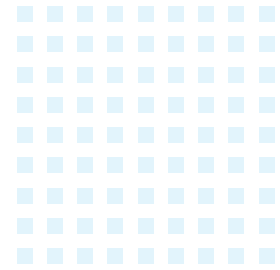
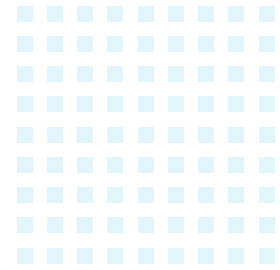
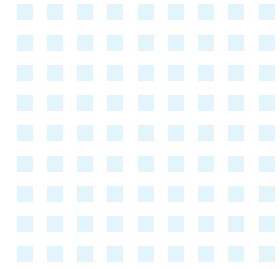


# 奥村組技術研究年報

No.49 2023



# 奥村組技術研究年報

OKUMURA TECHNICAL RESEARCH REPORT

No.49

2023

株式会社奥村組

技術本部技術研究所

TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE

OKUMURA CORPORATION

# 奥村組技術研究年報 No.49 2023 年

## 目 次

梗概 本文

### ■土木系■

#### (施工管理)

1. コンクリート打設統合管理システムの開発と現場適用 ..... 1 29  
廣中哲也・齋藤隆弘・今泉克彦・高尾篤志

#### (リニューアル)

2. アンカー孔の自動削孔装置の開発 ..... 2 35  
ーその2 下水道施設補強工事への適用ー  
川澄悠馬・三澤孝史・山口 治・川口竜巨

#### (情報化施工)

3. 地盤改良時影響可視化XRシステムの開発 ..... 3 41  
ー施工進捗と変位状況をリアルタイムに現地に3Dで可視化ー  
吉村藤子・宮田岩往・城井光雄・今泉和俊

#### (材 料)

4. Analytical and Experimental Study on Estimating the Compressive  
Strength of Early Age Concrete by the Maturity Method ..... 4 47  
Biswas Rajib Kumar・Takahiro Saito・Ryutaro Matsumoto

## ■建築系■

## (基礎)

5. 奥村・丸五式引抜き抵抗杭工法 (OMR/B-2) の開発 ..... 5 53  
—実大引抜き載荷実験結果—  
林 芳尚・武田彰文・小谷俊二・舟木秀尊

## (構造)

6. 扁平梁工法の構造性能に関する実験的研究 ..... 6 59  
—その2 ねじり耐力の評価—  
秋竹壮哉・岸本 剛・山際 創・浜口慶生

## (品質管理)

7. スラブ湿潤状態評価技術の開発 ..... 7 65  
—光学センサと自律走行式ロボットによる自動評価システムの構築—  
増田貴之・赤星博仁

## (免制振)

8. 免震建物に適用する過大变位抑制用性能可変オイルダンパーの開発 ..... 8 71  
—500kN級ダンパーの製造ばらつき—  
小山慶樹・山上 聡・洲鎌 星・舟木秀尊

■環境系■

(廃棄物処理)

9. ハイパースペクトルカメラを用いた災害廃棄物の種類と量の推定に関する基礎研究 ..... 9 77  
 羽渕博臣・清水祐也・岩下将也・吉村藤子

(土壌環境)

10. 環境変化に伴う掘削岩からの自然由来砒素溶出に関する基礎的研究 ..... 10 83  
 鈴木奨士・清水祐也・白石祐彰・倉品 悠

(音 響)

11. 音環境プレゼンテーションシステムの拡充 ..... 11 89  
 -その2 工事騒音評価への利用も考慮したシステム改良-  
 柳沼勝夫・阪本一生

英文サマリー .....	13
社外発表報文一覧 .....	19
表彰 .....	25

■表紙の写真■

上段：富津千葉高圧幹線 第1期建設工事（千葉県富津市）

中段：流山市立おおぐろの森中学校（千葉県流山市）

下段：和歌山城ホール（和歌山県和歌山市）

# コンクリート打設統合管理システムの開発と現場適用

Development of a Concrete Placement Management System and Use at a Construction Site

廣中哲也\* 齋藤隆弘\*\* 今泉克彦\*\* 高尾篤志\*\*\*  
Tetsuya Hironaka, Takahiro Saito, Katsuhiko Imaizumi, Atsushi Takao

## 研究の目的

コンクリート構造物の品質を確保するために、施工管理者は、打設計画の立案や、施工時のコンクリートの出荷・運搬情報とその時間経過、下層のコンクリートに上層のコンクリートを打ち込むまでの打重ね時間間隔等の情報を収集、分析し、適切に管理する必要がある、多くの時間と労力を費やしている。そのため、施工情報を連続的に共有し、早期に施工にフィードバックすることにより、適正な品質管理を実現すること、および打設管理業務を低減することが望まれている。そこで、コンクリート構造物の品質を確保するとともに打設管理業務を効率化するシステムの開発を目的とした。

## 研究の概要

コンクリートの運搬・打込み・打重ね等の情報を付与した CIM モデル、モニタリング技術およびクラウドの活用により、計画から施工までの情報をリアルタイムに共有するとともに見える化して一元管理するコンクリート打設統合管理システムを開発し、コンクリート堰堤築造工事に適用した。

図-1に示す打設・運行計画機能により、打設量、打設速度、ブロック分割番号、打込み順序等の打設計画条件を入力することで、打重ね時間表、平面と立体図の打重ね時間マップが自動生成され、計画の修正が容易かつ確実となり、最適な打設計画の立案が可能になった。打設場所ごとの計画作成時間が、従来の平面図と表計算ソフトを組み合わせた方法の2時間程度に比べて、1/4の30分程度に短縮できた。

図-2に示す運行管理機能により、運搬中、打設中および打設済みのアジテータ車の進捗状況や、コンクリートの運搬および打込みの経過時間を生コン工場と打設場所の両方のタブレット画面上で、数値と色分け表示により視覚的に確認できた。コンクリートの出荷調整を適切かつ円滑に行えたため、アジテータ車の現場待機時間が減少し、コンクリートの経時変化による品質低下の防止が可能になった。アジテータ車の運搬および打込み時間管理についても、従来の生コン伝票の内容確認作業と経過時間の計算作業が不要となったため、出荷調整、運搬および打込み時間管理業務の効率化が図れた。

図-3に示す打設管理機能により、打込み後の経過時間が数値と色分け表示されるため、制限時間内でのコンクリートの打重ね時間管理が容易となり、コンクリートのコールドジョイントの発生リスクを低減できた。従来の経過時間の計測、計画表の記入と計算作業を自動化することで煩雑な管理作業が不要となり、打重ね管理業務の効率化が図れた。

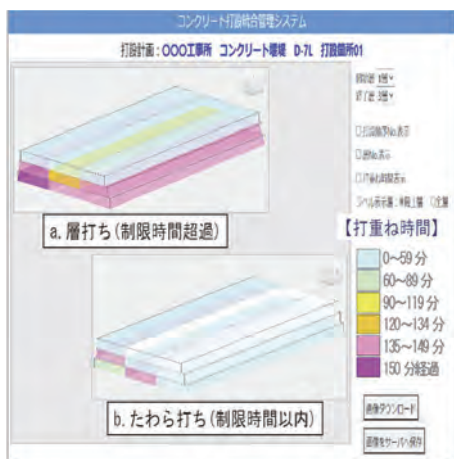


図-1 打設・運行計画機能の画面例



図-2 運行管理機能の画面例



図-3 打設管理機能の画面例

## 研究の成果

開発したコンクリート打設統合管理システムを現場に適用することで、コンクリート工事におけるアジテータ車の待機時間の短縮とコンクリートの経時変化による品質低下の防止、打重ね制限時間の遵守とコールドジョイントの防止を確認した。また、打設計画の立案、運搬・打込み・打重ねに関する時間管理および書類作成等の打設管理業務の効率化や、一連の施工情報の電子化によるトレーサビリティへの展開を可能にした。

\*技術本部技術研究所 \*\*技術本部技術研究所土木研究グループ \*\*\*ICT統括センターイノベーション部

# アンカー孔の自動削孔装置の開発

## —その2 下水道施設補強工事への適用—

Developing an Automated Drilling Hole Device for Anchors  
- Part 2 : Application to Sewerage Facilities -

川澄悠馬\* 三澤孝史\*\* 山口 治\*\*\* 川口竜巨\*\*\*  
Yuma Kawasumi, Takashi Misawa, Osamu Yamaguchi, Tatsuo Kawaguchi

### 研究の目的

既設コンクリート構造物の補強工事において行われるあと施工せん断補強工法や壁等の増設工法では、「あと施工せん断補強筋」や既設と新設コンクリートの一体性を高める「あと施工アンカー筋」の挿入孔の削孔が人力により行われる。削孔作業は通常、削岩機や電動ハンマードリル等を用いて行われるが、削孔本数が多く、繰り返しの振動作業になり、肉体的な負担がある。また、削孔時に発生する粉塵による作業環境の悪化があり、これらの改善が求められている。そこで、省力化・効率化を図るために、自動で削孔し、粉塵の飛散防止機能を備えたアンカー自動削孔装置を2種類開発した。

### 研究の概要

開発した自動削孔装置は、あと施工せん断補強筋を対象とする大径用自動削孔装置（最大削孔径φ40mm程度、写真-1）とあと施工アンカー筋を対象とする小径用自動削孔装置（最大削孔径φ25mm程度、写真-2）である。

本装置は、壁平行方向と壁直交方向、上下方向へ削岩機・電動ハンマードリルを移動させる機構を持っており、削孔計画（削孔位置、削孔深さ、削孔本数）に従って自動で移動・削孔し、削孔結果（削孔時間、移動量、削孔深さ等）を自動で保存する。事前の探査で把握できなかった鉄筋等に接触した場合には、削孔速度の低下を検知して中断し、次の孔の削孔するように制御している。

これらの装置を下水道処理施設の放流渠の耐震補強工事（図-1）に適用した（写真-3）。

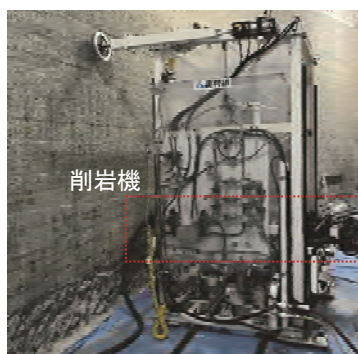
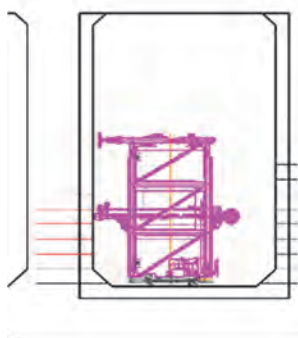


写真-1 大径用自動削孔装置

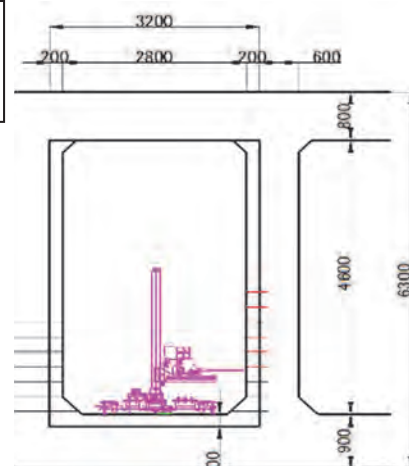


写真-2 小径用自動削孔装置

- ・側壁の片面に小径用自動削孔装置を適用
- ・対面の側壁に大径用自動削孔装置を適用



(a) 大径用自動削孔装置  
(削孔径φ34mm)



(b) 小径用自動削孔装置  
(削孔径φ20mm)

図-1 適用対象構造物

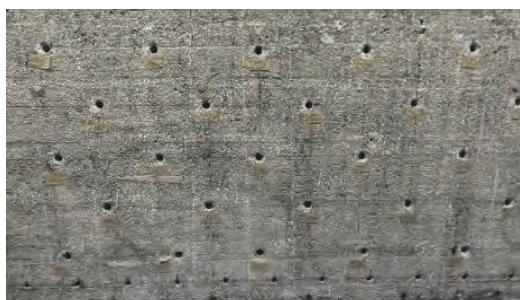


写真-3 大径用自動削孔装置適用後の壁面

### 研究の成果

小径用および大径用の2種類の自動削孔装置を開発して実施工に適用し、以下の成果を得た。

- 削岩機・電動ハンマードリルの移動精度および削孔深さ精度は良好であった
- 自動削孔装置を適用することで、人力施工に比べ、施工効率が向上した
- 粉塵の飛散防止機構により、削孔中の粉塵の飛散がみられず、作業環境が改善された
- 鉄筋接触時には、削孔の速度低下を検知して設計通りに自動で削孔を中断し、次の孔を削孔することを確認した

\*技術本部技術研究所土木研究グループ \*\*技術本部技術研究所 \*\*\*東日本支社リニューアル工事部



# 地盤改良時影響可視化XRシステムの開発

## — 施工進捗と変位状況をリアルタイムに現地に3Dで可視化 —

XR-based Visualization and Monitoring System for Soil Stabilization Work  
 - Real-time On-Site 3D Visualization of Construction Progress and Soil Displacement -

吉村藤子\* 宮田岩往\* 城井光雄\*\* 今泉和俊\*\*\*  
 Fujiko Yoshimura, Iwao Miyata, Mitsuo Shiroi, Kazutoshi Imaizumi

### 研究の目的

地盤改良の施工時には周辺地盤の土圧に影響を及ぼすため、地盤の隆起などの公衆災害のリスクを伴う。このような災害を防止するために、施工中は近接地盤の隆起を測定し、周辺に危害を及ぼすような地盤の変状が認められた場合は作業を中止するよう求められている。そのために施工にあわせて配置された監視員は、施工機械の制御担当者と連絡を取り合って施工進捗に合わせて監視すべき場所の目星をつけ、同時に、周辺地盤の隆起等の動態観測結果を随時確認して監視を行う。しかし、都市土木などで地下に構造物が存在するなど複雑な場所での監視業務は、監視員が立体的な位置関係を正確に把握できていないと実施できない。

そこで、空間把握が苦手な人や経験が浅い人でも監視業務を遂行できるよう、施工位置や進捗、隆起や沈下が起きている場所が容易に認識できるシステムを開発した。

### 研究の概要

施工位置や動態観測計測位置を現地にリアルタイムに表示するシステムを開発した。システム構成およびデータ構成概要を図-1に示す。施工機械や現地に設置したセンサからデータをクラウドストレージサービスにアップロードする。現地の光景に重ね合わせて可視化表示する特性上、XR（クロスリアリティ）技術を用いて、iPadとHoloLens（MRゴーグル）を表示端末として使用する。QRマーカを読み込んで位置合わせを行い、クラウドストレージサービス上にあるセンサデータを読み込み、事前に与えられている位置情報を参照して、正しい位置にデータを可視化表示する。

このシステムを、高圧噴射攪拌工法で地盤改良を行っている土木工事現場にて試行した。削孔している際には青いワイヤーフレームで削孔済みの場所が表示され、造成時には設計造成長が青いワイヤーフレーム、造成済みの場所は灰色の円柱として表示され、施工進捗にあわせてリアルタイムに長さが変化していく。また、現場に設置されている沈下計の位置に、鉛直変位量を表す矢印を表示する。矢印の向きが上ならば隆起、下ならば沈下を意味し、矢印の長さが変位量を示す。監視すべき位置が明確化し効果的に監視業務を行えるようになった。



図-1 システム構成およびデータ構成概要

### 研究の成果

地盤改良の施工データと動態観測の計測データを、リアルタイムにARやMRで可視化するシステムを開発した。現場で試行を行い、現地位置に合わせて可視化することで、空間把握能力の個人差を補完するだけでなく、情報伝達が円滑化するという気づきが得られた。監視業務がより確実に行えるため、公衆災害の防止に役立つ可能性が示された。

\* ICT統括センターイノベーション部 \*\* 西日本支社機電部 \*\*\* 技術本部技術戦略部

# Analytical and Experimental Study on Estimating the Compressive Strength of Early Age Concrete by the Maturity Method

Biswas Rajib Kumar\* Takahiro Saito\* Ryutaro Matsumoto\*

## OBJECTIVES

In order to expedite the construction process, it might be essential to estimate the early age (less than 1 day) strength of concrete subjected to various temperatures and curing methods for the construction of mountain tunnels. However, the relationship between various curing temperatures and the strength development of concrete at a very early stage is not completely understood, and the current approaches might not be able to predict the compressive strength of concrete at an early age. The objective of this study is to establish a relationship between early age compressive strength of concrete and concrete maturity considering varied temperature histories of concrete. Both numerical and experimental study has been carried out in this study.

## OVERVIEW

Estimation of strength of concrete (in situ) at an early age can be critical for many reasons such as removal of the formwork, post-tensioning, handling precast members, etc. In this study, the maturity function of concrete at early age (less than 1 day) was established using different water cement ratio (W/C) and various temperature histories for concrete curing. For, W/C=0.5, the number of experimental cases were 10, where initial concrete temperature ranged between 10 to 30°C and the curing temperature ranged between 10 to 50°C. The concrete maturity function obtained from the experimental study (W/C=0.5) can be seen in Figure 1. To predict the structural behaviour of concrete subjected to different W/C ratio and curing condition, numerical analysis was carried out in the software package LINK 3D. The software can incorporate the modelling of microscopic behavior of concrete, such as the progress of cement hydration reaction, the formation of void structures in hardened bodies, internal moisture state, and the macroscopic view of reinforced concrete. It can be seen from Figure 2 and 3 that there is an excellent correlation between the experimental study and FEM analysis. FEM analysis could predict the strength gain of the concrete specimens with high precision. The numerical study slightly underestimated the experimental data. However, the numerically obtained data can be considered safe in the case of field construction.

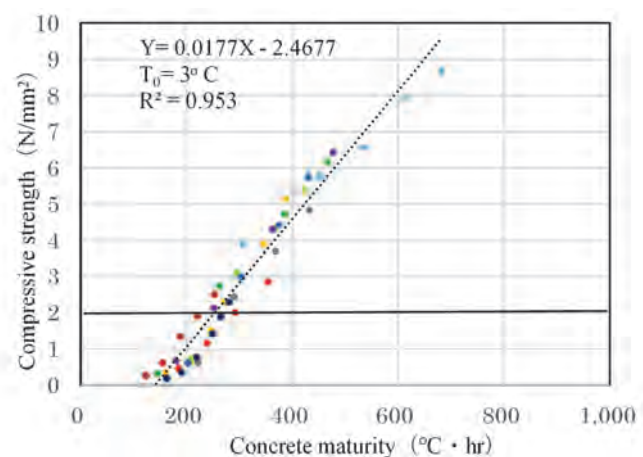


Figure 1: Concrete maturity function for W/C=0.5

## RESULTS

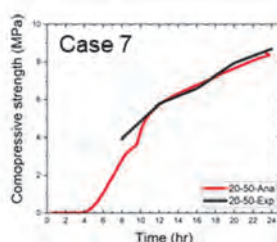


Figure 2: Comparison of experimental and numerical results for W/C = 0.5

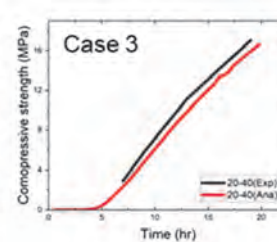
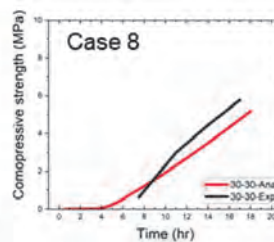


Figure 3: Comparison of experimental and numerical results for W/C = 0.4

From the experimental and numerical analysis, the relationship between compressive strength and concrete maturity at an early age (less than 1 day) was established. It was understood that for W/C=0.5, concrete can gain compressive strength of 2 MPa within 16 hours, when it is subjected to a curing temperature of 20°C or more and an initial temperature of 15°C or more. For W/C=0.4, concrete can gain compressive strength of 2 MPa within 12 hours, when it is subjected to curing temperature of 20°C or more and initial temperature of 20°C or more. Datum temperature may change depending on the concrete mix property. Appropriate datum temperature should be evaluated for improvement of the maturity method.



# 奥村・丸五式引抜き抵抗杭工法(OMR/B-2)の開発

## —実大引抜き載荷実験結果—

Development of the Okumura-Marugo pull-out Resistance Pile Method (OMR/B-2)  
- Results of Full-scale Pull-out Loading Tests -

林 芳尚\* 武田彰文\*\* 小谷俊二\*\* 舟木秀尊\*\*\*  
Yoshihisa Hayashi, Akifumi Takeda, Shunji Kodani, Hidetaka Funaki

### 研究の目的

当社と丸五基礎工業株式会社が共同開発した「奥村・丸五バケット式拡底杭工法(OMR/B)」は、拡底部に大きな引抜き抵抗力を有するものの、従来の OMR/B 工法で引抜き方向の抵抗力として考慮できるのは、杭軸部の周面抵抗力および杭自重のみに限定されており、設計上必要な引抜き抵抗力を確保するためには、杭の軸径を増やす、杭長を長くするなどの必要があった。

実大杭の引抜き載荷実験により、拡底部側面の傾斜による引抜き抵抗力の増加効果を確認し、新たに「奥村・丸五式引抜き抵抗杭工法(OMR/B-2)」として(一財)ベターリビングの評定を取得することを目的とした。

### 研究の概要

#### ■ 引抜き載荷実験の概要

開発技術のイメージを図-1に、新工法における杭の仕様を表-1に示す。

実験は、拡底部を定着させる支持層の地盤種別(砂質地盤、粘土質地盤、互層地盤)および傾斜角(5.8°、12°)をパラメータとして、計6体の杭で実施した。

載荷方法などは、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説 第一回改訂版(2002年)」に基づき実施した。

#### ■ 実験結果

- i. 地盤種別に関係なく、傾斜角の増加に伴い最大引抜き荷重、第2限界抵抗力、拡底領域の周面抵抗力度が大きくなる。
- ii. 実験結果から算出した支持力係数(砂質地盤: No.1、No.2、粘土質地盤: No.3、No.4)は、既存の研究で提案される評価式(式(2)、式(3))を上まわる(図-2参照)。

表-1 新工法における杭の仕様

	仕様
杭径	軸部径: 700mm~4, 500mm 拡底部径: 900mm~4, 700mm
コンクリート	設計基準強度 $F_c$ : 24~80N/mm <sup>2</sup> JIS 適合品の構造体強度補正值( $28S_{91}$ ): 0N/mm <sup>2</sup> 以上とする(大臣認定コンクリートの場合は指定された値による)
傾斜角( $\theta$ )	$6^\circ \leq \theta \leq 12^\circ$
最大掘削深さ	90m
適用地盤	砂質地盤、粘土質地盤、互層地盤

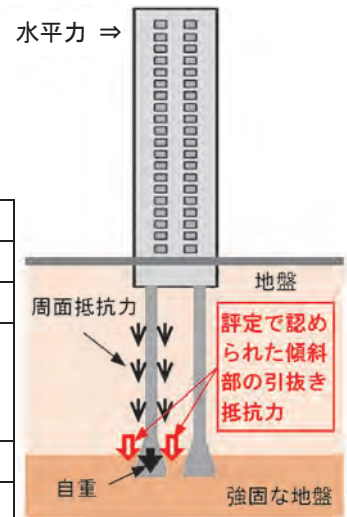


図-1 開発技術のイメージ

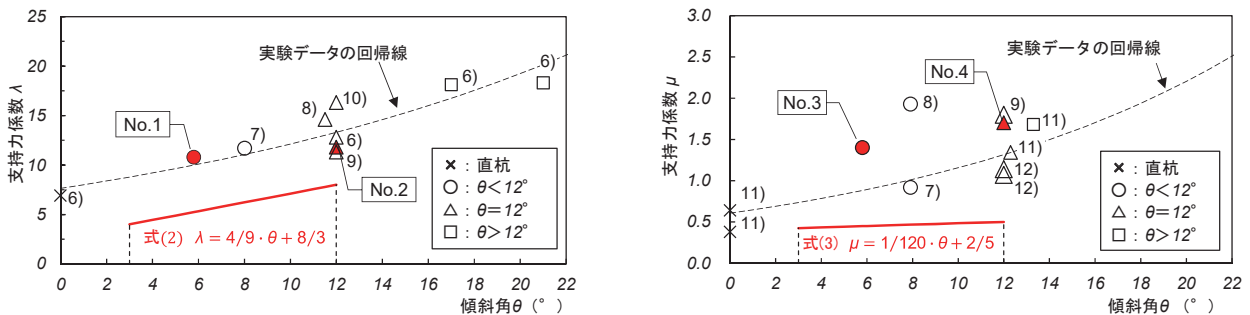


図-2 傾斜角と支持力係数の関係 (6)~(12)は、既存の実験データ)

### 研究の成果

(一財)ベターリビングにおいて拡底部側面の傾斜による引抜き抵抗力の増加効果が認められ、新たに「奥村・丸五式引抜き抵抗杭工法(OMR/B-2)」として評定を取得した。

# 扁平梁工法の構造性能に関する実験的研究

## — その2 ねじり耐力の評価 —

Experimental Study on Structural Performance of RC Flat Beam System  
- Part 2 : Evaluating Torsional Strength -

秋竹壮哉\* 岸本 剛\*\* 山際 創\*\*\* 浜口慶生\*\*\*\*  
Masaya Akitake, Takeshi Kishimoto, Hajime Yamagiwa, Keisei Hamaguchi

### 研究の目的

通常の梁よりも梁せいを小さくする代わりに、梁幅を柱幅よりも大きくした扁平梁を採用することで、プランの自由度が高まり、有効天井高や窓開口を大きく確保できるなどのメリットが生まれる。既報において、梁幅を柱幅の2~3倍とした扁平梁と柱から構成される部分架構実験を行い、既往式を準用した設計式が柱幅外の梁主筋の影響を考慮した扁平梁曲げ耐力、扁平梁と柱の接合部せん断耐力を安全側に評価できることを確認した。今回、設計式の合理化や、適用範囲の拡大のために部分架構実験を行い、ねじれ耐力を評価する。また、追加で実施した試験体においても扁平梁柱接合部のせん断耐力を既報の提案式で安全側に評価できるか確認する。

### 研究の概要

試験体は、接合部せん断耐力を確認するために接合部せん断破壊が先行するように計画した試験体2体、既報の実験にはなかった跳出し部のねじり破壊が先行するように計画した試験体4体の計6体である。なお、実建物での適用範囲を考慮し、 $F_c24,36\text{N/mm}^2$ 、柱断面 $1000\times1000\text{mm}$ 、扁平率2、梁せい $500\sim800\text{mm}$ 、階高 $3000\text{mm}$ 、梁スパン $7000\sim9000\text{mm}$ 程度を対象とし、試験体の縮尺は $1/2$ とした。図-1に代表例として直交梁のない試験体の詳細図を示す。ねじれ破壊を先行させるために柱外の扁平梁主筋を多く配筋している。

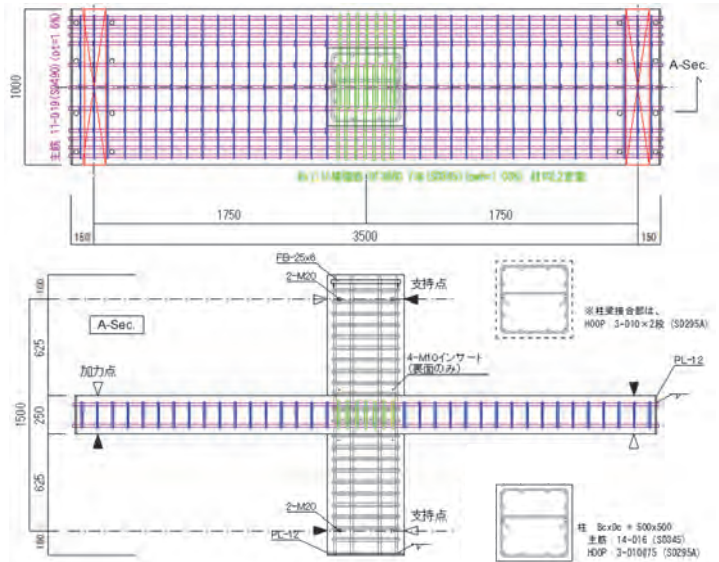


図-1 試験体図例(十字形)

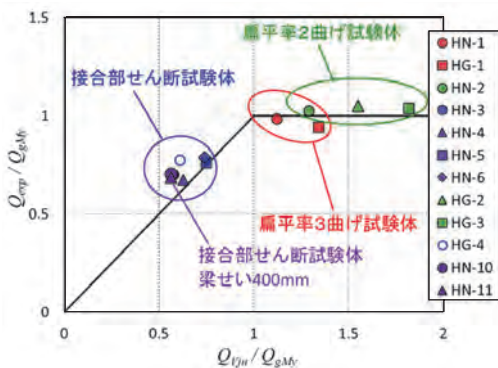


図-2 実験値と耐力計算値の比較 (曲げ、せん断)

表-1 実験値と耐力計算値の比較(ねじり)

試験体	直交梁なし		実験値/ 計算値	直交梁あり		実験値/ 計算値	
	実験値 (kNm)	計算値 (kNm)		試験体	実験値 (kNm)		計算値 (kNm)
HN-7	186.4	120.8	1.54	HG-5	103.7	94.8	1.09
HN-9	455.2	386.3	1.18	HN-8	201.4	153.8	1.31

### 研究の成果

- 扁平梁の構造性能を確認するため、計6体の部分架構実験を行い、扁平梁架構において以下のことが確認できた。
- ねじれ破壊先行型として計画した試験体において、直交梁がなく跳ね出し部のみで負担させる場合のねじりモーメントの計算値に対する実験値の余裕度は $1.18\sim1.54$ 、直交梁があり跳ね出し部と直交梁の強度を累加する場合は $1.09\sim1.31$ と、計算式は耐力を安全側に評価した
  - 接合部のせん断破壊先行型として計画した試験体において、梁せいが実大相当で $800\text{mm}$ の扁平梁も、既報の式で安全に評価できることを確認した
  - 接合部のせん断破壊先行型として計画した試験体において、扁平梁の片側側面が柱幅内におさまるように片側に扁平梁を寄せた形状でも、既報の式で安全に評価できることを確認した

\*技術本部技術研究所建築研究グループ \*\*技術本部技術研究所企画・管理グループ \*\*\*東日本支社建築設計部  
\*\*\*\*西日本支社建築設計部

# スラブ湿潤状態評価技術の開発

## — 光学センサと自律走行式ロボットによる自動評価システムの構築 —

Development of an Evaluation Method of Wet Conditions on Concrete Slabs  
- Building a System Incorporating Optical Sensors and Autonomous Mobile Robots -

増田貴之\* 赤星博仁\*\*  
Takayuki Masuda, Hiroto Akahoshi

### 研究の目的

建築工事のスラブコンクリートの施工において、スラブ表面の湿潤状態を適切に維持することは品質管理上、大変重要である。しかし、金鍍仕上げ後の湿潤養生開始時期の判断や湿潤状態の評価は管理者の目視に拠るため、定量的かつ適切な判断が為されているとは言い難く、その品質管理に係る記録を残すことも難しい。加えて、湿潤状態を適切に維持するために、散水養生をはじめとする作業面においても多くの労務が発生している。そこで、スラブ表面の湿潤状態を定量的に評価できるセンサとスラブ全体の湿潤状態を自動認識できるシステム開発に取り組んだ。

### 研究の概要

スラブ表面の湿潤状態を適切に評価するため、近赤外光を円偏光状態で照射するセンサを提案した。近赤外光に水の吸光特性を有する波長 1,450nm の光源を採用し、それを円偏光でスラブ表面に照射した場合、湿潤状態では反射光がほぼ全て帰還し、乾燥状態では帰還する光量が大きく減少すると仮定した(図-1)。これを実証し、センサとしての有効性を確認するため、散水したコンクリート供試体を用いて、湿潤から乾燥過程における反射光量の測定実験(室内実験)を行った。その結果、図-2に示す通り、反射光量の計測値(電圧値)がコンクリート表面の水位、すなわち表面の湿潤状態の変化に伴い変動すること、そして測定環境の気温により湿潤時の値が異なるものの、その値は同程度の範囲に収まることが確認された。したがって、計測値に対して閾値を設定することで、スラブ表面の状態を湿潤・半乾燥・乾燥の3段階評価が可能である。

次に、実現場におけるスラブ全体の湿潤状態を自動評価するため、センサを搭載した自律走行式ロボットを試作し(図-3)、現場での実用性に関する確認実験(現場適用実験)を行った。1m 四方にグリッド分割した約 860m<sup>2</sup> のスラブ面積に対して、約 20 分で計測が完了した。散水後のスラブ表面の湿潤状態を 1 時間ごとに計測した結果を図-4、表-1に示す。目視による湿潤状態の評価と概ね一致し、徐々に乾燥していく過程を視覚化できることを確認した。

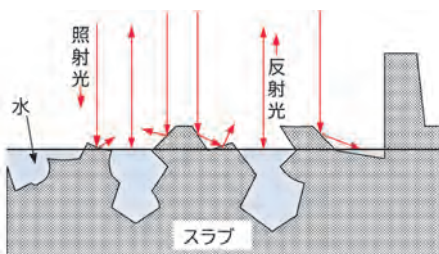


図-1 スラブ表面模式図

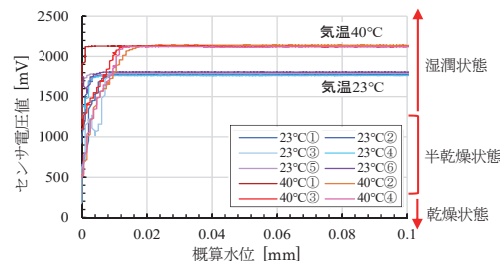


図-2 表面水位と反射光量(電圧値)の関係



図-3 センサ搭載型自律走行式ロボット

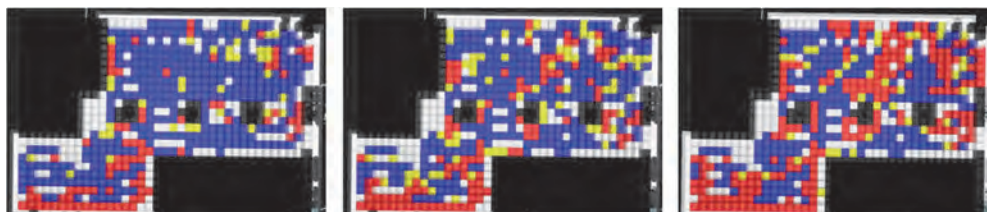


図-4 スラブを 1m 四方でグリッド化した各グリッドの湿潤評価結果  
(左から計測時刻 12:30, 13:30, 14:30 における評価結果 赤:乾燥、黄:半乾燥、青:湿潤)

表-1 湿潤評価結果の一覧

計測時刻	計測点数		
	12:30	13:30	14:30
乾燥状態	90	118	192
半乾燥状態	35	64	40
湿潤状態	317	261	210
湿潤割合(%)	72	59	47

湿潤割合: 評価可能点全てに対し、「湿潤状態」として評価した点の割合

### 研究の成果

近赤外光を用いたセンサと自律走行式ロボットによるスラブ表面自動評価システムを提案した。開発した技術の有効性と実用性の確認を目的とした室内実験と現場適用実験により、以下に示す事項を確認した。

- i. 波長 1,450nm の近赤外光を円偏光で照射するセンサにより、スラブ表面の湿潤状態の判定が可能である
- ii. 自律走行式ロボットを用いて、面積 860 m<sup>2</sup> のスラブ面を約 20 分で計測できる
- iii. 開発したシステムにより、時間とともに変化するスラブ面全体の湿潤状態の視覚的な把握が可能である

\*土木本部土木工務部 \*\*技術本部技術研究所建築研究グループ

# 免震建物に適用する過大変位抑制用 性能可変オイルダンパーの開発 —500kN 級ダンパーの製造ばらつき—

Passive Variable Orifice Damper to Control Excessive Displacement of Seismically Isolated Building  
- Manufacturing Variations in 500kN Class Dampers -

小山慶樹\* 山上 聡\* 洲鎌 星\* 舟木秀尊\*  
Yoshiki Koyama, Satoshi Yamagami, Sei Sugama, Hidetaka Funaki

## 研究の目的

近年、巨大地震に起因する長周期地震動の影響が危惧されており、免震建物では免震層に設けた水平クリアランス以上の過大な水平変位が生じ、擁壁に衝突する可能性が指摘されている。水平変位を低減する目的で、免震層の水平剛性や減衰性能を増加させると、中・大地震時に上部構造の応答が大きくなり、免震性能が低減されてしまう。そこで、中・大地震時は従来の免震性能を維持しつつ、巨大地震時に生じる免震層の過大な水平変位を低減することが可能な性能可変オイルダンパー（VOD）を開発する。

## 研究の概要

開発した VOD (図-1) は閾値以上の変位がダンパーに生じた場合、変位に応じて無段階でパッシブに減衰力を増加させ、地震中は増加した減衰力を維持し、地震終了後はパッシブに元の減衰性能に戻る回帰特性がある。最大減衰力が 500kN 級の VOD4 基に対して加振実験を行い、減衰性能と製造ばらつきを評価した (図-2)。また、減衰性能が変化してから元に戻るまでの回帰特性を確認し、問題のない範囲で再現性があることを確認した (図-3)。さらに、減衰性能が変化するまでの時間遅れが 0.05 秒以下であり、減衰性能に与える時間遅れの影響が極めて僅かであることを確認した (図-4)。最後に、免震建物にオイルダンパー (OD) を 2 基設けた場合を Case1、巨大地震時の免震層の過大な水平変位を小さくするために OD を 3 基設けた場合を Case2、VOD を 2 基設けた場合を Case3 とし時刻歴応答解析を行った。長周期地震動時では、Case2・Case3 とともに免震層の最大変位を低減したが、中・大地震時では、Case2 は Case1 に比べ上部構造の最大応答値が平均で概ね 17% 大きくなった。これに対し、Case3 は Case1 と概ね同程度の最大応答値に抑えられることを確認した (表-1、図-5)。

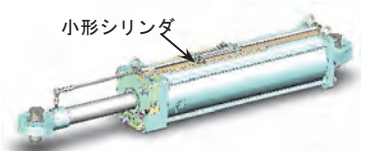


図-1 VOD 外観

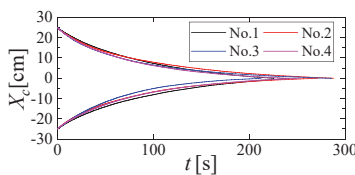


図-3 回帰特性

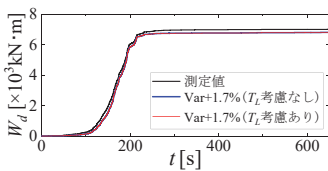


図-4 時間遅れの影響

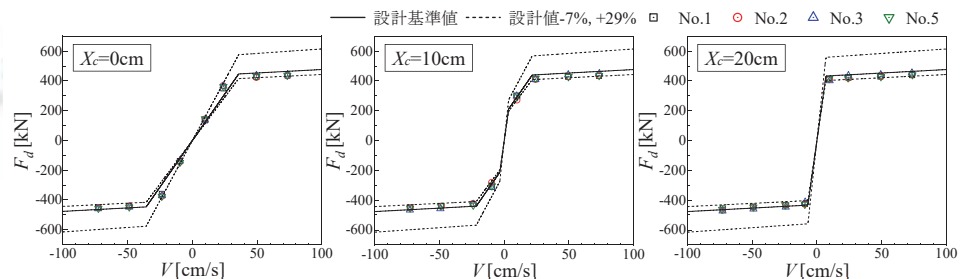


図-2 減衰力と速度の関係

表-1 免震層の最大水平変位

$\delta \text{Imax [cm]}$	
Case1 (OD×2)	43.6
Case2 (OD×3)	32.1
Case3 (VOD×2)	38.5

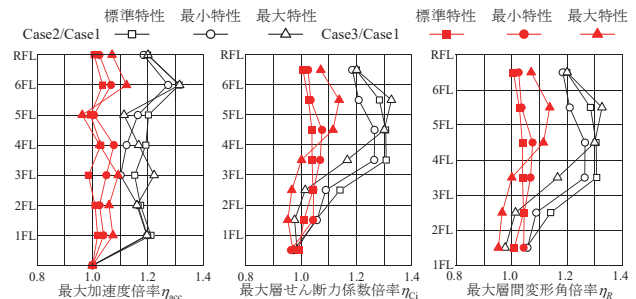


図-5 最大応答倍率 η の比較

## 研究の成果

4 基の VOD の性能確認を行い、設計基準値に対する減衰力の製造ばらつきを評価した。また、小形シリンダの回帰特性や減衰性能が変化するまでの時間遅れを確認した。実験で確認した減衰性能を考慮した解析結果から、VOD を用いた場合、中・大地震時は従来の免震性能を維持しつつ、巨大地震時に生じる免震層の過大な水平変位を低減できることを確認した。

