置に上下左右100mmの誤差がある場合でも、正確な位置合わせが可能(表-2)。
- ・孔中心と装薬パイプ断面中心の誤差は最大で左右前後10mm以内の精度でセットすることが可能で、この誤差を吸収するために自動装薬用親ダイの先端コーンが十分機能していることが確認できた。
- ・一般的なトンネル坑内を想定した明るさ(150ルクス以上)において、正確に装薬孔を検出できた。

4. 現場試験概要と試験結果

4.1 模擬トンネルにおける試験結果

模擬トンネル内での試験により、自動装薬システムの基本性能および孔位置の検出から装薬作業までの一連の動作が確認できたため、本システムを実際の山岳トンネル工事現場に導入し、現場環境下における性能の確認を実施した(写真-11)。本試験では孔位置検出後に実際の親ダイと増ダイ(粒状爆薬)を装薬し、発破するところまでを実施した。現場試験での確認項目は以下の通りとする。

- ① 切羽における本システムの動作（孔位置検出、装薬、位置合わせ・送出し機構の連続動作）確認
- ② 親ダイを装薬孔に挿入する際の孔ずれや孔荒れに対する先端コーンの機能性
- ③ 本システムで装薬された孔の発破状況

4.2 試験結果

①システムの動作確認

孔位置の検出は、現場環境下においても正常に検出することができた。しかし、写真-12に示すように、検出対象とする孔の周囲に5cm以上の凸部があると、その部分を孔のエッジ（縁）として誤検出する（写真-13）ため、正確な孔の中心座標を算出することができないということが分かった。これについては今後、検出アルゴリズムの改良を行い、検出精度の向上を行っていく。

装薬作業については、穿孔長に合ったストロークを適切に設定し、親ダイを孔奥に設置した後、装薬パイプを後退させながら増ダイ（粒状爆薬）を装薬することで、しっかりと密装填されることが確認できた。比較するために装薬パイプを後退させた後、孔の口元付近から増ダイを装填してみたが、この場合は密装填ができずに粒状爆薬が孔内に散乱した状態となった。

位置合わせおよび送出し機構については、孔位置の検出後、中心座標が算出された状態においては制御した通りに動作することが確認できた。また、今回は孔位置検出システムと合わせて視覚的に位置合わせ状態を確認するためのレーザーサイト（写真-14）を実装して試験を行ったところ、本機能によって人間が目視で確認できるため、検出後の位置確認（誤操作防止）や、検出システムにエラーが生じた際の遠隔位置合わせの目印として非常に有効であった。



写真-12 孔周辺の凹凸状況



写真-13 エッジ（縁）の検出状況



写真-14 レーザーサイトの実装状況



写真-11 現場実証試験の様子（無人の切羽）

②先端コーンの機能性

今回の現場条件において先端コーンは実際の切羽でも、数ミリの孔ずれに対して柔軟に追従し、孔内に小石が残っている状態でも引っかかることなく装薬ができた。今後は様々な地山状態に対して検証を重ねていき、機能性の拡充を目指していく。

③発破状況

今回の試験においては、従来通り人力で装薬を行った箇所と同様に発破できていることが確認できた。

5. おわりに

今回紹介した技術はまだ開発段階であるが、今後人手不足が深刻化していく山岳トンネル施工において、切羽直下での装薬作業を無人にすることで、安全性の向上とともに、自動装薬による省人化および生産性の向上に寄与できると考える。また、防衛施設への活用としては、火薬庫を建設する際のトンネル施工における装薬発破作業への応用が期待される。

今後は今回の現場試験で得られた孔位置検出アルゴリズムの改良を行って、凹凸が激しい切羽においても正確に孔位置が特定できるようにする。また、自動装薬システムを搭載した専用機の開発を進めるとともに、様々な地山に対応可能なシステムに発展するように技術開発を推進していく。

謝辞

本技術の開発は、古河ロックドリル(株)、(株)前田製作所、アスラテック(株)、カヤク・ジャパン(株)、また、孔位置検出ソフトウェアの開発は、ブレインビジョン(株)に協力を頂き、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 水谷和彦・坂下誠・浅井秀明・小笠原裕介・五味春香・下山悠・鈴木麟太郎:土木学会令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, 山岳トンネル施工における自動装薬システムの開発, VI-662
- 2) 小笠原裕介・坂下誠・浅井秀明・水谷和彦・五味春香・鈴木麟太郎:土木学会令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, 自動装薬システムにおける装薬孔位置検出システムの開発, VI-957

透過型フィルムディスプレイ「透彩」を用いたXR コックピットシステム

XR COCKPIT SYSTEM USING TRANSPARENT LED FILM DISPLAY “TOU-SAI”

森 守正*, 董 佳文**, 藤田 奈津木***, 中桐 賢二****
MORI Moritada, DON Jeawen, FUJITA Natuki and NAKAGIRI Kenji

- * 博（工） 株式会社竹中土木 経営戦略室（〒136-8570 東京都江東区新砂 1-1-1）
- ** 株式会社竹中土木 技術・生産本部 技術開発部（〒136-0075 東京都江東区新砂 1-3-3）
- *** 加賀電子株式会社 通信事業部（〒101-8628 東京都千代田区神田松永町 20）
- **** 株式会社 Delight Global（〒900-0015 沖縄県那覇市久茂地 2-12-6）

キーワード：発光ダイオード，透過型フィルムディスプレイ，クロスアリティ，建設重機，ICT 施工，マシンガイダンス
(LED, transparent film display, XR, construction heavy machinery, ICT construction, machine guidance)

1. はじめに

近年の ICT 施工技術の急激な発展に伴い、防衛省が契約する施設整備工事においても既往の掘削重機に別途マシンガイダンスシステムを導入し、情報化施工を実施する事例が増加している。図-1 に掘削重機用マシンガイダンスシステム（以下、「MG システム」と表す）の概要を示す。このシステムは、既往の掘削重機に別途 GNSS アンテナおよび各種センサーを搭載することでバケットの刃先位置をリアルタイムで測定し、別途ドローン等で取得した現況地形データと照合することで設計図面データ通りに掘削作業が出来るようにモニター画面にて刃先位置を誘導表示するものである。MG システムを利用することにより、造成工事においてこれまで事前に実施さ

れてきた測量・丁張作業が不要となり、更にオペレーターの技量に左右されることなく設計図通りの掘削作業を行うことが可能となる。

MG システムの欠点としては、図-2 に示す通り、オペレーターの視界を出来る限り遮ることのないよう、ガイダンス画面表示用のモニターが小型のタブレットとなっている点が挙げられる。これより、オペレーターは小さいガイダンス画面と刃先位置の両方を視認しながら掘削作業を行わねばならず、その度に焦点を合わせなおすことでタイムラグおよびオペレーターの意識散漫が発生し、その煩雑さに不満の声が挙がっている。