\*技術本部技術研究所建築研究グループ

# ハイパースペクトルカメラを用いた災害廃棄物の種類と量の推定に関する基礎研究

Estimation of Type and Volume of Disaster Waste Using Hyperspectral Camera

羽瀨博臣\* 清水祐也\* 岩下将也\*\* 吉村藤子\*\*\*  
Hiroomi Habuchi, Yuya Shimizu, Masaya Iwashita, Fujiko Yoshimura

## 研究の目的

気候変動等に伴い自然災害が頻発化・激甚化しており、その度に災害廃棄物が大量に発生している。急に発生する災害廃棄物の迅速な処理のために、自治体は事前に処理計画を立案している。また、被害情報や新たな統計手法が見いだされる度に災害廃棄物の種類と量を予測・更新し、それに合わせ処理計画を更新している。しかしながら、災害廃棄物は災害の種類や発生箇所等により、種類と量が異なるため、その予測精度は十分とは言えない。予測と実績の乖離、さらには発生量の把握が遅れることで、実際の災害発生時に作られる災害廃棄物処理実行計画の策定自体が遅れ、災害廃棄物の処理効率の低下を招くこと等が問題としてある。そのため、ICT やリモートセンシング技術等により、さらに簡便かつ正確に発生量・要処理量を推計する手法の開発が望まれている。

そこで本研究では、可視光の波長領域外(900~1700nm)を撮像するハイパースペクトルカメラ(以下、HSC)に着目し、災害廃棄物の種類と量を推定する検討を行った。

## 研究の概要

### 1. HSC の画像識別技術

一般的なカメラでは、入射光を光の三原色である R (650nm 波長)、G (550nm 波長)、B (450nm 波長) の 3 バンドに分解し、その重ね合わせによって可視光情報(約 380~750nm 波長)を表現するが、HSC では、より広範囲な波長領域を多くのバンド帯で分解することができる。

### 2. 実験対象

災害廃棄物量は、次式にて推計される。

ある特定の組成の災害廃棄物量 = 総体積 × 組成(区分別割合) × みかけ比重

本報では、発災後の仮置場での現地条件等による変動が少ない災害廃棄物の組成(区分別割合)の算定を目標とした。

### 3. 集積された災害廃棄物の山の撮影実験方法

模擬災害廃棄物は、東日本大震災の実績をもとに、種類別の質量割合で作製し、混合後、堆積させ、日照条件が異なる側方 6 方向から HSC で撮影した。解析結果の性能評価は、HSC での識別領域と、実際の正しい領域の重なり度合いを表す IoU (Intersection over Union、2つの領域の論理積を論理和で割った値)を用いた。

### 4. 実験結果

- ① 災害廃棄物表面を撮影した RGB 画像の 1m×1m を代表領域として、この範囲を 0.1m のメッシュで区分し、メッシュ毎の種類を目視により分類する方法(従来法)と HSC による分類(HSC 法)を比較した災害廃棄物の組成(区分別割合)の結果は同等であった。
- ② プラスチックは概ね 60%以上の IoU が得られた。災害廃棄物量の推定は、この程度の IoU が確保できていれば、実用上支障はないため、個別の素材や適用場面によっては HSC 法で分類できる可能性が示唆された。全体的な傾向として、逆光や影があると識別精度が低下した。

※写真：順光下で IoU が 91.3%と最も高かったプラスチック類の分類画像

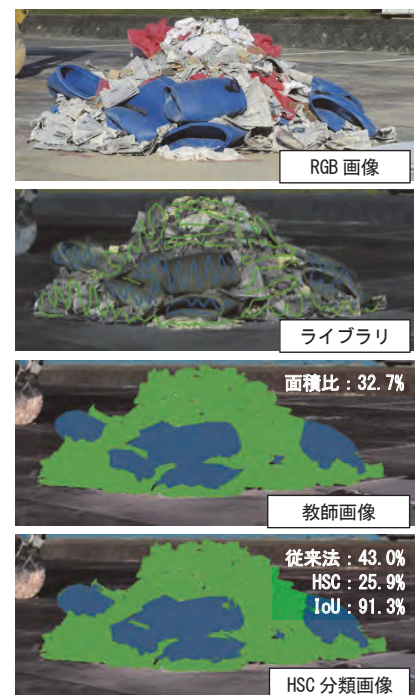


写真-1 HSCによる分類  
(青:プラスチック類)

## 研究の成果

- i. HSC 法を用いることで、災害廃棄物の種類が分類できる可能性がある
- ii. HSC による災害廃棄物の種類の分類は、適用場面を限定する必要がある
- iii. HSC 法は、目視により分類する従来法の代替となり得る
- iv. 実用化に向けては、さらなる精度向上と画像データや経験の蓄積が今後の課題である

\*技術本部技術戦略部環境ソリューション室 \*\*技術本部技術研究所環境研究グループ

\*\*\*ICT統括センターイノベーション部



# 環境変化に伴う掘削岩からの 自然由来砒素溶出に関する基礎的研究

Basic Research on Arsenic Leaching from Naturally Contaminated Rocks Attributable to Environmental Change

鈴木奨士\* 清水祐也\*\* 白石祐彰\* 倉品 悠\*\*\*  
Shoji Suzuki, Yuya Shimizu, Hiroaki Shiraiishi, Haruka Kurashina

## 研究の目的

山岳トンネル工事で発生する掘削岩には、有害物質の一つである砒素（以下、As）が潜在的に含有されているケースがあり、多くの発生事例が報告されている。このような掘削岩が発生する場合には、周辺環境に悪影響を及ぼさないよう遮水工封じ込め、不溶化処理、吸着層工法などの拡散防止対策が施される。拡散防止対策の設計には、工事中または工事後の岩石周辺環境の変化による溶出性への影響については十分な考慮がされていない。そこで、本研究では、拡散防止対策の設計をするうえで重要となる実態的な重金属等溶出性を把握するため、その影響因子となる、酸化還元電位（以下、Eh）、温度、酸素濃度について、掘削岩が埋め立てられた処分場内のモニタリングを実施した。さらに、その結果に基づく環境変化（Eh、温度、酸素濃度）を考慮した室内試験を行い、その溶出濃度の変化を確認した。

## 研究の概要

ベントナイト混合土による封じ込め処分場内に設置した温度と酸素濃度のセンサーによる測定結果を図-1に示す。処分場内の季節による温度変化は、深度が小さいほど変動幅が大きかった。また、温度の変化は深度によって遅れてピークに達しており、深度2mで約2ヶ月の遅れが確認された。酸素濃度は、夏季に低く冬季に高い傾向であり、深度が小さいほど酸素濃度の増減幅が大きかった。これは処分場の好気性微生物の活性が温度上昇により促進されたためと推察した。また、冬季において、酸素濃度が増加し、大きい深度で外気と同程度の20%を示したのは、処分場底面に設置されていた浸出水排水管が外部と繋がっていたため、外部からの酸素供給が原因と推察した。

上記処分場からの浸出水排水管出口に設置した温度とEhの水質モニターによる測定結果を図-2に示す。Ehは季節に関係なく、約+200~+300 mVを推移した。なお、センサーは浸出水排水管の出口に設置されているため、処分場内では、Ehが+200 mVよりも低くなっている箇所もあると推察した。

上記処分場から採取した掘削岩を対象とした模擬酸化還元条件によるバッチ試験を、①掘削岩の表面（酸化が進んでいる部分）を取り除く、②2mm以下に破碎、③室温20℃下で養生、④定期的に試料を分取、⑤還元剤（ギ酸Na、アスコルビン酸Na）を溶かした還元水を溶媒とした溶出試験を実施、の順序で行った。試験結果の一例を図-3に示す。As溶出濃度は、還元力が異なるすべての抽出溶媒において、大気暴露日数の増加に伴い増加した。これは、還元力が強い抽出溶媒を用いたケースほど大きく増加する傾向であり、120日間の大気暴露で、精製水は約1.9倍増加したのに対し、0.2 mol/Lアスコルビン酸Naでは約3.6倍増加した。

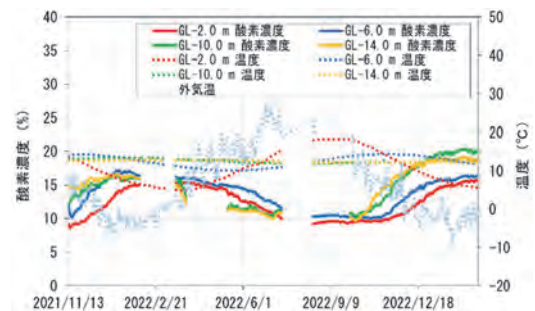


図-1 処分場内温度・酸素濃度変化

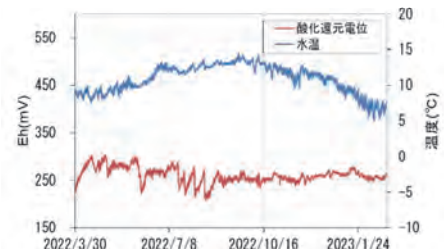


図-2 処分場浸出水 Eh・温度変化

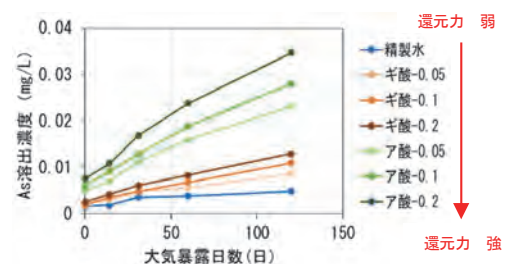


図-3 曝露期間・EhとAs溶出量

## 研究の成果

処分場内の環境変化をモニタリングし、結果を基にAs溶出における酸化還元電位および養生酸素、温度の影響について検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- i. 酸素を消費する物質（例：有機物）の少ない掘削岩の封じ込め処分場では、弱い酸化環境へと変化し（浸出水Eh：約+200~+300 mV）、また、浸出水排水管からの酸素の流入により酸素が処分場内に供給されている可能性がある
- ii. 掘削岩を大気環境下で仮置きした場合、発生直後よりもAs溶出量が増加する可能性がある
- iii. 還元環境下の方がAs溶出量は多くなる傾向があり、これは大気曝露を長く経験したもののほど顕著である

\*技術本部技術研究所環境研究グループ \*\*技術本部技術戦略部環境ソリューション室

\*\*\*技術本部技術戦略部知的財産管理室



# 音環境プレゼンテーションシステムの拡充

## —その2 工事騒音評価への利用も考慮したシステム改良—

Extending a Sound Environmental Presentation System  
- Part 2 : System Improvement for Construction Noise Evaluation -

柳沼勝夫\* 阪本一生\*  
Katsuo Yaginuma, Kazuki Sakamoto

### 研究の目的

建築音環境性能や音の大きさは、通常、Dr-50 や 50dB など数値で示すことが多く、一般の人にはその性能や大きさをイメージしにくい。このような背景から、設計仕様から完成建物の音環境を予測計算し、実音をもとに音環境性能を反映した音を試聴できる「音環境プレゼンテーションシステム」を開発している。本システムは、SIM 搭載型モバイル端末、ヘッドホンで構成され、小型軽量でかつ高速処理が可能である。今回、既開発システムの利便性向上と、建築音環境だけでなく工事騒音の評価に対しての利用を目的にシステム改良を行った。

### 研究の概要

既開発システムの操作画面の構成やプログラムの追加・修正を行った（写真-1、図-1）。

システムの改良点は以下の通りである。

- i. 工事騒音で発生頻度が高い低音域の録音、再生を行えるようにシステムのマイクやヘッドホンを見直した
- ii. 建築音環境評価と工事騒音評価の操作画面とデータベースを分離し、画面構成を追加・修正した
- iii. 大音量の騒音録音時に生じるサチュレーション確認機能を追加した
- iv. システム外の市販の予測計算ソフト等による騒音予測結果や新材料の音響透過損失や吸音率を容易にシステムに反映できるようにデータベース画面を修正した（CSV データ作成機能）
- v. 複数音源・暗騒音を考慮した試聴が行えるように試聴音の再生・評価画面を修正し、複数試聴音の再生開始時間を合わせて同時再生できるように配慮した



### 研究の成果

既開発システムの操作画面の構成やプログラムの追加・修正を行うことで、システムの利便性が向上し、建築音環境だけでなく工事騒音の評価に対しても利用できるシステムに改良できた。

\*技術本部技術研究所環境研究グループ



## ■■ 英文サマリー ■■

## 1. Development of a Concrete Placement Management System and Use at a Construction Site

Tetsuya Hironaka, Takahiro Saito, Katsuhiko Imaizumi, Atsushi Takao

We developed a concrete placement management system that ensures the quality of concrete structures and streamlines the management of placement tasks. This system applies a construction information model (CIM) that incorporates information on transportation, placement and layering of concrete, monitoring technologies, and cloud services, allowing the sharing, real-time visualization, and central management, from planning to implementation, of all construction information. Applying this system to a construction site reduced standby times for concrete agitator trucks, eliminated cold joints and quality problems associated with changes in concrete over time, and enabled compliance with layering time limits. It also made casting planning, concrete transportation management, casting and layering, document preparation, and other casting management tasks more efficient. By handling and storing construction information in digital format, this management system also ensures the traceability of construction tasks.

**Keywords:** construction information modeling, monitoring technology, cloud service, transportation management, placement management

## 2. Developing an Automated Drilling Hole Device for Anchors - Part 2 : Application to Sewerage Facilities -

Yuma Kawasumi, Takashi Misawa, Osamu Yamaguchi, Tatsuo Kawaguchi

For post-installed shear reinforcements, additional wall installations, drilling holes for reinforcing bars is typically done manually with a rock drill or electric hammer drill. However, this approach involves many drilling operations, repetitive vibration, physical strain, and harmful dust scattering. In response, two types of Automated Drilling Hole Devices have been developed to handle drilling processes in retrofitting work involving existing concrete structures. These devices, which, respectively, address large and small diameter holes, are capable of automatically drilling holes in accordance preset drilling plans (number of holes, drilling position, drilling depth), and can also record construction performance data while preventing dust dispersion. To prevent rebar damage, once the device detects contact with an existing rebar, it halts the process and moves to the next hole position. These devices can be expected to improve efficiency and reduce labor requirements.

The developed devices were applied to seismic reinforcement work for the discharge culvert of a sewage treatment facility, and performed drilling automatically, accurately, and in accordance with drilling plans, and effectively prevented dust scattering.

**Keywords:** renewal projects, reinforcement work, drilling work, labor savings, automation

### 3. **XR-based Visualization and Monitoring System for Soil Stabilization Work - Real-time On-Site 3D Visualization of Construction Progress and Soil Displacement -**

Fujiko Yoshimura, Iwao Miyata, Mitsuo Shiroy, Kazutoshi Imaizumi

Monitoring field conditions during soil stabilization work is crucial for averting issues such as ground uplift and water leakage. We developed a system that improves monitoring by sensing the construction depth and displacement of the surrounding ground and visualizing this data. The sensor data is uploaded to the cloud and can be viewed in real-time on devices with XR technology. We expect this system to improve personnel assignments, allowing staff lacking strong spatial reasoning skills and experience in supervising ground work to function as inspectors. The system will allow inspectors to track work progress and look for abnormal displacement. The capacity to share images will further communication and shared understanding.

We assessed this system at an actual construction site. The values of the vertical displacement meters and the length of the piles being constructed underground at the time were successfully visualized via HoloLens and iPad. The results indicate this system is capable of effectively visualizing sensor data in the context of the surrounding landscape and preventing unintended and negative impacts on the surroundings.

**Keywords:** soil stabilization, field observation, IoT Sensor, XR, visualization

### 4. **Analytical and Experimental Study on Estimating the Compressive Strength of Early Age Concrete by the Maturity Method**

Biswas Rajib Kumar, Takahiro Saito, Ryutarō Matsumoto

In order to expedite the construction process, it might be essential to estimate the early age (less than 1 day) strength of concrete subjected to various temperatures and curing methods for the construction of mountain tunnels. However, the relationship between various curing temperatures and the strength development of concrete at a very early stage is not completely understood, and the current approaches might not be able to predict the compressive strength of concrete at an early age. In order to establish a relationship between early age compressive strength of concrete and concrete maturity while taking varied temperature histories of concrete curing into account, numerical and experimental study has been carried out in this study. The results obtained from the numerical analysis and experimental study were in good agreement. Finally, to predict the very early-age compressive strength of lining concrete, different equations have been proposed in this study for different water to cement ratio. This study will be helpful to predict the early age compressive strength of lining concrete.

**Keywords:** Lining concrete, concrete maturity, FEM analysis, early age

## 5. Development of the Okumura-Marugo pull-out Resistance Pile Method (OMR/B-2) - Results of Full-scale Pull-out Loading Tests -

Yoshihisa Hayashi, Akifumi Takeda, Shunji Kodani, Hidetaka Funaki

The bucket type bell pile method (OMR/B) has a high pull-out resistance in the bell enlargement. However, evaluations of pull-out resistance have been limited to the surface resistance of the pile shaft and the weight of the pile itself, which generally leads to increased pile shaft diameters or pile lengths to ensure the pull-out resistance required for a specific design.

In response, we performed pull-out loading test of full-size piles anchored by the bucket type bell pile method (OMR/B) to confirm the following:

- i. Regardless of the soil type, the maximum pull-out load, the second limit resistance force and the degree of circumferential resistance in the bell enlargement region increase with increasing tilt angle.
- ii. Bearing capacity factor of the ground calculated from the experimental results exceeds the solutions of the evaluation formulae proposed in existing studies.

Assessments of the increased pull-out resistance generated by the sloping surface of the bell enlargement led to its approval as the new bucket type bell pile method (OMR/B-2) by the Center for Better Living, a general incorporated foundation in Japan.

**Keywords:** cast in place pile, bell enlargement, pull-out resistance, loading test, tilt angle

## 6. Experimental Study on Structural Performance of RC Flat Beam System - Part 2 : Evaluating Torsional Strength -

Masaya Akitake, Takeshi Kishimoto, Hajime Yamagiwa, Keisei Hamaguchi

In apartment complexes, the use of RC flat beams, in which the beam width is larger than the column width in compensation for making the beam depth smaller than the normal beam, has advantages such as improvement of planning and enlargement of effective ceiling heights and window openings. Our previous reports discussed a series of experiments (1 and 2) involving partial framing consisting of RC flat beams and columns with beam widths two to three times wider than the column widths. These studies confirmed that a design equation modified from the existing equation is capable of assessing the bending capacity of RC flat beams and the shear capacity of RC flat beam-column connections with adequate safety margins, taking into account main reinforcements of the beams arranged outside the column width.

This study involved a partial frame structure experiment (3rd series) intended to confirm the validity of the design equation and to expand its scope of application. The design formula for torsion confirmed that the torsional capacity of the orthogonal beam and the hang-out part can be evaluated while providing an adequate margin for safety based on their cumulative capacity. We also confirmed that the shear capacity of the RC flat beam-column connection can be evaluated with an adequate safety margin using the formula previously proposed.

**Keywords:** RC flat beam, column joint, torsional strength, flexural strength, shear strength

## 7. Development of an Evaluation Method of Wet Conditions on Concrete Slabs - Building a System Incorporating Optical Sensors and Autonomous Mobile Robots -

Takayuki Masuda, Hiroto Akahoshi

Maintaining optimal moisture conditions on the surface of concrete slabs after pouring and finishing helps prevent surface cracking and other problems; this is a critical factor in construction quality management. However, surface conditions are often judged by visual inspections alone; accurate quantitative judgments are often difficult to make. In the study reported here, we developed an evaluation method based on circular polarized light in the near-infrared region to perform quantitative evaluations of surface conditions. We confirmed the effectiveness of this method under conditions of multiple experimental parameters. We confirmed that the values measured by this method correlate with changes on the slab surface. Setting thresholds for these measured values allowed evaluations at three stages: wet, semi-dry, and dry.

We mounted a device equipped with these sensors on an autonomous mobile robot and deployed this as part of a construction project involving a floor slab area of 860 m<sup>2</sup>. The system allowed discrete and quantitative evaluations as the robot remained in motion. Including the optical device, autonomous robot, and visualization unit, the system thus developed allowed the visual representation of the surface drying process on a color map within just 20 minutes.

**Keywords:** Concrete Slab, Circular Polarization, Near-infrared Light, Absorption Spectrum of Water, Autonomous Mobile Robot, Labor Saving

## 8. Passive Variable Orifice Damper to Control Excessive Displacement of Seismically Isolated Building - Manufacturing Variations in 500kN Class Dampers -

Yoshiki Koyama, Satoshi Yamagami, Sei Sugama, Hidetaka Funaki

Variable Orifice Dampers (VODs) are designed to suppress excessive horizontal displacement during long-period ground motions while otherwise maintaining seismic performance comparable to conventional seismically isolated buildings during moderate to large earthquakes. VODs passively boost the damping coefficient when displacement exceeds a predefined threshold, moderating displacement and maintaining increased damping properties during an earthquake. They also feature regressive characteristics that restore the original damping coefficient following the earthquake.

We confirmed the damping performance of four VODs with a maximum force of 500 kN via dynamic loading tests and evaluated manufacturing variations. We also investigated the regression characteristics of the damping coefficients returning to the original performance after the pre-defined threshold displacement is exceeded, confirming that reproducibility remained within a practical range with no significant problems. We verified that the delay in switching of damping force was less than 0.05 seconds and had minimal impact.

Based on the results of analyses of seismically isolated buildings incorporating the VODs, we concluded that the VODs provide the targeted seismic performance.

**Keywords:** isolated building, passive variable orifice damper, displacement control design, long-period ground motions

## 9. Estimation of Type and Volume of Disaster Waste Using Hyperspectral Camera

Hiroomi Habuchi, Yuya Shimizu, Masaya Iwashita, Fujiko Yoshimura

This research explores the use of hyperspectral cameras (HSCs) for estimating the type and volume of disaster waste. With the increasing frequency and severity of natural disasters due to climate change and other factors, the generation of large volumes of disaster waste has become a pressing issue. Swift and efficient handling of such waste is crucial for effective disaster management. However, accurate predicting of the types and volumes of disaster waste remains challenging due to the variability in waste composition and volumes based on the specific disaster type and location.

To address this challenge, we investigate the applicability of hyperspectral camera, which can capture imagery in the wavelength range of 900 through 1700 nm beyond the visible spectrum. By leveraging the unique spectral information provided by HSC, we aim to develop a methodology for estimating the types and volumes of disaster waste more accurately and efficiently. In this study, we have carried out the several trials to shoot the simulated disaster wastes by HSC and verified that it has possibilities to separate determine the types of components based on the spectral intensities. This research holds significant potential for improving waste management planning and resource allocation in the aftermath of natural disasters.

**Keywords:** hyperspectral camera, disaster waste, disaster waste estimates, waste management, natural disasters

## 10. Basic Research on Arsenic Leaching from Naturally Contaminated Rocks Attributable to Environmental Change

Shoji Suzuki, Yuya Shimizu, Hiroaki Shiraishi, Haruka Kurashina

Arsenic-bearing rocks excavated during tunnel construction and related work are deposited at landfill disposal sites, where arsenic leaching countermeasures are implemented. Arsenic elution characteristics identified immediately after excavation are used to design these countermeasures. However, no consideration is given to environmental changes, such as exposure to reducing environments, to which excavated rocks may be exposed after placement at the landfill. Our study sought to grasp the arsenic elution characteristics for excavated rocks attributable to environmental changes after landfill. As part of this study, we performed environmental monitoring at the disposal site, including monitoring of oxygen concentrations, temperatures, and the oxidation reduction potential of the leachate. We performed various tests with the following three factors in mind: changes in the oxidizing environment attributable to the atmospheric exposure of excavated rocks and the effects of the shift to a reducing environment; the effects of differences in ambient oxygen concentrations; and the effects of temperature changes. Our results showed that reducing environments accelerate arsenic elution. This suggests that the design of corresponding countermeasures must account for the arsenic elution characteristics attributable to such environmental changes.

**Keywords:** excavated rock, arsenic elution, redox potential, ambient oxygen concentration, temperature change

## 11. Extending a Sound Environmental Presentation System - Part 2 : System Improvement for Construction Noise Evaluation -

Katsuo Yaginuma, Kazuki Sakamoto

Architectural sound performance and sound levels are typically indicated as numerical values (e.g., Dr-50, 50 dB) not readily understood by the lay public. In response, we developed a Sound Environment Presentation System to improve communication about the sound performances. Our system predicts and calculates building sound environments based on building design specifications and play the predict sounds the system anticipates users will experience. The system relies on mobile devices and cloud computing to achieve portability and rapid computational processing.

Several modifications of the original system have been made, including the adoption of a new microphone and headphone suitable for low frequency regions, improved user interface, addition of a detector for saturation of recorded noise, and improved data entry process.

As a result, the improved system presents construction noise and the results of countermeasures aurally, improving usability over existing systems for evaluating architectural sound environments.

**Keywords:** noise environment, construction noise, cloud-based system, mobile devices, presentation system



## ■ ■ 社外発表論文一覧 ■ ■

【土木系】(2022年4月～2023年3月)

## 査読付論文

	標 題	所 属	氏 名	掲載論文集	主 催	2022年
1	目地板引抜きにより形成した目地による覆工コンクリートのひび割れ誘発特性	奥村組 " 東京工業大学 "	齋藤隆弘 浜田 元 目黒 緑 千々和伸浩 岩波光保	土木学会論文集F1(トンネル工学) Vol.78 No.1 pp.40-54	土木学会	5月
2	マスコンクリートのパイプクーリングにおける流量制御システムの開発	奥村組 " アクティオ "	齋藤隆弘 外木場康将 栗原賢司 荒地智晴	コンクリート工学会年次論文集 Vol.44 No.1 pp.958-963	日本コンクリート工学会	7月
3	A simplified approach to evaluate cyclic response and seismic fragility of corrosion damaged RC bridge piers	奥村組 東京工業大学 " 奥村組 インペリアル・カレッジ・ロンドン	ビスワス ラジフ・クマル 岩波光保 千々和伸浩 齋藤隆弘 クリスチャン・マラガ	Developments in the Built Environment 12(2022)	Developments in the Built Environment	8月
4	下水道管渠損傷度判定システムの実用化に向けた精度向上	奥村組 " 日本下水道事業団 "	山口 治 趙 鵬 山森隼人 猪木博雅	第59回 下水道研究発表会講演集 N-7-4-3	日本下水道協会	8月
5	Examination of New Joint Formation Method of Lining Concrete by Full-Scale Construction Experiment	奥村組 " " " 東京工業大学	齋藤隆弘 浜田 元 目黒 緑 張 志セン 岩波光保	ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2022 and 48th General Assembly Bella Center, Copenhagen 2 - 8 September 2022	ITA(世界トンネル協会)	9月

## 講演会発表論文

6	Estimation of Early Age Compressive Strength of Concrete Using Maturity Method	奥村組 " " "	ビスワス ラジフ・クマル 齋藤隆弘 川口昇平 松本隆太郎	76th RILEM Annual Week 2022 and ICRCs 2022	RILEM	9月
7	締固めを必要とする高流動コンクリートの自由落下高さによる材料分離に関する検討	千葉工業大学 " " 清水建設 千葉工業大学 オリエンタル白石 鉄建建設 東洋建設 鹿島建設 奥村組 内山アドバンス 竹本油脂 太平洋セメント	渡邊大河 石川椋太 橋本紳一郎 根本浩史 池田信義 中村敏之 西脇敬一 竹中 寛 松本修治 廣中哲也 三本 巖 小林竜平 石井祐輔	土木学会第77回年次学術講演会 V-111	土木学会	9月
8	フライアッシュを混和したモルタルの中性化抵抗性に及ぼす石灰系膨張剤の影響	東北大学 " " " 奥村組	小川遼太郎 皆川 浩 宮本慎太郎 久田 真 齋藤隆弘	土木学会第77回年次学術講演会 V-413	土木学会	9月
9	締固めを必要とする高流動コンクリートの振動締固め性に関する検討	千葉工業大学 " " 清水建設 千葉工業大学 オリエンタル白石 鉄建建設 東洋建設 鹿島建設 奥村組 内山アドバンス 竹本油脂 太平洋セメント	石川椋太 渡邊大河 橋本紳一郎 根本浩史 池田信義 中村敏之 西脇敬一 竹中 寛 松本修治 廣中哲也 三本 巖 小林竜平 石井祐輔	土木学会第77回年次学術講演会 V-444	土木学会	9月
10	クーリング制御システムを用いた鉛直パイプクーリングの効果	奥村組 " " " " アクティオ " "	齋藤隆弘 松島弘樹 松浦秀樹 市南賢人 吉田直樹 栗原賢司 荒地智晴 福嶋 真	土木学会第77回年次学術講演会 VI-209	土木学会	9月
11	超薄型充填検知センサと圧力センサを用いた覆工コンクリート天端部の充填確認	奥村組 " " " "	柿沼 諒 曾田康太郎 浜田 元 川口昇平 林 健人	土木学会第77回年次学術講演会 VI-248	土木学会	9月



## 【建築系】(2022年4月～2023年3月)

## 査読付論文

No.	標 題	所 属	氏 名	掲載論文集	主 催	2022年
1	人力加振による杭の簡易載荷試験とその数値シミュレーション その2	戸田建設 ベターリビング 浅沼組 奥村組 熊谷組 五洋建設 佐藤工業 西武建設 東亜建設工業 東京ソイルリサーチ 西松建設 長谷エコーポレーション 松村組	成田修英 久世直哉 飛田喜則 岸本 剛 小川 敦 富田祐介 内田崇彦 大沼 満 川幡栄治 阿部秋男 新井寿昭 沼本大輝 佐藤 武	第57回地盤工学研究発表会 21- 6-3-07	地盤工学会	7月
2	面内応力を受けるCLTの接着面をCZMとした有限要素法 モデルの検討	信州大学 奥村組 京都大学 ベターリビング	松田昌洋 佐野峻祐 五十田博 岡部 実	日本建築学会構造系論文集 Vol.88 No.803 pp.81-90	日本建築学会	2023年 1月

## 講演会発表論文

3	梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 -その 1:工場溶接形式における欠陥高さを因子とした載荷実験-	神戸大学 " 奥村組 神戸大学 角藤 " "	前田涼太 田中 剛 上田 遼 山本 涼 畔上 進 的場 耕 塚大空哉	令和4年度日本建築学会近畿支 部研究発表会 No.803 pp.357- 360	日本建築学会	6月
4	直床仕上げの施工管理手法に関する実験的検討 その2 コンクリート表層品質	奥村組 " " "	伊藤 淳 河野政典 赤星博仁 門井大祐	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 1396 pp.791-792	日本建築学会	9月
5	H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 その 1:工場溶接形式;欠陥高さを因子とした載荷実験	神戸大学 " 奥村組 神戸大学 角藤 " "	山本 涼 田中 剛 上田 遼 前田涼太 畔上 進 的場 耕 津大空哉	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 1524 pp.1047-1048	日本建築学会	9月
6	H形断面梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 その 2:工場溶接形式;亀裂進展状況および塑性変形能力	神戸大学 " 奥村組 神戸大学 角藤 " "	前田涼太 田中 剛 上田 遼 山本 涼 畔上 進 的場 耕 塚大空哉	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 1525 pp.1049-1050	日本建築学会	9月
7	川島町薬師堂の復原研究	奥村組 芝浦工業大学 " 芝浦工業大学大学院 "	藤田真央 小柏典華 伊藤洋子 松下裕介 山田悠太	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 9171 pp.341-342	日本建築学会	9月
8	杭基礎の2次設計に用いる簡易評価法の提案	奥村組 芝浦工業大学	和田湧気 土方勝一郎	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 20240 pp.479-480	日本建築学会	9月
9	循環攪拌を用いたケーシング縁切引抜き工法の研究 (その3) 模型実験の一軸圧縮強さ	東急建設 安藤ハザマ 奥村組 五洋建設 高松建設 松村組	川崎健二郎 森 清隆 門井大祐 富田祐介 松寄達弘 柏木隆男	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 20257 pp.513-514	日本建築学会	9月
10	既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響(緩み)に関する 研究 (その10):稲敷金江津地区における追加調査結果(ポー リング調査結果)	基礎地盤コンサルタンツ 熊谷組 奥村組 東洋テクノ 三谷セキサン 丸五基礎工業	大田 孝 森 利弘 岸本 剛 山田正毅 木谷好伸 今井康幸	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 20264 pp.527-528	日本建築学会	9月
11	粘弾性体を屋根材と母屋との間に介在させた制振機構による 屋根型円筒ラチスシェルの応答低減 -その1 実験概要、ス イープ波入力時の低減効果-	明治大学大学院 奥村組(元明治大学大学院) 明治大学大学院 明治大学 日本建築センター	田中大亮 長川偉星 藤井暁大 熊谷知彦 磯崎 浩	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 20346 pp.691-692	日本建築学会	9月
12	粘弾性体を屋根材と母屋との間に介在させた制振機構による 屋根型円筒ラチスシェルの応答低減 -その2 正弦波、地震 波入力時の低減効果-	奥村組(元明治大学大学院) 明治大学大学院 " 明治大学 日本建築センター	長川偉星 田中大亮 藤井暁大 熊谷知彦 磯崎 浩	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 20347 pp.693-694	日本建築学会	9月

No.	標 題	所 属	氏 名	掲載論文集	主 催	2022年
13	ビル物免震建物に適用可能な過大变位抑制用性能可変オイルダンパーの開発 (その1) 500kN級ダンパーの性能確認	奥村組 " " 東北大学 "	小山慶樹 山上 聡 舟木秀尊 五十子幸樹 井上範夫	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 21331 pp.661-662	日本建築学会	9月
14	計測震度と損傷度に基づく鉄骨造病院建物の応急危険度判定基準に関する考察	奥村組 京都工芸繊維大学 "	徳永真彦 小島紘太郎 金尾伊織	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 22418 pp.835-836	日本建築学会	9月
15	ハイブリッド梁(端部RC造中央部S造梁)に関する実験的研究 その1 実験概要	奥村組 " "	岸本 剛 山上 聡 小山慶樹	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 22639 pp.1277-1278	日本建築学会	9月
16	ハイブリッド梁(端部RC造中央部S造梁)に関する実験的研究 その2 実験結果	奥村組 " "	山上 聡 岸本 剛 小山慶樹	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 22640 pp.1279-1280	日本建築学会	9月
17	接着系あと施工アンカーを用いた部材の構造特性評価に関する研究 その28 増設スラブ接合部に用いたあと施工アンカーの力学的性質に関する研究(実験概要)	エナ・デザインコンサルタント 奥村組 宇都宮大学大学院 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究所 東洋大学	山本颯真 小嶋汰知 大桶敦也 向井智久 有木克良 香取慶一	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 23077 pp.153-154	日本建築学会	9月
18	接着系あと施工アンカーを用いた部材の構造特性評価に関する研究 その29 増設スラブ接合部に用いたあと施工アンカーの力学的性質に関する研究(実験結果 その1)	奥村組 宇都宮大学大学院 エナ・デザインコンサルタント 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究所 東洋大学	小嶋汰知 大桶敦也 山本颯真 向井智久 有木克良 香取慶一	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 23078 pp.155-156	日本建築学会	9月
19	接着系あと施工アンカーを用いた部材の構造特性評価に関する研究 その30 増設スラブ接合部に用いたあと施工アンカーの力学的性質に関する研究(実験結果 その2と考察)	宇都宮大学大学院 エナ・デザインコンサルタント 奥村組 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究所 東洋大学	大桶敦也 山本颯真 小嶋汰知 向井智久 有木克良 香取慶一	日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) 23079 pp.157-158	日本建築学会	9月

## 雑誌掲載報文

20	高炉スラグ微粉末を用いた環境配慮型コンクリートの実構造物への適用 =CO <sub>2</sub> 排出量を60%削減=	奥村組 " "	河野政典 赤星博仁 伊藤 淳	建設機械 Vol.58 No.6(688) pp.46-50	日本工業出版	6月
21	高炉スラグ微粉末の使用率を変化させた環境配慮型コンクリートの基本性能 -CELBIICの開発-	東急建設 長谷工コーポレーション 奥村組 五洋建設	古川雄太 金子 樹 河野政典 高橋祐一	GBRC Vol.48 No.1 pp.25-32	日本建築総合 試験所	2023年 1月
22	建物調査の作業を支援するシステム タイル仕上げ等の壁や床面の調査結果整理を省力化	奥村組	起橋孝徳	建設機械 Vol.59 No.2(696) pp.6-10	日本工業出版	2023年 2月

## 【環境系】(2022年4月～2023年3月)

## 査読付論文

No.	標 題	所 属	氏 名	掲載論文集	主 催	2022年
1	自然由来の重金属等を含有する粘土の拡散溶出特性に及ぼす温度の影響	奥村組 京都大学大学院 国立環境研究所 奥村組 京都大学大学院	小河篤史 高井敦史 肴倉宏史 目黒 緑 勝見 武	地盤工学ジャーナル Vol.17 No.2 pp.181-194	地盤工学会	6月
2	Heat Transfer in Soft Clay: Pilot-Scale Experiment Using Solar Collectors	京都大学大学院(現奥村組) 京都大学大学院 奥村組 錦城護謨 京都大学大学院	サクル モハメド 高井敦史 小河篤史 三成昌也 勝見 武	Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2022, 148(8): 04022061 1-13	AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS	6月
3	土砂混合廃棄物の分別特性に及ぼす含水比と細粒分含有率の影響の評価	奥村組 " 京都大学大学院 " "	清水祐也 塩入潤一郎 中川将吾 高井敦史 勝見 武	地盤工学ジャーナル Vol.17 No.3 pp.319-329	地盤工学会	8月
4	トンネル掘削ずりの飽和・不飽和カラム試験によるひ素溶出特性の研究	奥村組 " " ハイドロ総合技術研究所 岩手大学 "	岩本容昭 清水祐也 倉品 悠 森田修二 齊藤 剛 大河原正文	廃棄物資源循環学会論文誌 Vol.33 pp.83-93 2022	廃棄物資源循環学会	8月

## 講演会発表論文

5	地方自治体の条例における土壌・地下水汚染への対応に関する特徴	土壌環境センター(奥村組) 土壌環境センター " " "	清水祐也 鴨志田元喜 菅沼優巳 藤安良昌 今安英一郎	第27回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会(2022年)【S2-08】 pp.137-140	地盤工学会	6月
6	トンネル掘削ずり盛土における浸出水対策	ハイドロ総合技術研究所 奥村組 岩手大学 奥村組 "	森田修二 清水祐也 大河原正文 岩本容昭 大塚義一	土木学会第77回年次学術講演会Ⅲ-361	土木学会	9月
7	RNA解析による絶滅危惧種(タチスミレ)の潜在的脆弱性の評価	奥村組 茨城県自然博物館 東北大学 筑波大学	白石祐彰 小幡和男 牧野能士 津村義彦	土木学会第77回年次学術講演会Ⅶ-30	土木学会	9月
8	床振動に及ぼす間仕切壁の影響に関する検討 その4:実測による間仕切壁の振動伝播性状の検証	鴻池組 " " 熊谷組 奥村組	原田雅俊 伊藤真二 植村友昭 前川利雄 柳沼勝夫	日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) 40223 pp.477-478	日本建築学会	9月
9	ピオトープにおけるクロホシクサなど湿地性植物の保全の取り組みについて	奥村組 " " " 筑波大学	長 千佳 鈴木奨士 富山陽子 稲留康一 上條隆志	植生学会 第27回大会講演要旨集 B04 p.28	植生学会	10月
10	粘土が含有する重金属等の拡散溶出特性における温度依存性評価	奥村組 京都大学大学院 国立環境研究所 京都大学大学院	小河篤史 高井敦史 肴倉宏史 勝見 武	第15回地盤改良シンポジウム論文集 pp.555-558	日本材料学会	12月
11	回転式・振動式ふるい機を用いた土砂系混合廃棄物の分別特性評価	京都大学大学院 " " " 奥村組	石田倫啓 平岡寛星 高井敦史 勝見 武 清水祐也	第15回地盤改良シンポジウム論文集 pp.699-706	日本材料学会	12月

## 雑誌掲載報文

12	ZEB化改修オフィスの省エネと快適性	奥村組	奥原剛史	省エネルギー Vol.74 No.6 pp.52-55	省エネルギーセンター	6月
13	奥村組のEGS/SDGsの取り組み 持続可能な社会の実現に貢献	奥村組 " " "	齋藤 格 大矢好洋 長 千佳 泊 初恵	土木施工 Vol.63 No.11(791) pp.89-92	オフィス・スペース	11月



■■ 表彰 ■■

令和4年度土木学会賞 環境賞（Iグループ）  
（公益社団法人土木学会）

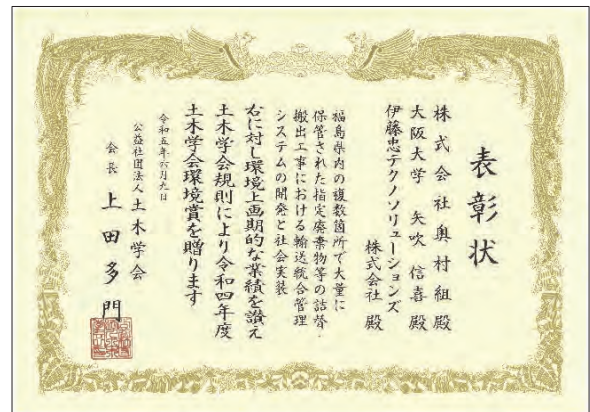
対象研究：「福島県内の複数箇所で大量に保管された指定廃棄物等の詰替・搬出工事における輸送統合管理システムの開発と社会実装」

受賞者：株式会社奥村組（大塚義一、今井亮介、須田博幸、酒井一紀、加藤貴章、吉田恭平）  
大阪大学大学院工学研究科（矢吹信喜）  
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社（総 宜史、松田祐哉、中谷英俊、石丸基之、齋藤孝次）

土木学会賞は100余年の伝統に基づく権威ある表彰制度であり、その中の1つである環境賞は、環境の保全・改善・創造に貢献した先進的な土木工学的研究や画期的なプロジェクトに授与される。

今回環境賞を受賞した「輸送統合管理システム」は、東京電力福島第一原子力発電所の事故によって大気中に放出された放射性物質を含む指定廃棄物等を埋立処分施設やセメント固型化施設に安全・円滑に運搬することを目的に開発された。本システムにより、廃棄物の種類や物性および放射能濃度、作業員の出退勤や被ばく線量、また、運搬車両の位置等の様々な情報をクラウド上で一元管理して、関係者で共有することができる。

本システムは廃棄物の輸送計画を立案する機能も有し、平成28年度から始まった特定廃棄物埋立処分事業に係る搬出工事等で実装され、現在までに41万袋を超える廃棄物や、のべ28万人を超える作業員の情報を収集・管理した。今後も得られた膨大なデータの解析を進めて、指定廃棄物等輸送事業、1,300万m<sup>3</sup>ともいわれる除去土壌輸送事業、想定される首都圏直下型地震等の巨大災害復興事業に寄与する技術革新を目指していく。



輸送統合管理システムの概要

日建連表彰 第3回 土木賞  
 (一般社団法人日本建設業連合会)

プロジェクト名：発電所水圧鉄管路のTBMによる斜坑掘削プロジェクト (神流川発電所)  
 グリーン社会の実現に向けた水力発電需要に貢献する斜坑掘削技術の発展

当社を幹事会社とする共同企業体が1997年から2008年にかけて施工した神流川発電所工事における、「全断面斜坑TBM工法による掘削」が、一般社団法人日本建設業連合会の日建連表彰2022の第3回土木賞を受賞した。日建連表彰土木賞は、社会基盤として国民生活と経済活動を支える土木分野の優れたプロジェクト・構造物を表彰するため、2020年に創設されたものである。

本工事は、揚水式発電所における、高低差約653mの水圧鉄管路を敷設するもので、掘削径6.6m、勾配48度、延長961mの斜坑を「全断面斜坑TBM工法」により掘削し、安全かつ高精度で貫通できたことが土木賞に値するものと評価された。

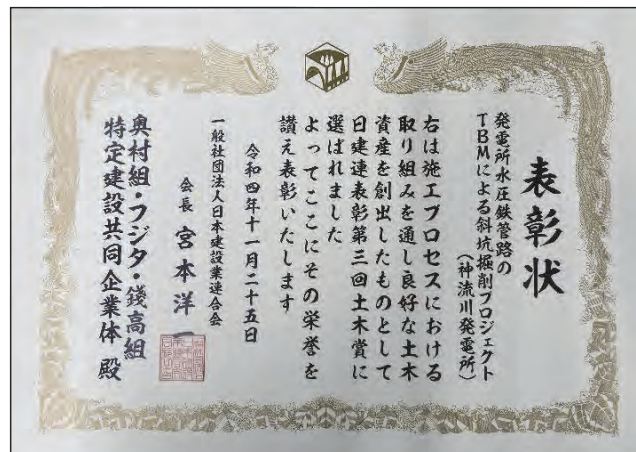
従来の斜坑掘削は小断面の導坑を下方から上向きに掘削した後、上方から切詰め掘削を行う2工程方式が採用されてきたが、本工事では斜坑TBM工法をさらに進化させ、下方から上向きに全断面を掘削する1工程方式とした。このTBMによる全断面斜坑掘削は国内初の取組みであり、斜坑掘削に採用したTBMは世界的にも最大級である。



神流川発電所工事で使用した  
 全断面斜坑掘削TBM



神流川発電所工事の長大斜坑





## 令和4年度 木材利用優良施設等コンクール〈優良施設部門〉内閣総理大臣賞 (木材利用推進中央協議会)

施設名：流山市立おおぐろの森中学校（千葉県流山市）

木材利用推進中央協議会が主催する「令和4年度 木材利用優良施設等コンクール」において、当社が施工した「流山市立おおぐろの森中学校」が優良施設部門で「内閣総理大臣賞」を受賞した。本コンクールは、木材利用分野の拡大や特色ある木材利用に資する施設等を対象として、その施主、設計者、施工者を表彰するものである。

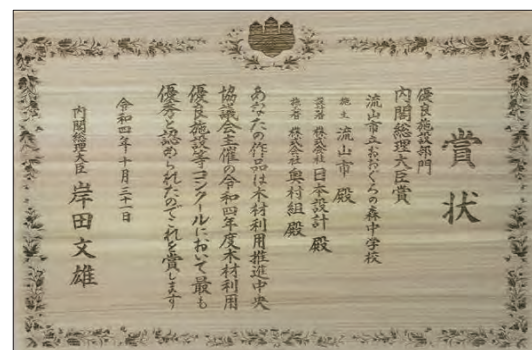
流山市立おおぐろの森中学校は、木材使用量が 3,518m<sup>3</sup> となる国内最大規模の木造校舎である。東西の教室棟と、その間に体育館棟とプール棟が設けられており、教室の柱・壁・床・天井や体育館の屋根などが木造となっている。最新の木造建築技術を背景に、構成する部材には千葉県産をはじめとする国産の杉やカラマツを加工した多彩なエンジニアードウッド\*を利用しており、2022年3月に竣工した。

※木を原材料に二次加工された木質部材のうち、特に強度特性が計算・評価・保証されたもの

施主	千葉県流山市
設計者	株式会社日本設計
施工者	株式会社奥村組
主要構造	木造（軸組工法、木質ラーメン構造）、 鉄骨造、鉄筋コンクリート造
階数	地上3階
延べ面積	14,568.34m <sup>2</sup>
主な使用樹種	スギ、ヒノキ、カラマツ、カバ、サクラ、 ヒバ、マテバシイ



流山市立おおぐろの森中学校外観

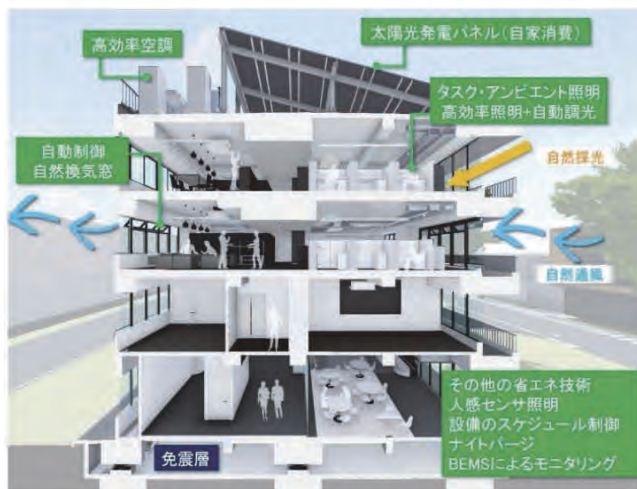


## 令和4年度エネルギー管理功績者及びエネルギー管理優良事業者等関東経済産業局長表彰 (経済産業省 関東経済産業局)

対象事業所：株式会社奥村組 技術本部 技術研究所

エネルギー管理優良事業者表彰は、省エネルギーの一層の普及促進を図るためにエネルギー管理の推進に不断の努力を重ね、その成果が大であり、他の模範となる事業所を表彰するものである。今回、技術研究所が表彰された。

これまで技術研究所では、事業所全体の一次エネルギー原単位目標を定め、環境委員会を設置し、エネルギー管理に関する継続的な改善体制を構築してきた。2019年度に技術研究所管理棟を Nearly ZEB 改修した。自然採光利用、タスクアンビエント照明方式の採用、建物外皮断熱性能の向上、高効率タイプ空調システムへのリプレイスなどを実施し、屋上には自家消費型の太陽光発電システムを導入した。これらの技術によって、管理棟は改修前と比べて28%のエネルギー削減を達成、基準一次エネルギー消費量との比較においても76%の削減を実現した。さらに、その他の実験棟を含む事業所全体で、5年間平均エネルギー消費原単位を4.3%改善したことなどが功績として認められ、今回の表彰に至った。



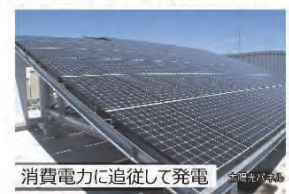
研究管理棟のNearly ZEB化で採用した技術



タスク・アンビエント照明空間と高効率照明、自動調光センサー



自動制御自然換気窓



太陽光発電パネル(自家消費型)

### Nearly ZEB 改修の概要



# コンクリート打設統合管理システムの開発と現場適用

## Development of a Concrete Placement Management System and Use at a Construction Site

廣中哲也\* 齋藤隆弘\*\* 今泉克彦\*\* 高尾篤志\*\*\*

### 要 旨

コンクリート構造物の品質管理の適正化および打設管理業務の効率化を目的に、レディーミキストコンクリート工場、打設場所および現場事務所等のあらゆる場所において、コンクリートの打設計画から出荷・運搬、打込み・打重ね作業までの施工情報を、CIM モデル、モニタリング技術およびクラウドにより管理できるコンクリート打設統合管理システムを開発した。本システムの適用により、コンクリート工事における運搬、打込み・打重ねに関する品質の確保と、打設計画の立案、運搬・打込み・打重ねに関する時間管理および書類作成等の打設管理業務の効率化が実現され、あわせて一連の施工情報の電子化によるトレーサビリティへの展開が可能となった。

キーワード：CIM、モニタリング技術、クラウド、運行管理、打設管理

### 1. まえがき

コンクリート構造物の品質を確保するために、施工管理者は、打設計画の立案や、施工時のコンクリートの出荷・運搬情報とその時間経過、下層のコンクリートに上層のコンクリートを打ち込むまでの打重ね時間間隔等の情報を収集、分析し、適切に管理する必要がある、多くの時間と労力を費やしている。そのため、施工情報を連続的に共有し、早期に施工にフィードバックすることにより、適正な品質管理を実現すること、および打設管理業務を低減することが望まれている。

そこで、コンクリート構造物の品質管理の適正化および打設管理業務の効率化を目的に、3D モデルにコンク

リートの運搬・打込み・打重ね等の情報を付与したモデル（以下、CIM モデル）、モニタリング技術およびクラウドの活用により、計画から施工までのあらゆる情報をリアルタイムに共有するとともに見える化して一元管理するコンクリート打設統合管理システムを開発した。本報では、コンクリート打設統合管理システムの概要および同システムの現場適用結果について述べる。

### 2. コンクリート打設統合管理システムの概要と特徴

#### 2.1 システムの概要

図-1にコンクリート打設統合管理システムの概要を示す。本システムは、打設・運行計画、運行管理および

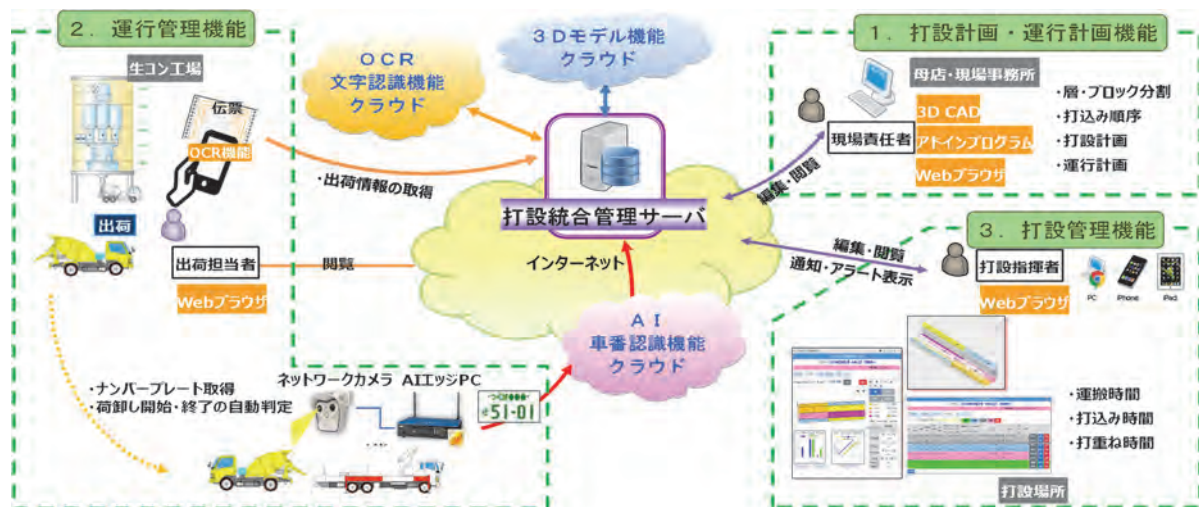


図-1 コンクリート打設統合管理システムの概要

\*技術本部技術研究所 \*\*技術本部技術研究所土木研究グループ \*\*\*ICT統括センターイノベーション部

打設管理の3つの機能から構成され、将来の発展性、汎用性を考慮した自由度の高いシステムとするため、クラウド上のコア機能を有する打設統合管理サーバと必要機能を有する外部クラウドを組み合わせました。また、CIMモデル、モニタリング技術およびクラウドを活用したネットワークを構築し、レディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場）、打設場所、現場事務所等で計画から施工までの情報をリアルタイムに共有するとともに見える化して一元管理するシステムとした。外部クラウドとして、3Dモデル機能、OCR光学的文字認識機能およびAI車番認識機能を、通信端末として、スマートフォン、タブレットおよびPCを使用している。

2.2 打設・運行計画機能

打設・運行計画機能は、3Dモデルを用いてコンクリートの打込み位置を水平方向と鉛直方向に分割（以下、ブロック分割）した図の作成、打設条件設定や下層のコンクリートを打ち込んでから下層のコンクリートが固まり始める前に上層のコンクリートを打ち重ねることで、下層と上層の一体性を保つことができる時間間隔<sup>リ</sup>（以下、打重ね時間）の照査等の打設計画の作成を管理している。また、コンクリートの配合、総出荷台数や時間あたりの出荷台数等の運行計画の作成も管理している。以下に打設・運行計画機能の特徴を示す。

図-2に3Dモデルのブロック分割例を示す。3DCADソフトの追加機能により、水平・鉛直方向の分割条件を入力することで、各ブロック接点の3次元座標からなるブロック分割の3DCADデータが作成される。次に、この3DCADデータを打設統合管理サーバに登録することで、3Dモデルクラウドサービスを利用して、3Dモデルが自動作成される。これにより、3Dモデルが3次元座標を持つブロックで管理でき、一連の計画業務を短時間でできる。

図-3に打込み順序の入力と打重ね時間の照査例を示す。打設量、打設速度、ブロック分割番号、打込み順序等の打設計画条件の入力により、打重ね時間表、平面と立体図の打重ね時間マップが自動作成される。これらを確認することで、計画の修正が容易かつ確実となり、最適な打設計画の立案を可能にした。

2.3 運行管理機能

運行管理機能は、コンクリートの種類、出荷時刻、トラックアジテータ（以下、アジテータ車）の車番や積載量等のコンクリート納入書（以下、生コン伝票）、受入れ場所のコンクリートの荷卸し開始・終了時刻等の情報を管理している。以下に運行管理機能の特徴を示す。

図-4にOCRクラウドサービスを利用した生コン伝票情報の読み込み例を示す。生コン伝票の初期登録として、通信端末カメラで読み取った生コン伝票の画像データに検出範囲を指定する。これにより、生コン工場でのコンクリート出荷時に、通信端末カメラで生コン伝票を

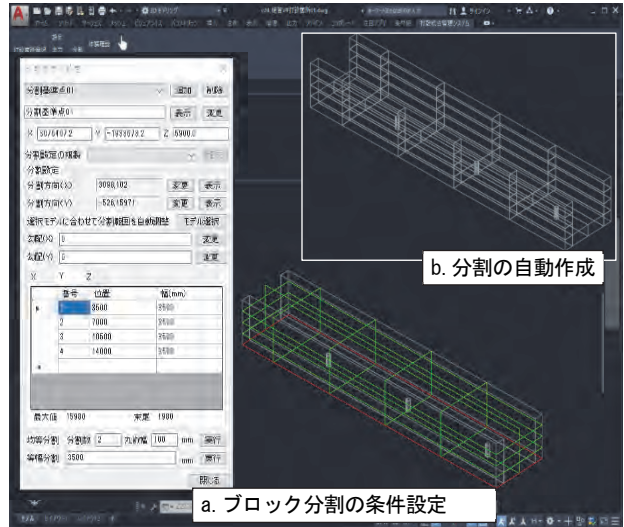


図-2 3Dモデルのブロック分割例

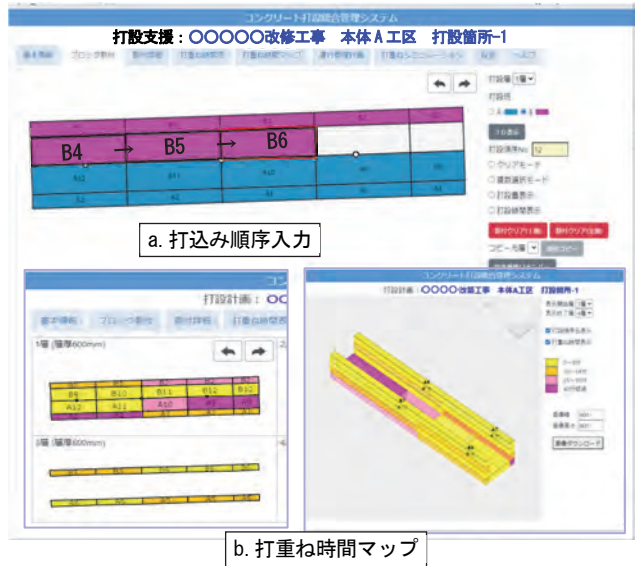


図-3 打込み順序の入力と打重ね時間の照査例

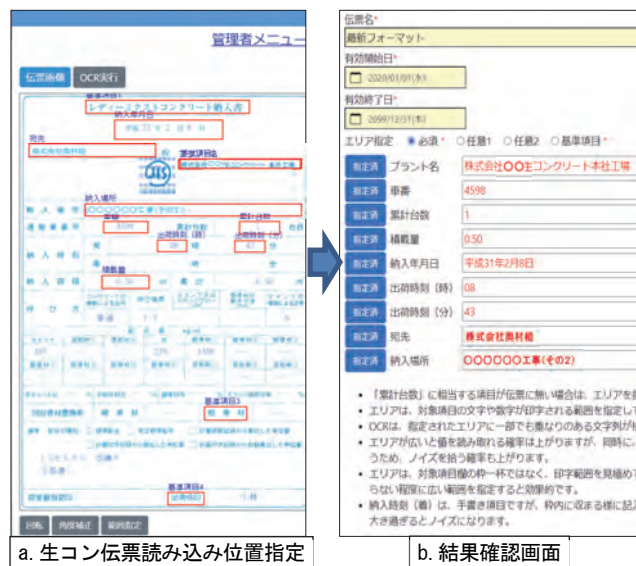


図-4 OCRによる生コン伝票情報の読み込み例

読み取るごとに、情報が文字コードに電子化され、打設統合管理サーバに登録、共有化される。

受入れ場所の荷卸し開始・終了時刻の検出には、使用機器の故障、システム不具合、操作ミスなどに対する保守性、信頼性を向上するために、「タブレット画面上の開始・終了ボタンをタップする単純な方法」と、「タップ忘れの人為的ミスを排除できる AI 処理による車番認識方法」の 2 種類の方法を併用した。図-5 にネットワークカメラ映像の AI 処理によるアジテータ車の車番認識機能の構成を示す。AI クラウドサービスを利用して、現地でネットワークカメラ映像を AI 処理できる AI 処理端末（以下、AI エッジ PC）を用いて、受入れ場所での荷卸し時のアジテータ車の後面の車番と時刻を一定の間隔で検出している。検出した車番の有無と時刻のデータをもとに、打設統合管理サーバにて、コンクリートの荷卸し開始・終了時刻が算出され、登録、共有化される。なお、通信環境が悪い建設現場でも AI 処理を有効に利用するため、クラウド AI に比べて、送信するデータ量を少なく抑えられる AI エッジ PC を使用した。

図-6 にタブレットの運行管理画面例を示す。既開発の 2D モデル版の画面表示と同様に、打設統合管理サーバに登録された生コン伝票およびコンクリート荷卸し開始・終了時刻等の情報から、コンクリートの運搬の進捗情報（出荷済み、運搬中、荷卸し中、荷卸し終了等）を通信端末の画面上に数値、色分け表示および警告バナー・メール通知等で見える化してリアルタイムに表示する。運搬情報を生コン工場と打設現場の両方で視覚的に確認することにより、コンクリートの出荷調整が容易になったため、アジテータ車の待機時間が短縮され、コンクリートの経時変化による品質低下を防止できる。また、コンクリートの運搬時間と打込み時間を自動計算して見える化することで、時間管理を確実にできるため、JIS 規格等の規定時間の超過を防止できる<sup>1)3)</sup>。さらに、打設場所ごとに、生コン伝票の情報、運搬時刻および打込み時刻等の運行情報が打設統合管理サーバに登録、電子化されることで、運行実績等の書類作成が容易になる。

2.4 打設管理機能

打設管理機能は、打設計画、コンクリート打込み位置・順序と時刻の打込み状況および打重ね時間の情報を管理している。以下に打設管理機能の特徴を示す。

図-7 にタブレットの打設管理画面例を示す。図-7 a. に示すように、打設統合管理サーバに登録された打設・運行計画と、タブレット画面上で打設指揮者による各ブロックの打込み開始・終了の位置指定の情報によりコンクリート打込み後からの経過時間を自動計算して平面と立体図で色分け表示することができる。煩雑な打重ね時間の計算を自動化し、視覚的に確認することにより、打重ね時間の管理を確実にできるため、土木学会コンクリート標準示方書施工編（以下、示方書）の許容打重ね



図-5 映像による AI 車番認識機能の構成

コンクリート打設

打設支援：〇〇〇〇〇改修工事 本体 A 工区 打設箇所-1

運搬警告：(89) 77 分、(567) 76 分

基本情報 打設管理 打設 b. 運搬・打込み時間の警告バナー

運搬中		打設中		打設済		警告		超過				
No.	ポンプ車No.	車番	積載量 (m³)	累計出荷量 (m³)	出荷時刻	到着予想時刻	荷卸開始時刻	荷卸終了時刻	運搬時間 (分)	判定	打込み時間 (分)	判定
1	P1	4598	2.80	2.80	07:31	-	08:02	08:14	31	○	43	○
2	P1	176	2.80	5.60	07:41	-	08:11	08:23	30	○	42	○
8	P2	83	3.00	23.00	08:25	-	09:07		42	○	89	
9	P1	233	2.80	25.80	08:25	-	09:02		37	○	89	
10	P2	89	3.00	28.80	08:37	09:17			77	○	77	
11	P1	567	2.80	31.60	08:38	09:08			76	○	76	
12	P2	34	3.00	34.60	08:51	09:31			63	○	63	
13	P2	47	3.00	37.60	09:04	09:44			50	○	50	

a. 運搬進捗の数値・色分け表示

図-6 タブレットの運行管理画面例

コンクリート打設統合管理システム

打設支援：〇〇〇〇〇改修工事 本体 A 工区 打設箇所-1

b. ブロック分割の変更

分割層 5層 層分割実行

層変更ボタン

上層厚	300
下層厚	300

a. 運搬進捗の数値・色分け表示

【打重ね時間】

- 0~60分 (黄色)
- 60~90分 (オレンジ)
- 90~120分 (赤)
- 120~150分 (紫)
- 打設中 (青)
- 打設済 (緑)
- 未打設 (白)
- 中断中 (黒)

【時間当り荷卸量】 【累計荷卸量】 【3D表示】

図-7 タブレットの打設管理画面例

時間間隔（以下、制限時間）を遵守し、コンクリートのコールドジョイントを防止できる<sup>3)</sup>。また、図-7b.に示すようにコンクリート打設中に計画変更が生じた場合でも、層分割の厚さを入力するだけで、3Dモデル機能クラウドによりブロック分割の変更を自動作成後、打設統合管理サーバにより打重ね層厚・層数および打込み順序を自動作成することで、計画変更が容易になる。これら一連の機能と操作により、打設管理業務を効率的に行える。そのうえ、打設場所ごとに計画から打設・運行実績の施工情報が打設統合管理サーバに電子化されることで、書類作成業務の効率化や施工情報のトレーサビリティによる維持管理業務への活用が可能になる。

### 3. 適用事例

#### 3.1 適用概要

表-1に本システムを適用したコンクリート堰堤の概要、図-8にコンクリート堰堤の概要図を示す。施工期間は2022年4月から2023年3月とし、堤体積7,200m<sup>3</sup>、堤長74.5m、堤高17.9mのコンクリート堰堤を適用対象とした。打設場所1回あたりのコンクリートの高さ（リフト高さ）を標準1.5m、水平方向に6ブロック8.2～13.5m、1回あたりの打設量50～170m<sup>3</sup>、打設速度16～20m<sup>3</sup>/hとして、総打設回数60回にて施工した。コンクリートの打込みは、コンクリートの受入れ場所と打設場所の高低差が大きいことや、打設場所ごとに打込みの移動範囲が広いことを考慮して、いずれにも対応できる、つり上げ重量100tラフテレーンクレーン1台と、容量2m<sup>3</sup>コンクリートホッパ2基を組み合わせで行った。

今回の適用システムは、図-1に示したコンクリート打設統合管理システムの中でAI車番認識機能以外とし、運行管理機能の受入れ場所でのコンクリートの荷卸し開始・終了の検出と登録については、タブレット画面をタップする方法を使用した。

図-9にシステムの使用機器の概要を示す。すべてのデータを打設統合管理サーバに一元化し、打設・運行計画機能では、現場事務所に打設・運行計画管理用のPC端末を設けた。また、運行管理機能では、生コン工場出荷用と受入れ場所荷卸し用のタブレット端末を、打設管理機能では、打設指揮用のタブレット端末を使用した。

#### 3.2 適用結果

##### a. 打設・運行計画

打設・運行計画の手順として、3D CAD機能により打設場所ごとに層・ブロック分割の自動作成を行い、打設統合管理サーバにデータをアップロードした。その後、打設・運行計画機能により、打設情報（打設日時、打設場所、打設量、打設速度、コンクリート配合種類等）、出荷情報（アジテータ車の出荷台数、積載量、出荷速度等）の計画条件および打込み順序を入力し、自動作成された

打重ね時間表、平面と立体図の打重ね時間マップにて、打重ね時間の照査、打込み順序やブロック分割の変更を行った。

図-10に幅12.4m、長さ13.0mおよび高さ1.5mの打設場所を1層の厚さ0.5mの3層で打ち重ねる打設計画のPC表示画面を示す。水平方向にコンクリートを打ち込む「層打ち」では示方書の制限時間（気温25℃未満

表-1 適用対象の概要

適用対象	コンクリート堰堤
施工期間	2022年4月～2023年3月
構造物諸元	堤長74.5m、堤高17.9m、堤体積約7,200m <sup>3</sup>
打設概要	リフト高さ1.5m(標準)、打設回数60回 1回あたり打設量50～170m <sup>3</sup> 、打設速度16～20m <sup>3</sup> /h
打込み方法	コンクリートホッパによる打込み ・つり上げ重量100tラフテレーンクレーン1台 ・コンクリートホッパ2基

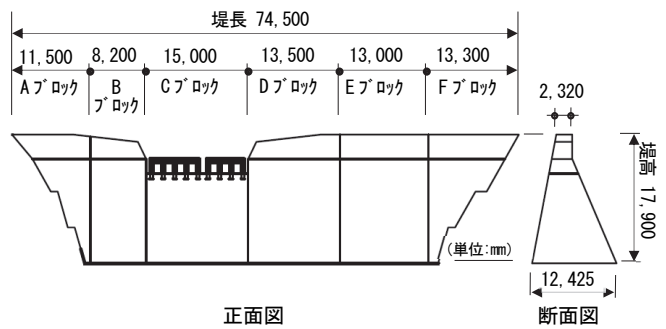


図-8 コンクリート堰堤の概要図

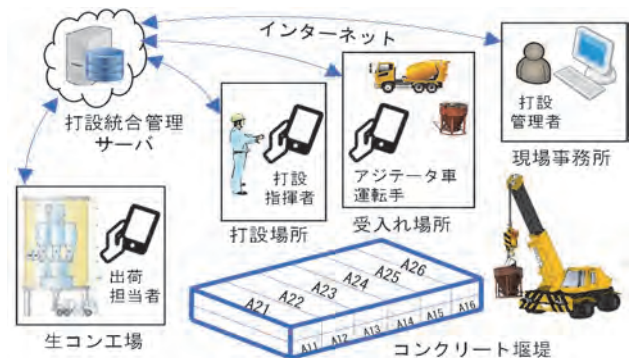


図-9 システム使用機器

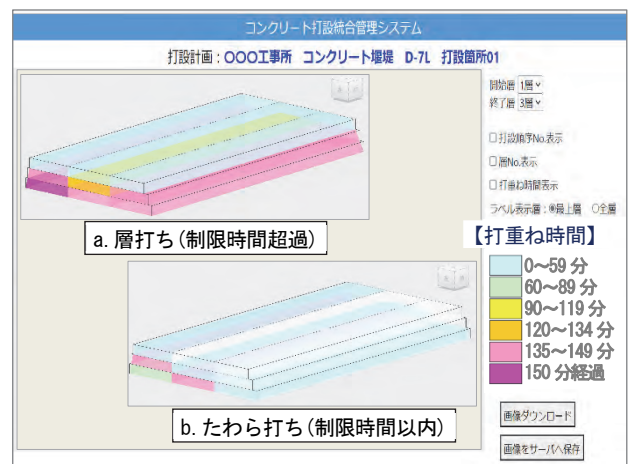


図-10 打重ね時間計画のPC画面

で150分以内の場合)を超過するため、階段状の順序でコンクリートを打ち込む「たわら打ち」に変更することにより、打重ね時間を短縮し、制限時間内での打重ねとなるように計画した。これにより、1回の打設面積が比較的広く、制限時間の確保が困難な場合には、コールドジョイントの発生のリスクを低減するため、たわら打ちでコンクリートを打ち込むことが有効であることがわかる。また、打設・運行計画機能を使用することで、打設場所ごとの計画作成時間が、従来の平面図と表計算ソフトを組み合わせた方法の2時間程度に比べて、1/4の30分程度に短縮できた。

b. 運行管理

図-11に生コン工場でのOCR文字認識機能による生コン伝票の読み取り状況、写真-1にコンクリート受入れ場所および荷卸し開始・終了のタブレット画面を示す。生コン工場の出荷担当者は、コンクリート出荷時にタブレットのカメラ機能で各アジテータ車の生コン伝票を撮影する。受入れ場所のアジテータ車の運転手は、荷卸し開始時と荷卸し終了時にタブレット画面の開始・終了ボタンをタップする。これにより、コンクリートの配合、出荷時刻、アジテータ車番、積載量、出荷台数や受入れ場所での荷卸し開始と終了時刻等の出荷・荷卸し情報が打設統合管理サーバに登録、共有化される。

図-12に生コン工場の出荷担当者や打設場所の打設指揮者のタブレットの運行管理画面を示す。運搬中、打設中(荷卸し開始)および打設済み(荷卸し終了)等のアジテータ車の進捗状況や、コンクリートの運搬および打込みの経過時間を、生コン工場と打設場所の両方のタブレット画面上で、数値と色分け表示により視覚的に確認できた。これにより、コンクリートの出荷調整を適切かつ円滑に行えたため、アジテータ車の現場待機時間が減少した。また、アジテータ車の運搬および打込み時間管理についても、JIS規格等の規定時間の合否判定を短時間で確実に行うことができた。運行管理機能を使用することで、従来の生コン伝票の内容確認作業と経過時間の計算作業が不要となったため、出荷調整、運搬および打込み時間管理業務の効率化が図れた。

c. 打設管理

図-13に打設管理状況および打設指揮者のタブレットの打設管理画面を示す。打設指揮者は、打込み位置の各ブロックの打込み開始時と終了時に、タブレット画面の該当ブロックをタップする。これにより、各ブロックの打込み開始・終了時刻等の打込み情報が打設統合管理サーバに登録、共有化される。各ブロックの打込み後の経過時間が数値と色分け表示されるため、制限時間内でのコンクリートの打重ね時間管理が容易となり、コンクリートのコールドジョイントの発生リスクを低減したことで、硬化品質の確保ができた。打設管理機能を使用することで、従来の経過時間の計測、計画表の記入と計算

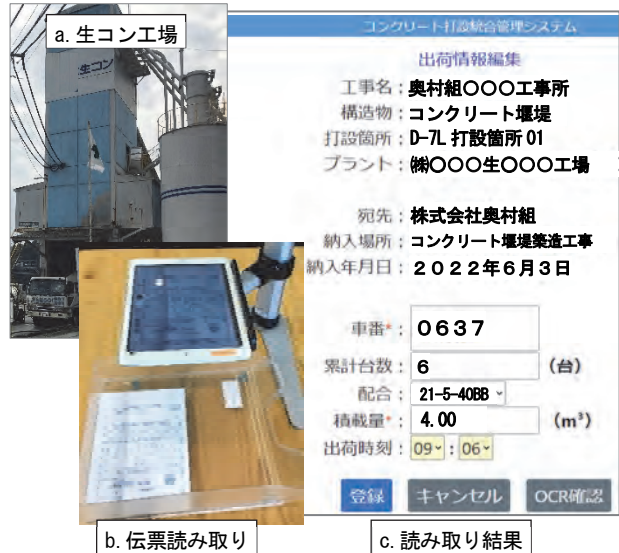


図-11 OCRによる生コン伝票の読み取り状況



写真-1 受入れ場所と荷卸し開始・終了画面

Figure 12 shows the operation management screen at the concrete plant and the receiving site. The screen displays a table of concrete transport and placement status.