この問題を解決するため、筆者らは透過型 LED フィルムディスプレイ「透彩」を開発したうえで掘削重機のフロントガラスに設置し、更にガイダンス情報をオペレーターの視線と重ねて表示する XR コックピットシステムを開発した。以下にその概要を報告する。



図-1 掘削重機用マシンガイダンスシステム概要¹⁾



図-2 運転席におけるガイダンス状況²⁾

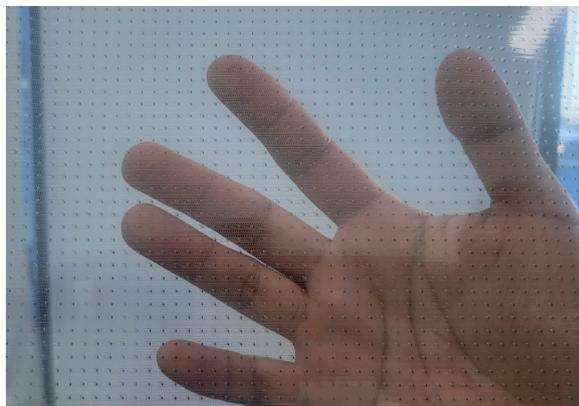
2. 透過型 LED フィルムディスプレイ「透彩」概要

「透彩」の仕様を表-1 に示す。本ディスプレイは Pet フィルム基盤の上面に Cu 配線を施したうえで、R/G/B の LED チップおよび映像を制御する超小型ディスプレイドライバ IC チップを COB 形式で基盤に直接マウントしたものである。上記 4 つのチップを縦横 4mm 間隔で配置して片方にダイジーチェーン接続することにより、配線本数を省略して透過率の向上を図っている。

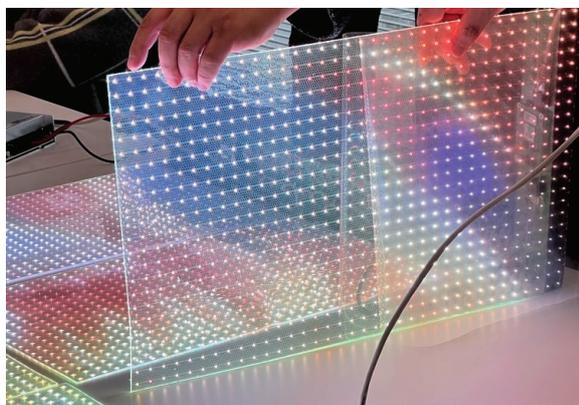
更に、従来品と比較して 1/3 の大きさかつ 8bit フルカラーを実現する超小型ディスプレイドライバ IC チップを独自開発した。この IC を搭載することにより、図-3 に示すように 84%の透過率を確保しつつ高演色性を両立している。

表-1 「透彩」仕様

項目	仕様
Pixel Pitch	4mm
Transparency ratio	84%
Size	500mm x 240mm
Brightness	1,200nit
Weight	< 300g
Color Process	8 bit per R/G/B
Lifetime	50,000 hours (50% Brightness)



(a) 非発光時 (Pixel Pitch : 4mm , Transparency : 84%)



(b) 発光時 (Pixel Pitch : 14mm, Transparency : 90%)

図-3 フィルムディスプレイ写真

フィルムディスプレイパネル 1 枚当たりのサイズは最大 500x240mm であり、図-4 に示すように端部には制御用の基板(Sub Controller Unit : SCU)が接続される。フィルムディスプレイと SCU の 1 セットを複数ダイジーチェーン接続することにより、図-5 に示すように大型ディスプレイが構成される。

本製品は掘削重機の運転席に適用することを想定して設計されており、高輝度の発光が可能な miniLED サイズの LED 発光体を採用している。そのため、類似製品である LCD や有機 EL 形式の透過型ディスプレイが最大輝度 500nit 程度であるのに対し、本製品は最大で 1,200nit となり、図-6 に示す通り真夏の炎天下であってもオペレーターが運転席から映像を視認することが可能である。

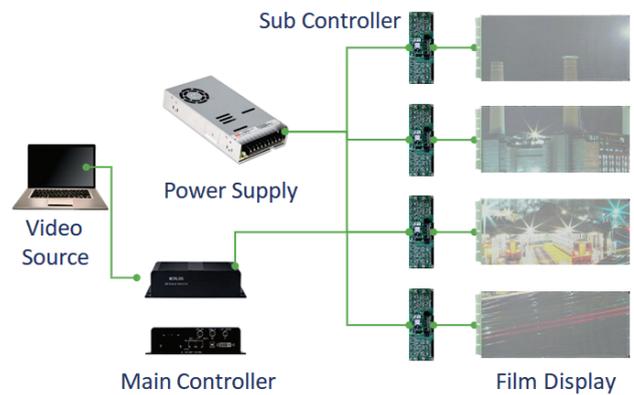


図-4 フィルムディスプレイ構成図

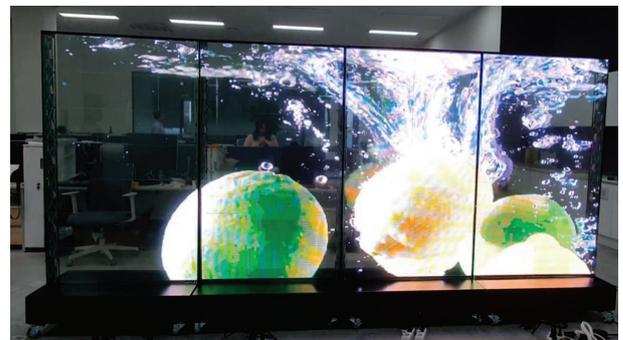


図-5 大型ディスプレイ外観 (画素数 : 1,000x420)



図-6 掘削重機運転席設置状況 (2023 年 7 月)

3. XR コックピットシステム概要

XR コックピットシステムのシステム構成図を図-7 に示す。本システムは以下の4つのユニットより構成されている。

- ① 透過型 LED フィルムディスプレイ「透彩」
(株竹中土木 / 株Delight Global 開発)
- ② 三次元リアルタイム VR 表示システム UC-Win/Road
(株フォーラムエイト開発・販売)
- ③ リアルタイム視線位置測定システム Smart Eye Pro
(Smart Eye AB 開発 / 株東陽テクニカ販売)
- ④ 掘削重機用 MG システム iCon_iXE3
(ライカジオシステムズ株開発・販売)

MG システム中には予め現地測量より得られた現況地形データが、VR 表示システム中には設計データがそれぞれ LandXML 形式で保存されており、図-8 に示す視線

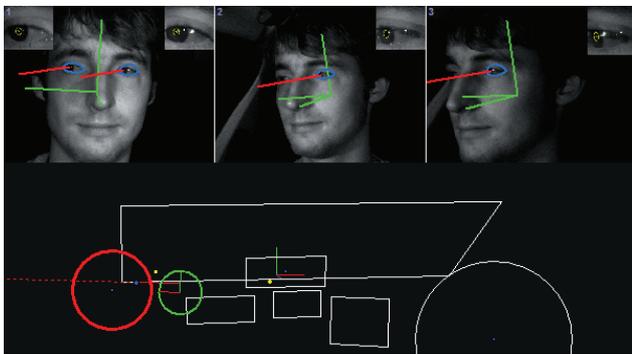


図-8 Smart Eye Pro 視線位置計測画面³⁾

位置測定システムより得られたオペレーターのリアルタイム視線位置座標を用いて、フロントガラス平面に設置された透過型フィルムディスプレイ上にオペレーターの視線と重なるように2次元変換された現況地形/設計データを表示する。

運転席における各種機器設置状況を図-9 に示す。運転席正面の窓ガラスにフィルムディスプレイ部を縦向きに合計6枚貼り付けたうえで、上下端部にSCUを配置した。また、運転席の右上部に Smart Eye Pro 用の小型カメラを設置した。これらを制御する Main Controller、映像制御用PC、MG システム用制御BOX、UC-Win/Road 用PC、Smart Eye Pro 用 PC (全て市販のゲーミングノート PC) は全て運転席の座席後部に収納しており、オペレーターの操作を阻害することなく運用可能である。

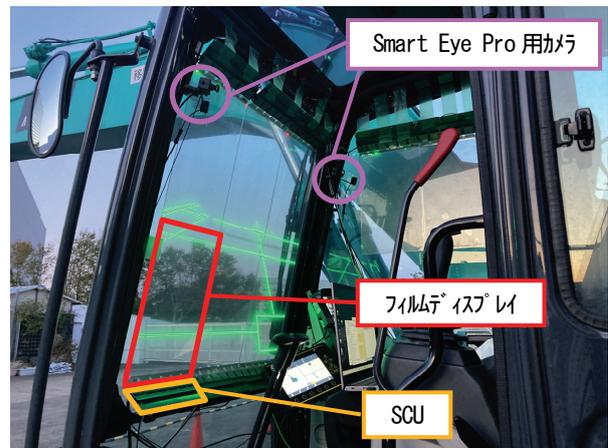


図-9 運転席における各種機器設置状況

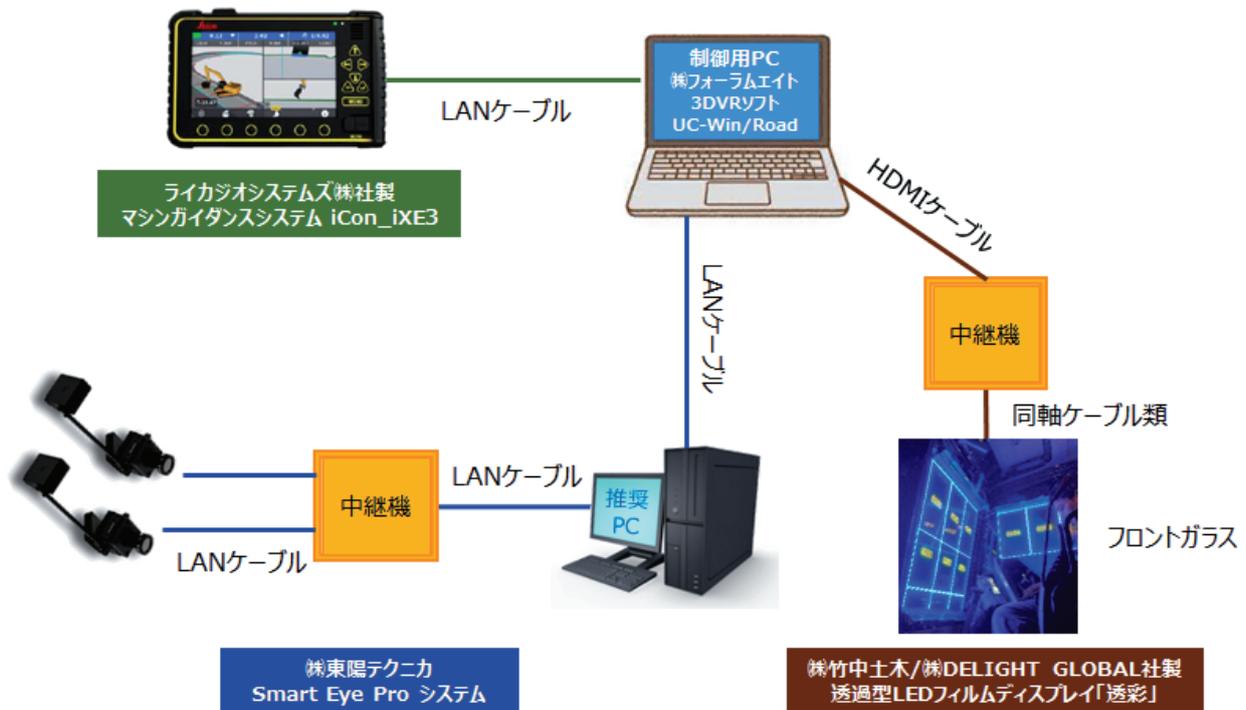


図-7 XR コックピットシステム構成図

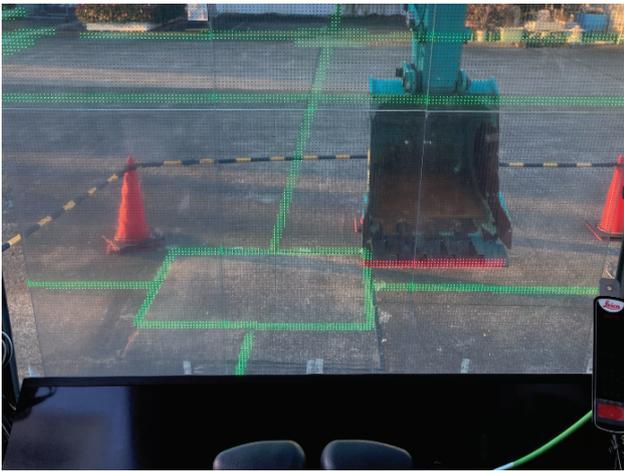


図-10 XR コックピットシステム稼働状況

XR コックピットシステムの稼働状況を図-10 に示す。実際の掘削重機上で、オペレーターの視線と重なるようにフロントガラス上に設置した透過型 LED ディスプレイに現況地形情報および刃先位置をリアルタイム表示することに成功した。遅延もそれほど大きくなく、十分実用的な稼働状況であることを確認した。