コンクリート打設統合管理システム													
打設支援: 〇〇〇工事所 コンクリート堰堤 D-7L 打設箇所-1													
基本情報		打設管理		打設詳細		運行管理		距離計		設定		ヘルプ	
運搬中	打設中	打設済	警告	超過									
No.	ポンプ車No.	車番	積載量 (m³)	累計出荷量 (m³)	到着予想時刻	出荷時刻	荷卸し開始時刻	荷卸し終了時刻	運搬時間 (分)	判定	打込み時間 (分)	判定	打設ブロックNo.
17	P1	220	4.00	61.50	10:56	11:39	11:49	43	○	53	○		
18	P1	211	4.00	65.50	11:07	11:52	12:01	45	○	54	○	生コン 21-5-4088	A6-2 伝票表示
19	P1	1964	4.00	69.50	11:14	12:03	12:11	49	○	57	○	生コン 21-5-4088	A6-2 伝票表示
20	P1	2517	4.00	73.50	11:23	12:11	12:22	48	○	59	○	生コン 21-5-4088	A7-3A6-2 伝票表示
21	P1	215	4.00	77.50	12:26	13:04		38	○	46		生コン 21-5-4088	A7-3A8-4 伝票表示
22		217	4.00	81.50	12:35	13:01		36		36		生コン 21-5-4088	伝票表示
23		806	4.00	85.50	12:47	13:17		35		35		生コン 21-5-4088	伝票表示
24		832	4.00	89.50	12:58	13:21						生コン	伝票表示
25		221	4.00	93.50								生コン	伝票表示

図-12 生コン工場・打設場所の運行管理画面

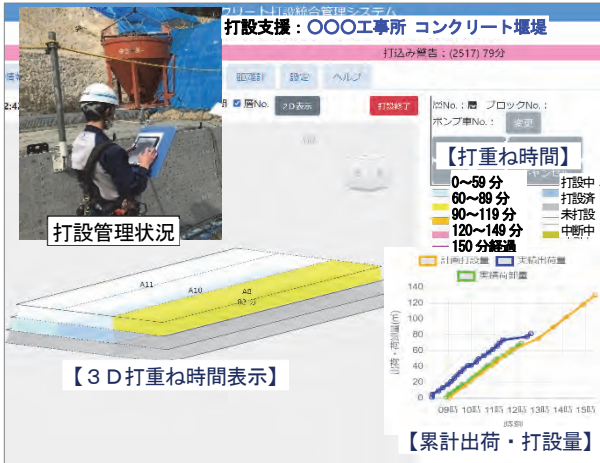


図-13 打設管理状況および打設管理画面

作業が不要となったため、打重ね管理業務の効率化が図れた。また、打設統合管理サーバで3Dモデル、出荷・荷卸し情報および打重ね情報が関連付けられるため、どのアジテータ車のコンクリートが、どのブロックに打ち込まれたかを判別できたことから、施工情報のトレーサビリティに活用できると考える。

図-14にコンクリート打設管理報告書の出力例を示す。本システムでは、打設作業完了後の書類として、打設統合管理サーバで関連付けられた各種情報からコンクリート打設管理報告書を自動作成することができる。出力項目は、基本情報、打設数量・時間、打重ねマップ、運搬・打込み実績および打重ね実績である。書類作成機能を使用することで、打設場所ごとのコンクリート打設報告書作成時間が、従来の各種情報をPCに手入力する方法の1~2時間程度に比べて、数分程度となり大幅に短縮できた。

4. まとめ

コンクリート構造物の品質管理の適正化および打設管理業務の効率化を目的に開発したコンクリート打設統合管理システムを現場に適用し、以下の結果を得た。

- i. 打設・運行計画機能では、ブロック分割、打重ね時間表やマップ等の自動作成により、打設場所ごとの計画作成時間を従来の1/4の30分程度に短縮でき、計画作成業務の効率化が図れた
- ii. 運行管理機能では、出荷、運搬、荷卸し、および打込みの進捗をリアルタイムに把握することで、コンクリートの出荷調整が容易になり、アジテータ車の待機時間が短縮され、コンクリートの経時変化による品質低下を防止できた。また、従来の生コン伝票の内容確認作業や経過時間の計算作業が不要となるため、出荷調整、運搬および打込み時間管理業務の効率化が図れた
- iii. 打設管理機能では、煩雑な打重ね時間の計算を自

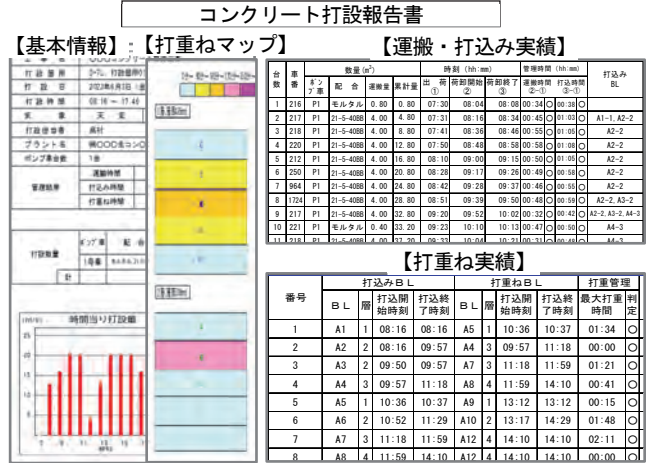


図-14 コンクリート打設報告書の出力例

動化し、各ブロックの打込み後の経過時間を数値と色分け表示により視覚的に確認することで、打重ね制限時間の遵守やコールドジョイントの防止等のコンクリートの品質確保が可能となった。また、従来の打重ね時間の計測や計算作業が不要となるため、打重ね管理業務の効率化が図れた

- iv. 3Dモデル、出荷・荷卸し情報および打重ね情報が電子データとして関連付けられるため、コンクリート打設報告等の書類作成時間を従来の1~2時間から数分程度に短縮でき、書類作成業務の効率化が図れた。また、施工情報のトレーサビリティが可能となり、維持管理業務に活用できる

5. あとがき

CIMモデル、モニタリング技術およびクラウドを活用したコンクリート打設統合管理システムを導入し、コンクリート工事における運搬、打込み、および打重ねに関する品質確保、また、打設計画の立案、運搬・打込み・打重ねに関する時間管理、および書類作成等の打設管理業務の効率化を確認した。今後も現場への適用が予定されており、現場適用を通じて使用性、適用効果および運用方法を検証し、システムの利便性の向上を図るとともに、コンクリート工事の施工と品質に役立つ技術として、土木・建築の両分野に展開していきたい。

【参考文献】

- 1) 土木学会、「2017年制定 コンクリート標準示方書 施工編」、pp.108-109、pp.118-120、2017.3
- 2) 廣中哲也、石井敏之、「ICTを活用したコンクリート打設支援システムの開発とその適用」、電力土木、No.348、pp.76-78、2010.7
- 3) 日本規格協会、「JIS A 5308:2019 レディーミクストコンクリート」、JISハンドブック 10 生コンクリート、pp. 17-95、2022.7



# アンカー孔の自動削孔装置の開発

## －その 2 下水道施設補強工事への適用－

### Developing an Automated Drilling Hole Device for Anchors

#### - Part 2 : Application to Sewerage Facilities -

川澄悠馬\* 三澤孝史\*\* 山口 治\*\*\* 川口竜巨\*\*\*

#### 要 旨

補強工事における、あと施工せん断補強工法や壁等の増設工法では、「せん断補強筋」や既設と新設コンクリートの一体性を高める「あと施工アンカー筋」の挿入孔の削孔が行われる。削岩機や電動ハンマードリル等の人力で繰り返し行われる挿入孔の削孔では、作業の省力化や効率化、作業環境の改善が求められている。そこで今回、自動で削孔作業を行うアンカー自動削孔装置を 2 種類開発し、同一現場において適用した。その結果、省力化、ならびに作業環境の改善に繋がった。

キーワード：リニューアル工事、補強工事、削孔作業、省力化、自動化

#### 1. まえがき

既設コンクリート構造物の補強工事において行われる、あと施工せん断補強工法や壁等の増設工法では、「せん断補強筋」や既設と新設コンクリートの一体性を高める「あと施工アンカー筋」の挿入孔の削孔が人力により行われる。削孔作業は通常、削岩機や電動ハンマードリル等を用いて行われるが、削孔本数が多く、繰り返しの振動作業になり、肉体的な負担が大きい。また、削孔作業で発生する粉塵により、作業環境が悪化し、健康面や作業性に悪影響を及ぼしており、これらの改善が求められている。そこで今回、削孔作業の自動化および粉塵の飛散防止機能を備えたアンカー自動削孔装置（以下、自動削孔装置）を 2 種類開発した<sup>1)~3)</sup>。1 つは、壁状のコンクリート構造物において、せん断補強筋を対象とする大径用自動削孔装置（最大削孔径  $\phi 40\text{mm}$  程度）ともう一つは、あと施工アンカー筋を対象とする小径用自動削孔装置（最大削孔径  $\phi 25\text{mm}$  程度）である。

これらの装置を下水道施設の耐震補強工事へ適用した。小径用自動削孔装置に関しては、今回で 2 回目の現場適用である。

#### 2. 自動削孔装置

##### 2.1 自動削孔装置の概要

自動削孔装置の外観を図-1、構成を表-1 に示す。2 種類の自動削孔装置は、削孔計画で指定する削孔位置、

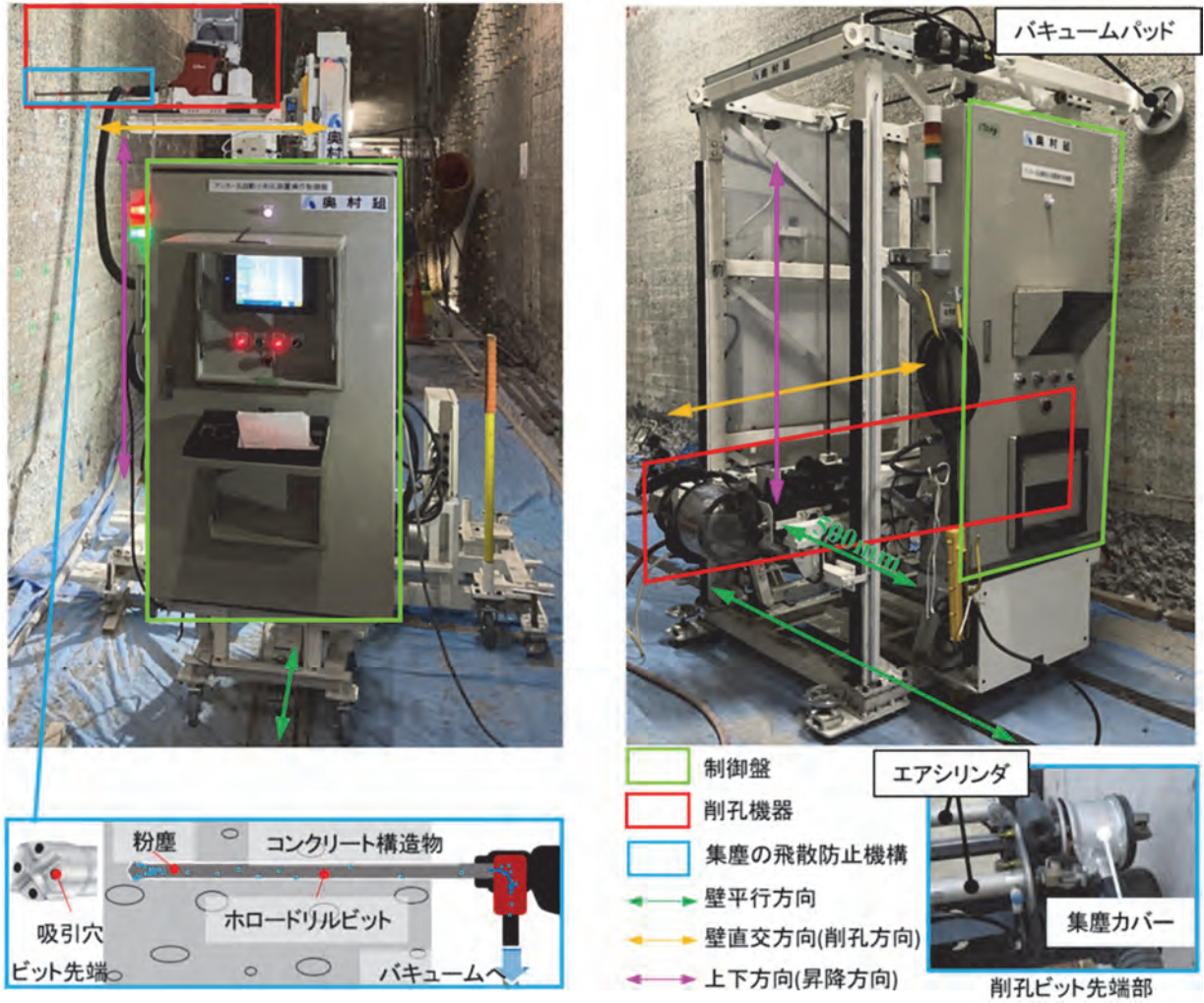
削孔深さ、削孔数に従って自動削孔する。削孔計画は装置の移動ごとに PC で作成して装置に伝送する。また、自動削孔後に自動生成される削孔結果（削孔時間、移動量、削孔深さなど）は制御盤内に保存され、PC へ無線で伝送することができる。自動削孔装置の削孔機器は、故障時の対応が容易な市販のものを用いており、小径用自動削孔装置では電動ハンマードリル、大径用自動削孔装置では空圧削岩機を用いている。自動削孔装置では、これらの削孔機器を削孔位置に自動で移動し、所定の深さまで削孔する。この作業を、計画した削孔数が完了するまで自動的に繰り返す。

##### 2.2 自動削孔装置の仕様

###### a. 小径用自動削孔装置

自動削孔装置の仕様を表-2 に示す。小径用自動削孔装置は、1 回目の現場適用<sup>4)</sup>の際に、内空幅が狭かったため、装置本体と制御盤の一体構造から制御盤等を分割し、機器台車に搭載して装置本体に連結した。外寸が壁平行方向 1,918mm×壁直交方向（削孔方向）1,865mm×上下方向（昇降方向）2,626mm である。壁平行方向へ自動移動するためにラックギヤ付きの走行レールを敷設している。レール長は 1.5m であり、施工延長に合わせて敷設する。レールが敷設できない場所では、手押しによるキャストでの移動が可能である。施工可能高さは設置位置（床面等）から 750mm～2,250mm 程度、削孔深さは最大 300mm まで適用可能である。また、粉塵の飛散防止機構は、ビット内部が空洞のホールドリルビットと集塵機である。

\*技術本部技術研究所土木研究グループ \*\*技術本部技術研究所 \*\*\*東日本支社リニューアル工事部



(a) 小径用自動削孔装置

(b) 大径用自動削孔装置

図-1 自動削孔装置の外観

表-1 自動削孔装置の構成要素

	小径用自動削孔装置	大径用自動削孔装置
削孔機器	電動ハンマードリル	空圧削岩機
粉塵飛散防止機構	・ホロードリルビット (ヒルティ社製) ・集塵機	・集塵カバー、エアシリンダ ・集塵機
制御盤	PLC	PLC
壁平行方向	走行レール、電動モータ	・走行レール、電動モータ ・スライドテーブル
上下方向	昇降機	昇降機
壁直交方向(削孔方向)	スライドテーブル	フィード機構

表-2 自動削孔装置の仕様

	小径用自動削孔装置	大径用自動削孔装置
最大削孔径	φ 25mm程度	φ 40mm程度
外寸	W: 1,918 × D: 1,865 (ビットなし) × H: 2,626mm	W: 1,742 × D: 2,215 × H: 2,593mm
質量	690kg	980kg
移動可能範囲	壁平行方向	・スライドテーブル : 500mm ・走行レール : L = 1.5m × n本
	上下方向(昇降方向)	1750mm ※(750~2,250mm)
	壁直交方向(削孔方向)	1,200mm

※設置位置(床面等)からの高さ

b. 大径用自動削孔装置

大径用自動削孔装置は、外寸が壁平行方向 1,742mm×壁直交方向 2,215mm×上下方向 2,593mm である。壁平行方向の移動は、小径用自動削孔装置と同様に敷設した長さ 3.0m の専用のレール上を走行する。また、装置本体に備えたスライドテーブルにより削岩機は壁平行方向に 500mm 移動できる。施工可能高さは、設置位置（床面等）から 450mm～2,200mm 程度である。削孔深さは最大 1,200mm まで適用可能である。小径用と比べて反力が大きいため、想定する削孔時の最大反力 3kN を確保するために、真空圧によりコンクリート表面に吸着するバキュームパッドを上部に 2 台装備している。パッドは 1 台当たり 2kN 以上を確保でき、必要に応じて使用する。一方、粉塵の飛散防止機構は、削孔箇所を覆う集塵カバーと同カバーを施工面へ押し付けるエアシリンダ、および集塵機で構成される。

2.3 自動削孔装置の動作フロー

事前準備として、自動削孔装置の削孔機器を任意の削孔開始位置に昇降・移動させ、その点を制御の原点とする。自動削孔を行うには、制御の原点ごとに、各削孔の原点位置からの 2 軸（壁平行方向、上下方向）の移動量、削孔深さを指定した削孔計画を自動削孔開始前に作成しておく必要がある。その後、自動削孔装置は削孔計画に従って、図-2 に示す手順で動作する。対象とするエリアの計画した削孔がすべて終了したら、自動削孔装置本体を次のエリアに移動させ、同じ手順で自動削孔させる。また、削孔速度が設定値以下となった場合は、鉄筋等の障害物に接触したものと自動判定し、削孔を中止して削孔計画の次の孔の削孔を行うように制御している。削孔を中止した孔については、計画した削孔の終了後に、目視により鉄筋接触状況を確認し、現場の管理基準に沿って、鉄筋に接触した孔の近傍に、自動削孔装置により再削孔を行う。

なお、大径用自動削孔装置において、バキュームパッドで反力を取る必要がある場合は、削孔エリアに移動した後バキュームパッドを壁表面へ吸着させ、自動削孔を開始する。

3. 適用現場の施工条件

自動削孔装置の適用対象は、図-3 に示す下水道処理施設の放流渠の耐震補強工事である。延長約 20m の壁面において、側壁の片面に、あと施工アンカー筋の挿入孔を、対面の側壁に、せん断補強筋の挿入孔を施工した。

自動削孔装置の放流渠内への搬入については、搬入口が装置の外形よりも小さいため、装置本体を小径用は 3 分割、大径用は 6 分割して施工場所へ搬入し、放流渠内部で組み立てた。

小径用は、あと施工アンカー筋（D16）の挿入孔とし

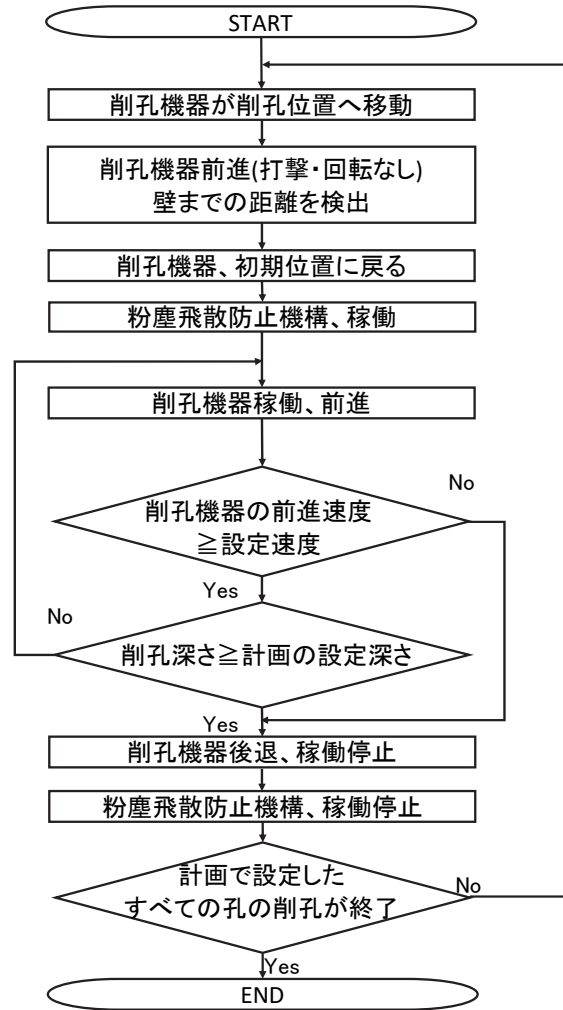


図-2 自動削孔の動作フロー

て削孔径φ20mm、設計削孔深さ112mm以上の削孔に、大径用は、あと施工せん断補強筋（D16）の挿入孔として削孔径φ34mm、設計削孔深さ662mm±9.5mmに適用した。小径用の削孔深さの設定値は現場管理値に合わせて128mmとし、大径用の設定値は削孔が深くなる傾向がみられたため、662mmから653mmへと段階的に2度調整しながら適用した。あと施工せん断補強筋および、あと施工アンカー筋用の削孔は、どちらも250mm間隔の千鳥配置であり、適用した削孔数は、小径用が約200孔、大径用が約170孔である。自動削孔装置を適用した放流渠内面は、あらかじめウォータージェットによる目荒らしを実施済みであり、粗骨材が露出していた。

装置本体を移動させるためのレールを写真-1に示す。走行レールは、各自動削孔装置で異なり、小径用は走行を補助するカムフォロアとアングル、および装置の走行駆動力を伝えるラックギヤから構成され、アングルにラックギヤが取り付けられている。大径用は2本のアングルと、アングル間の離隔を所定の間隔にするための鋼

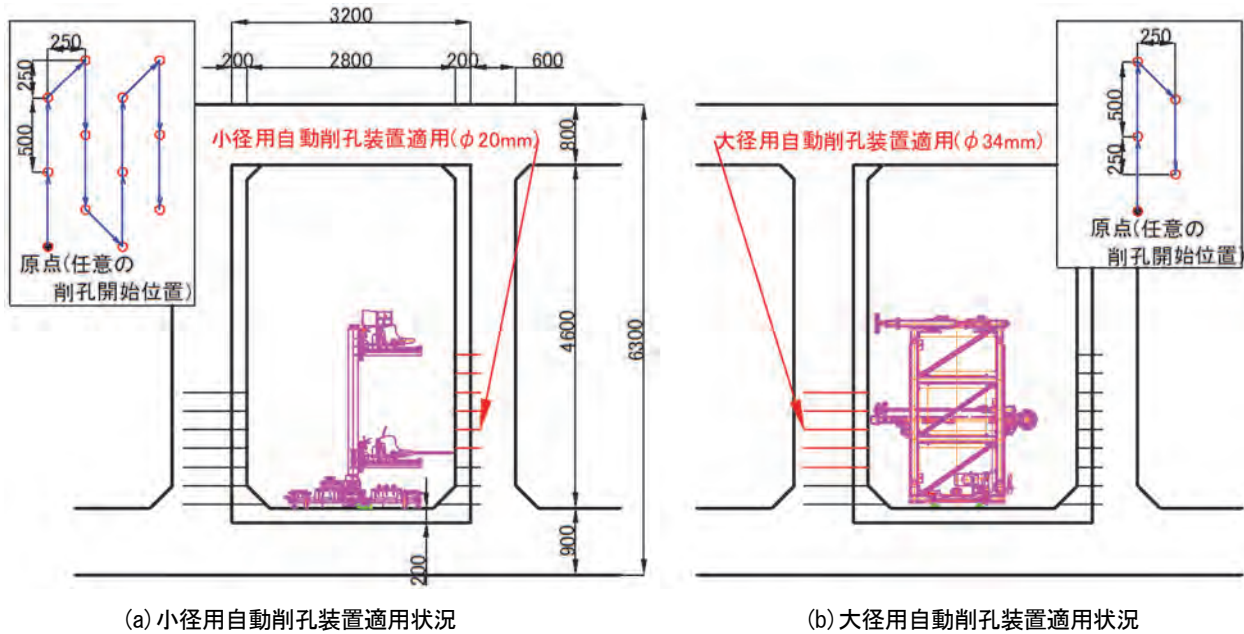


図-3 適用対象構造物

材で構成される。なお、レールの運搬、組み立て等の作業性を考慮し、アングル同士、およびアングルと離隔を確保する鋼材は、嵌合式の接続部材により容易に接合、取り外しができる構造としている。これらのレールは、自動削孔装置による施工後に、撤去可能なスクリーアンカーで床へ固定した。小径用では、長さ1.5m×14セットのレールを削孔位置に事前に設置して施工し、大径用では、長さ3m×3セットのレールを削孔位置に応じて移設して施工した。ただし、2種類の自動削孔装置の稼働エリアが重複していたため、小径用の施工が完了した後に、レールを撤去してから、大径用のレールを設置し施工を行った。

小径用では、装置に設置したギヤ付きエンコーダをレールのラックギヤに沿って走行させることにより、走行量を算出する。また、エンコーダの誤差の累積を考慮し、適用時には、小径用の場合は、高さ方向3孔×壁平行方向4列で削孔計画を作成し、削孔計画ごとの削孔数を12孔、累積移動量を1m以下とするように設定した。一方、大径用の場合は、削孔の際に本体は走行しないので、スライドテーブルの壁平行方向の最大移動量である500mmに収まるように、高さ方向2~3孔×壁平行方向2列で計画し、削孔計画ごとの削孔数を5孔、累積移動量を250mmとして設定した。

4. 適用結果

4.1 適用状況

自動削孔装置の現場適用状況を写真-2に示す。小径用、大径用自動削孔装置とも、計画した通りに自動削孔することができた。自動削孔中に、事前に把握できな

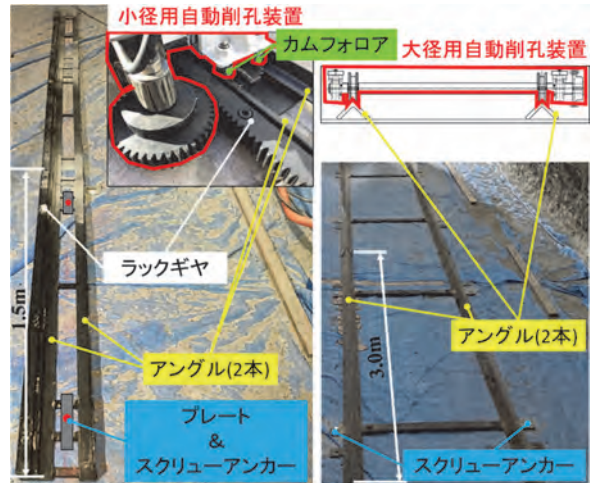


写真-1 自動削孔装置の走行レール



写真-2 自動削孔装置の現場適用状況

かった鉄筋と接触した場合は、削孔を中断して次の削孔位置へ自動で移動しており、鉄筋接触時の動作処理が適切に行われていることを確認できた。また、削孔で発生する粉塵については、ホロードリルビットおよび集塵カバーと集塵機による吸引により削孔中の粉塵の飛散がみられず、作業環境の改善が図られた。

大径用におけるバキュームパッドは、目荒らしした壁面で問題なく動作することを確認した。ただし、今回はバキュームパッドを適用しなくとも反力が得られることを確認できたため、使用せずに削孔を行った。

4.2 削孔深さ

表-3に、削孔深さの計測値を示す。削孔深さはスケールにより計測した。削孔深さの計測値の平均は小径用では128.6mmとなり、すべての孔で設計値112mm以上を満足した。小径用の計測値(平均)を見ると、ほぼ設定した削孔深さで削孔できていることがわかる。大径用では設定値653~662mmに対して、計測値の平均は668.5mmであった。大径用の計測値は、全体的に設定した削孔深さよりも深くなる傾向を示した。これは、深さを計測する距離計のキャリブレーションを、より精度良く調整することで改善できると考える。また、計測値の標準偏差は小さく、適切な設定値を、現場での計測値を基に設定することにより設計値内に収めることができた。

4.3 削孔位置

表-4に、削孔位置の設定値に対する計測値の差の絶対平均を示す。削孔位置をトータルステーションで計測し、自動削孔装置に入力した上下方向および壁平行方向の設定値に対する計測値の差を求めた。小径用の上下方向は、絶対平均10.3mm、壁平行方向は絶対平均11.9mm、大径用の上下方向は、絶対平均3.1mm、壁平行方向は絶対平均6.7mmであり、どちらの自動削孔装置も削孔ビット径未満であり、良好な位置精度であったと考える。誤差の発生要因の一つとしては、事前に削孔面に行った目荒らしにより、削孔ビットが滑る現象を確認しており、その影響があったと考える。特に、大径用に比べ小径で剛性が小さい削孔ビットを用いる小径用自動削孔装置では、比較的影響が大きかった可能性がある。

4.4 削孔速度

表-5に、自動削孔装置の削孔速度を示す。小径用では、削孔位置の移動を含まない1孔当たりの削孔時間が削孔深さ128mmの時、平均25.5sであり、平均削孔速度が5.1mm/sとなる。大径用では、削孔深さ662mmの時、平均166.4sかかり、平均の削孔速度は4.1mm/sであった。あと施工アンカー筋の挿入孔の削孔作業については、今回の現場と削孔径・削孔長が同じ電動ハンマードリルによる他現場における人力施工の場合の実績が180孔/人日<sup>3)</sup>であったのに対し、本適用での小径用による施工の場合では施工歩掛から247孔/台日となり、施工効率

表-3 削孔深さの計測値

	小径用自動削孔装置	大径用自動削孔装置
設計値	112mm以上	662mm±9.5mm
設定値(現場管理値)	128mm	653~662mm
計測値(平均)	128.6mm	668.5mm
標準偏差	1.9mm	2.4mm
サンプル数	187孔	144孔

表-4 削孔位置の設定値に対する計測値の差

	小径用自動削孔装置		大径用自動削孔装置	
	上下方向	壁平行方向	上下方向	壁平行方向
設計値	250mm	250mm	250mm	250mm
設定値	250mm	250mm	250mm	250mm
計測値の差(絶対平均)	10.3mm	11.9mm	3.1mm	6.7mm
サンプル数	138孔	138孔	77孔	81孔

表-5 自動削孔装置の削孔速度(壁直交方向の移動)

	小径用自動削孔装置		大径用自動削孔装置	
	削孔時間(s)	削孔速度(mm/s)	削孔時間(s)	削孔速度(mm/s)
平均値	25.5	5.1	166.4	4.1

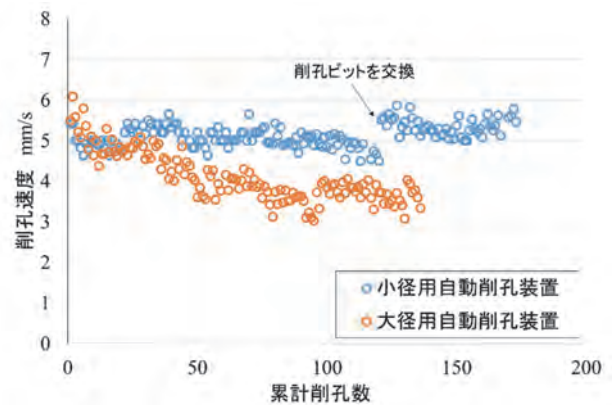


図-4 累積削孔数と削孔速度の関係

が向上した。あと施工せん断補強筋の挿入孔の削孔作業については、一般的な削岩機による人力施工の場合が最大で約50孔/台日に対し、大径用による施工の場合が施工歩掛から62孔/台日となり、大径用でも、あと施工せん断補強筋の挿入孔削孔作業の施工効率が向上した。

累積削孔数と削孔速度の関係を図-4に示す。自動削孔装置において、削孔本数が蓄積されることで削孔ビットの摩耗により削孔速度が低下し、削孔効率も低下する傾向がみられた。特に削孔長が長い大径用自動削孔装置

では、累計約 33m (50 孔程度) 削孔した段階で削孔速度が約 25%低下している。これは、対象構造物のコンクリートの性状などにより異なると思われるが、自動削孔装置における削孔ビットの最適な交換時期について、今後検討が必要である。

## 5. まとめ

削孔作業を自動で行う 2 種類の自動削孔装置 (小径用自動削孔装置、大径用自動削孔装置) を開発した。これらの装置を実施工に適用した主な結果を以下に示す。

- i. 鉄筋接触時に、削孔の速度低下を検知して自動で削孔を中断することを確認した
- ii. 小径用自動削孔装置の削孔深さ精度は設定値 128mm に対して計測値が平均 128.6mm、標準偏差 1.9mm であり、高い精度で削孔できた
- iii. 大径用自動削孔装置の削孔深さ精度は設定値 653mm ~ 662mm に対して、計測値が平均 668.5mm、標準偏差 2.4mm と設定値よりも深くなる傾向がみられたが、適切な設定値とすることにより設計値内に施工することができた
- iv. 移動精度は、どちらの自動削孔装置も設定値との差が絶対平均 10mm 程度であり、高い精度で移動できていることを確認した
- v. 小径用および大径用自動削孔装置の適用により、ともに人力施工に比べ、施工効率の向上が図られた
- vi. 削孔速度は、削孔本数が多くなるほど削孔ビットの摩耗により低下し、大径用自動削孔装置の場合、削孔延長が約 33m で約 25%の低下がみられた
- vii. 作業環境については、粉塵の飛散防止機構により、削孔中の粉塵の飛散がみられず、改善が図られた  
今後も自動削孔装置の現場適用を積極的に行うとともに、さらなる作業の省力化、効率化を図るべく、ブラッシュアップをしていきたい。

## 【参考文献】

- 1) 有川 健、三澤孝史、西山宏一、石井敏之、「既設コンクリート構造物のあと施工せん断補強に伴う削孔作業に適用する自動削孔装置の開発」、令和 2 年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集、pp.149-154、2020.12
- 2) 川澄悠馬、三澤孝史、西山宏一、有川 健、山口治、石井敏之、栗本雅裕、「小径のアンカー孔を対象とする自動削孔装置の開発」、土木学会・土木建設技術発表会 2020、2021.2
- 3) 三澤孝史、川澄悠馬、西山宏一、有川 健、山口治、石井敏之、「アンカー孔の自動削孔装置の開発」、奥村組技術研究年報 No.47、pp.67-72、2021.9
- 4) 田島鉄朗、三澤孝史、加藤清孝、川澄悠馬、「小径のアンカー孔を対象とする自動削孔装置の実施工への適用」、令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会、VI-665、2022.9

# 地盤改良時影響可視化 X R システムの開発

## — 施工進捗と変位状況をリアルタイムに現地に 3 D で可視化 —

### XR-based Visualization and Monitoring System

### for Soil Stabilization Work

### - Real-time On-Site 3D Visualization of Construction Progress and Soil Displacement -

吉村藤子\* 宮田岩往\* 城井光雄\*\* 今泉和俊\*\*\*

#### 要 旨

地盤改良の施工において、周囲に影響が及んでいないか施工中に監視することは公衆災害を防ぐうえで重要である。そこで、施工深度や周辺地盤の変位などをセンシングし、その情報を可視化することで監視業務を高度化させるシステムを開発した。センシングデータがクラウドを経由して監視員の端末上にリアルタイムで XR 表示される。施工位置や変位の異常が一目でわかり、監視業務が円滑に行えるようになる。さらに、本システムを、実際の施工にあわせて試行した。この試行により、従来の監視業務の課題が解決され、施工品質の向上および公衆災害の防止につながれることを確認した。

キーワード：地盤改良、動態観測、IoT センサ、XR、可視化

#### 1. まえがき

近年、国土交通省が ICT 活用工事の基準類に関する整備を進めている。平成 28 (2016) 年度に土工の基準が整備されたことを皮切りに、令和 4 (2022) 年時点で対象が 12 工種にまで拡大している。その中で地盤改良工は比較的早く、令和元 (2019) 年度に 5 番目の工種として ICT 活用工事の基準類が整備された<sup>1)</sup>。

そのため、早い段階から地盤改良の施工に関する ICT ツールが開発されてきた。その多くは、施工機械の位置誘導や出来形・品質管理の効率化を主目的としている<sup>2)</sup>。

その一方で、地盤改良の施工は周辺地盤の土圧に影響を及ぼすため、地盤の隆起などの公衆災害のリスクを伴う<sup>3)</sup>。このような災害の防止のために、施工中は近接地盤の隆起を測定し、周辺に危害を及ぼすような地盤の変状が起きた場合は作業を中止するよう求められている<sup>4)</sup>。

そこで、ICT 活用の一環として、公衆災害を防止するための安全管理に効果的な ICT ツールが必要になると考え、XR (クロスリアリティ) 技術を用いて地盤改良施工時の監視業務を高度化するシステムを開発することとした。XR とは、VR (Virtual Reality、仮想現実)、AR (Augmented Reality、拡張現実)、MR (Mixed Reality、複合現実) の総称であり、その中で今回は AR と MR を対象とした。

#### 2. 地盤改良施工時の監視業務の課題

一般的に、地盤改良の施工の際には、監視員を配置して、周辺に影響が出ていないかを監視し、万が一異常があった場合には即座に施工を止められる体制を整えている。監視員は、施工機械の制御担当者と連絡を取り合っ て施工進捗状況に合わせて監視すべき場所の目星をつけ、同時に、周辺地盤の隆起等の動態観測結果を随時確認して監視を行う。

図-1 は、地下構造物に隣接した場所で施工を行う際に、地下構造物内に配置された監視員の行う業務をフロー図にしたものである。ここで、赤枠とした箇所が、後述する開発システムにより置き換わる業務である。

地下構造物内からは、施工位置が当然目視できないため、監視員は、施工機械が設置されている地上と自身のいる位置との位置関係を図面から考えて、自身から見て施工位置がどこなのか見当を付ける必要がある。動態観測の計測位置についても同様である。すなわち、三人称視点で描かれている図面から、目の前に広がる視界という一人称視点に、視点を変換することが必要となる。

このようにして行われる位置関係の把握は、まだ現場に慣れていない人や、空間把握が得意でない人にとっては大きな負担となり、監視業務ができる人材が空間把握

\* ICT 統括センターイノベーション部 \*\* 西日本支社機電部 \*\*\* 技術本部技術戦略部

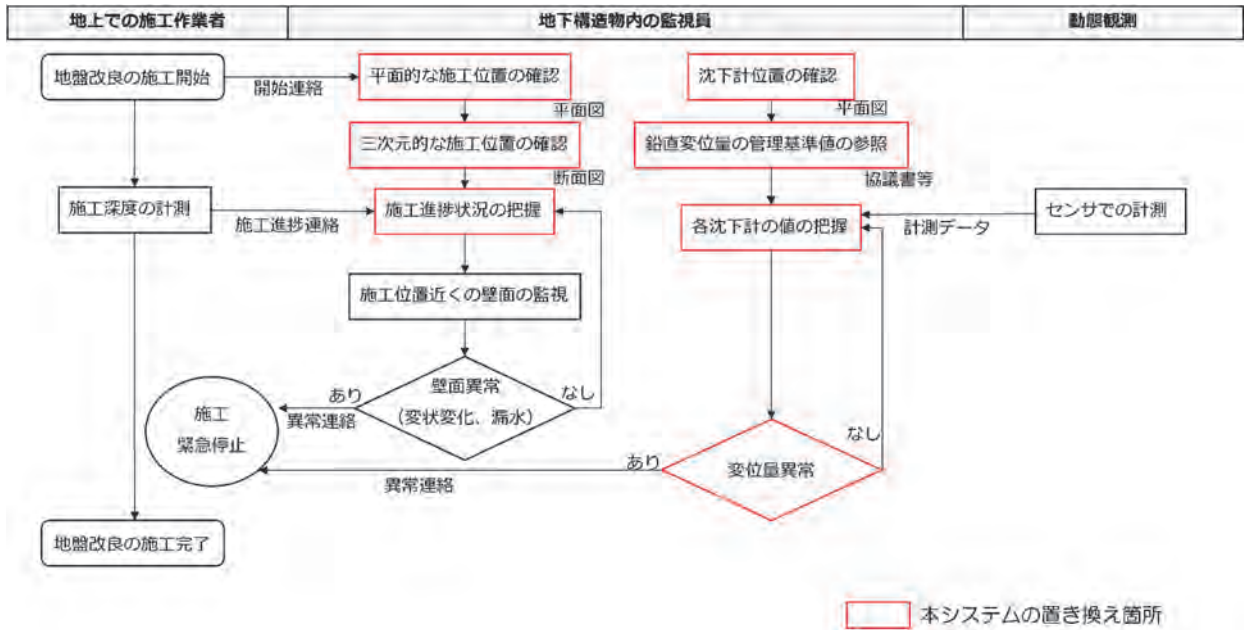


図-1 監視業務のワークフロー図と本システムによる置き換え箇所

能力の有無によって限られるため、急な配置転換に対応できない一因となっている。また、空間位置の誤認のために正しく監視業務が実施されないリスクもある。

監視員は、自己位置から見た施工位置・沈下計位置を正しく把握した後、実際に施工が始まると（図-1左上）、施工機械側の担当者と連絡を取り合い、施工進捗状況に応じて監視場所を変更していく必要がある。これは上述の通り、個人の空間把握能力に大きく依存している。

次に、施工進捗状況を把握しつつ、地下構造物に変状変化や漏水が起きていないかを監視し、同時に、周辺地盤や地下構造物が隆起・沈下していないかを監視する。異常に気付いた場合は（図-1中央下部）、即座に施工機械側に連絡し施工を止め、公衆災害を防ぐ必要がある。

このように、地盤改良施工時の監視業務は、公衆災害

防止のために重要な役割を担っている中で、個人の空間把握能力に依存するところが大きい。不足している労働力を補うためにも、空間把握が苦手な人でも監視業務を遂行できる体制を構築する必要がある。

### 3. 開発システムおよび機能の概要

#### 3.1 システム概要

施工位置や動態観測計測位置がどこであるのかを現地にリアルタイムに表示するシステムを開発した。現地位置に合わせて、現地の光景に重ね合わせて可視化表示する特性上、タブレット端末（iPad）を用いた AR 技術と MR ゴーグル（HoloLens2）を用いた MR 技術を利用した。

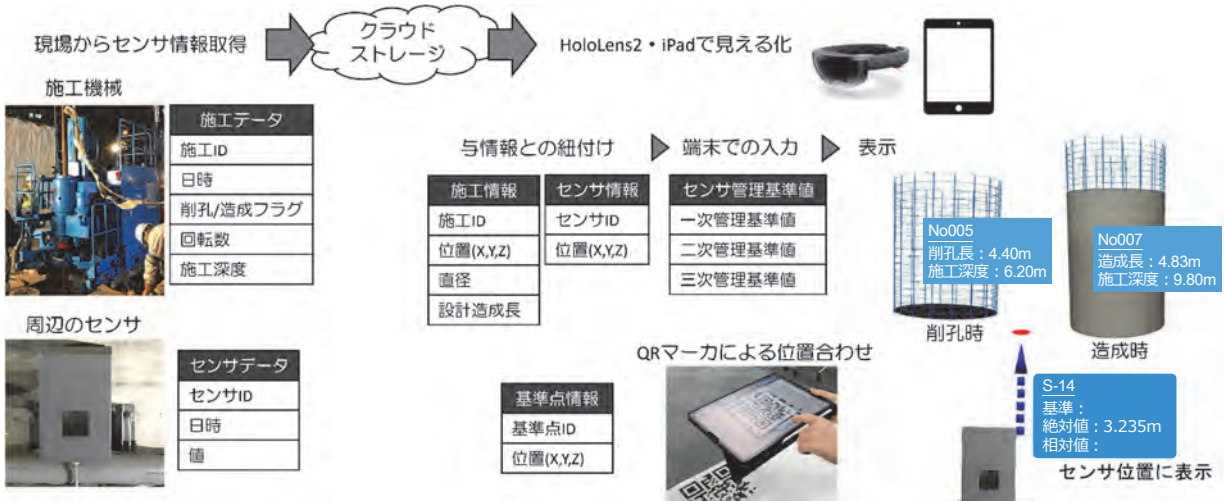


図-2 システム構成およびデータ構成概要



システム構成およびデータ構成概要を図-2に示す。施工機械や現地に設置したセンサ（図中のセンサの写真は沈下計）からデータをクラウドストレージサービスにアップロードする。データを集約する場所としてクラウドストレージサービスを利用した理由は、汎用性を高め、API 等が公開されていないセンサとも接続できるようにするためである。CSV ファイルとしてセンサ情報が書き込まれさえすれば、表示端末側からデータを参照しに行けるようになっている。

各改良体の施工機械の設置位置と直径、動態観測センサの設置位置、表示位置の位置合わせに使う監視場所付近の基準点の位置情報については、事前に端末側に入力しておく。

使用する際は、QR マーカを読み込んで位置合わせを行い、クラウドストレージサービス上にある CSV ファイルを読み込み、事前に与えられている位置情報を参照して、正しい位置にデータを可視化表示する。

### 3.2 施工データの可視化機能

施工機械に施工深度やロッドの回転数を取得するセンサを取り付けることにより、施工データがクラウドストレージサービスを経由して端末の画面上に表示される。画面上では、現地の光景の中に施工進捗状況を示す三次元モデルが重ね合わせて表示されるため、図面から現在位置と施工位置を考える必要がなくなる。また、自動で深度情報が取得されるため、従来は施工機械側の担当者と連絡を取り合う必要があったが、本システムにより連絡が不要となり、より精度よく高頻度に進捗を把握できるようになる。

施工機械に取り付けたセンサから、改良体番号を示す ID、日時、今行っていることが削孔なのか造成なのかを示すフラグ、ロッドの回転数、施工深度の情報を取得する。改良体番号を示す ID により、事前に与えられて

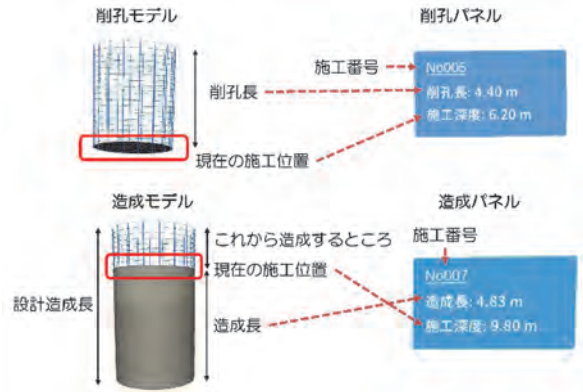


図-4 削孔モデルと造成モデルの見方

いた施工機械の設置位置の情報との紐付けが行われる。図-3に示す通り、ロッドの回転数の情報により、回転が始まった施工深度を施工開始位置とし、そこを基準として三次元モデルが表示される。

表示される三次元モデルは、削孔した後に改良体を造成していく高圧噴射攪拌工法などを想定しているため、削孔はワイヤーフレームで、造成は円柱形として表現した。さらに造成時は、設計造成長を事前に入力しておくことで、あとどれくらいで造成が完了するのかわかるように、これから造成するところをワイヤーフレームで表示する（図-4）。