今回、掘削重機のフロントガラスの大きさに合わせて6枚のフィルムディスプレイパネルを設置しているが、画素数としては150x150程度となる。この場合、ワイヤーフレームの描画は可能であるが、細かい文字や記号等を表示するには解像度が不足していると感じた。従って、実際の重機作業に適用するにはフィルムディスプレイの発光体間隔を更に狭める必要があると思われる。

4. 結論および今後の課題

掘削重機用MGシステムのガイダンス画面に関する視認性の問題を解消するため、フロントガラスに設置可能な透過型 LED フィルムディスプレイおよび視線位置計測システムとMGシステムの情報を統合してオペレーターの視線と重なるように各種情報を表示可能なXRコックピットシステムを開発した。しかし、現状の解像度ではワイヤーフレームの描画は可能であるが、細かい文字や記号等を表示するには解像度が不足している。

現在、我々は現状の発光体間隔である4mmから2mmに狭めた新しい透過型 LED フィルムディスプレイ製品の開発に着手しており、開発完了後に再度XRコックピットシステムへの適用を検討する予定である。

建設重機用のMGシステムについては、冒頭で述べたように防衛省が契約する施設整備工事現場においても導入事例が増えているほか、陸上自衛隊の「施設課部隊」においても導入に向けた動きが始まっており⁴⁾、本技術を導入することで防衛施設整備における重機作業の更なる効率化に貢献できる可能性があると思われる。

謝辞

本システムの開発にあたりまして、株式会社フォーラムエイト様、株式会社東陽テクニカ様、ライカジオシステムズ株式会社様、イマクリエイト株式会社様に多大なるご協力を頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 加藤製作所 WEB :
<https://kato-works.co.jp/products/shovel/hdmg.html>
- 2) 日建連「建設こまち」WEB :
https://www.nikkenren.com/komachi/story/story_05.html
- 3) Martin Liebner, Felix Klanner, Christoph Stiller : Der Fahrer im Mittelpunkt - Eye-Tracking als Schlüssel zum mitdenkenden Fahrzeug? , Conference: 8. Workshop Fahrerassistenzsysteme, 2012
- 4) 日経クロステック WEB :
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00138/071901335/>

レーザーピーニングによる金属材料の残留応力と疲労特性の改善

IMPROVEMENT OF RESIDUAL STRESS AND FATIGUE PROPERTIES OF METALLIC MATERIALS BY LASER PEENING

佐野雄二*, 小林祐次**
SANO Yuji and KOBAYASHI Yuji

* 博（工）株式会社 LAcubed（〒220-0012 横浜市西区みなとみらい3-7-2-2406）
** 博（工）新東工業株式会社（〒441-1205 愛知県豊川市大木町小牧180-1）

キーワード：レーザーピーニング, 残留応力, 疲労, A7075, Ti-6Al-4V, HT780
(*Laser peening, Residual stress, Fatigue, A7075, Ti-6Al-4V, HT780*)

1. はじめに

レーザーピーニング (LP; Laser peening) は、尖頭値の高いパルスレーザーを金属材料に照射した際の衝撃力を利用することにより、表面に圧縮の残留応力を形成する技術である^{1,5)}。ショットピーニングとの類似性からレーザーピーニングと呼ばれているが、レーザーショックピーニング (LSP; Laser shock peening) と言うことも多い⁴⁾。

パルスエネルギーの大きいレーザーを使用すると、その効果は材料の表面から奥深くまで及び、深さ数 mm の圧縮残留応力を導入することも可能である⁶⁾。このため、高い信頼性が要求されるジェットエンジンなどの航空機部品の疲労対策⁷⁾や、原子炉構造物の応力腐食割れに対する予防保全対策^{5,8)}として使用されている。

レーザーピーニングは対象に応じて施工条件を瞬時に制御することが可能で、ショットのような回収物がない、非接触で施工反力がない、等の優れた特徴を備えている。一方、これまで国内で利用できるレーザー装置は 100 mJ ~ 1 J クラスの Nd:YAG レーザーに限られていた^{8,9)}ため、レーザーピーニングの特徴を十分に活用できない場面もあった。我々は内閣府 ImPACT プログラムにおいて、手のひらサイズの超小型・高出力レーザーを開発¹⁰⁾し、屋外利用やインフラのメンテナンス等への適用可能性を拓いた。また昨年、高出力のレーザーピーニング装置を新東工業 (株) が導入した¹¹⁾ことから、国内で幅広い用途に対応できる体制が整った。

本報告では、まずレーザーピーニングの原理・効果などについて説明する。次に、新たに開発した超小型レーザーを使用した可搬型のレーザーピーニング装置¹²⁾、並びに高スループットが期待できる高出力のレーザーピーニング装置^{4,13)}、更にはそれらを使用した残留応力および疲労特性の改善効果について紹介する。

2. レーザーピーニングの原理および効果

レーザーピーニングの基礎プロセスを、図-1 に示す。水で覆われた材料に強いレーザーパルス照射すると材料のごく表層がアブレーションされ、高圧のプラズマが発生する。水の慣性がプラズマの膨張を妨げるため、プラズマの圧力は空気中と比較して数十倍となり数 GPa に達する^{3,14)}。この圧力によって衝撃波が発生して材料中を伝播し、動的な応力によって材料は塑性変形を受ける。衝撃波が通過した後は、未変形部からの弾性拘束によって材料の表層に圧縮残留応力が生じる¹⁵⁾。対象物またはレーザービームを移動させながら順次レーザーパルスを照射すると、レーザーが照射された表面にほぼ一様な圧縮残留応力が導入される。

プラズマを閉じ込めて高圧化するために必要な水膜の厚さは 1 mm で十分であるが、小さな部品は水に沈めて処理することが多い。近赤外の Nd:YAG レーザー (波長 1.06 μm) は水に吸収されやすいため、水中の透過距離が長い場合には、吸収が無視できる緑色の第2高調波 (波長 532nm) を使用する。

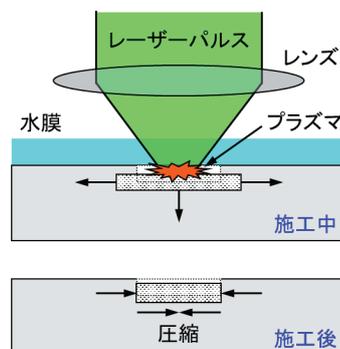


図-1 レーザーピーニングの基礎プロセス

3. レーザーピーニングの効果

ここでは、残留応力および疲労特性に対するレーザーピーニングの効果について概説する。金属組織、硬さ、表面粗さ、加工誘起マルテンサイト、SCC 感受性などに対する効果については、別途文献^{16,17)}にまとめている。

3.1 残留応力に対する効果

残留応力に対するレーザーピーニングの効果の1例を図-2に示す¹⁸⁾。水中に設置した490 MPa級溶接構造用圧延鋼材 (SM490) 試験片に、Nd:YAG レーザー第2高調波 (波長 532 nm、パルス幅 8 ns) をパルスエネルギー 200 mJ、集光径 0.8 mm、密度 36 パルス/mm² で照射した。この場合、試験片表面の各点には1ヶ所あたり平均して18回レーザーパルスが照射されている。

表面の残留応力はX線回折 (XRD) により測定し、XRD と電解研磨による表面層除去を交互に繰り返して残留応力の深さ分布を求めた。表面層除去による残留応力の再分布は補正していないが、除去面積および深さが試験片の寸法と比較して小さい場合には、その影響は小さい¹⁹⁾。

本試験片は20年前の2004年にレーザーピーニング処理したものであるが、当時の残留応力測定結果と2022年の結果に有意な差はなく、レーザーピーニングによる残留応力は室温では緩和しないことが確認できた。

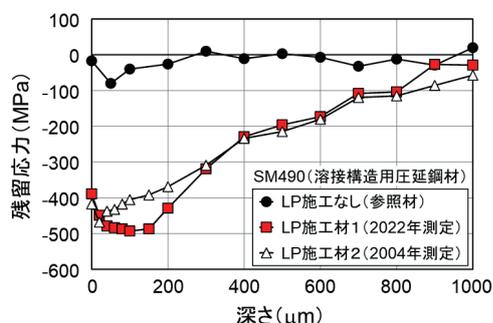


図-2 残留応力に対するレーザーピーニングの効果¹⁸⁾

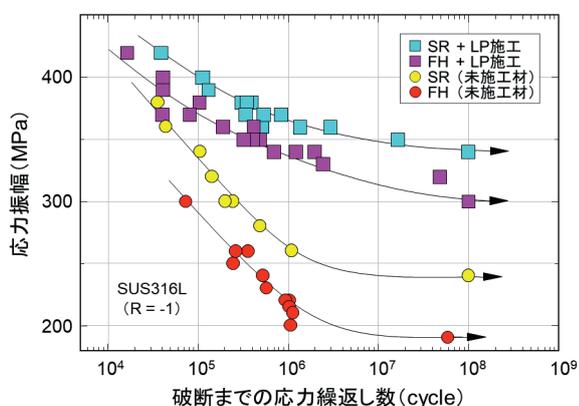


図-3 疲労特性に対するレーザーピーニングの効果⁹⁾

3.2 疲労特性に対する効果

高サイクル疲労に対するレーザーピーニングの効果を確認するため、SUS316L 丸棒試験片にレーザーピーニング処理を施し、回転曲げ疲労試験 (応力比 $R = -1$) を行った⁹⁾。負荷繰り返し速度は 46 Hz (2760 rpm) とし、試験片の発熱は水流により除去した。

試験片には予め熱処理 (FH および SR) を施した。FH は結晶の均一化を目的とし、1100 °C で1時間の真空焼鈍処理を行った。また、SR は試験片作成時の機械加工による残留応力の除去を目的とし、900 °C で1時間の処理を行った。熱処理後は試験片の表面仕上げを行い、3.1節と同様の条件でレーザーピーニング処理を施し、回転曲げ疲労試験に供した。

疲労試験の結果を図-3に示す⁹⁾。レーザーピーニング処理により SR 材の疲労限度は未施工の 240 MPa から 340 MPa に上昇し、約 1.4 倍向上した。FH 材では疲労限度が未施工の 190 MPa から 320 MPa に上昇し、約 1.7 倍となった。

高サイクル疲労については SUS304、アルミニウム合金 AC4CH、A7050、A7075、橋梁用鋼材 SM490、高張力鋼 HT780、機械構造用合金鋼 SCM420、電磁鋼板 Fe-3Si、チタン合金 Ti-6Al-4V 等についても試験を行い、レーザーピーニングによる残留応力と疲労特性の改善効果を確認している。また、摺動特性²⁰⁾や腐食特性²¹⁾についても良好な結果が得られている。

4. レーザーピーニング装置および試験結果

一般にレーザーピーニング装置は (1) 高出力パルスレーザー、(2) 処理対象物またはレーザービームを走査するための電動ステージとロボット、(3) 水膜を形成するための水ノズルとポンプ、(4) それらの制御装置とソフトウェアにより構成される。また、状況に応じて空調や冷却系、安定化電源などが必要となる。

ここでは、我々が約3年前に開発した持ち運び可能な小型レーザーピーニング装置の概要と試験結果を報告する。また、昨年国内に初めて導入された高出力のレーザーピーニング装置の概要を報告する。

4.1 小型・可搬型レーザーピーニング装置

高出力のレーザー装置は空調 (温湿度制御) を備えた屋内での使用を前提に設計されている。我々は、内閣府 ImPACT プログラムにおいて、空調のない半屋外の環境で使用できる超小型の高出力レーザーを開発した¹⁰⁾。また、戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン) において、超小型の高出力レーザーを使用した持ち運び可能な小型レーザーピーニング装置を開発した (図-4)¹²⁾。

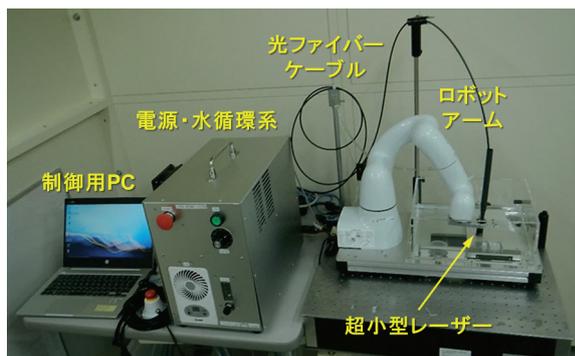


図-4 小型レーザーピーニング装置

この装置は超小型レーザーを搭載した6軸ロボットアーム、電源・水循環システム、制御用PCで構成され、航空手荷物として持ち運び可能な大きさ・重量となっている。ロボットアームの先端には受動Qスイッチ式Nd:YAGレーザー(波長1.06 μm 、パルス幅1.3 ns、パルスエネルギー10 mJ、繰返し100 Hz)が搭載され、光ファイバーケーブルを介して電源ボックス内の半導体レーザーにより駆動される。レーザーピーニングに使用した水は、水循環系によって回収・再利用される。