### 3.3 動態観測データの可視化機能

動態観測の情報についても、センサからリアルタイムでクラウドストレージサービスにデータをアップロードできるようにし、端末画面上で計測位置に表示させる。その際に数値データだけではなく、三次元モデルとして可視化する。例えば、鉛直変位量を可視化する場合は、変位方向を矢印の向きで、変位量を矢印の長さで表現し、管理基準値を閾値として、変位量に応じて矢印を4段階

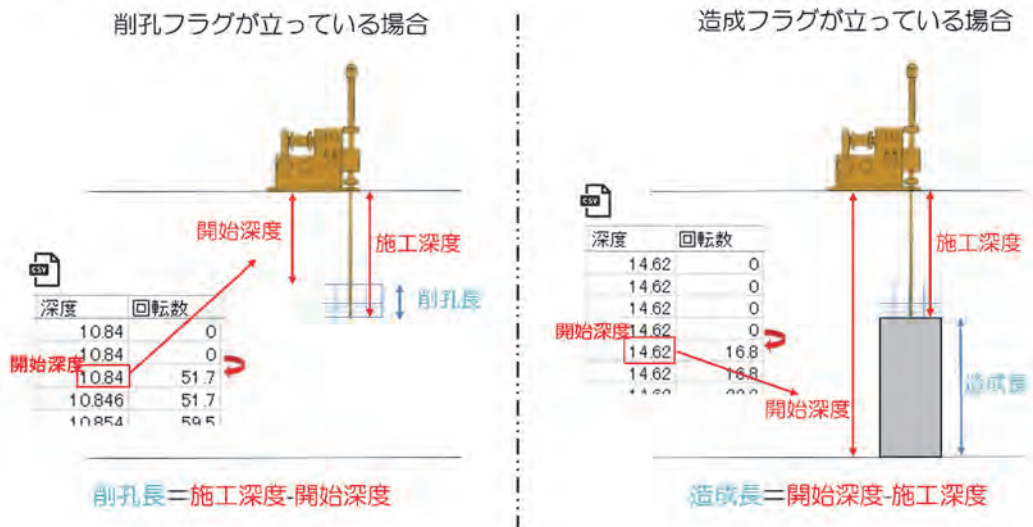


図-3 削孔/造成モデルの生成方法

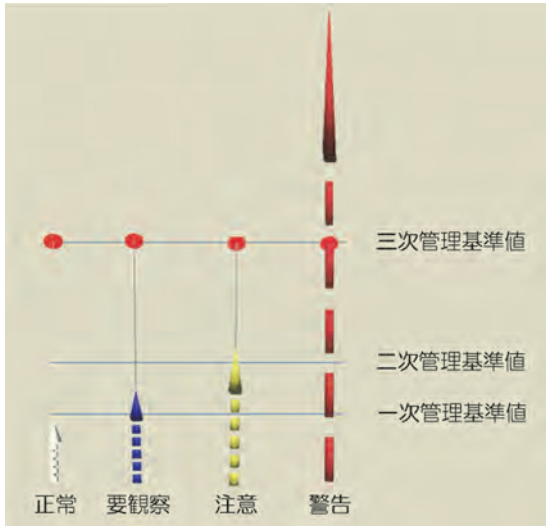


図-5 管理基準値と表示の例

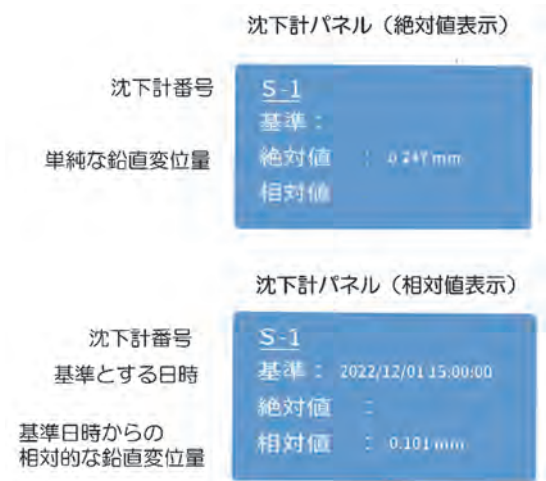


図-6 絶対値表示と相対値表示の例

に着色する(図-5)。三次管理基準値に相当する値を矢印の延長線上に赤丸で表示し、超えた場合は警報を鳴らすなど異常に気づきやすいように工夫した。

また、単純な計測データだけではなく、過去のある任意の時点からの変化量も表示できるようにした。そうすることで、地盤改良の施工に起因する計測値の変化量がわかりやすくなる。

沈下計を可視化した際に三次元モデルの横に表示されるパネルの例を図-6に示す。単純な鉛直変位量をそのまま示した「絶対値表示」と、基準とする日時からの相対的な鉛直変位量を示した「相対値表示」の2つのモードを切り替えることができる。

### 3.4 記録振り返り機能

各種データの表示機能に加え、MRゴーグルを使用した場合には、仮想空間上に手書きでメモを書き込める機能も実装した。変状位置や漏水位置を書き込み、施工進捗状況を表す三次元モデルや動態観測を表す三次元モデルと併せてスクリーンショットを撮影することで、どのような状況下でどこに異常が起きたのかを正確に記録す



図-7 メモの記入例  
(HoloLens2画面内のキャプチャ画像)



図-8 空間に配置されたメモ画像  
(HoloLens2画面内のキャプチャ画像)

ることが可能となる(図-7)。これにより、リアルタイムにデータを可視化するだけでなく、過去の施工履歴も振り返ることができる。どこが施工済みであるのか、以前の施工時にどれほどの変位があったのか、などを確認することができ、また、メモを三次元空間のみならず時間に紐づけて配置することができるため、メモを記載したときの状況をXR空間内で再現することができる(図-8)。

## 4. 現場での試行によるシステム有効性確認

### 4.1 試行現場概要

実際に施工が行われるタイミングで、システムが有効に稼働するか確かめるために試行した。試行した建設現場は、大阪駅前地下道の撤去・新設工事を行っている土木工事現場である。当該現場は、地上部分が交通量の多い交差点であり、地下一階部分に梅田駅改札に繋がる地下歩道があり、地下二階に地下鉄の軌道が走るトンネル躯体が存在する構造になっている(図-9、10)。このような現場は立体構造の把握が難しいうえに、施工の影響で隆起沈下や漏水・変状変化が起きると甚大な社会的影響を及ぼすため、特に公衆災害を防止することが重要である。

この現場では、地下一階部分の地下道を撤去・新設するにあたり、地下鉄躯体に対するアンバランスな荷重負担を回避するため、地下道の直下にあたる地下二階相当

の空間のうち、地下鉄の躯体が存在しない土壌箇所に高圧噴射攪拌工法（SUPERJET35、有効直径φ3.5m）での地盤改良を行っている。営業線の地下鉄躯体に近接して施工するため、地下鉄躯体に影響が出るリスクが高く、少しでも異常が起きたら即座に施工を止められるよう、監視員の果たす役割が重要である。

現場では施工中、地下鉄躯体壁面に 5m おきに水盛式沈下計を設置し（図-11）、1 分おきに鉛直変位量を観測しており、ウェブブラウザで各沈下計の数値データを

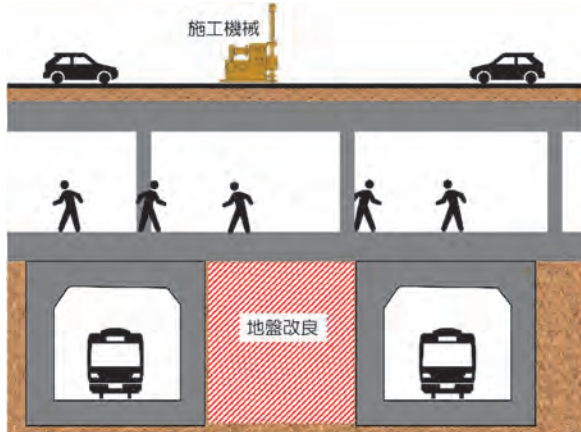


図-9 試行現場の模式的な断面図



図-10 交差点を占有しての地盤改良施工状況

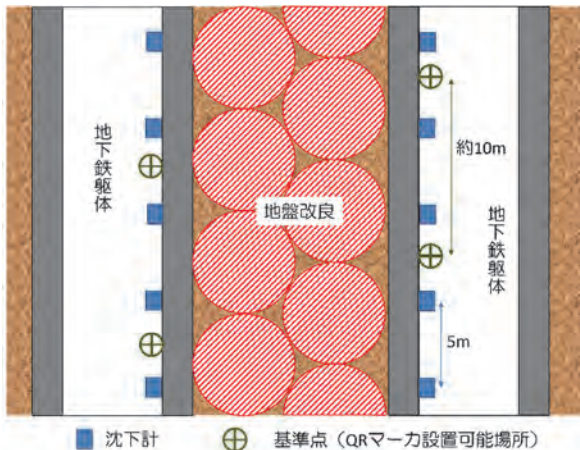


図-11 地下鉄躯体レベルでの模式的な平面図

確認できるシステムを導入している。管理基準値を 3 段

階設けて管理しており、三次管理基準値を超えた場合は施工を止める必要がある。

施工の進捗状況は、施工機械に設置するロッドの残尺を計測して施工深度を算出し、1m 進むごとに施工機械側の連絡担当者がチャットで監視員に連絡していた。

施工は夜間の終電から始発の間に行われ、これまで監視員は地下鉄躯体内で、沈下計のデータと施工進捗状況の連絡をタブレット端末で確認しつつ、施工位置を頭の中で推定しながら、躯体壁面に異常が起きていないか監視を行っていた。

#### 4.2 試行内容

従来の手動による検尺に替わり、施工機械にセンサを取り付け、1 秒ごとに施工データを取得し、施工進捗状況を把握した。データは現場に設置したパソコンに送り、そこからクラウドストレージサービスに CSV ファイルとして常時同期更新されるように設定した。また、地下鉄躯体に取り付けられている沈下計のデータも、同様にクラウドストレージサービスに CSV ファイルとして書き込まれていくように設定した。これらのデータが安定してアップロードされるよう、携帯回線ではなく有線 LAN ケーブルを接続した。沈下計位置と施工機械の位置は事前に設定ファイルに記入し、端末側に入力しておく。

表示位置の位置合わせは、端末で QR マーカを読み込んで行う。日によって異なる施工位置に対応できるように、位置合わせ用の基準点をおおよそ 10m に一箇所程度用意しておく（図-11）、最寄りの基準点に QR マーカを置いて読み込めるようにした。QR マーカは、床に置くことも壁に貼り付けて設置することもできるようにした（図-12）。読み込む iPad の姿勢により水平設置なのか鉛直設置なのかを判別し、QR マーカの中心を原点として QR マーカの向きに合わせて仮想空間の座標が配置される。また、QR マーカを指定した基準点の真上に設置できない状況（例えば、設置している沈下計の箱の角を基準点としていた場合、QR マーカの中心をその角に置くことは不可能である）にも対処できるように、基準点位置をオフセットすることができるようにした。

端末は、AR 端末として iPad（第 6 世代）および iPad Pro（第 5 世代）、MR ゴーグルとして HoloLens2 を使用した。図-13 は、HoloLens2 を用いて試行している状況である。通信回線については、現場内は携帯回線が接続可能な場所であったため、iPad と iPad Pro は携帯回線を

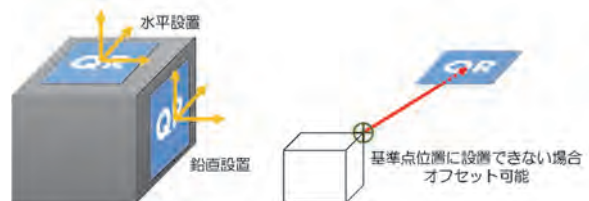


図-12 QR マーカの設置方法

利用し、HoloLens2 は iPad Pro からのテザリングで回線を利用した。いずれの回線も下りで 40Mbps 以上出ており、支障なく使用できた。

#### 4.3 試行結果

本システムの試行により、これまで頭の中で考えていた、おおよその施工位置が視覚的にはっきりとわかるようになったため、監視すべき位置が明確化され適切な位置に注意力を払って監視業務を行えるようになった（図-14）。また、今まで 1m おきにしかわからなかった施工進捗がリアルタイムにわかるため、ロッドの段取り替えなどで一旦止まっているなどの地上の施工機械側の様子が推察できるようになり、より緊密な連携を取って監視業務が行えるようになった。

さらに、沈下計が示す鉛直変位量が、管理基準値に対してどれほど許容量があるのか、管理基準値を超えそうな危険な場所はどこなのか、などが画面を見ただけでわかるようになった。それまで上限下限それぞれ 3 段階ずつあった管理基準値の 6 つの数字を覚えておく必要がなくなった。

端末による見え方の違いを検証したところ、iPad（第 6 世代）は、地下鉄躯体内の照明だけではカメラによる位置認識精度が落ちて表示が数 m 単位でずれることがわかった。一方、LiDar 機能を搭載している iPad Pro（第



図-13 HoloLens2 を用いた試行状況

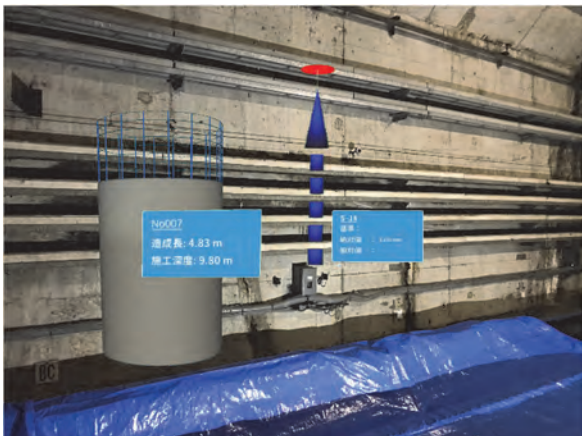


図-14 造成モデルと沈下計モデルの表示

5 世代) と HoloLens2 では表示位置が iPad ほどずれることはなく、監視業務を行うことが可能である。

iPad および iPad Pro は、没入感に乏しいため、奥行き感が掴みにくく、表示されている三次元モデルが躯体壁面の奥にあるのか手前にあるのか、認識しづらかった。一方で、iPad や iPad Pro はその場にいる複数人で一つの画面を覗き込むことができ、共通認識を持ちながら会話できるため、監視員が複数人いる場合のコミュニケーションツールとしても有効であることがわかった。

また、施工中に表示されているモデルを含めた躯体壁面の様子を画面のスクリーンショットとして保存しておけば、施工が完了した後に、どのような施工状況で、どの場所（施工箇所との位置関係も踏まえた場所）の壁面の様子なのかを他の人に正確に伝えることができるため、情報共有ツールとしても有効であることがわかった。

#### 5. まとめ

地盤改良の施工データと動態観測の計測データを、リアルタイムに AR や MR で可視化するシステムを開発した。現場で試行を行い、現地位置に合わせて可視化することで、空間把握能力の個人差を補完するだけでなく、情報伝達が円滑化することもわかった。また、監視業務がより確実に行えるため、公衆災害の防止に役立つ。

現段階では可視化できる計測データは沈下計だけであるが、データをクラウドストレージサービス経由にすることで汎用性を持たせているため、様々な IoT センサのデータを可視化していくことが可能である。今後は、傾斜、地下水位、施工位置近くの井戸水の pH など、地盤改良の多様な影響を可視化し、適用現場を増やしていきたい。

#### 【参考文献】

- 1) 国土交通省、「ICT 施工の対象工種の拡大に向けた取組」、2023、<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/content/001595484.pdf> (参照 2023-02-28)
- 2) 土木学会建設技術研究委員会建設技術体系化小委員会、「CIM, ICT 関連技術の体系化に関する調査報告書」、2020、<https://committees.jsce.or.jp/sekou05/node/42> (参照 2023-02-28)
- 3) 平出 亜、柿原芳彦、「深層混合処理の施工に伴う周辺地盤変位のメカニズムと変位予測についての考察」、応用地質技術年報、1997
- 4) 国土交通省、「建設工事公衆災害防止対策要綱 土工事編」、国土交通省告示第 496 号第 8 章第 54、2020、<https://www.mlit.go.jp/tec/content/001305480.pdf> (参照 2023-02-28)

# Analytical and Experimental Study on Estimating the Compressive Strength of Early Age Concrete by the Maturity Method

Biswas Rajib Kumar,\* Takahiro Saito,\* Ryutaro Matsumoto\*

## Abstract

In this study an approach is proposed to expedite the construction of mountain tunnels by estimating the early age (less than one day) strength of concrete, subject to various temperatures and curing methods. The relationship between various curing temperatures and the development of concrete strength at a very early age is not fully understood; current approaches may be incapable of predicting the compressive strength of early age concrete. Numerical and experimental investigations were carried out to establish a relationship between the early age compressive strength of concrete and concrete maturity while taking varied temperature histories of concrete curing into account. The results obtained from numerical analyses and experimental investigations were in good agreement. Finally, to predict the very early age compressive strength of lining concrete, we propose different equations for different water to cement ratios.

Keywords; Lining concrete, concrete maturity, FEM analysis, early age

## 1. Introduction

Estimating concrete strength *in situ* at an early age can be important for several reasons, including for determining whether formwork can be removed, post-tensioning, handling precast members, and other actions. Overestimates of early age concrete strength can affect construction safety; underestimates of early age concrete strength can generate delay and additional cost.

To accelerate the construction process and reduce construction costs, it is often important to remove the formwork at the earliest possible time. The compressive strength required for lining concrete at demolding to avoid surface peeling is typically considered to be more than 2 MPa.<sup>1)</sup>

First proposed in the 1940s, the maturity method calculates concrete strength by accounting for the effects of both time and temperature. R.W. Nurse examined the steam-curing of concrete and plotted the product of time and temperature against concrete strength after three days of storage at room temperature.<sup>2)</sup> A.G.A. Saul examined the principles underlying the steam-curing of concrete at atmospheric temperature and defined maturity as the product of the concrete age and average temperature above freezing.<sup>3)</sup>

Many studies address maturity-based estimates of concrete

strength. Tekle et al.<sup>4)</sup> investigated the application of the maturity method to estimate the early age compressive strength of concrete slabs in cold weather, considering in particular the relationship between *in situ* strength and strength calculated by the maturity method at an early age (one to three days) and in cold weather (below 10°C). Sun et al.<sup>5)</sup> investigated the effects of temperature and relative humidity on the development of the compressive strength of surface layer cement mortar. However, most of these studies considered concrete of more than one day in age.

This study aims to establish the maturity function for concrete at an early age (less than one day) with varying water cement ratios and temperature histories. This study carried out both experimental studies and numerical analysis to establish a concrete maturity function for estimating the compressive strength of concrete at an early age.

## 2. Experimental study

### 2.1 Water to cement ratio of 0.5

Medium-flow concrete was used with ordinary portland cement and crushed rock sand. Table 1 gives the mix proportions used in the experimental study.

Table 1: Concrete mix properties (W/C = 0.5)

Slump flow (cm)	Air volume (%)	W/C (%)	s/a (%)	G <sub>max</sub> (mm)	Materials (kg/m <sup>3</sup> )				Materials (g/m <sup>3</sup> )	
					water (W)	cement (C)	sand (S)	gravel (G)	Water reducer	AE agent
35–50	4.5±1.5	50.0	52.2	25	175	350	904	838	3,500	7

\*Technical research institute civil engineering research group

The experimental program entailed the compressive strength testing of concrete cylinders. The cylinder specimens prepared measured  $\phi 100 \times 200$  mm.

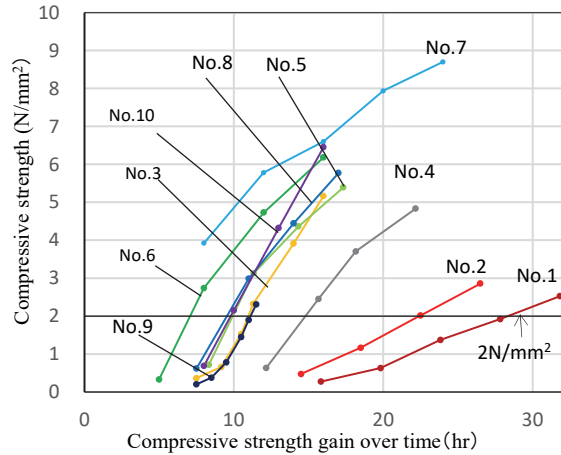
Table 2 gives the experimental cases considered in the experimental program for  $W/C = 0.5$ . Ten experimental cases were considered, encompassing initial concrete temperatures from  $10^\circ\text{C}$  to  $30^\circ\text{C}$  and curing temperatures from  $10^\circ\text{C}$  to  $50^\circ\text{C}$ . Kneading temperatures were kept within  $\pm 3^\circ\text{C}$  of the target temperature. The initial curing temperatures for Cases 1 to 8 were maintained at the target temperature. For Cases 9 and 10, curing temperatures began at  $25^\circ\text{C}$ . In Case 9, the curing temperature gradually reached  $30^\circ\text{C}$  after 5 hours. In Case 10, the curing temperature gradually reached  $40^\circ\text{C}$  after 12 hours. The curing method was hot air curing at a relative humidity of 70%.

To measure the hydration heat of the concrete, we placed temperature sensors at the center of the cylinder specimens. We performed compressive strength tests in accordance with JIS A 1108 and tested the early age compressive strength of concrete from five hours until 32 hours to confirm that the desired strength (2 MPa) was achieved. Three specimens were tested for each data point. Initial concrete temperatures and curing temperatures significantly affected compressive strength (Figure 1). In cases other than Cases 1 and 2, concrete specimens achieved the requisite strength of 2 MPa in 16 hours. More interestingly, in Cases 6 and 7, the desired strength was achieved in eight hours.

The maturity method was developed in the 1940s to account for the combined effects of temperature and time on the compressive strength of RC structures subjected to different curing temperatures. Concrete maturity can be understood as the sum of the products of temperature and time. This method is known as the Nurse-Saul function. A figure for concrete maturity can be calculated as follows:

$$M(t) = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \tag{1}$$

where  $M(t)$  is concrete maturity at time  $t$ ,  $T$  is the average concrete temperature over time interval ( $\Delta t$ ), and  $T_0$  is the datum temperature. Datum temperature is generally defined as the lowest temperature at which concrete is able to gain strength. According to the Canadian Standards Association, it is critical to have temperatures above  $5^\circ\text{C}$  to avoid major damage to concrete, especially in the first 24 hours.<sup>6)</sup> Figure 2 shows the

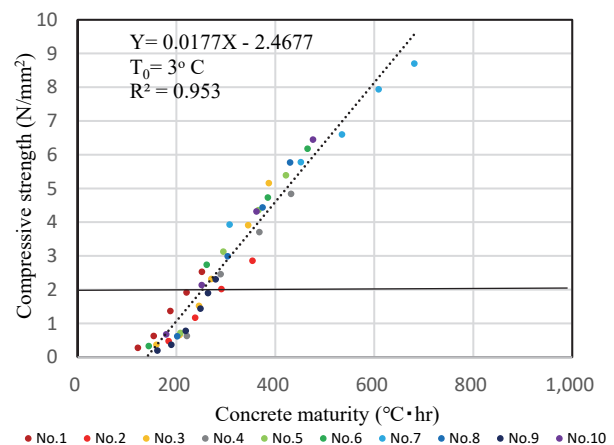


maturity curve obtained from the experimental study. In this study, the datum temperature was set to  $3^\circ\text{C}$ . The best fit of the data obtained is at  $3^\circ\text{C}$ . From Figure 2, we can establish the following relationship between concrete maturity and compressive strength, where  $y$  represents the compressive strength of the concrete and  $x$  denotes concrete maturity:

$$y = 0.0177x - 2.4677 \tag{2}$$

### 2.2 Water to cement ratio of 0.4

Many RC structures are constructed at a water to cement ratio of 0.4. For this reason, we undertook another study with  $W/C = 0.4$ . The concrete used was similar to the concrete used for  $W/C = 0.5$ . We considered a total of four cases based on actual construction practice. The maximum size of the coarse aggregate was 25 mm. Table 3 gives the specifics of the concrete mix. The initial temperature was kept at  $20^\circ\text{C}$  for all cases—Cases 1, 2, 3, and 4. Curing temperatures were  $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ , and



**Table 2: Cases considered for the experimental study ( $W/C = 0.5$ )**

Case No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Initial concrete temperature ( $^\circ\text{C}$ )	10	15	15	20	20	20	20	30	15	15
Curing temperature ( $^\circ\text{C}$ )	10	15	30	20	30	40	50	30	25-30	25-40

**Table 3: Concrete mix properties (W/C = 0.4)**

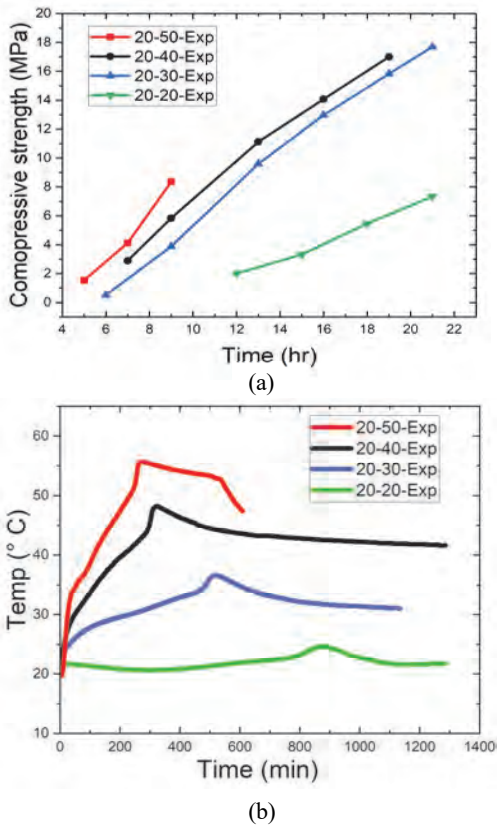
Slump flow (cm)	Air volume (%)	W/C (%)	s/a (%)	G <sub>max</sub> (mm)	Materials (kg/m <sup>3</sup> )				Materials (g/m <sup>3</sup> )	
					water (W)	cement (C)	sand (S)	gravel (G)	Water reducer	AE agent
35-50	4.5±1.5	40.0	52.2	25	175	350	904	838	3,500	7

**Table 4: Cases considered for W/C = 0.4**

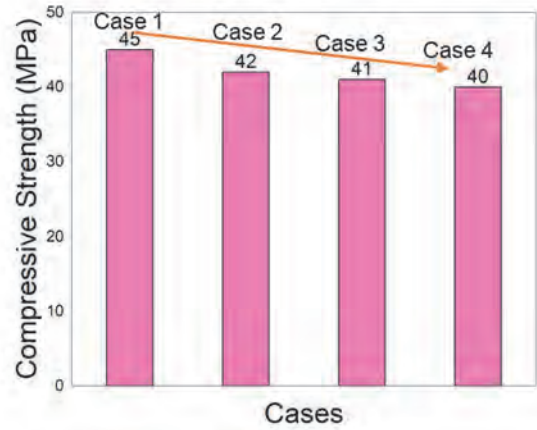
	Initial concrete Temperature (°C)	Curing temperature (°C)
Case 1	20	20
Case 2	20	30
Case 3	20	40
Case 4	20	50

50°C, respectively, for the Cases 1, 2, 3, and 4. The temperature of the concrete was measured as for W/C = 0.5. The curing method was likewise similar.

Figure 3 presents the results obtained from the experimental study. Figure 3 shows that curing temperature significantly affects early age compressive strength. In Case 1, the 2 MPa strength target was reached in all cases in roughly 12 hours. The time required to obtain the desired concrete strength was reduced by 33%, 42%, 58%, respectively, when curing temperatures were increased from 20°C to 30°C, 40°C, and 50°C; high curing temperatures tend to boost the rate of cement hydration. Nevertheless, it should be noted that high curing



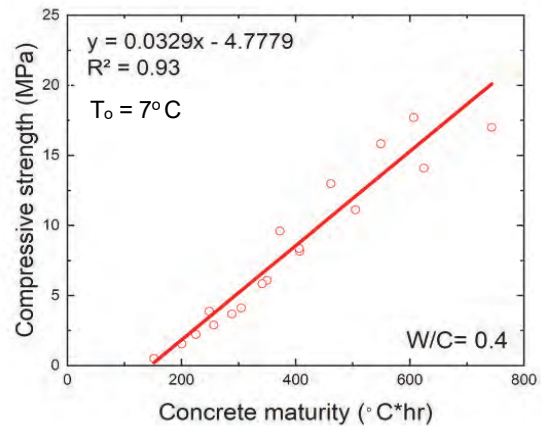
**Figure 3: Experimental results for (a) compressive strength gain over time and (b) hydration heat**



**Figure 4: Effect of curing temperature on compressive strength at 28 days**

temperature has negative impact on 28 days compressive strength of concrete as shown in Figure 4. High temperature concrete curing results in high concentrations of hydrates near the cement grains, leading to the formation of large pores.<sup>7)</sup> These larger pores may ultimately reduce compressive strength (Figure 4).

The hydration process begins at the moment cement and water mix. During the hydration process, the cement paste is heated by an exothermic hydration reaction. To obtain a temperature history, we measured the temperature of the concrete with time-temperature sensors placed in the middle of the concrete cylinders. Figure 3(b) shows that higher curing temperatures boost heat release from the specimens. Case 1 has the slowest heat release, with a peak temperature recorded



**Figure 5: Concrete maturity function for W/C = 0.4**

roughly 15 hours after casting. The heat release increases significantly as curing temperatures increase. Maximum temperatures were increased by 48%, 104%, and 148%, respectively, when curing temperatures increased from 20°C to 30°C, 40°C, and 50°C. The time required to reach the peak temperature fell dramatically with higher curing temperatures.

Figure 5 shows the concrete maturity function obtained from the experimental study. The datum temperature in this study was set to 7°C. Here, also, the linear function fits the data quite well. As shown in Figure 5, we can establish the following relationship between concrete maturity and compressive strength, where  $y$  represents the compressive strength of concrete and  $x$  denotes concrete maturity:

$$y = 0.0329x - 4.7779 \quad (3)$$

### 3. FEM modeling

Numerical analysis was performed in the LINK3D software package, which is capable of predicting the structural behavior of concrete under different weather conditions. This software has two modules: DuCOM and COM3. DuCOM is ideal for modeling the microscopic behavior of concrete, including the progress of cement hydration reactions, the formation of void structures in hardened bodies, and internal moisture states, as well as macroscopic views of reinforced concrete. COM3 is ideal for nonlinear structural analyses of RC structures. This system was developed to simulate the behavior of concrete structures, starting from cement hydration through maintenance and management. Figure 6 is a schematic diagram of LINK3D.

#### 3.1 Modeling hydration heat

We can calculate the hydration heat of each component of cement from the following equations presented by Maekawa et al. 7):

$$H_i = \gamma_i \beta_i \lambda_i \mu_i H_{iT_0} Q_i \exp \left\{ -\frac{E_i}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right\} \quad (4)$$

$$Q_i = \int H_i dt \quad (5)$$

In Equation 4,  $E_i$  represents the activation energy of component  $i$ ,  $R$  denotes the gas constant,  $H_{iT_0}$  is the reference heat generation rate of component  $i$  at constant temperature  $T_0$ ,  $\gamma_i$  represents the effects of chemical admixture in the hydration process,  $\beta_i$  is the coefficient for reduced heat generation due to the reduced availability of free water,  $\lambda_i$  represents the heat generation rate from the powder admixture, and  $\mu_i$  is the coefficient related to the heat generation rate. In Equation 4,

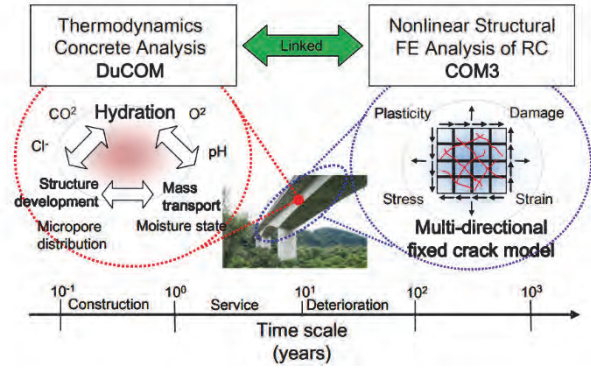


Figure 6: Overview of LINK 3D<sup>8)</sup>

$E_i/R$  represents thermal activity considered within the framework of the model developed by Suzuki et al. 9) (Figure 7).

#### 3.2 Modeling Compressive Strength

We can calculate the compressive strength of concrete from the following equation:

$$f_c = f_\infty \{1 - \exp(-\alpha D_{\text{hyd.out}}^\beta)\} \quad (6)$$

where  $f_\infty$  represents ultimate strength and  $\alpha$  and  $\beta$  are material constants. Here,  $D_{\text{hyd.out}}$  is the ratio of space occupied by the outer bulk hydrates to the initial capillary space. We can present this as follows:

$$D_{\text{hyd.out}} = \frac{V_{\text{hyd.out}}}{V_{\text{cap.ini}}} = \frac{V_{\text{hyd.total}} - V_{\text{hyd.in}}}{V_{\text{cap.ini}}} \quad (7)$$

Here,  $V_{\text{hyd.out}}$  is the volume of the hydration products that form outside the original cement particles,  $V_{\text{hyd.total}}$  is the total volume of the hydration products,  $V_{\text{hyd.in}}$  is the volume of hydration products that form inside the original cement particles (equivalent to the reacted volume fraction of the mineral compounds), and  $V_{\text{cap.ini}}$  is the volume of the initial capillary space. The initial capillary space can be expressed with the water to cement ratio of the concrete mix given as follows:

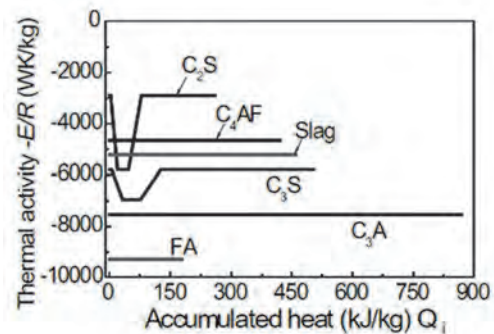


Figure 7: Thermal activity for the reaction of each compound<sup>7)</sup>



$$V_{cap.ini} = \frac{\frac{W}{C} \cdot \rho_c}{\frac{W}{C} \cdot \rho_c + 1} \quad (8)$$

#### 4. Numerical analysis to validate experimental results

Numerical analysis was performed using the LINK3D software package. Figure 8 shows the analysis model.

Figure 9 shows a clear and strong correlation between the results of the experimental study and FEM analysis. FEM analysis is capable of precisely predicting the strength gained by the concrete specimens. For  $W/C = 0.5$ , in Case 8, the compressive strength observed in 16 hours in the experimental study was about 6 MPa; in the FEM analysis, the compressive strength obtained was about 5 MPa. Other cases demonstrated equally solid agreement between experimental study and numerical analysis. The numerical studies tended to slightly underestimate the experimental data, but the data obtained numerically is well within safety margins for the purposes of actual construction.

For  $W/C = 0.4$ , in Case 1, in which the initial and curing temperatures are 20°C, the 21-hour compressive strength obtained in the experimental study is 8.15 MPa; in the numerical study, the 21-hour compressive strength obtained is about 7 MPa. In the experimental study, we obtained the desired compressive strength (2 MPa) at 12 hours. With FEM analysis, we obtained the required strength at 13 hours. In Case 2, the

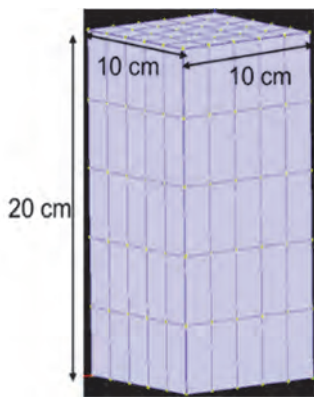


Figure 8: Analysis model in LINK 3D

difference between the values for 21-hour compressive strength is less than 18%. In Cases 3 and 4, the difference between the experimental and numerical analysis results is less than 6%. The results for required strength exhibit a strong correlation.

We also see strong agreement between the experimental and analysis results in the case of heat release (Figure 10). Numerical analysis is capable of accurately predicting the heat released by concrete specimens subjected to different curing

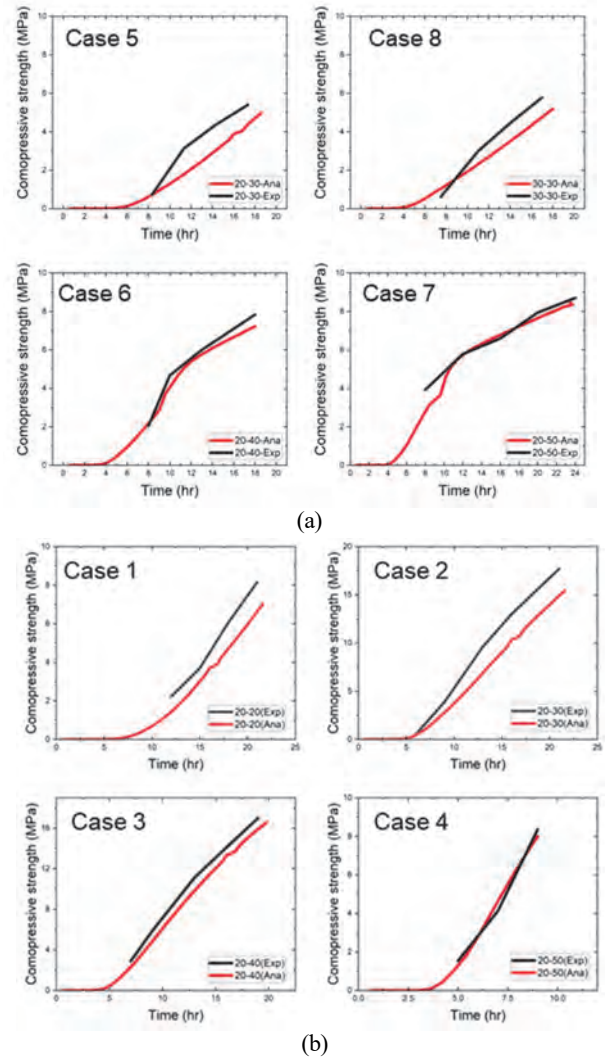


Figure 9: Comparison of experimental and numerical results for (a)  $W/C = 0.5$  and (b)  $W/C = 0.4$

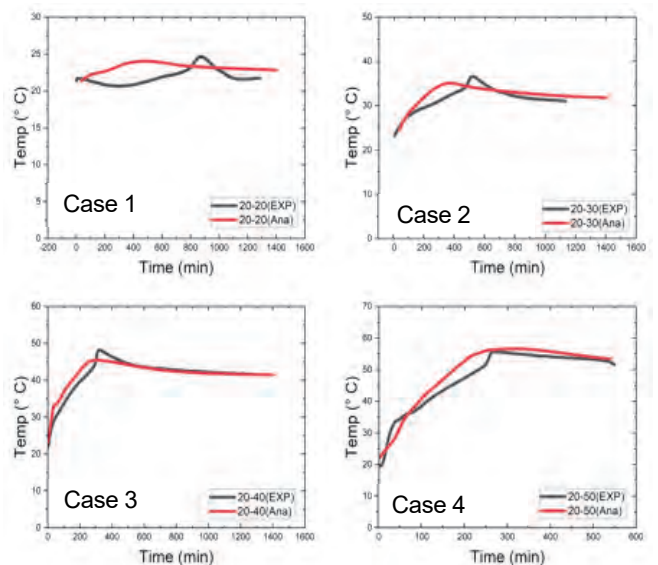
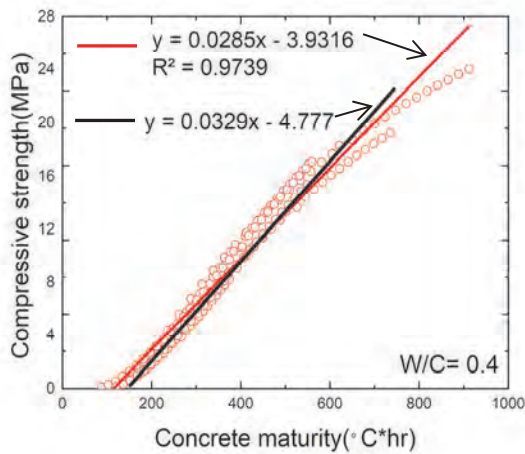


Figure 10: Comparison of heat release between experimental study and numerical analysis



**Figure 11: Comparison of relationship between compressive strength and concrete maturity with W/C = 0.4**

temperatures. The largest difference in heat release is less than 6%. In the experimental study, the duration of peak heat release shrinks as curing temperatures increase. As Figure 10 shows, the trends for numerical analysis are similar.