ロボットアームには人協働ロボットを採用することで、柵の設置などの安全対策を不要とした。ロボットアームの重量は4 kg、可搬重量は0.5 kgである。電源は単相交流100~220 Vで、最大消費電力は330 Wである。コンセントに接続して数リットルの水を供給すれば、レーザーピーニング処理が可能な状況となる。

開発した小型レーザーピーニング装置を用いて、パルスエネルギー7.5 mJ、集光径0.42 mmでアルミニウム合金A7075-T73のレーザーピーニング処理を行った。照射密度は100~1600 パルス/mm²の間で変化させた。残留応力深さ分布の測定結果を図-5に示す。未処理材の残留応力はほぼ0 MPaであり、残留応力測定の標準偏差は ± 20 MPa以下であった。従来のレーザーピーニングの条件(図-2ではパルスエネルギー200 mJ)と比較して桁違いに小さい7.5 mJのパルスエネルギーであっても、表面から0.3~0.5 mm程度の深さまで圧縮の残留応力を導入できることが分かった。

図-6にアルミニウム合金A7075BE-T6511の回転曲げ疲労試験(応力比R=-1)の結果を示す²²⁾。将来のレーザーピーニング装置の更なる小型化を目指し、図-5の条件(7.7 mJ)より小さいパルスエネルギー(1.7 mJ)で処理を行った。集光径は0.3 mm、照射密度は800 パルス/mm²とした。その結果、1.7 mJという極端に小さいパルスエネルギーにもかかわらず、レーザーピーニング処理によって疲労強度は約1.5倍に、疲労寿命は約100倍まで改善された。

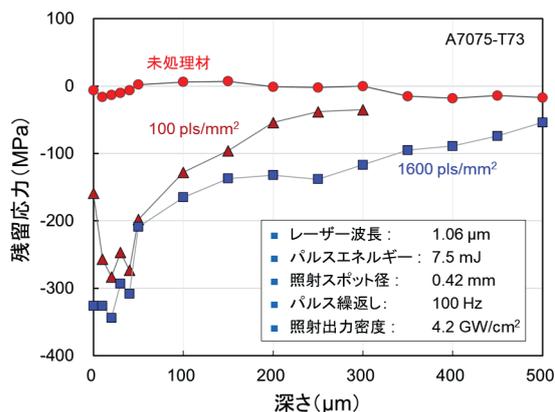


図-5 A7075-T73の残留応力深さ分布

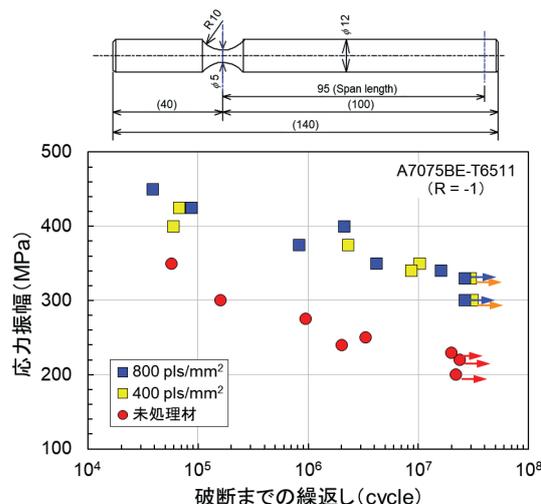


図-6 A7075-T6511の疲労試験結果²²⁾

パルスエネルギー1.5 mJでレーザーピーニングを施した機械構造用合金鋼SCM420Hの回転曲げ疲労試験の結果を図-7に示す。集光径は0.2 mm、照射密度は1600 パルス/mm²とした。圧縮残留応力の深さは100 μm 程度に留まっていた²³⁾が、疲労特性は大きく改善された。

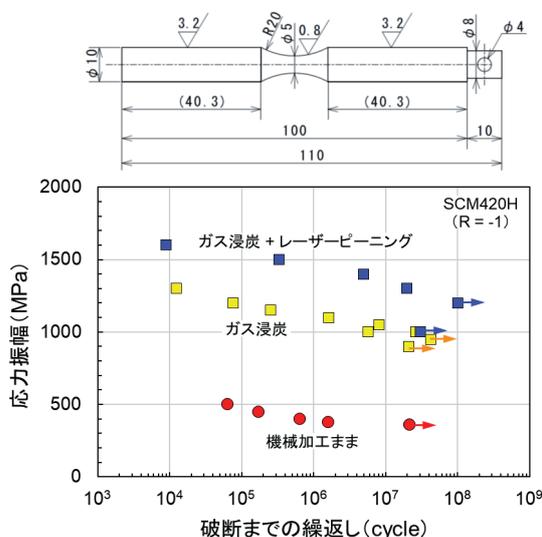


図-7 SCM420Hの疲労試験結果²³⁾

780MPa 級高張力鋼 (HT780) 突合せ溶接継手試験片の疲労試験結果を図-8に示す¹²⁾。レーザーピーニングはパルスエネルギー 7.7 mJ、集光径 0.5 mm、照射密度 800 パルス/mm²で行った。7.7 mJ という桁違いに小さいパルスエネルギーを使用しても、従来の結果 (200 mJ) と比較して遜色はなく、疲労特性は大きく改善された。

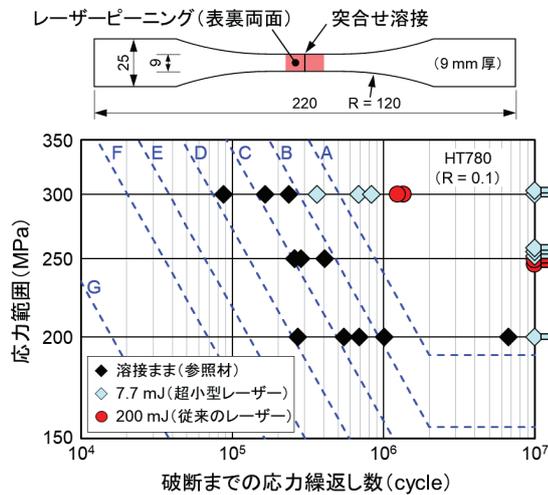


図-8 HT780 溶接継手の疲労試験結果¹²⁾

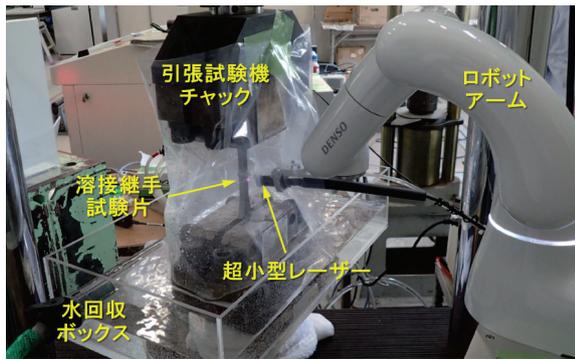


図-9 レーザーピーニングの現場施工模擬試験

本レーザーピーニング装置は小型で移動が容易であり、空調のない環境でも使用できるため、橋梁のメンテナンスを模擬したレーザーピーニング試験を行った(図-9)。試験片には図-8に記載の HT780 の突合せ溶接継手を使用した。結果は解析中であるが、解放された半屋外の条件においてもレーザーピーニング装置は正常に動作することを確認した。

建設工事では、溶接などの現場での接合作業が何らかの形で必要となる。また、構造部材の製造時にピーニング等により残留応力改善を行った場合においても、現場に据え付けた際に死荷重を受け、ピーニングの効果が十分に発揮できない状況が想定される。可搬型の小型レーザーピーニング装置を使用すれば、現場で接合部の残留応力改善を行うことが可能となり、これらのニーズに応えることができる。

4.2 高出力レーザーピーニング装置

昨年、新東工業(株)が導入したレーザーピーニング装置 Procudo[®]の同型機を図-10に示す^{4,24)}。また、レーザー装置を図-11に、内部の光学部品類を図-12に示す。レーザーは半導体励起の Nd:YLF で波長 1.05 μm、最大パルスエネルギー 10 J、パルス幅 8~16 ns、最大繰返し 20 Hz で発振する。平均出力は 200 W に達する。

本レーザーピーニング装置はジェットエンジンのファンブレードの FOD (Foreign object damage) 対策や、タービンブレードの疲労強度向上に利用されてきた^{4,7)}。タービンブレードの施工の様子を図-13に示す²⁵⁾。水ノズルを使用してブレード表面に水膜を作りながらレーザーパルス照射する。ブレードの表面には予め金属フイルムやテープを貼付し、高強度のレーザーパルス照射した際の材料表面の損傷を防いでいる。赤いビームは施工位置を示すアイガイドである。

残留応力改善の例を図-14に示す¹³⁾。Ti-6Al-4V にピーク出力密度 3.2、4.5、9.9 GW/cm² でレーザーを 1 パルス (1 レーヤー) 照射したときの結果である。ピーク出力密度依存性がよく現れており、9.9 GW/cm² では 1 mm を越える深さまで圧縮残留応力が形成されている。



図-10 Procudo レーザーピーニング装置⁴⁾



図-11 Procudo レーザー装置²⁴⁾



図-12 レーザーおよび光学部品²⁴⁾



図-13 タービンブレードのレーザーピーニング²⁵⁾

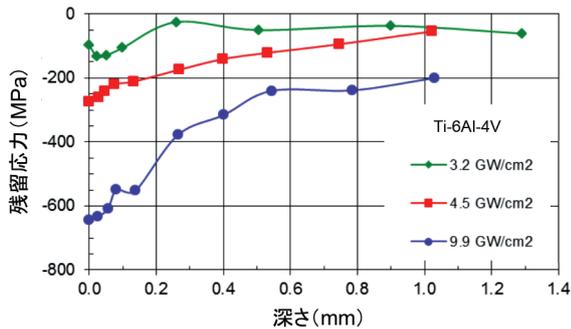


図-14 Ti-6Al-4V の残留応力改善¹³⁾

新東工業 (株) におけるレーザーピーニング処理の準備作業の様子¹¹⁾を図-15に、アルメンストリップの施工状況²⁶⁾を図-16に示す。ロボットの可搬重量は数百 kg であり、金型や様々な部品・構造物のレーザーピーニング施工が可能である。

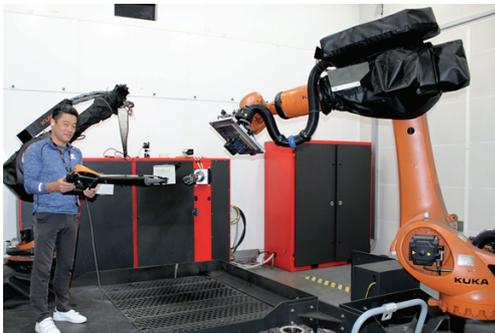


図-15 レーザーピーニング処理の準備作業¹¹⁾

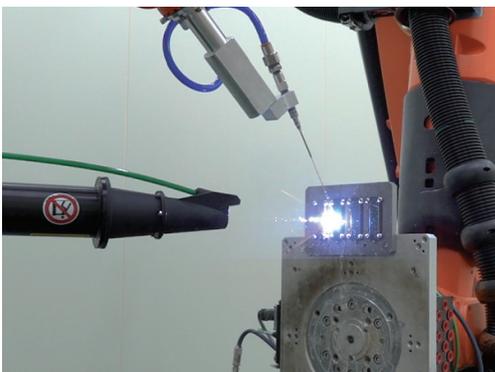


図-16 アルメンストリップのレーザーピーニング²⁶⁾

5. おわりに

レーザーピーニングの原理および効果について概説した。また、近年国内で開発あるいは導入された新たなレーザーピーニング装置について、その概要を紹介した。

3年前に開発した可搬型のレーザーピーニング装置については、手のひらサイズの高出力レーザーを使用してアルミニウム合金 A7075、機械構造用合金鋼 SM420H、高張力鋼 HT780 のレーザーピーニング試験を行った。その結果、表面に高い圧縮の残留応力が導入され、疲労特性が大きく改善されることを確認した。本装置は小型で軽量のロボットアームを使用することで狭隘な部位や高所への適用が容易となるため、航空機や船舶など複雑な大型構造物への適用の他、建築現場の溶接後処理や鋼橋の寿命延長など屋外での利用が期待できる。

一方、昨年導入した高出力レーザーピーニング装置については、システムの概要および施工の準備状況を説明した。レーザーピーニングに特化したパルスエネルギー 10 J、繰返し 20 Hz、平均出力 200 W の従来にない高性能なレーザー装置を備えており、高いスループットが期待できる。また、被施工物のハンドリング用に高精度かつ大型のロボットアームを使用しているため、メートル級の大きさで重量数百 kg の部品のレーザーピーニング処理も可能である。本装置の活用により、様々な金属部品・構造物の疲労特性が大幅に改善され、寿命延長を図ることができる。