Figure 11 compares the relationship between the compressive strength given by Equation 3 and numerical analysis. As in the experimental study, the datum temperature for calculating concrete maturity is set to 7°C. The analysis shows a linear relationship between compressive strength and concrete maturity. Overall, the equation derived via numerical modeling agrees with the equation derived from the experimental studies.

## 5. Conclusions

The key conclusions obtained from the experimental and numerical analysis can be summarized as follows:

- ① Experimental and numerical analysis established a relationship between compressive strength and concrete maturity at an early age (less than one day).
- ② The results of both experimental studies and numerical analysis are in good agreement.
- ③ For W/C = 0.5, concrete gains a compressive strength of 2 MPa within 16 hours when subjected to a curing temperature of 20°C or greater and an initial temperature of 15°C or greater.
- ④ For W/C = 0.4, concrete can gain a compressive strength of 2 MPa within 12 hours when subjected to a curing temperature of 20°C or more and an initial temperature of 20°C or more.
- ⑤ Datum temperatures may change depending on the properties of the concrete mix. The maturity method can

be improved by evaluating datum temperatures.

In the future, we plan to undertake experimental and numerical studies for W/C = 0.6 and for blast furnace slag cement.

## 【References】

- 1) Japan Society of Civil Engineering: standard specifications for tunneling, p. 193, 2016 (in Japanese).
- 2) Nurse RW. Steam-curing of concrete. Mag Concr Res. Vol. 1, No. 2, 1949.
- 3) Saul AGA. Principles underlying the steam-curing of concrete at atmospheric pressure. Mag Concr Res. Vol. 2, No. 6, 1951.
- 4) Tekle, B. H., Al-Deen, S., Anwar-Us-Saadat, M., Willans, N., Zhang, Y., Lee, C. K.: Use of maturity method to estimate early age compressive strength of slab in cold weather. Structural Concrete, Vol. 23, No. 2, 2022.
- 5) Sun, B., Noguchi, T., Cai, G., & Chen, Q.: Predicting early the compressive strength of mortars at different curing temperatures and relative humidity by a modified maturity method. Struct Concr. Vol. 1, No. 13, 2020.
- 6) CSA A23.1/A23.2. Concrete Materials and Methods of Concrete Construction / Test Methods and Standard Practice for Concrete. 5060 Spectrum Way, Suite 100, Mississauga, Ontario, Canada: CSA Group; 2019.
- 7) Meakawa, K., Ishida T. and Kishi T.: Multi scale modeling of structural concrete, CRC Press, London, 2009.
- 8) Ohno, M., Chijiwa, N., Suryanto B. and Meakawa, K., H.: An Investigation into the Long-Term Excessive Deflection of PC Viaducts Using 3D Multi-scale Integrated Analysis. Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 10, 47-58, 2012 .
- 9) Suzuki, Y., Tsuji, Y., Meakawa, K. and Okumura, H.: Quantification of heat evolution during hydration process of cement in concrete. Proceedings of the JSCE, Vol. 414, 1990.

# 奥村・丸五式引抜き抵抗杭工法 (OMR/B-2) の開発

## — 実大引抜き載荷実験結果 —

### Development of the Okumura-Marugo Pull-Out Resistance Pile Method (OMR/B-2)

#### - Results of Full-scale Pull-out Loading Tests -

林 芳尚\* 武田彰文\*\* 小谷俊二\*\* 舟木秀尊\*\*\*

#### 要 旨

当社と丸五基礎工業株式会社が共同開発した「奥村・丸五バケット式拡底杭工法 (OMR/B)」を用いた実大杭の引抜き載荷実験を実施し、拡底部側面の傾斜による引抜き抵抗力の増加効果を確認した。

その結果をもとに、新たに「奥村・丸五式引抜き抵抗杭工法 (OMR/B-2)」として(一財)ベターリビングの評定を取得し、従来よりも大きな引抜き抵抗力を持つ杭の設計が可能となった。

キーワード：場所打ち杭、拡底部、引抜き抵抗、載荷実験、傾斜角

#### 1. まえがき

1985年に当社と丸五基礎工業株式会社が共同開発した「奥村・丸五バケット式拡底杭工法 (OMR/B)」は、拡底径の拡大や使用するコンクリートの強度を高めるなどの改良を継続的に行いながら、2022年度までに約3,000件(杭本数10万本以上)の実績を積み重ねてきた。また、2010年には業界で初めてアースドリル工法における拡底率(有効底面積÷軸部面積)の最大値4.9(直径比約2.2倍)を実現するなど、場所打ちコンクリート拡底杭工法として高い評価と信頼を得てきた。

しかし、拡底部に大きな引抜き抵抗力を有するものの、従来のOMR/B工法で引抜き方向の抵抗力として考慮できるのは、図-1に示す杭軸部の周面抵抗力および杭自重のみに限定されていたため、設計上必要な引抜き抵抗力を確保するためには、杭の軸径を大きくしたり、杭長を長くしたりする必要があった。そこで両社は、拡底部側面の傾斜による引抜き抵抗力の増加効果を実大の杭の引抜き載荷実験により確認し、新たに「奥村・丸五式引抜き抵抗杭工法 (OMR/B-2)」(以下、「本工法」として(一財)ベターリビングの評定を取得した。

本報では、本工法の概要および引抜き載荷実験の結果概要を報告する。

#### 2. 本工法の概要

##### 2.1 杭の仕様

本工法における杭の仕様を以下に示す。また、杭の各部名称を図-2に示す。

- ・杭径：軸部径 700~4,500mm、拡底径 900~4,700mm
- ・コンクリートの設計基準強度  $F_c$  : 24~80N/mm<sup>2</sup>  
JIS 適合品の構造体強度補正值 ( $_{28}S_{91}$ ) : 0N/mm<sup>2</sup> 以上とする (大臣認定コンクリートの場合は指定された値による)
- ・傾斜角  $\theta$  :  $6^\circ \leq \theta \leq 12^\circ$
- ・最大掘削深さ：90m
- ・支持層地盤：砂質地盤、粘土質地盤、互層地盤

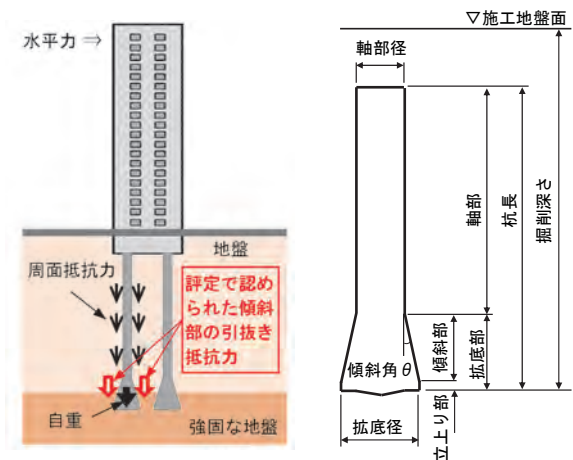


図-1 開発技術のイメージ

図-2 杭の各部名称

\* 建築本部 建築部    \*\* 西日本支社 建築設計部    \*\*\* 技術本部 技術研究所 建築研究グループ

## 2.2 本工法の特長

本工法の特長は、①これまで考慮されなかった拡底部側面の傾斜による引抜き抵抗力を評価できる点、②従来工法よりも杭の軸径部をスリム化したり、杭長を短縮することが可能となり、掘削土量や打設するコンクリート量、施工時に使用する安定液量などを削減できるため、コストや地球環境への負荷低減が期待できる点、③適用地盤に互層地盤を含むので強固な地盤に拡底部を全て埋め込まなくても引抜き抵抗力を評価できる点、である。

本工法による設計上の引抜き抵抗力（短期）の一例を図-3に示す。本例では、N値60の砂質土に拡底部を

全て定着した場合は OMR/B 工法より約 3 倍の引抜き抵抗力を、拡底部の 40%程度を定着した場合でも約 2 倍の引抜き抵抗力を有している。

## 3. 引抜き载荷実験の概要

### 3.1 実験要因

実験ケース一覧を表-1に、地盤と杭の関係を図-4に示す。本実験は、傾斜部の地盤種別（砂質地盤、粘土質地盤、互層地盤）および傾斜角（5.8°、12°）をパラメータに計6体の杭で実施した。

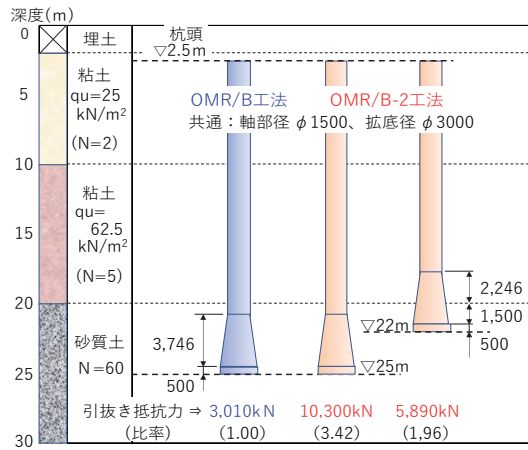


表-1 実験ケース一覧

杭 No.	定着地盤	傾斜部平均 N 値	傾斜部平均 $q_u^*$ (kN/m <sup>2</sup> )	軸径 (m)	拡底径 (m)	傾斜角 (°)	杭長 (m)	杭頭深度 (GL-m)	先端深度 (GL-m)
1	砂質	34	—	1.10	1.70	5.8	15.53	0.50	16.03
2	砂質	43	—	1.10	2.50	12	15.99	0.50	16.49
3	粘土質	—	268	1.10	1.70	5.8	17.60	17.60	35.20
4	粘土質	—	422	1.10	2.50	12	17.10	17.90	35.00
5	互層	27	136	1.10	1.70	5.8	22.80	0.55	23.35
6	互層	42	213	1.10	2.50	12	22.30	0.50	22.80

※  $q_u$  : 一軸圧縮強度

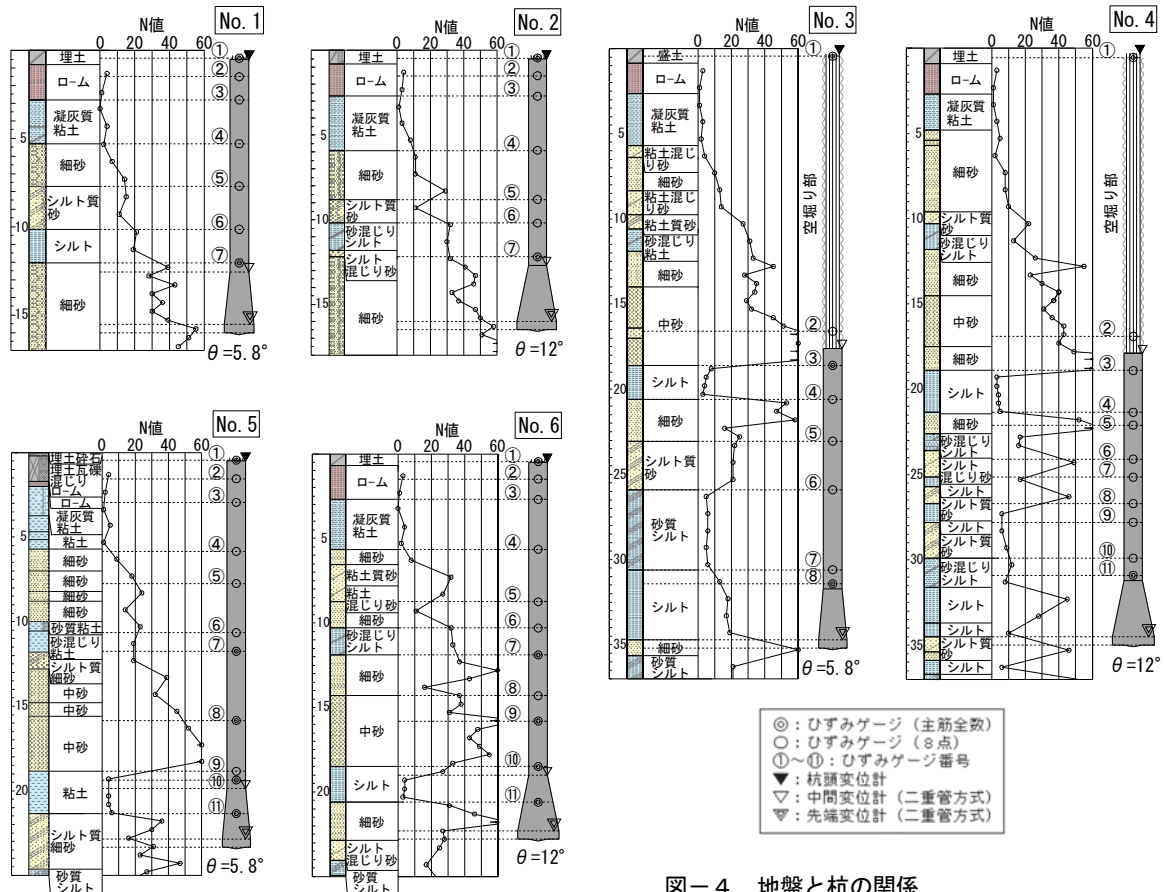


表-2 に鉄筋およびコンクリートの仕様を示す。主筋は全ネジ形状を有する PC 鋼棒 (D36) であり、載荷荷重に応じて 16~32 本を配置した。コンクリートの設計基準強度は 36N/mm<sup>2</sup> であり、実験当日の圧縮強度は 51~60N/mm<sup>2</sup> であった。

表-2 鉄筋およびコンクリートの仕様

杭 No.	鉄筋		コンクリート	
	主筋 (ネジボ ンC種1号)	フープ筋 (SD295)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度※ (N/mm <sup>2</sup> )
1	16-D36	D13@300	57.3	3.84
2	28-D36		59.8	3.94
3	20-D36		50.8	3.55
4	32-D36		57.7	3.85
5	24-D36		51.2	3.57
6	32-D36		54.6	3.72

※ 文献<sup>1)</sup>の方法により圧縮強度から算出

### 3.2 実験方法

本実験は、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説 第一回改訂版 (2002 年)」に基づき実施した。写真-1 に載荷装置の全景を示す。載荷装置は、油圧ジャッキにより杭に引抜き力を作用させ、鋼製桁を介して反力杭に抵抗させる機構である。

載荷方法は、一方向多サイクル方式であり、杭 No.1 を例として載荷サイクルを図-5 に示す。載荷は、杭周囲の引抜き抵抗力が極限状態となった時の最大荷重 (明確に荷重のピークが現れない場合は、杭先端変位が拮底径の 10% に達した時の荷重) で定義される第 2 限界抵抗力までを目標に行った。



写真-1 載荷装置の全景

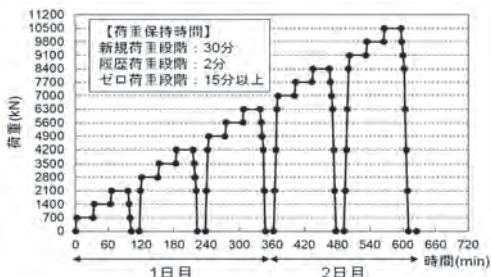


図-5 載荷サイクル (杭 No.1)

### 3.3 引抜き方向の軸力算定方法

各ゲージ位置の引抜き方向の軸力 (引抜き力)  $P$  は、文献<sup>1)~4)</sup>を参考に式(1)で算出した。

$$P = \sigma_t \cdot A_c + E_s \cdot A_s \cdot \varepsilon \quad (1)$$

ここに、

$\sigma_t$  : コンクリート引張応力度

$A_c$  : コンクリート断面積

$E_s$  : PC 鋼棒のヤング係数

$A_s$  : PC 鋼棒の断面積

$\varepsilon$  : ひずみ量

式中のコンクリートの引張応力度  $\sigma_t$  は、発生するひずみの大きさに応じて以下のように算出した。

$$\sigma_t = \frac{f_t}{\varepsilon_t} \cdot \varepsilon \quad (0 < \varepsilon < \varepsilon_t)$$

$$\sigma_t = f_t \quad (\varepsilon_t \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu})$$

$$\sigma_t = f_t \cdot \left( \frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon} \right)^c \quad (\varepsilon_{tu} < \varepsilon)$$

ここに、

$f_t$  : 割裂引張強度  $f_t = 0.291 \cdot \sigma_B^{0.637}$

$\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度 (試験当日の供試体の圧縮試験結果を用いる)

$\varepsilon_t$  : コンクリート引張ひずみ ( $\varepsilon_t = \varepsilon_{tu} / 2 = 100\mu$ )

$\varepsilon_{tu}$  : コンクリート引張ひずみ ( $\varepsilon_{tu} = 200\mu$ )

$c$  : 付着性状を表す係数  $c = 0.9$

また、ひずみゲージ位置間の軸力差 (ある位置のひずみゲージ値から算出した  $P$  からその下位置の  $P$  を引いた値で、杭最下端の  $P$  はゼロとする) をその位置間の周面抵抗力と定義する。なお、この軸力差は、杭周面に生じる抵抗力と杭自重分によるが、本報では自重分も含めた軸力差を便宜上その区間の周面抵抗力とする。

### 3.4 実験結果

#### a. 最大引抜き荷重

表-3 に各試験体の最大引抜き荷重を示す。地盤種類の違いに関係なく、拮底部の傾斜角の増加に伴い、最大引抜き荷重が大きくなることを確認した。なお、一例として図-6 に杭 No.1 および No.2 の杭頭荷重-杭頭変位関係を示す。

表-3 最大引抜き荷重

杭 No.	傾斜角 (°)	最大引抜き荷重(kN)	杭 No.	傾斜角 (°)	最大引抜き荷重(kN)
1	5.8	10,630	2	12	15,916
3		12,126	4		21,110
5		13,069	6		17,782

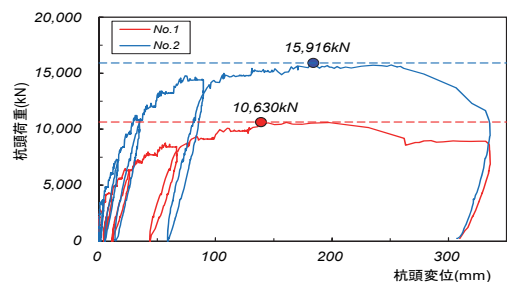


図-6 杭頭荷重-杭頭変位関係

b. 杭頭荷重－杭先端変位比関係

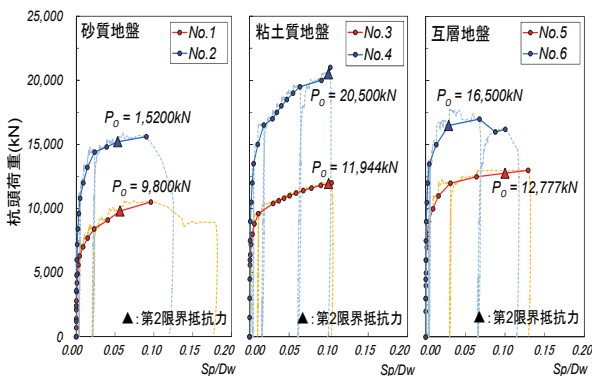
図－7 に杭頭荷重－杭先端変位比 ( $Sp/Dw : Sp$ ; 杭先端変位,  $Dw$ ; 拡底径) 関係を示す。

杭 No.1 および杭 No.2 は、荷重保持中に杭先端変位量が拡底径の 10% を超えて荷重を保持できなくなったため、30 分荷重を保持した前段階の杭頭荷重である 9,800kN および 15,200kN を第 2 限界抵抗力 (以下、第 2 限界抵抗力時の杭頭荷重:  $P_o$ ) とした。

杭 No.3 は、荷重保持中に杭先端変位量が拡底径の 10% を超えたが、そのまま 30 分荷重を保持したため、杭先端変位量が拡底径の 10% に達した時の杭頭荷重である 11,944kN を  $P_o$  とした。杭 No.4 は、荷重保持中に杭先端変位量が拡底径の 10% を超えて荷重を保持できなくなったため、30 分荷重を保持した前段階の杭頭荷重である 20,500kN を  $P_o$  とした。

杭 No.5 は、荷重保持中に杭先端変位量が拡底径の 10% を超えたが、そのまま 30 分荷重を保持したため、杭先端変位量が拡底径の 10% に達した時の杭頭荷重である 12,777kN を  $P_o$  とした。杭 No.6 は、荷重保持中に杭先端変位量が拡底径の 10% を超えて荷重を保持できなくなったため、30 分荷重を保持した前段階の杭頭荷重である 16,500kN を  $P_o$  とした。

図－7 によれば、全ての杭において杭頭荷重は  $Sp/Dw$  が小さい領域で急激に増加し、その後、杭先端変位比が 10% を超えるまで緩やかな増加傾向を示している。また、傾斜角が大きいくほど  $P_o$  が増加することを確認した。



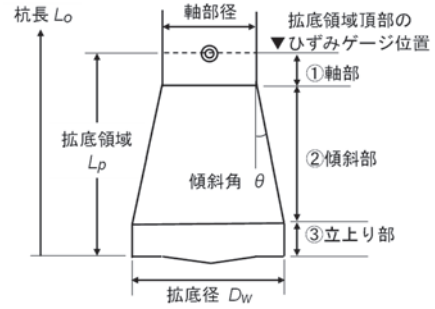
図－7 杭頭荷重－杭先端変位比関係

c. 杭頭荷重に対する拡底部直上軸力の割合

以後の載荷試験結果を整理するにあたり図－8 に示す①+②+③を拡底領域と定義する。

$P_o$  および図－8 に示す拡底領域頂部のひずみゲージの値を用いて式(1)から算出した軸力 (以下、拡底領域頂部軸力:  $P_p$ ) をまとめたものを表－4 に示す。また、表－4 に杭長 ( $L_o$ ) に対する拡底領域の長さ ( $L_p$ ) の割合を併記する。

$P_o$  に対する  $P_p$  の割合は、 $L_o$  に対する  $L_p$  に比べて約 2.2 ～ 3.0 倍の値となっており、拡底領域が軸部に比べて引



図－8 拡底領域

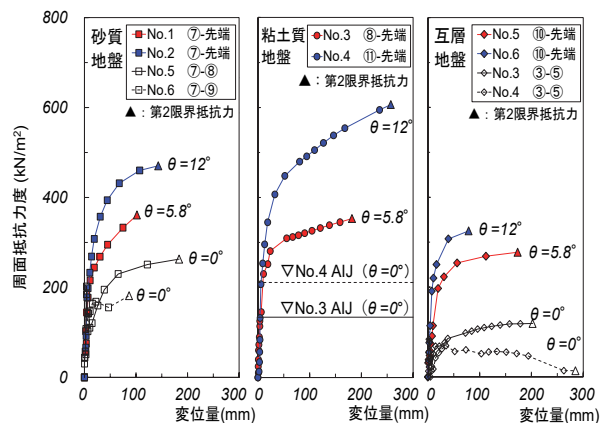
表－4 杭頭荷重および拡底領域頂部軸力

杭 No.	$P_o$ (kN)	$P_p$ (kN)	$P_p/P_o$ (%)	$L_p/L_o$ (%)
1	9,800	6,344	64.7	25.6
2	15,200	11,617	76.4	26.8
3	11,944	5,922	49.6	21.5
4	20,500	14,553	71.0	23.9
5	12,777	4,877	38.2	17.5
6	16,500	8,039	48.7	19.3

抜き抵抗力の負担割合が大きいことがわかる。さらに、 $P_o$  に対する  $P_p$  の割合は、砂質地盤で約 65%～76%、粘土質地盤で約 50%～71%、互層地盤で約 38%～49% である。すなわち、拡底領域で全体の約 1/3～2/3 程度の引抜き抵抗力を負担しており、傾斜角が大きいくほど、負担割合が大きいことがわかる。

d. 傾斜角の違いによる周面抵抗力度の比較

第 2 限界抵抗力時における傾斜角の違いによる拡底領域の周面抵抗力度 ( $P_p$  を拡底領域の側面積で除した値) と変位量の関係を図－9 に示す。なお、砂質地盤における  $0^\circ$  の周面抵抗力度は、図－4 に示す杭 No.1 および杭 No.2 の拡底領域と同深度における杭 No.5 および杭 No.6 の軸部の周面抵抗力度を、互層地盤における  $0^\circ$  の周面抵抗力度は、杭 No.5 および杭 No.6 の拡底領域と同深度における杭 No.3 および杭 No.4 の軸部の周面抵抗力度を用いた。一方、粘土質地盤では同深度に位置する直杭のデータがないため、建築基礎構造設計指針<sup>5)</sup>の式を用いて算出し図中に「No.3 AIJ」、「No.4 AIJ」として記載した。



図－9 傾斜角の違いによる周面抵抗力度の比較

図-9によれば、第2限界抵抗力時における拡底領域の周面抵抗力度は、地盤種別の違いに関係なく、傾斜角の増加に伴い大きくなることわかる。

例えば砂質地盤では、傾斜角 5.8° は 361kN/m<sup>2</sup>、傾斜角 12.0° は 470kN/m<sup>2</sup> で、対応する直杭の周面抵抗力度 (182kN/m<sup>2</sup>、273kN/m<sup>2</sup>) の平均値 228kN/m<sup>2</sup> と比較すれば、傾斜角 5.8° は約 1.6 倍、傾斜角 12.0° は約 2.1 倍の値を示している。また、傾斜角 12.0° は傾斜角 5.8° と比較して約 1.3 倍の値を示している。

粘土質地盤および互層地盤においても同様の傾向が見られた。

e. 傾斜部の支持力係数

(a) 傾斜部周面抵抗力度

傾斜部の引抜き方向の周面抵抗力は、 $P_p$  から、①軸部および③立上り部の周面抵抗力を差し引いて求め、それを傾斜部の側面積で除して傾斜部周面抵抗力度を求めた(後述の「支持力係数」とともに表-5に示す)。

図-10 および図-11 に傾斜部周面抵抗力度と傾斜部区間の平均 N 値 (以下、 $\bar{N}_s$ ) および平均一軸圧縮強度 (以下、 $\bar{q}_u$ ) の関係を示す。同図には、比較のため同種の実験結果が掲載されている文献<sup>6)~12)</sup>の値を併記する。

砂質地盤では、傾斜角に関係なく $\bar{N}_s$ が増加すると傾斜部周面抵抗力度が大きくなる傾向がみられる。また粘土質地盤では、傾斜角 12°では一部ばらつきがみられるものの、 $\bar{q}_u$ 値が増加すると同様に傾斜部周面抵抗力度が大きくなり、傾斜角が 12°未満では比較的緩やかに増加する傾向がみられる。ただし、直杭ではその傾向はみられない。

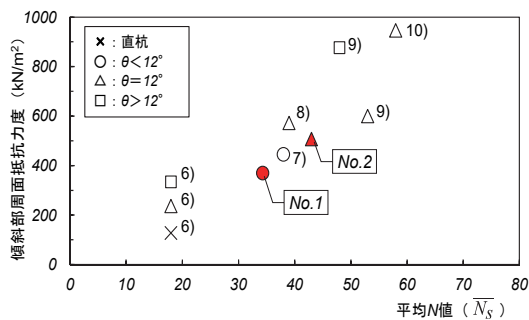


図-10 傾斜部周面抵抗力度—平均 N 値の関係

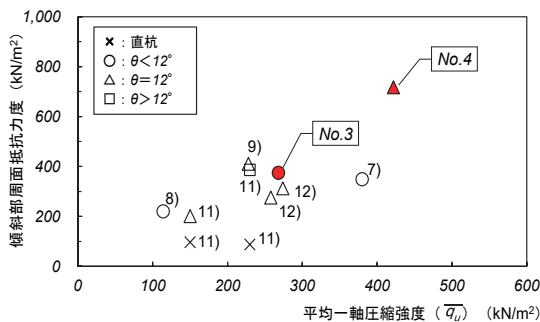


図-11 傾斜部周面抵抗力度—平均一軸圧縮強度の関係

(b) 支持力係数

傾斜部の支持力係数 (砂質地盤:  $\lambda$ 、粘土質地盤:  $\mu$ ) は、前述した傾斜部周面抵抗力度を傾斜部区間の $\bar{N}_s$ および $\bar{q}_u$ で除して求める。表-5に支持力係数を図-12および図-13に傾斜角と支持力係数の関係を示す。

ここで、文献<sup>13)</sup>では $\lambda$ および $\mu$ に関する評価式として式(2)および式(3)を提案している。同図に式(2)、式(3)および文献<sup>6)~12)</sup>の実験結果を併記する。ただし、比較のため文献<sup>13)</sup>に示される評価式中の低減係数 $\zeta$ を 1.0 としている。

$$\lambda = 4/9 \cdot \theta + 8/3 \quad (3^\circ \leq \theta \leq 12^\circ) \quad (2)$$

$$\mu = 1/120 \cdot \theta + 2/5 \quad (3^\circ \leq \theta \leq 12^\circ) \quad (3)$$

砂質地盤で傾斜角 12° の杭 No.2 の支持力係数 $\lambda$ は、傾斜角 5.8° の杭 No.1 の値の 1.1 倍程度、粘土質地盤で傾斜角 12° の杭 No.4 の支持力係数 $\mu$ は、傾斜角 5.8° の杭 No.3 の値の 1.2 倍程度となり、定着地盤の種別にかかわらず傾斜角が大きくなると支持力係数は増加することが認められる。また、砂質地盤の杭 No.1 および杭 No.2、粘土質地盤の杭 No.3 および杭 No.4 において、式(2)および式(3)により求めた値を十分に上回ることが確認できる。

表-5 傾斜部の周面抵抗力度および支持力係数

杭 No.	定着地盤	傾斜角 $\theta$ (°)	傾斜部周面抵抗力度 (kN/m <sup>2</sup> )	$\bar{N}_s$	$\bar{q}_u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\lambda$	$\mu$
1	砂質	5.8	369	34	—	10.8	—
2	砂質	12	507	43	—	11.8	—
3	粘土質	5.8	384	—	268	—	1.43
4	粘土質	12	713	—	422	—	1.69

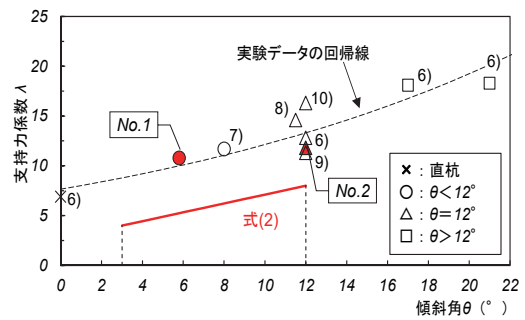


図-12 砂質地盤：傾斜角—支持力係数 $\lambda$ の関係

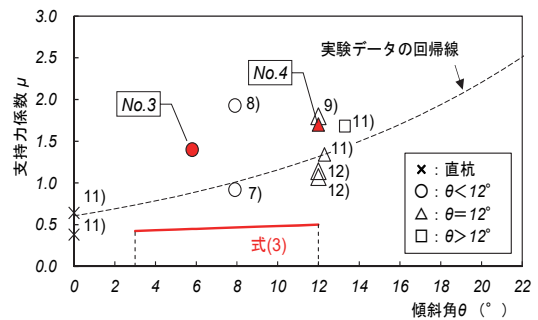


図-13 粘土質地盤：傾斜角—支持力係数 $\mu$ の関係

f. 変断面位置の軸力評価

先に示した式(1)による軸力の算出方法は、直杭の実験結果から導かれたものである。本実験では、杭 No.5 および No.6 の拡底部内にひずみゲージを設置して、変断面位置における式(1)の適用性を確認した。

図-14 に各载荷サイクルにおける深度方向のひずみおよび軸力分布を示す。どちらの杭においても深くなるほどひずみは小さくなった。一方、第2限界抵抗力付近における軸力分布を見ると、変断面位置である11断面の軸力は直上位置の10断面の軸力より大きい値となった(図中○部)。本試験は引抜き方向の载荷試験であり、拡底領域において深さ方向の軸力が逆転することは考えにくい。すなわち、変断面位置においては、ひずみから軸力を算定する時に軸部で用いた式(1)を適用するのは難しく、別途検討する必要があると考えられる。

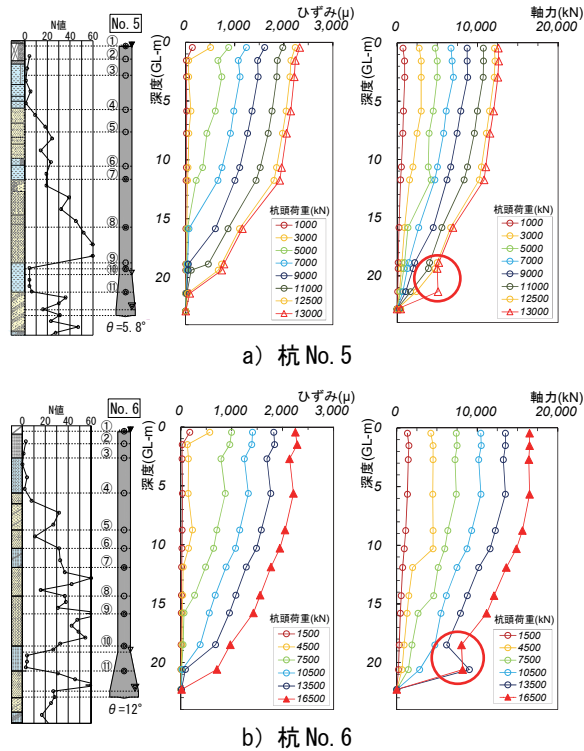


図-14 深度方向のひずみおよび軸力分布

4. まとめ

実大の場所打ち拡底杭を用いて引抜き载荷実験を行い、拡底部の引抜き抵抗性能を確認した。主な結論を以下に示す。

- i. 地盤種別の違いに関係なく、傾斜角の増加に伴い最大引抜き荷重、第2限界抵抗力、拡底領域の周面抵抗力度が大きくなる
- ii. 実験結果から算出した支持力係数(砂質地盤： $\lambda$ 、粘土質地盤： $\mu$ )は、文献<sup>13)</sup>で提案される評価式を上まわる

- iii. 変断面位置では、ひずみから軸力を算定する方法として軸部と同一方法を適用するのは難しく、別途検討する必要がある

【参考文献】

- 1) 日本建築学会、「高強度コンクリートの技術の現状」、2009
- 2) 出雲淳一、島 弘、岡村 甫、「面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル」、コンクリート工学、Vol.25、No.9、pp.107-120、1987
- 3) 福浦尚之、「4方向にひび割れを有する鉄筋コンクリート要素の履歴依存型構成モデル」、1998、博士論文
- 4) 中西義隆、渡邊 徹、堀井良浩、濱健太郎、村松晃次、藤田峻也、「砂質地盤に拡大部を設けた場所打ちコンクリート杭の引抜き抵抗に関する研究(その1 実験概要)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20214、pp.427-428、2020.9
- 5) 日本建築学会、「建築基礎構造設計指針」、2019
- 6) 渡邊 徹、中西義隆、堀井良浩、濱健太郎、村松晃次、藤田峻也、「砂質地盤に拡大部を設けた場所打ちコンクリート杭の引抜き抵抗に関する研究(その2 実験結果)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20215、pp.429-430、2020
- 7) 二川和久、内田和久、「場所打ち拡底杭の引抜き载荷試験、および引抜き力-引抜き量関係に関する考察(その1 引抜き载荷試験)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20248、pp.495-496、2021
- 8) 太田雄介、沼本大輝、中岡章郎、「杭軸部中間に拡底部を有する杭の鉛直载荷試験」、長谷工技報 No.35、pp.1-6、2018
- 9) 佐野大作、森 利弘、矢島淳二、大久保健治、飯田努、「先端および中間部に拡径部を有する杭の支持力特性(その2 拡径間隔および拡径比の影響を考慮した支持力評価)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20209、pp.417-418、2014
- 10) 平井芳雄、青木雅路、丸岡正夫、「場所打ち拡底杭の引抜き抵抗について」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20278、pp.555-556、2004
- 11) 中西義隆、小座間琢也、渡邊 徹、堀井良浩、濱健太郎、「粘土質地盤に拡大部を設けた場所打ちコンクリート杭の引抜き抵抗に関する研究(その2 実験結果)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20251、pp.501-502、2021
- 12) 平井芳雄、若井修一、青木雅路、「拡径部を有する場所打ちコンクリート杭の原位置引抜き試験」、基礎工、Vol.39、No.11 (460)、pp.60-63、2011.11
- 13) 新井淳マウリシオ、中西義隆、久保 豊、「場所打ち拡底杭の引抜き耐力の評価」、基礎工 Vol.43、No.8 (505) pp.68-72、2015.8



# 扁平梁工法の構造性能に関する実験的研究

## －その2 ねじり耐力の評価－

### Experimental Study on Structural Performance of RC Flat Beam System

#### -Part 2 : Evaluating Torsional Strength -

秋竹壮哉\* 岸本 剛\* 山際 創\*\* 浜口慶生\*\*\*

#### 要 旨

集合住宅等において、通常の梁よりも梁せいを小さくする代わりに、梁幅を柱幅よりも大きくした扁平梁を採用することで、プランの自由度が高まり、有効天井高や窓開口を大きく確保できる、などのメリットが生まれる。既報<sup>1</sup>において、梁幅を柱幅の2~3倍とした扁平梁と柱から構成される部分架構実験シリーズ1、2を行って、既往式を準用した設計式が、柱幅外の梁主筋の影響を考慮した扁平梁曲げ耐力および扁平梁と柱の接合部せん断耐力を安全側に評価できることを確認した。今回、設計式の合理化や、適用範囲の拡大を目的として部分架構実験シリーズ3を行った。その結果、ねじれの設計式において、直交梁が存在する場合は、直交梁と跳出し部のねじり耐力を累加しても安全側に評価できることを確認した。また、追加で実施した試験体においても、扁平梁柱接合部のせん断耐力を既報の提案式で安全側に評価できることを確認した。

キーワード：扁平梁、柱梁接合部、ねじり耐力、曲げ耐力、せん断耐力

#### 1. まえがき

集合住宅において住戸内や外周梁の梁せいを極力小さくすることは、商品力向上に大きく寄与する。過去の研究において、スラブが梁を介さずに直接柱と一体化されたフラットプレート構造に関する実験を行い、「奥村式フラットプレート工法」を確立し、実建物へ適用した<sup>2)</sup>~<sup>4)</sup>。ただし、架構の耐力や剛性が小さいことから、中低層の集合住宅などに採用が限定されていた。

そこで、よりプランの自由度が高められ、有効天井高や窓開口を大きく確保でき、高層・超高層の集合住宅においても採用できる工法として、通常の梁よりも梁せいを500mm程度と小さくする代わりに、梁幅を柱幅よりも大きくした「扁平梁工法」に着目し、その構造性能を明らかにするために構造実験を実施した<sup>1)</sup>。その結果、柱幅外に配置される梁主筋が負担する応力は柱幅内よりも低く、梁主筋応力は梁幅内で一様ではないこと、その場合でも扁平梁の扁平率（梁幅/柱幅）が2程度であればRC基準による曲げ耐力式で評価できること、さらに、従来の指針などでは想定していない梁幅が柱幅を超える場合における接合部せん断耐力についても提案する設計式により、安全に評価できることを確認した。

一方、扁平梁において柱幅より跳出した部分のねじり破壊時の耐力評価方法や、それに与える直交梁の影響、

さらに、扁平梁せいが500mmよりも大きい場合の構造性能や設計式の適用性等については研究事例も少ない。そこで、これらの構造性能を明らかにし、扁平梁工法の適用範囲を確認するために構造実験を行った。本報では、その実験概要と結果の考察を示す。

#### 2. 実験概要

##### 2.1 試験体形状

表-1に試験体一覧を、図-1に代表的な試験体の詳細図を、表-2に材料試験結果を示す。試験体は、接合部せん断耐力を確認するために接合部せん断破壊が先行するように計画した試験体（以下、せん断試験体）2体、既報の実験（シリーズ1、2）にはなかった跳出し部のねじり破壊が先行するように計画した試験体（以下、ねじり試験体）4体の計6体である。

シリーズ3の試験体6体は、扁平梁の扁平率を2.0とし、扁平梁せい250mmの場合について、跳出し部ねじり破壊型を想定した十字形試験体HN-7、直交梁を設けた場合の跳出し部ねじり破壊型を想定した十字・ト字形試験体HN-8・HG-5、扁平梁せい400mmの場合について、跳出し部ねじり破壊型を想定した十字形試験体HN-9、接合部せん断破壊型を想定した十字形試験体HN-10、梁芯が柱芯から偏心した場合の接合部せん断破

\*技術本部技術研究所建築研究グループ \*\*東日本支社建築設計部 \*\*\*西日本支社建築設計部

壊型を想定した十字形試験体 HN-11 で構成される。

試験体は、柱と扁平梁からなる部分架構を取り出し、実建物での適用範囲を考慮し、Fc24、36、柱断面 1000

×1000mm、梁せい 500、800mm、階高 3000mm、梁スパン 7000~9000mm 程度を対象としており、加力装置の制約上、試験体の縮尺は 1/2 とした。

表-1 試験体一覧 (シリーズ3)

試験体	架構形状	Fc (N/mm <sup>2</sup> )	扁平梁		想定破壊形式	柱		扁平梁		直交梁		ねじり補強筋							
			B <sub>g</sub> × D <sub>g</sub>	B <sub>gr</sub> × D <sub>gr</sub>		主筋	帯筋	主筋	あばら筋	主筋	あばら筋	配筋	p <sub>wh</sub> (%)						
			(mm)	(mm)		配筋	配筋	配筋	P <sub>t</sub> (%)	配筋	配筋								
HN-7	十字形	36	1000 × 250	—	跳出部 ねじり	14-D16 (SD345)	3-D10@75 (SD295A)	11-D19 (SD490)	1.64	7-D6@100 (SD295A)	4-D13 (SD345)	—	—	D13@60, 7本 (SD345)	1.03				
HN-8						24-D19 (SD345)	—	11+4-D19 (SD490)				—	2-S6@55 (KSS785)	D13@350, 2本 (SD345)					
HG-5						24-D19 (SD390)	4-S10@60 (KSS785)	12+3-D19 (SD490)				10-D6@100 (SD295A)	2-D6@55 (SD295A)	D13@60, 3本 (SD345)					
HN-9	十字形	24	1000 × 400	—	接合部 せん断	24-D19 (SD345)	—	9+2-D19 (SD490)	1.51	7-D6@75 (SD295A)	—	—	—	D13@60, 7本 (SD345)	0.54				
HN-10						24-D19 (SD345)	—	—								—	—	—	0.53
HN-11						625 × 400 片寄せ配置	—	—								—	—	—	0.53

(注) 1) 扁平率は共通で2.0

2) 柱断面は共通でBc × Dc = 500 × 500

3) p<sub>t</sub> = a<sub>t</sub> / (B<sub>g</sub> × d), a<sub>t</sub>: 扁平梁引張主筋断面積, B<sub>g</sub>: 扁平梁幅, d: 梁有効せい

4) p<sub>wh</sub> = a<sub>wh</sub> / (D<sub>g</sub> × (D<sub>c</sub> + d)), a<sub>wh</sub>: ねじり補強筋総断面積, D<sub>g</sub>: 扁平梁せい, D<sub>c</sub>: 柱せい

5) 柱梁接合部帯筋は、3-D10 × 2段または3段(SD295A)

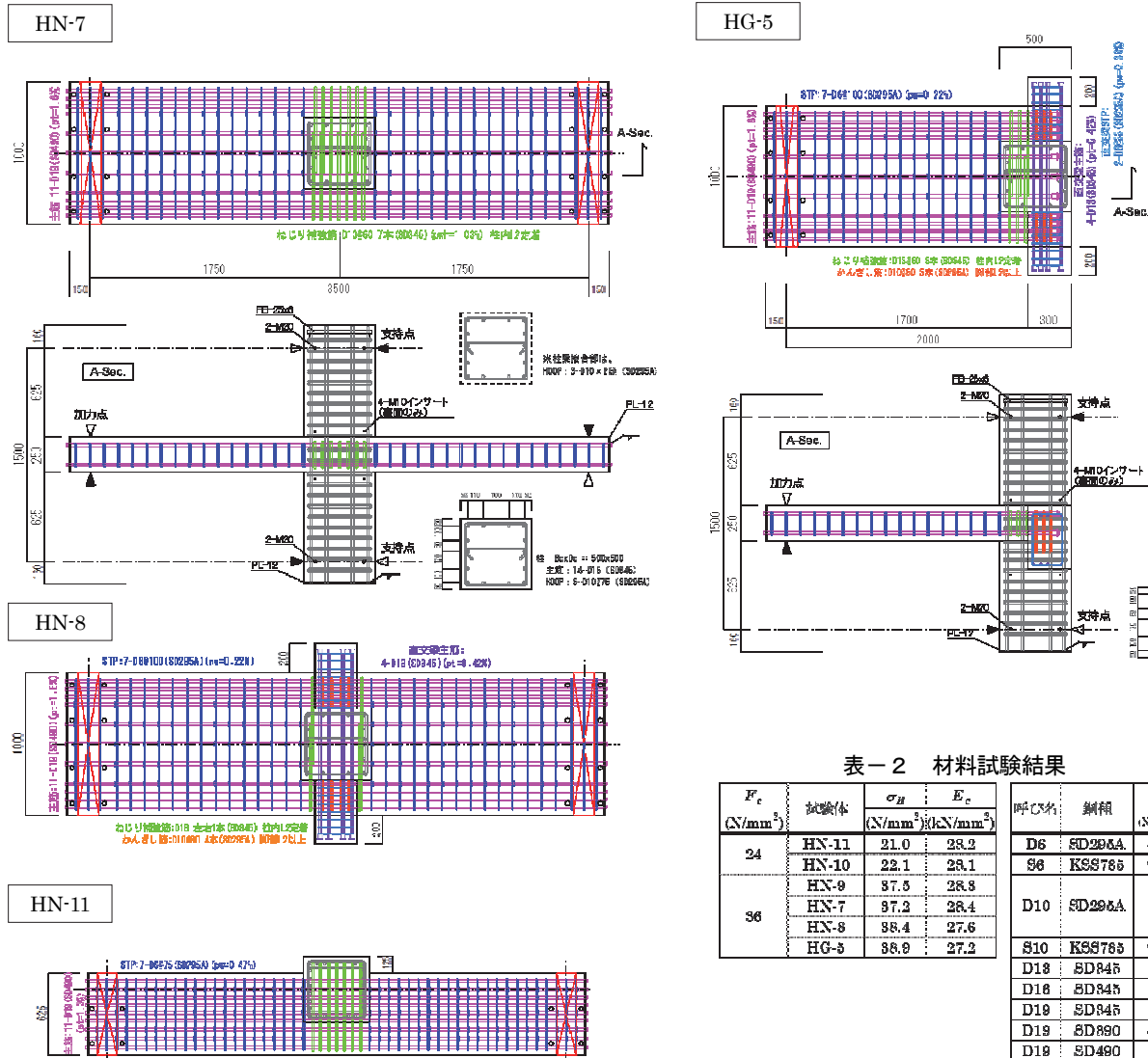


図-1 試験体詳細図

表-2 材料試験結果

Fc (N/mm <sup>2</sup> )	試験体	σ <sub>H</sub>	E <sub>c</sub>	呼び名	鋼種	σ <sub>yk</sub> (N/mm <sup>2</sup> )
		(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )			
24	HN-11	21.0	28.2	D6	SD295A	461
	HN-10	22.1	28.1	S6	KSS785	965
	HN-9	37.5	28.8	D10	SD295A	979
36	HN-7	97.2	28.4	S10	KSS785	914
	HN-8	88.4	27.6	D18	SD345	866
	HG-5	88.9	27.2	D18	SD345	879
				D19	SD345	870
				D19	SD490	488
				D19	SD490	542

## 2.2 加力方法

加力装置を図-2に示す。柱に一定軸力  $N$  (軸力比  $\eta=N/(\sigma_B \times B_c \times D_c) = 0.1$ 、ただし、 $\sigma_B$  はコンクリート実圧縮強度、 $B_c$  は柱幅、 $D_c$  は柱せい) を与えた状態で、十字形架構は扁平梁両端部の加力点変位を逆対称に、ト形架構は扁平梁片端部の加力点変位のみ制御して上下方向に加力を行った。扁平梁を片寄せ配置した試験体は、パンタグラフにより加力点の扁平梁の傾きを拘束した。また、十字形架構端部では試験体にかかる治具の重量を、ト形架構では治具に加えて試験体自重(扁平梁部自重の1/2相当)をカウンターウェイトでキャンセルした。

載荷履歴は、層間変形角  $R = \pm (2.5, 5.0, 10, 15, 20, 30, 40) / 1000 \text{ rad}$  の7水準を2サイクルずつ繰り返し、その後、 $R = +100/1000 \text{ rad}$  まで一方向単調載荷を行った。

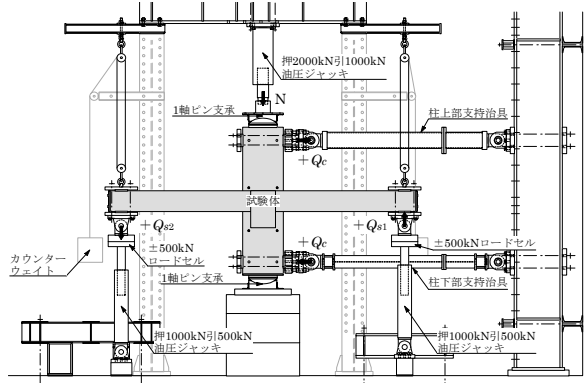


図-2 加力装置

## 3. 実験結果および検討

### 3.1 荷重-変形関係および破壊状況

図-3に各試験体の荷重と層間変形角の関係を、写真-1に試験体の典型的なひび割れの状況を示す。

各試験体の共通のひび割れ発生状況として、 $R=0.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$  から  $0.4 \times 10^{-3} \text{ rad}$  時において梁側面または梁上面に梁初期曲げひび割れが発生し始め、 $R=0.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$  から  $1.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$  時には梁上面全幅にわたって曲げひび割れ(BFC)が発生した。 $R=1.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$  から  $2.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$  時には、柱梁接合部領域の柱幅外の梁跳出し部(以下、跳出し部と称す)上面にねじれによる斜めひび割れ(JPC)が発生し、梁せい250mmの試験体では  $R=4.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$  から  $7.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$  時に、梁せい400mmの試験体では  $R=1.9 \times 10^{-3} \text{ rad}$  から  $2.8 \times 10^{-3} \text{ rad}$  時に跳出し部側面にせん断ひび割れ(JSC)が発生した。なお、ト字形試験体(HG-5)では  $R=10.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$  時に跳出し部背面にねじれによる鉛直ひび割れ(JBC)が発生した。また、 $R=15 \times 10^{-3} \text{ rad}$  から  $30 \times 10^{-3} \text{ rad}$  時には、柱幅内の梁端部コンクリートの圧壊(BCF)が発生し、十字形試験体では  $R=10.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$  から  $20.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$  時に柱角からの鉛直ずれひび割れ(BVC)が発生し始めた。

【主な発生現象】	
[扁平梁]	[柱梁接合部(柱幅外の梁跳出し部)]
BFC : 梁全幅にわたる曲げひび割れ	JPC : 跳出し部上面の斜めひび割れ
BVC : 柱角からの鉛直ずれひび割れ	JBC : 跳出し部背面の鉛直ひび割れ
BCF : 材端部コンクリートの圧壊	JSC : 跳出し部側面のせん断ひび割れ
BTY : 梁主筋の引張降伏	KTY : ねじり補強筋の引張降伏
STY : 梁あばら筋の引張降伏	JTY : 接合部帯筋の引張降伏
	OTY : 直交梁主筋の引張降伏
	HTY : かんざし筋の引張降伏

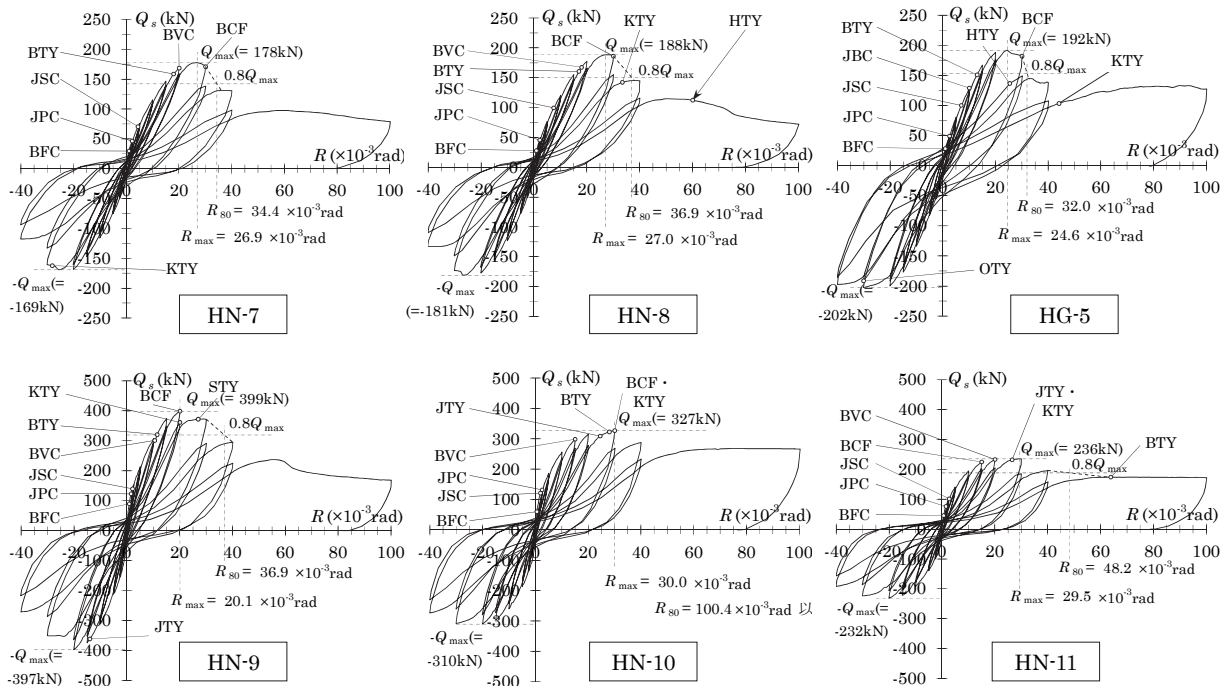


図-3 荷重と層間変形角の関係

跳出し部ねじり破壊型で梁せいが 250mm の十字型試験体 HN-7、HN-8 では、 $R=+17.0, 18.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に柱幅内で梁主筋の引張降伏 (BTY) が生じ、柱幅内梁主筋は塑性ひずみが増加したが、跳出し部に定着されている柱幅外梁主筋では一部が降伏する程度に留まり、HN-7 では  $R=+26.9 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に最大耐力 (178kN) に、HN-8 では  $R=+27.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に最大耐力 (188kN) に至った。その後、 $R=+28.1, 33.5 \times 10^{-3} \text{rad}$  時にねじり補強筋の降伏 (KTY) が生じ、柱角からの鉛直ずれひび割れ、曲げ圧縮側梁主筋方向への伸展を伴う跳出し部側面せん断ひび割れが拡大し、耐力が最大耐力の 80% まで低下した変形角を限界層間変形角  $R_{80}$  とし、HN-7 では  $+34.4 \times 10^{-3} \text{rad}$ 、HN-8 では  $+36.9 \times 10^{-3} \text{rad}$  であった。なお、両試験体ともに梁あばら筋と柱梁接合部帯筋の降伏は最終変形時まで生じず、HN-8 では、 $R=+60.1 \times 10^{-3} \text{rad}$  時にかんざし筋の降伏 (HTY) が生じたが、直交梁主筋と直交梁あばら筋の降伏は生じなかった。これら梁主筋、ねじり補強筋の降伏状況から、跳出し部のねじり破壊によって最大耐力に至ったものと考えられる。

跳出し部ねじり破壊型のト型試験体 HG-5 では、 $R=+13.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に柱幅内で梁主筋の引張降伏 (BTY) が生じ、柱幅内梁主筋は塑性ひずみが増加し、跳出し部に定着されている柱幅外梁主筋は一部が降伏した。その後に、定着部近傍における跳出し部上面の斜めひび割れが拡大するとともに引張ひずみが低下して、 $R=+24.6 \times 10^{-3} \text{rad}$  時には最大耐力 (192kN) に至った。また、 $R=+25.4 \times 10^{-3} \text{rad}$  時にはかんざし筋の降伏 (HTY) が生じ、梁主筋定着部近傍に発生した跳出し部上面の斜めひび割れが鉛直ずれを伴って拡大して、限界層間変形角  $R_{80}$  は  $+32.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  であった。なお、 $R=30.1 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に直交梁主筋の降伏 (OTY) が、 $R=+44.1 \times 10^{-3} \text{rad}$  時にねじり補強筋の降伏 (KTY) が生じ、梁あばら筋、直交梁あばら筋、柱梁接合部帯筋の降伏は最終変形時まで生じなかった。これら梁主筋、かんざし筋の降伏状況とひび割れ幅の拡大状況から、跳出し部梁主筋機械式定着部の上面押し出し定着破壊によって最大耐力に至ったものと考えられる。

跳出し部ねじり破壊型で梁せいが 400mm の十字型試験体 HN-9 は、 $R=+13.0 \times 10^{-3}$ 、 $-14.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に柱幅内で梁主筋の引張降伏 (BTY) と柱梁接合部帯筋の降伏

(JTY) が順次生じたが、柱幅内梁主筋および跳出し部に定着された柱幅外梁主筋の一部が降伏する程度に留まり、 $R=+20.1 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に最大耐力 (399kN) に至った。その後、 $R=+20.1 \times 10^{-3} \text{rad}$  時にねじり補強筋の降伏 (KTY) が生じ、柱角からの鉛直ずれひび割れ、曲げ圧縮側梁主筋方向への伸展を伴う跳出し部側面せん断ひび割れが拡大し、限界層間変形角  $R_{80}$  は  $+36.9 \times 10^{-3} \text{rad}$  となった。なお、 $R=+27.1 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に梁あばら筋の降伏 (STY) が生じた。これら梁主筋、ねじり補強筋、柱梁接合部帯筋の降伏状況から、跳出し部ねじりおよび接合部せん断による複合破壊によって最大耐力に至ったものと考えられる。

接合部せん断破壊型で梁せいが 400mm の十字型試験体 HN-10 では、 $R=+24.5 \sim 30.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に柱梁接合部帯筋の降伏 (JTY)、柱幅外の一部の梁主筋の引張降伏 (BTY)、ねじり補強筋の降伏 (KTY) が順次生じ、跳出し部側面せん断ひび割れが拡大していき、 $R=+30.0 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に最大耐力 (327kN) に至った。その後、柱角からの鉛直ずれひび割れ、曲げ圧縮側梁主筋方向への伸展を伴う跳出し部側面せん断ひび割れが拡大し、耐力がやや低下したが、限界層間変形角  $R_{80}$  は最終変形時の  $+100.4 \times 10^{-3} \text{rad}$  以上であった。なお、梁あばら筋の降伏は最終変形時まで生じなかった。これら梁主筋、柱梁接合部帯筋の降伏状況とひび割れ幅の拡大状況から、接合部せん断破壊によって最大耐力に至ったものと考えられる。

接合部せん断破壊型で梁せいが 400mm の十字型梁片寄せの試験体 HN-11 では、 $R=+26.6 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に柱梁接合部帯筋の降伏 (JTY) とねじり補強筋の降伏 (KTY) が生じて、跳出し部側面せん断ひび割れが拡大していき、 $R=+29.5 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に最大耐力 (236kN) に至った。その後、柱幅内梁端部コンクリートの圧壊範囲、柱角からの鉛直ずれひび割れ、曲げ圧縮側梁主筋方向への伸展を伴う跳出し部側面せん断ひび割れが拡大し、限界層間変形角  $R_{80}$  は  $+48.2 \times 10^{-3} \text{rad}$  であった。なお、 $R=+63.9 \times 10^{-3} \text{rad}$  時に柱幅内の一部で梁主筋の降伏 (BTY) が生じたが、梁あばら筋の降伏は最終変形時まで生じなかった。これら梁主筋、柱梁接合部帯筋の降伏状況とひび割れ幅の拡大状況から、接合部せん断破壊によって最大耐力に至ったものと考えられる。

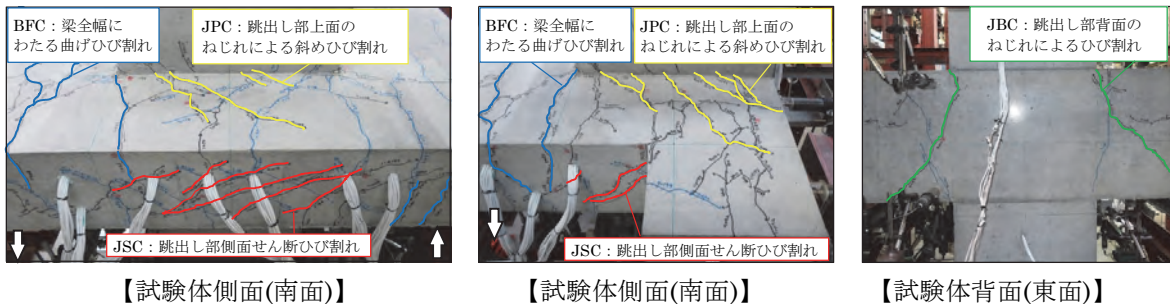


写真-1 典型的なひび割れの状況

### 3.2 ねじり耐力の評価

直交梁がないねじり破壊試験体の、跳出し部ねじりモーメントの実験値と耐力計算値の比較を表-3に示す。

直交梁なしの場合、ねじり補強筋が図-4の赤色矢印に示す方向でねじり強度に寄与することとする。コンクリート断面では、柱幅( $D_c$ )の両側に扁平梁の有効梁せい( $d$ )を加えた幅と、扁平梁の応力中心間距離( $j$ )を高さとした図-4の青色で囲まれた範囲がねじりに寄与することとする。ねじり強度( $M_{tu1}$ )は、既往の研究<sup>5)</sup>を参考に式(1)のように、コンクリート負担分( $M_{tc}$ )とねじり補強筋のダボ効果( $M_{ts}$ )の累加強度として算定した。

$$M_{tu1} = M_{tc} + M_{ts} \quad (1)$$

$$M_{tc} = j^2 / 2 \cdot (B_i - j/3) \cdot \tau_s \quad (2)$$

$$M_{ts} = \Sigma(a_{wh} \cdot l_n) \cdot \sigma_s / \sqrt{3} \quad (3)$$

$$\tau_s = 0.5 \sqrt{(\sigma_B \cdot \sigma_t)} \quad (4)$$

ここに、 $\tau_s$ ：コンクリートねじりせん断強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $a_{wh}$ ：ねじり補強筋の断面積(mm<sup>2</sup>)、 $l_n$ ：危険断面中央から補強筋位置までの距離(mm)、 $\sigma_s$ ：ねじり補強筋の降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_t$ ：コンクリート引張強度(N/mm<sup>2</sup>)である。 $B_i$ 、 $j$ 等の寸法定義に関しては図-4参照

直交梁があるねじり破壊試験体の、跳出し部ねじりモーメントの実験値と耐力計算値の比較を表-4に示す。

直交梁がある場合、跳出し部と直交梁がいずれもねじりモーメントを負担すると考え、直交梁のねじり強度( $M_{tu2}$ )は、既往の研究<sup>9)</sup>を参考に式(5)のように、コンクリート負担分( $T_u$ )とあばら筋負担分( $T_s$ )の累加強度として算定する。

$$M_{tu2} = T_u + T_s \quad (5)$$

$$T_u = 0.64 \sqrt{(\sigma_B) \cdot b^2 \cdot d / 3} \quad (6)$$

$$T_s = (0.66 + 0.33 \cdot d' / b') A_t \cdot b' \cdot d' \cdot \sigma_{wy} / S \quad (7)$$

(0.66 + 0.33 \cdot d' / b' ≤ 1.5)

ここに、 $b$ ：直交梁幅とせいの小さい方(cm)、 $d$ ：直交梁幅とせいの大きい方(cm)、 $b'$ ：直交梁あばら筋の短辺中心間距離(cm)、 $d'$ ：直交梁あばら筋の長辺中心間距離(cm)、 $A_t$ ：直交梁あばら筋1本の断面積(cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_{wy}$ ：直交梁あばら筋の降伏強度(kgf/cm<sup>2</sup>)、 $S$ ：直交梁あばら筋間隔(cm)である。

なお、ねじりモーメント実験値  $M_{tD}$  は、まず跳出し部梁主筋の最大経験ひずみを引張応力に換算し、この引張応力から曲げモーメント略算式より跳出し部に生じる最大入力曲げモーメントを算出する。次にこの値を接合部形状に応じて係数倍(ト形：1倍、十字形：2倍)する

ことで跳出し部の最大入力ねじりモーメント値とした。

以上の計算結果から、実験値と計算値の比は、直交梁がなく跳出し部のみで負担させる場合は1.18~1.54、直交梁があり跳出し部と直交梁どちらにも負担させる場合は1.09~1.31と安全側に評価できることを確認できた。

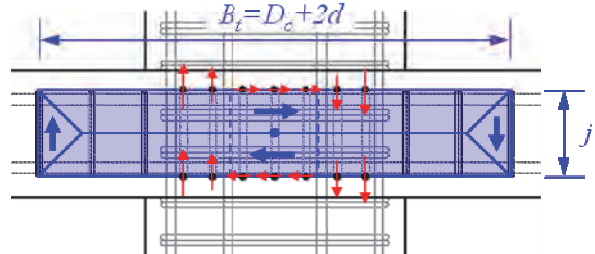


図-4 ねじり強度算定用概念図

表-3 実験値と耐力計算値の比較(直交梁なし)

試験体	実験値	計算値	実験値/ 計算値
	$M_{tD}$ (kNm)	$M_{tu1}$ (kNm)	
HN-7	186.4	120.8	1.54
HN-9	455.2	386.3	1.18

表-4 実験値と耐力計算値の比較(直交梁あり)

試験体	実験値	計算値	実験値/ 計算値
	$M_{tD}$ (kNm)	$M_{tu1} + M_{tu2}$ (kNm)	
HG-5	103.7	94.8	1.09
HN-8	201.4	153.8	1.31

### 3.3 曲げ・せん断耐力の評価

既報<sup>4)</sup>のシリーズ1、2と、本報のシリーズ3の実験値と計算値の耐力の比較を表-5に、図-5に  $Q_{exp} / Q_{Mu} - Q_{ju} / Q_{Mu}$  関係を示す。既報において、扁平梁曲げ耐力時の扁平梁先端荷重計算値( $Q_{Mu}$ )、扁平梁曲げ終局モーメント( $M_u$ )は、それぞれ式(8)、式(9)により評価できることを確認している。

$$Q_{Mu} = 2 \cdot M_u / L_o \quad (8)$$

$$M_u = 0.9 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (9)$$

ここに、 $M_u$ ：曲げ終局モーメント(N・mm)、 $a_t$ ：扁平梁主筋引張鉄筋断面積(mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_y$ ：扁平梁主筋降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $d$ ：扁平梁有効せい(mm)、 $L_o$ ：内法スパン(mm)である。

曲げと同様にせん断も、接合部せん断耐力時の扁平梁先端荷重計算値( $Q_{ju}$ )、接合部せん断強度( $V_{ju}$ )は式(10)、式(11)により評価できることを確認している。

$$Q_{ju} = Q_{Mu} \cdot V_{ju} / V_j \quad (10)$$

$$V_{ju} = \kappa \cdot \phi \cdot F_j \cdot b_j \cdot D_j \quad (11)$$

$$b_j = B_c + b_{a1} + b_{a2} \quad (12)$$

$$b_{a1}, b_{a2} = \min(b_i/2, D_j/4, B_c/4) \quad (13)$$

ここに、 $V_j$ ：終局状態設計用せん断力(N)、 $\kappa$ ：接合部形状係数、 $\phi$ ：直交梁の有無による補正係数、 $F_j$ ：接合部せん断強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $b_j$ ：接合部の有効幅(mm)、 $b_{a1}, b_{a2}$ ：跳出し部有効長さ(mm)、 $b_i$ ：柱側面からこれに平行する扁平梁側面までの長さ(mm)、 $D_j$ ：柱せいまたは定着板までの梁主筋定着長さ(mm)、 $B_c$ ：柱幅(mm)である。

図-5の実線は、実験値 ( $Q_{exp}$ ) と計算値 ( $Q_{Mu}$  または  $Q_{Vju}$ ) が等しい値を示し、この実線を上回れば実験値が計算値以上であることを示している。

本報のシリーズ3のせん断試験体 HN-10、HN-11 では、 $Q_{Vju}$  に対する  $Q_{exp}$  の比が 1.22~1.24 となり、既報の式により安全側に評価できることを確認できた。したがって、梁せいが実大相当で 800mm の扁平梁や、扁平梁の片側側面が柱幅内におさまるくらい片側に扁平梁を寄せた形状でも、接合部せん断耐力を式(5)で評価できると考えられる。

表-5 実験値と計算値の耐力比較 (曲げ、せん断)

試験体	計算値		実験値 $Q_{exp}$ (kN)	比較 $Q_{exp} / \min(Q_{GM}, Q_{Vj})$
	$Q_{GM}$ (kN)	$Q_{Vj}$ (kN)		
HN-1	205	230	202	0.88
HG-1	205	276	194	0.94
HN-3	263	152	184	1.21
HN-2	147	190	151	1.03
HN-4	355	223	239	1.07
HN-5	183	137	139	1.02
HN-6	183	136	145	1.06
HG-2	147	228	155	1.05
HG-3	147	268	153	1.04
HG-4	275	188	213	1.26
HN-10	468	264	327	1.24
HN-11	343	193	238	1.22

$Q_{GM}$ ：扁平梁曲げ耐力時の扁平梁先端荷重  
 $Q_{Vj}$ ：接合部せん断耐力時の扁平梁先端荷重  
 $Q_{exp}$ ：実験時扁平梁先端荷重最大値

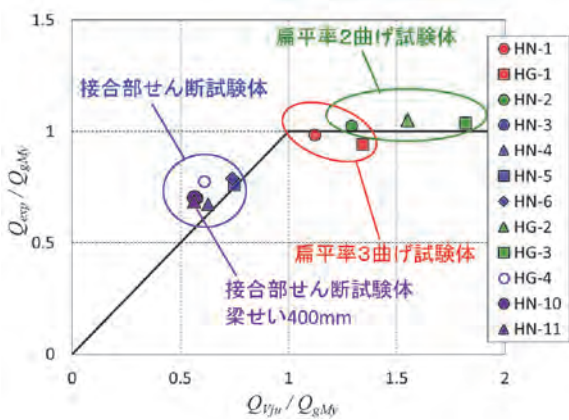


図-5  $Q_{exp} / Q_{Mu} - Q_{Vju} / Q_{Mu}$  関係

#### 4. まとめ

扁平梁の構造性能を確認するため、計6体の部分架構実験を行った。実験結果から、扁平梁架構において、以下のことが確認できた。

- i. ねじり破壊先行型として計画した試験体において、直交梁がなく跳出し部のみで負担させる場合のねじりモーメントの計算値に対する実験値の余裕度は1.18~1.54、直交梁があり跳出し部と直交梁の強度を累加する場合は1.09~1.31と安全側に評価した
- ii. 接合部のせん断破壊先行型として計画した試験体において、梁せいが実大相当で800mmの扁平梁も、既報の式で安全に評価できることを確認した
- iii. 接合部のせん断破壊先行型として計画した試験体において、扁平梁の片側側面が柱幅内におさまるように片側に扁平梁を寄せた形状でも、既報の式で安全に評価できることを確認した

#### 5. あとがき

本研究で行ったねじり耐力の合理的な評価と、適用条件の拡大により「扁平梁工法」は従来よりも設計しやすい工法となった。また本工法には、プランの自由度が高まる、有効天井高や窓開口を大きく確保できる、などのメリットがあるため、集合住宅を主な対象として積極的に提案していきたい。

#### 【参考文献】

- 1) 山際 創、岸本 剛、浜口慶生、服部晃三、「扁平梁工法の構造性能に関する実験的研究」、奥村組技術研究年報、No.45、2019.9
- 2) 岸本 剛、早川邦夫、岡 靖弘、平松一夫、「柱とスラブからなるフラットプレート架構の構造性能 その1」、奥村組技術研究年報、No.32、2006.7
- 3) 岸本 剛、早川邦夫、岡 靖弘、平松一夫、「柱とスラブからなるフラットプレート架構の構造性能 その2」、奥村組技術研究年報、No.33、2007.7
- 4) 岸本 剛、山際 創、岡 靖弘、平松一夫、「スラブと柱で構成するフラットプレート架構の構造性能」、奥村組技術研究年報、No.44、2018.9
- 5) 蛭田 駿、中村聡宏、勅使川原正臣、「扁平梁—柱接合部における張出部のねじれ耐力に関する研究」、日本建築学会学術講演梗概集、2015.9
- 6) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料」、1987

# スラブ湿潤状態評価技術の開発

## —光学センサと自律走行式ロボットによる自動評価システムの構築—

### Development of an Evaluation Method of Wet Conditions on Concrete Slabs

#### -Building a System Incorporating Optical Sensors and Autonomous Mobile Robots -

増田貴之\* 赤星博仁\*\*

#### 要 旨

スラブコンクリートの施工において、コンクリート打設後にスラブ表面の湿潤状態を適切に維持することは品質管理上大変重要である。しかしながら、金罫仕上げ後の湿潤養生開始時期の判断や酷暑期における湿潤状態の管理は難しく、その湿潤状態の評価は管理者の目視判断に拠るため、定量的かつ適切な判断がなされているとは言い難い。また、湿潤状態を維持するためには、作業面においても多くの労力を要する。そこで湿潤状態を定量的に評価できるセンシング技術の開発に着手した。まず、円偏光として照射する近赤外光に着目した光学ユニットを提案し、その有効性を室内実験により確認した。さらに、本センシング技術を搭載した自律走行式ロボットを用いて、スラブ表面の湿潤状態を自動的に判定しマッピング表示するシステムの構築を行い、その現場適用を試みた。その結果、現場実装への可能性を確認した。

キーワード：スラブ、近赤外光、円偏光、水の吸光特性、自律走行式ロボット、省力化

#### 1. まえがき

近年、EC サイトなどの増加を受け、大量の配送物を保管できる物流施設が増加している。そうした物流施設のスラブはコンクリートの直床仕上げの場合が多く、表面が露出した状態となるため、打設後の湿潤養生は大変重要な作業である。コンクリートには普通ポルトランドセメントが用いられることが多く、概ね5日以上の湿潤養生期間が求められている。

所要の高品質を得るべく、適切な湿潤状態を維持するために散水後のスラブ表面を養生マットで覆うなどして管理が行われている。また、人的管理が主流であるため、一定のスキルを有する人材の確保や管理コストの負担が増えるといった問題がある。現在、そうした養生管理の負担を軽減するために、スラブと養生マットの間に湿潤状態を検知するセンサを配置して、湿潤養生を管理する技術が提案されている<sup>1)</sup>。しかし、スラブ面積が大きい場合、多くのセンサを設置する必要があり、やはり人材確保および管理コストの負担が発生している。

こうした人的負担を軽減するために、配置型の測定端子を用いることなく、スラブ表面の湿潤状態を自動的に管理できる技術や装置の開発が強く望まれている。こうした中で、コンクリートの水分量を測定するものとして、乾燥したコンクリートに水を散布したのち、水分吸収率

の高い波長域の光と低い波長域の光の2つの波長の近赤外光を照射して、水分の吸収度合いを測定する装置が提案されている<sup>2)</sup>。しかし、これは近赤外分光法を用いたものであり、水分量を正確に測定することが目的であるため、装置が比較的大きく汎用性に欠ける。また、スラブのような大きな面積に対して湿潤状態を管理する用途には、運用・機能・取得データ処理方法・費用などの観点から種々の問題がある。

そこで今回、スラブ表面の湿潤状態を非接触でかつ簡単な機構で評価できるセンサの開発を行った。加えて管理業務の省人化を図るために、自動で湿潤状態を計測できるロボットの開発を行った。本報では、同状態を定量的に評価できる近赤外光を用いたセンシング技術の概要、そのセンシング技術の有効性を確認した室内実験および、センサを搭載した自律走行式ロボットを用いてスラブ湿潤状態を自動でマッピング表示するシステムを試行した現場適用実験について報告する。

#### 2. 近赤外光を用いたセンシング技術の概要

スラブ表面の湿潤状態を評価するために、光の性質に着目した。光を鏡に照射した場合、反射されることは周知であり、その鏡はスラブ上の湿潤養生がなされている状態で再現することができる。この現象は水面に太陽光

\* 土木本部土木工務部 \*\* 技術本部技術研究所建築研究グループ

が反射される光景からも理解でき、光の物理的な特性である偏光状態が作用したものである。具体的には、光が円偏光状態で水膜に照射された場合、光は全反射を起こすという現象である。光は、P 波（Parallel 波）および S 波（Senkrecht 波）に分解可能な二つの直行する電磁波である。そして、P 波と S 波の位相差がない状態を直線偏光と呼び、伝搬方向に直線的に運動する。これに対し、P 波と S 波の位相差が 90 度の状態を円偏光と呼び、伝搬方向に螺旋的に運動する。図-1 に示す通り、円偏光は伝搬方向において回転運動しながら進むため、反射面に対して浅い角度で照射されることになり、同じ回転運動を保ったまま水膜により反射される。これは、水切りという遊びから現象が確認できるように、水面に対して回転させながら石を投げた場合、水面に対して浅い角度であればあるほど石は飛び跳ねる。この現象と円偏光の反射現象は似ているため、光の形状を円偏光として開発することとした。

上記の現象は、光が水膜に対して垂直に照射した場合に確認できる。一方、垂直でない場合、光の一部は反射されずに水膜内に侵入することになる。そこで、水の吸光特性を利用することで、スラブ表面の湿潤状態をより厳密に評価できると考えた。吸光特性とは、物体が特定の波長の光を吸収する特性のことで、例えば水は近赤外光である  $\lambda=700\text{nm}$  より長い波長の光を吸収する特性がある。特に、図-2 に示す通り、水の分子構造のうち O-H の伸縮振動と変角振動による吸収帯である  $\lambda=1,940\text{nm}$  や、H-O-H の伸縮振動による吸収帯である  $\lambda=2,900\text{nm}$  やその半分の波長である  $\lambda=1,450\text{nm}$  に大きな吸収が認められている。しかし、これら近赤外光を用いた技術はあるものの、先に課題として挙げている通り、スラブ表面の湿潤状態の評価には利用できない。また、波長が長くなるにつれ、その光源やセンサは一般に技術難易度が高く、コストが高くなるといったデメリットが挙げられる。そこで本技術では、技術難易度とコストのバランスを鑑みて、 $\lambda=1,450\text{nm}$  を用いたセンシング技術を開発することとした。

スラブ表面には多少の凹凸が存在するため、図-3 のように模式図として表現することができる。スラブ表面が湿潤している状態、すなわち水が表面の凹凸を被覆している場合には、レーザから照射された光が水面で全反射され、照射光はほぼ全て帰還することになる。一方、スラブ表面が乾燥過程にある状態、すなわち表面の一部が露出し始めると、表面に存在する凹凸が水から突出して空気中出现する。この出現時にレーザを照射した場合、凹凸によって拡散反射されることになり、湿潤時よりも帰還する光量が減少する。また、凹凸に微細な水分が含まれている場合は、表面張力によって覆われた水膜に対し、照射光は角度を有して照射されるため、一部の光が水に侵入する。その結果、光が吸光特性により水に

吸収されて、帰還する光量は減少する。したがって、湿潤状態ではレーザ光の反射量が大きく、乾燥状態ではレーザ光の反射量が小さくなるのが分かる。

この関係性を、3 章で言及する室内実験で確認し、スラブ表面の湿潤状態を評価できる基礎技術とした。この基礎技術を応用し、図-4 に示す通り、光学センサを開発した。センサ内では、円偏光のみの受光量を計測できるように内部で制御しており、光検出器において受光量を電圧に増幅変換する仕様としている。