処理速度をはじめとするレーザーピーニング装置の性能や適用範囲、使用環境はレーザー装置の性能やロボスタ性によって左右される。このため、レーザー装置とシステムの高度化を推進し、安定かつ高繰返し運転が可能なナノ秒レーザー装置を実現し、レーザーピーニングの適用拡大を図っていく所存である。

参考文献

- 1) 佐野雄二：レーザーピーニング技術の開発動向と将来展望，防衛技術ジャーナル，Vol. 43, No. 3, pp. 20-27, 2023.
- 2) 佐野雄二：パルスレーザーの直接照射による金属材料の長寿命化技術，スマートプロセス学会誌，Vol. 11, No. 2, pp. 40-44, 2022.
- 3) Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki, and M. Obata: Residual Stress Improvement in Metal Surface by Underwater Laser Irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, Vol. 121, pp. 432-436, 1997.
- 4) A.H. Clauer: Laser Shock Peening, The Path to Production, Metals, Vol. 9, p. 626, 2019.
- 5) Y. Sano: Quarter Century Development of Laser Peening without Coating, Metals, Vol. 10, p. 152, 2020.
- 6) N.I. Morar, N. Holtham, L. Hackel, K. Davami, M. Sharma, A. DeWald, and R. Roy: Effects of High-energy Laser Peening

- Followed by Pre-hot Corrosion on Stress Relaxation, Microhardness, and Fatigue Life and Strength of Single-crystal Nickel CMSX-4® Superalloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 126, pp. 4893-4912, 2023.
- 7) D.W. See, J. L. Dulaney, A.H. Clauer, and R.D. Tenaglia: The Air Force Manufacturing Technology Laser Peening Initiative, *Surface Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 32-36, 2002.
 - 8) 千田格：レーザーピーニングの社会実装，スマートプロセス学会誌，Vol. 11, No. 2, pp. 45-51, 2022.
 - 9) Y. Sano, M. Obata, T. Kubo, N. Mukai, M. Yoda, K. Masaki, and Y. Ochi: Retardation of Crack Initiation and Growth in Austenitic Stainless Steels by Laser Peening without Protective Coating, *Material Science and Engineering A*, Vol. 417, pp. 334-340, 2006.
 - 10) 佐野雄二：ImPACT 掌サイズの高出力パルスレーザーによるものづくりの革新，溶接学会誌，Vol. 89, No. 1, pp. 16-20, 2020.
 - 11) 新東工業と米・LSP テクノロジーズ社レーザーピーニング加工の領域拡大をめざし受託加工の合弁会社を設立，<https://www.sinto.co.jp/product/surface/news/3184>.
 - 12) Y. Sano, T. Kato, Y. Mizuta, S. Tamaki, K. Yokofujita, T. Taira, T. Hosokai, and Y. Sakino: Development of a Portable Laser Peening Device and Its Effect on the Fatigue Properties of HT780 Butt-welded Joints, *Forces in Mechanics*, Vol. 7, p. 100080, 2022.
 - 13) M.A. Kattoura, S.C. Bovid, D.F. Lahrman, and A.H. Clauer: Modern Laser Peening for Material Surface Enhancement, In *Book: Shot Peening - A Dynamic Application and Its Future*, Edition: 6th, Chapter: 14, Publisher: Metal Finishing News, 2021.
 - 14) R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, and J. Virmont: Physical Study of Laser-produced Plasma in Confined Geometry, *Journal of Applied Physics*, Vol. 68, pp. 775-784, 1990.
 - 15) 佐野雄二，依田正樹，向井成彦，小畑稔，菅野真紀，嶋誠之：レーザーの水中照射による金属材料の残留応力改善メカニズム，日本原子力学会誌，Vol. 42, No. 6, pp. 567-573, 2000.
 - 16) 小畑稔，久保達也，佐野雄二，依田正樹，向井成彦，嶋誠之，菅野真紀：パルス状レーザー照射による応力改善技術の開発—SUS304 鋼に対する応力改善効果の検討—，*材料*，Vol. 49, No. 2, pp. 193-199, 2000.
 - 17) 佐野雄二：レーザーピーニングの効果，ショットピーニング技術，Vol. 14, No. 1, pp. 1-10, 2002.
 - 18) T. Kato, Y. Sakino, and Y. Sano: Effect of Laser Peening without Coating (LPwC) on Retardation of Fatigue Crack Growth in SM490 Plates, *Forces in Mechanics*, Vol. 13, p. 100234, 2023.
 - 19) Y. Akiniwa, and H. Kimura: Determination of Residual Stress Distribution in Severe Surface Deformed Steel by Shot Peening, *Materials Science Forum* Vols. 571-572, pp. 15-20, 2008.
 - 20) J. Park, I. Yeo, I. Jang, and S. Jeong: Improvement of Friction Characteristics of Cast Aluminum-Silicon Alloy by Laser Shock Peening, *J Mater Process Technol.*, Vol. 266, pp. 283-291, 2019.
 - 21) S. Tokita, H. Kokawa, S. Kodama, Y.S. Sato Y. Sano, Z. Li, K. Feng, and Y. Wu: Suppression of Intergranular Corrosion by Surface Grain Boundary Engineering of 304 Austenitic Stainless Steel Using Laser Peening Plus Annealing, *Materials Today Communications*, Vol. 25, p. 101572, 2020.
 - 22) Y. Sano, K. Masaki, Y. Mizuta, S. Tamaki, T. Hosokai, and T. Taira: Effects of Laser Peening with a Pulse Energy of 1.7 mJ on the Residual Stress and Fatigue Properties of A7075 Aluminum Alloy, *Metals*, Vol. 11, p. 1716, 2021.
 - 23) 政木清孝，斎藤悠太，小林祐次，佐野雄二，水田好雄，玉置悟司：LP 処理した SCM420H 浸炭材の硬さ分布からの残留応力減衰予測とその疲労限度推定，*材料*，Vol. 72, No. 12, pp. 845-851, 2023.
 - 24) LSP Technologies, Inc., Procudo® Laser Peening System, 2015.
 - 25) R.D. Tenaglia, and D.F. Lahrman: Preventing Fatigue Failures with Laser Peening, *The AMPTIAC Quarterly*, Vol. 7, No. 2, pp. 3-7, 2003.
 - 26) つよくする，レーザーピーニングによる応力付与の特性とは，https://www.sinto.co.jp/product/surface/function_purpose/tsuyoku04/.

年次フォーラム 2024 令和 5 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 978-4-907956-61-5

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。