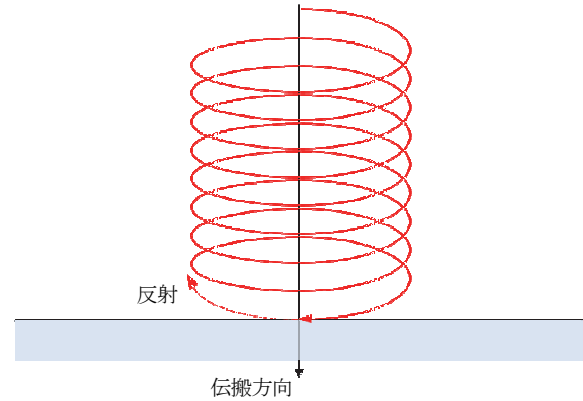


図-1 円偏光の反射現象

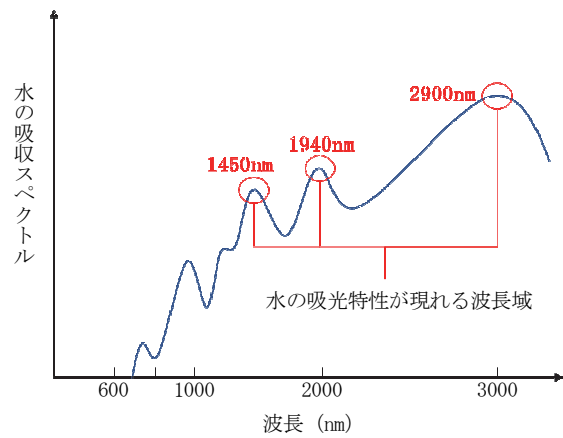


図-2 水の吸光特性

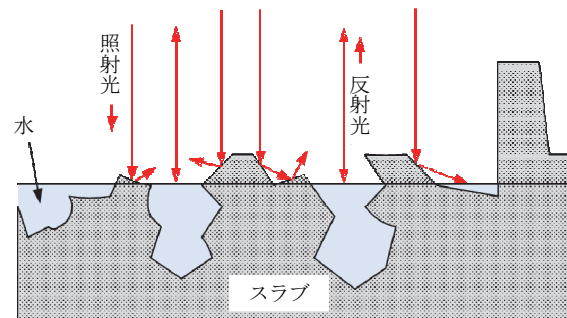


図-3 スラブ表面の湿潤状態と光の反射状態を表す模式図



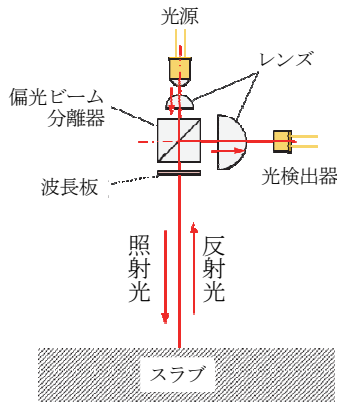


図-4 光学センサの内部機構

### 3. 室内実験

#### 3.1 実験概要

開発したセンシング技術の有効性を検証するため、コンクリートの湿潤状態と受光計測値との関係を室内実験により確認した。試験体としたコンクリートは、平面  $100 \times 100\text{mm}$ 、高さ  $50\text{mm}$  で、表面に水膜を張り、その直上にセンサを配置して、計測値（電圧値）を求めた。湿潤状態の変化については、ビデオ撮影による表面状態の目視観察と水の質量変化を電子天秤により測定した。実験状況を図-5に示す。なお、測定環境条件は、湿度条件を  $40 \sim 50\%$  とし、気温条件を  $40^\circ\text{C}$  で 6 回、 $23^\circ\text{C}$  で 4 回の計 10 回実施した。

計測にあたり、 $\lambda=1,450\text{nm}$  の光に加え、 $\lambda=1,300\text{nm}$  の光での計測も行った。 $\lambda=1,300\text{nm}$  は、図-2でも確認できる通り、水の吸光特性が認められない波長である。2つの波長での光を用いて計測することで、それらに相対的な違いが確認できると考えたためである。

#### 3.2 実験結果と考察

2つの波長の光での計測結果の一例を図-6に示す。ここで、 $\lambda=1,300\text{nm}$  での計測値を  $\text{LD1}(\text{mV})$ 、 $\lambda=1,450\text{nm}$  での計測値を  $\text{LD2}(\text{mV})$  とする。なお、図の中では、青線で  $\text{LD1}$  を、赤線で  $\text{LD2}$  を、緑線でコンクリート質量( $\text{g}$ )を表現している。どちらの光もスラブ表面の経時変化に応じて計測値が変化することが認められるが、 $\text{LD1}$  は計測値の大小関係が逆転していることから湿潤状態を絶対的に評価することが難しいことが分かる。一方で、 $\text{LD2}$  は、計測値の大小関係が逆転せず絶対評価が可能である。したがって、 $\text{LD2}$  すなわち  $\lambda=1,450\text{nm}$  の光の有効性が確認できた。

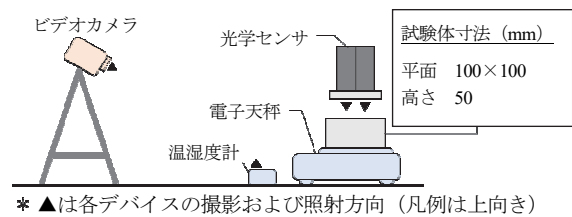
次に2つの波長の光での計測において、再現性を検証するために、各水準の表面に対して、計測値と水の厚さ（水位）の関係を確認した。なお、水位を継続して直接計測することは精度的に困難なため、電子天秤で計測した質量から水位を換算した。

まず、 $\text{LD1}$  での計測結果と水位の関係の一例を図-7に示す。 $\text{LD1}$  での計測値は、大小関係が逆転しており、さらに実験条件からの規則性が認められないことから、有効性と再現性の確認には至らないことが分かる。

次に、 $\text{LD2}$  での計測結果と水位の関係を図-8に示す。 $\text{LD2}$  での計測値は、全水準において大小関係が逆転していないことが分かる。さらに、実験に用いた全水準での計測値が  $1,750\text{mV}$  付近と  $2,200\text{mV}$  付近の2つの範囲に集約されており、概ね良好な再現性を確認できる。2つの範囲に分かれた大きな理由は、気温による影響であることが分かるが、気温による計測値の違いがあったとしても、計測値の大小関係が逆転していないことから、湿潤状態を評価することに影響はないと判断した。

最後に、スラブ表面の湿潤状態と計測値の関係について考察する。スラブ表面の凹凸が水面に露出していない状態を「湿潤状態」、スラブ表面の一部の凹凸が水面より露出した状態を「半乾燥状態」、スラブ表面の多くの凹凸が水面より露出した状態を「乾燥状態」と分類した。これら3つの状態は計測値の大小関係に従っており、「湿潤状態」は計測値が  $1,200\text{mV}$  以上、「乾燥状態」は  $100\text{mV}$  以下、「半乾燥状態」は  $100\text{mV} \sim 1,200\text{mV}$  に収まることを複数の実験結果により確認した。その結果、それぞれのスラブ表面の湿潤状態を定量的に定義するためには、計測値による閾値を設定することで工学的に可能であると考察した。

上記の結果と考察から、スラブ表面の湿潤状態を評価する技術として、近赤外光である  $\lambda=1,450\text{nm}$  のレーザを用いることにした。また、それによる計測値が湿潤状態を定量的に判断できる根拠であることを確認した。



\* ▲は各デバイスの撮影および照射方向（凡例は上向き）

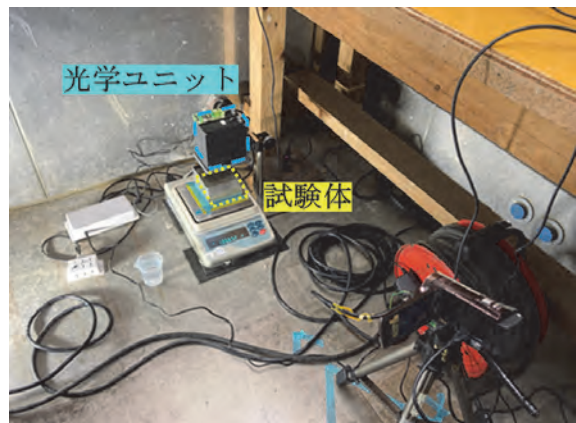


図-5 室内実験状況

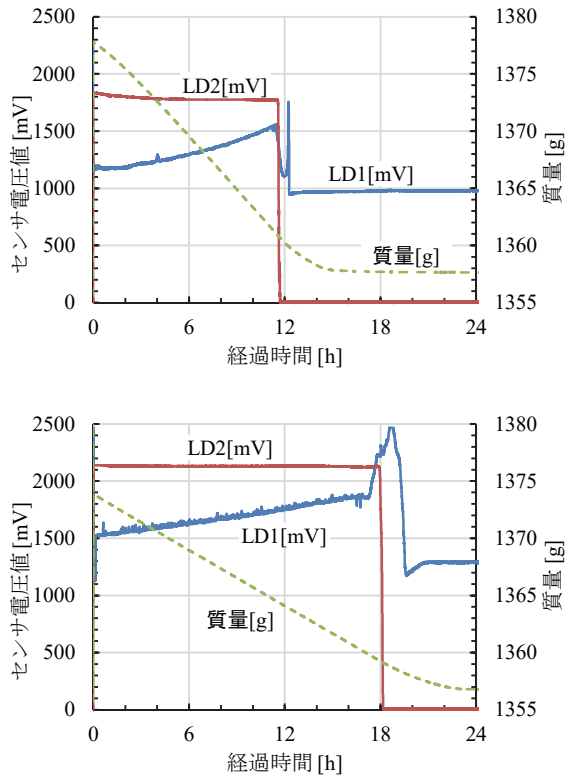


図-6 LD1, LD2 および質量の計測結果  
 (上) 湿度 50%、気温 40°C  
 (下) 湿度 50%、気温 23°C

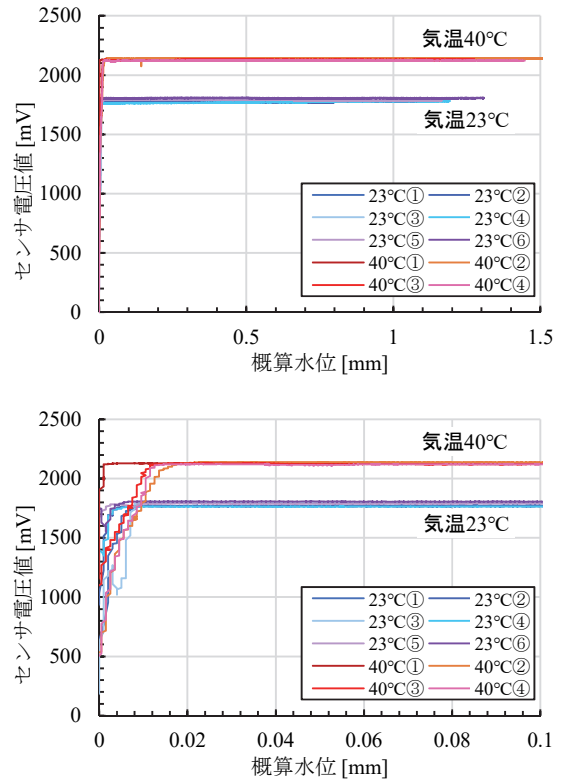


図-8 LD2 計測結果と水位の関係 (全 10 水準)  
 下段は上段の水位 0.1mm 以下における拡大表示

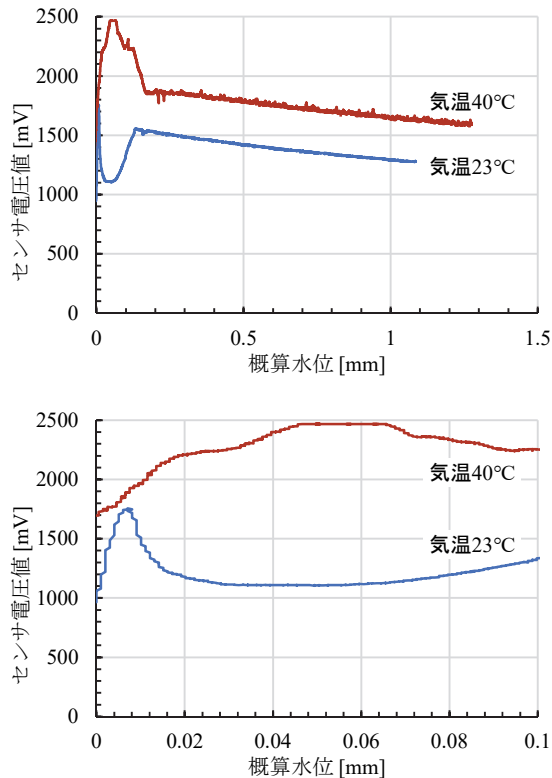


図-7 LD1 計測結果と水位の関係 (2 水準)  
 下段は上段の水位 0.1mm 以下における拡大表示

#### 4. 現場適用実験

##### 4.1 自律走行式ロボットの概要

実現場におけるスラブ表面の湿潤状態を評価管理するためには、先に挙げた電極センサを配置する方法でも可能だが、配置のための労力が発生することから、省力化の目的を達成できていない。そこで、実現場への適用性と省力化の観点から、自律走行式ロボットにより評価管理することが最適と判断した。

自律走行式ロボットとは、走行ロボットが移動する周囲の環境に誘導装置を設置することなく、ロボット本体に搭載したセンサ類により自己位置、あるいは走行路を検出して走行するものである。現在実用化されている主な自律走行方式には、2次元 SLAM 方式、画像処理・3D モデル比較方式、および3次元 SLAM 方式があり、いずれも SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)と呼ばれる技術が基本となっている。SLAM とは、ロボット周囲の環境を計測するセンサを用いて、地図を生成しながら、同時に自己位置を同定するものである。今回開発した自律走行式ロボットは、省力化と高い汎用性を考慮した結果、メンテナンスのしやすさと低コストを優先し、2次元 SLAM 方式を採用した。

そして、2章で開発したセンサを自律走行式ロボットに搭載し、移動しながらスラブ表面の湿潤状態を評価し、

評価結果をログに残すシステム一式の開発を行った。センサを搭載した自律走行式ロボットの外観を図-9に示す。諸元として、サイズは全長 1,400mm、全幅 750mm、全高 780mm、質量は 85kg、最高走行速度は時速 2.0km、最小回転半径は 2.0m である。また、自律走行式ロボットには、ロボ駆動をはじめとした各種操作を制御するパソコンなどの制御部、ロボットの周囲環境を計測する 2D LiDAR およびスラブ表面の湿潤状態を評価するセンサを実装した。2D LiDAR とは、レーザを使用して周囲の物体を検出するセンサの一種で、2次元の平面に対してレーザを放射し、反射した光を検出して、物体の位置、距離、形状などの情報を取得するものである。

#### 4.2 実験概要

開発したセンサとロボットの実用性を確認するために、1,000m<sup>2</sup> 級のスラブ面積を有する工事現場での現場適用実験を行った。選定した工事現場の概要を図-10に示す。実験に用いた対象スラブ面積は約 860m<sup>2</sup> である。今回は広範囲のスラブに対する自動計測の実用性を確認することが目的であるため、コンクリート打設から 30 日後のスラブに対して、一様に散水し、その後の湿潤状態を計測することとした。実験時期は冬期で、気温は 0.4℃、湿度は 78%の環境であった。なお、計測回数は 3 回で、12:30、13:30、14:30 の 1 時間ごととした。

実験手順として、まず、自律走行式ロボットを人による操作で対象スラブ上をなるべく隈なく走行させる。この時、自律走行式ロボットに搭載している 2D LiDAR により周辺環境を点群として計測し、ロボットが走行する地図を作成する。作成した地図は、任意の範囲でグリッド化でき、今回は 1m 四方をグリッド化した。次に、作成した地図情報とロボット情報を照合して、走行経路を算出する。作成した地図と算出された走行経路により、ロボットへ走行開始の信号を送ることで、自律走行が開始する。この際、搭載している湿潤状態評価センサにより、1m 四方のグリッドに応じた自動評価も開始する。また、評価結果を目視結果と比較しやすくするために、3.2 節で定義した、「湿潤状態」を青色、「半乾燥状態」を黄色、「乾燥状態」を赤色として、システム上で表現した。なお、ロボットの走行速度と測定頻度の関係上、同じグリッド上で複数回の計測が連続して発生する。その場合、計測値のうち小さいものを評価結果として採用した。それは、計測値が小さいほど、「乾燥状態」に近いことを表し、湿潤養生の管理上、安全側の判定とするためである。

#### 4.3 実験結果と考察

時間経過に伴う表面状態の変化について、湿潤評価結果と目視結果を比較したものを図-11に、各計測時間における計測点の湿潤評価結果の一覧を表-1に示す。スラブ面積 860m<sup>2</sup> の計測範囲に対して、1 回あたりの計測に要した時間は約 20 分で、スラブ面積全体の約 80%

の面積を計測することができた。80%程度の計測面積となった主たる理由は、今回開発したロボットの最小回転半径が 2.0m であり、特に測定対象範囲とした外周部分においてロボットが走行できないエリアが発生したためである。

図-11 に示す評価結果のうち、黄色の丸に着目すると、目視で確認できる通り、センサによる評価と概ね一致していることが確認できる。そして、表-1 に示す湿潤状態を計測したデータの「乾燥状態」と「湿潤状態」について着目すると、時間経過とともに、それぞれが相反しながら推移しており、評価結果に矛盾が生じていないことを確認できる。また、この確認を容易にするために、「湿潤割合」という指標を設けた。「湿潤割合」とは、評価可能点全てに対し、「湿潤状態」として評価する点の割合と定義した。「湿潤割合」が時間経過とともに一律的に低下していくことが確認できたため、スラブ表面の湿潤状態を評価する指標として提案できる可能性がある。



図-9 センサ搭載型自律走行式ロボット

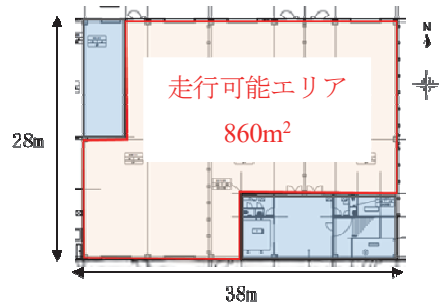


図-10 現場適用実験の概況

5. まとめ

物流施設をはじめとした、スラブ面積 1,000m<sup>2</sup> 級のコンクリート表面を対象にした湿潤状態を評価する技術として、近赤外光を用いたセンシング技術を提案した。本報では、当該技術の有効性の確認を目的とした室内実験と、スラブ表面自動評価システムの実用性の確認を目的とした現場適用実験により、以下に示す事項を確認した。

- i. 光の形状を円偏光にし、水の吸光特性が卓越する波長 1,450nm の近赤外光を用いたセンサにより、スラブ表面の湿潤状態の判定が可能である
- ii. 自律走行式ロボットを用いて、面積 860m<sup>2</sup> のスラブ面を約 20 分で計測できる
- iii. 開発した湿潤状態のマッピングシステムにより、時間とともに変化するスラブ面全体の湿潤状態の把握が可能である

表－1 湿潤評価結果の一覧

計測時間	計測点数		
	12:30	13:30	14:30
乾燥状態	90	118	192
半乾燥状態	35	64	40
湿潤状態	317	261	210
未計測	123	122	123
湿潤割合 (%)	72	59	47

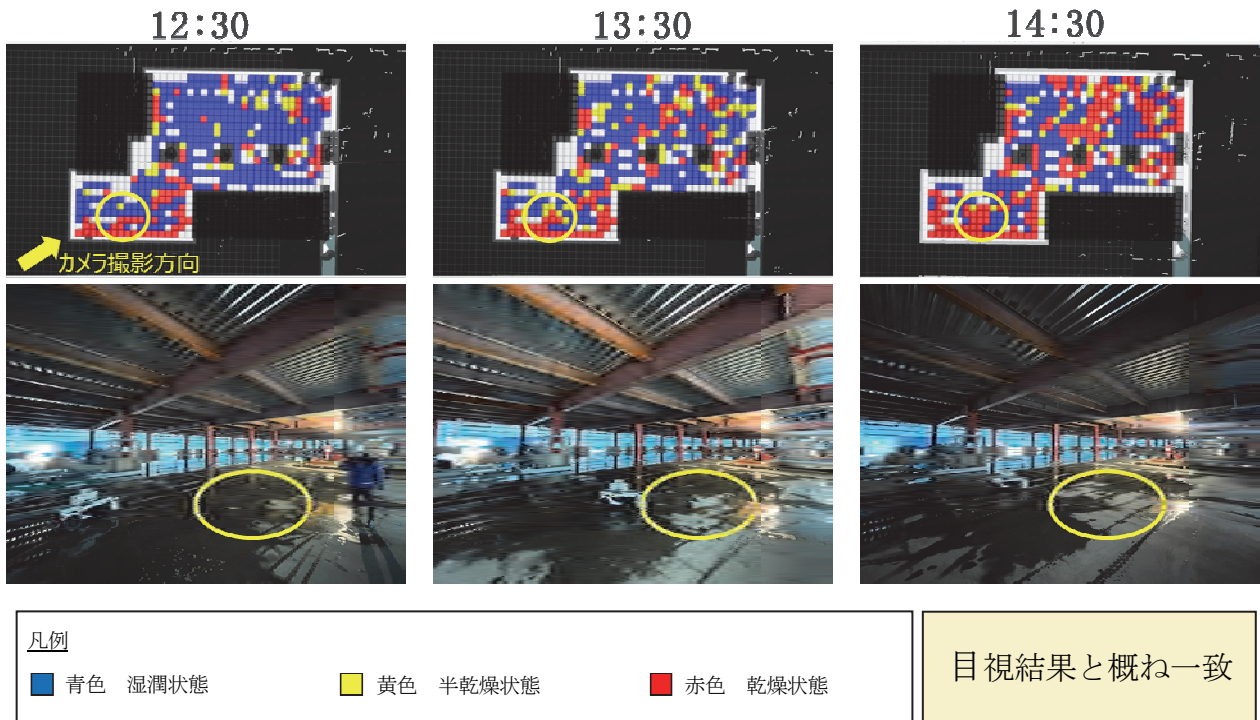
6. あとがき

建設現場への実装適用に向けて、散水設備との連携を目指す。得られたスラブ表面の湿潤状態の評価結果を、散水設備に連携することで、より高品質な湿潤養生が可能になると考える。その結果、従来の湿潤養生に要した労務を無人で行えることから、施工現場の省力化に寄与できる。その他にも、水を垂れ流しにした従来の散水養生などに比べて、必要十分な散水養生が可能となるため、水の省資源化にも寄与することが可能である。

最後に、本開発はユアサ商事株式会社と共同で実施しているものであり、建設現場への実装適用に向けてロボットの量産化も目指していく。

【参考文献】

- 1) NETIS KK-160022-VE、コンクリート養生管理に用いる無線温湿度測定装置、<https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/details?regNo=KK-160022%20> (2023 年 4 月 19 日確認)
- 2) 郡 政人、「近赤外分光法によるコンクリート表層部の物性評価に関する研究」、土木学会年次学術講演会梗概集、pp.7-8、2012.9



図－11 湿潤評価結果と目視結果の比較

# 免震建物に適用する過大变位抑制用 性能可変オイルダンパーの開発

— 500kN 級ダンパーの製造ばらつき —

## Passive Variable Orifice Damper to Control Excessive Displacement of Seismically Isolated Building

- Manufacturing Variations in 500kN Class Dampers -

小山慶樹\* 山上 聡\* 洲鎌 星\* 舟木秀尊\*

### 要 旨

長周期地震動時に、建物の一次固有周期が長い免震建物では過大な水平変位が免震層に生じる可能性がある。既報<sup>1)</sup>では、ダンパーの変位に応じて減衰力をパッシブに変化させることで免震層の変位を抑制する、最大減衰力が 500kN 級の性能可変オイルダンパーのプロトタイプを製作し、その性能確認を行った。本報では、複数基の 500kN 級性能可変オイルダンパーの性能確認を行い、製造ばらつきなどを評価した。また、免震建物に性能可変オイルダンパーを適用した解析的検討から、性能可変オイルダンパーの過大变位抑制効果や上部構造の応答性状を示し、その優位性を確認した。

キーワード：免震構造、性能可変オイルダンパー、長周期地震動、変位制御、パッシブ制御

### 1. まえがき

2003 年 9 月の十勝沖地震<sup>2)</sup>などや 2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震<sup>3)</sup>などでは、巨大地震による甚大な被害が生じ、特にその中でも長周期地震動が観測され注目を浴びた。これを受け、2016 年 6 月に「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について」<sup>4)</sup>が通知され、それまでの設計基準を上回る地震動による構造物の安全性検討が必要となった。

一般に、免震建物は一次固有周期が長く、長周期地震動時に免震層に過大な水平変位が生じる恐れがある。この対策として、免震層に剛性や減衰を付加する方法があるが、上部構造が負担する地震力が増加し、免震性能が損なわれる。これに対して、井上、五十子らは、大きな水平変位が免震層に生じたときにパッシブに減衰力を増加させる性能可変オイルダンパー（以下、VOD）を提案し、戸建免震住宅を対象にその変位抑制効果などを示した<sup>5)</sup>など。既報<sup>1)</sup>では、ビル物の免震建物を対象とした最大減衰力が 500kN 級の VOD を開発し、その性能を確認した。本報では、複数基の VOD を製作して減衰性能を確認し、その製造ばらつきを評価した。さらに、VOD の適用効果を解析的検討から確認した。

### 2. VOD の減衰性能

#### 2.1 VOD の概要

VOD の外観を図-1に、機構模式図を図-2に示す。本ダンパーの特徴は、ユニフロー式のオイルダンパーの外部に、オイルが充填された小形シリンダを設置している点である。小形シリンダとガイドロッドの間には、設計者が任意に設定可能なクリアランス  $L_s$  があり、 $L_s$  以上の変位がダンパーに生じると、ピストンロッドの変位に追従したガイドロッドが小形シリンダを作動させ、ばね座を押し込み、自動的に減衰力が増加する。なお、地震終了後は、圧縮された調圧弁ばねの復元力により小形シリンダが自動で徐々に押し戻され、性能変化前の減衰特性に戻る。

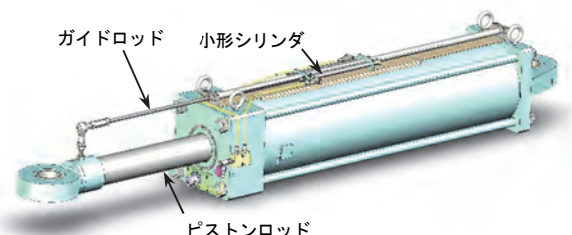


図-1 VOD 外観

\* 技術本部技術研究所建築研究グループ

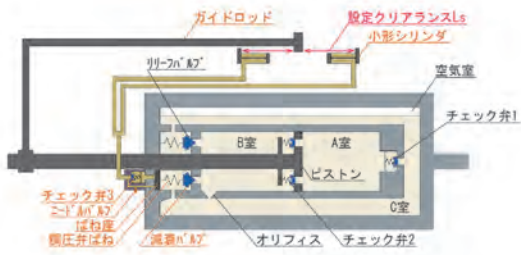


図-2 機構模式図

2.2 作動原理

圧縮時を例として、性能変化前後の作動原理を図-3に示す。本ダンパーは、チェック弁1とチェック弁2の開閉状態を圧縮時、引張時で反転させることで、同一方向に作動油が流れるユニフロー型のオイルダンパーである。図-3(a)、(b)に示すように、性能変化前はチェック弁3が常に閉じた状態で、速度が速くなるとリリーフバルブが開き、減衰力と速度の関係がバイリニア型となる。また、ダンパーの変位が設定クリアランス  $L_s$  以上になると、ガイドロッドと小形シリンダが干渉して、小形シリンダ内に充填された作動油がチェック弁3を開き、小形シリンダの作動距離  $X_c$  に比例して、ばね座が押し込まれ調圧弁ばねを圧縮し、減衰バルブが閉じて、減衰力が増加する。性能変化後は図-3(c)に示すように、チェック弁2とオリフィス部から作動油が流れ、速度が速くなると、図-3(d)に示すように、減衰バルブが開くことで、性能変化前の図-3(a)と同じように作動油が流れる。さらに、速度が速くなると、図-3(e)に示すように、リリーフバルブが開き、性能変化前の図-3(b)と同じように作動油が流れ、減衰力と速度の関係がトリリニアとなる。図-4に、VODの減衰力と速度の関係を示す。ここで、ばね座を押し込んだ作動油はニードルバルブによりその戻り具合が制御され、地震中は変化した性能を保持して、徐々に変化前の性能へ自動で戻る回帰特性がある。なお、本ダンパーは解体することなく、外部からダンパーの減衰性能を調整することが可能である。

3. 性能実験

3.1 基本性能

No.1 から No.4 の計 4 基の 500kN 級 VOD を対象に、性能確認を行った。実験装置の概要を図-5に示す。加振機にダンパーを取り付け、ダンパー変位と小型シリンダの作動距離、ダンパーの減衰力、および、ダンパー表面温度を測定した。入力波は、定常3波の前後に1波のテーパを設けた正弦波とした。ここで、小形シリンダに強制変位を与えるため、ピストンロッドとガイドロッドを切り離した。加振パラメータを表-1に示す。加振周期は 3.0 秒とし、小形シリンダの作動距離  $X_c$  とダンパーロッドの最大速度  $V_{max}$  をパラメータとした。ここで、

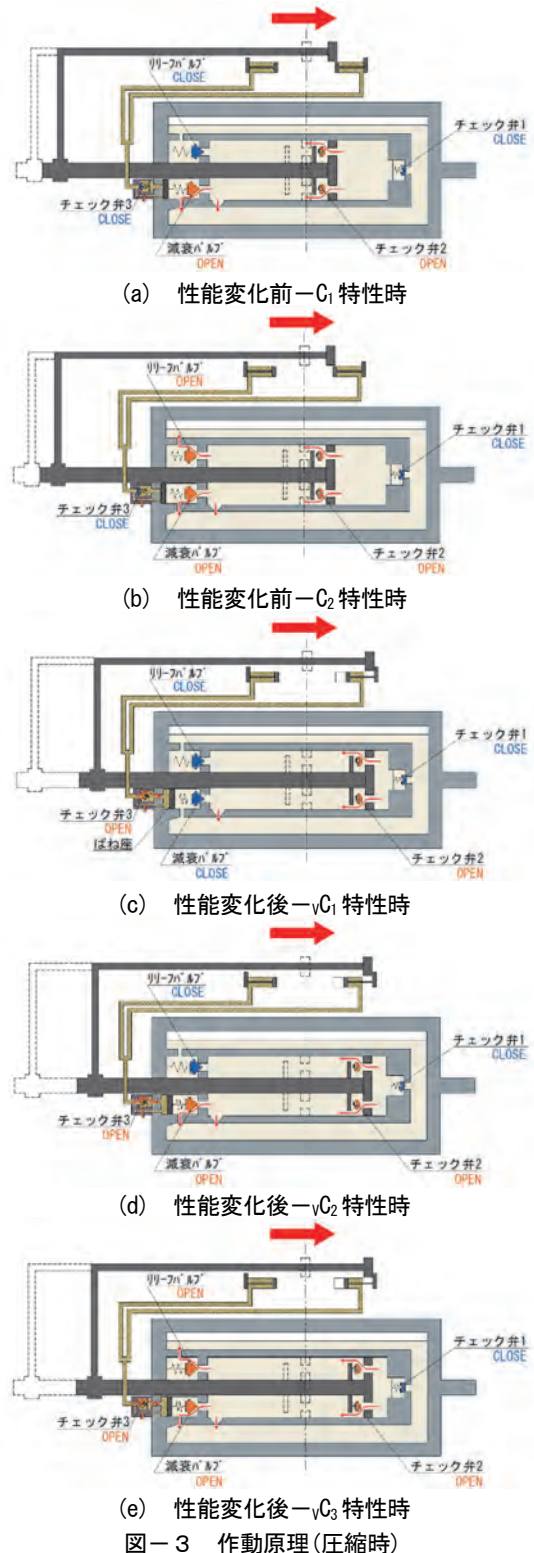


図-3 作動原理(圧縮時)

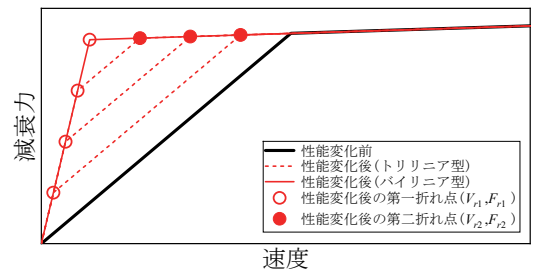


図-4 減衰力と速度の関係

計測のサンプリング周波数は 100Hz とし、0.002Hz から 30Hz のバンドパスフィルタ処理を施し、 $T/20$  の移動平均処理をして平滑化した。この条件下において、定常 3 サイクル目に着目し、ダンパーの減衰性能を評価した。

表-1 加振パラメータ

小形シリンダの作動距離 $X_c$ [cm]	0、5、10、15、20、25
入力波	最大速度 $V_{max}$ [cm/s]
	加振周期 $T$ [s]
	10、25、50、75
	3.0

減衰力とダンパー変位の関係を図-6に示す。図より、 $V_{max}$  が 25cm/s 以下の場合には、小形シリンダの作動距離  $X_c$  に応じて減衰力が大きくなっていることが分かる。また、50、75cm/s の場合には、リリーフバルブが開き、最大減衰力は小形シリンダの作動距離によらず、概ね一定であることが分かる。次に、図-7に定常 3 サイクル目の正負の最大減衰力と最大速度の関係を示す。なお、図中の実線が設計基準値、破線がばらつきを考慮した設計値である。VOD の基準値諸元を表-2に示す。低速

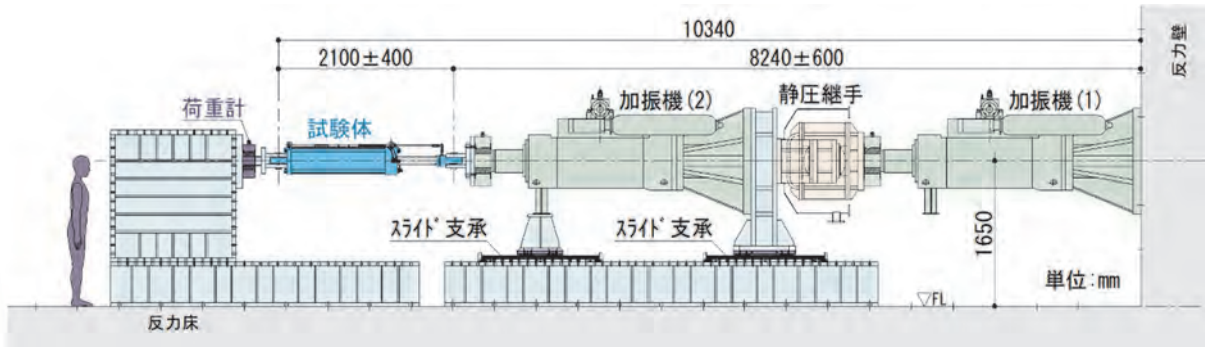


図-5 実験装置の概要

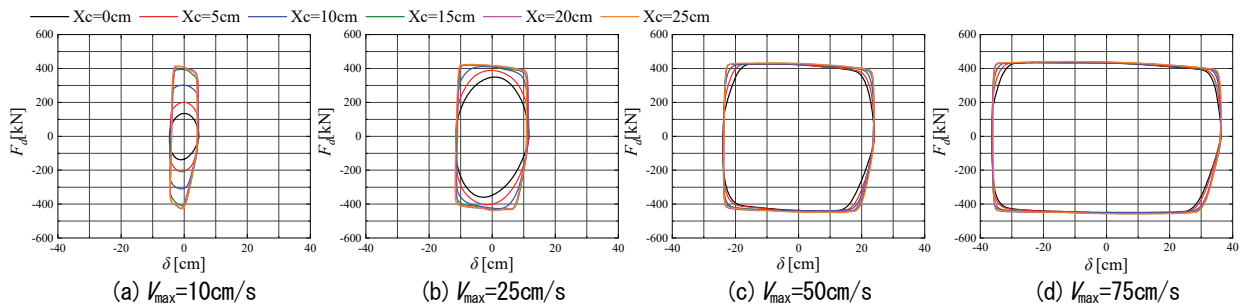


図-6 減衰力とダンパー変位の関係 (No.1、定常 3 ループ目)

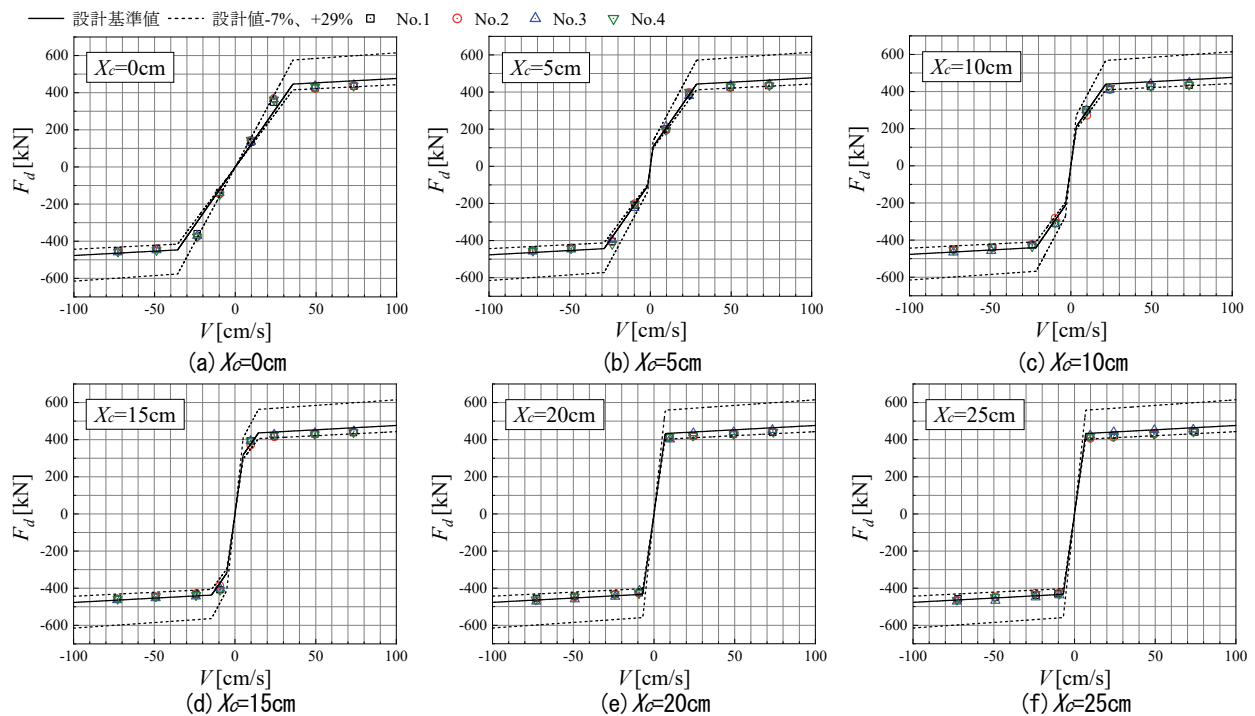


図-7 減衰力と速度の関係

表一 2 VODの基準値諸元

設定クリアランス	$L_s$	15 [cm]
性能変化前の一次減衰係数	$C_1$	12.5 [kN·s/cm]
性能変化後の一次減衰係数	$vC_1$	62.5 [kN/cm]
切片減衰力	$F_{dd}$	430 [kN]
最大減衰力	$F_{dmax}$	500 [kN]
面積比	$\alpha$	24.82
調圧弁ばね剛性	$K_{sp}$	1.475 [kN/cm]
低減倍率	$\zeta$	0.58

域の減衰力は基準値よりも大きくなるように、リリース速度以上の高速域では、建物に過度な力を負担させないために基準値よりも小さくなるように調整した。図より、最大速度が 10、25cm/s の低速域においては、小形シリンダの作動距離  $X_c$  の増加に伴い、減衰力が増加しており、減衰性能が変化していることが分かる。減衰力は 25cm/s 以下の低速域で基準値よりも最大で 29%ほど大きく、50、75cm/s の高速域で基準値よりも最小で 7%ほど小さく調整することができた。

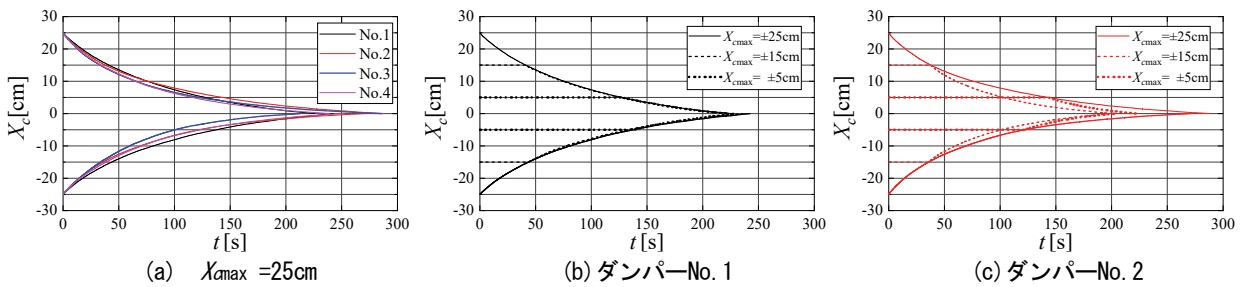
3.2 小形シリンダの回帰特性

小形シリンダが作動すると、その作動距離に応じて減衰性能が変化し、その後、時間をかけて自動で元の位置に戻り、性能変化前の減衰性能に戻る回帰特性がある。ここでは、ダンパー本体のピストンロッドと小形シリンダのガイドロッドを切り離れた状態で、ニードルバルブの開閉状態を調整し、小形シリンダに強制変位  $X_{cmax}$  を与え自由解放し、その回帰特性を確認した。ダンパー全数を対象とし、強制変位  $X_{cmax}$  は 25、15、5cm、引張側(+)、圧縮側(-)で実施した。強制変位  $X_{cmax}$  が ± 25cm

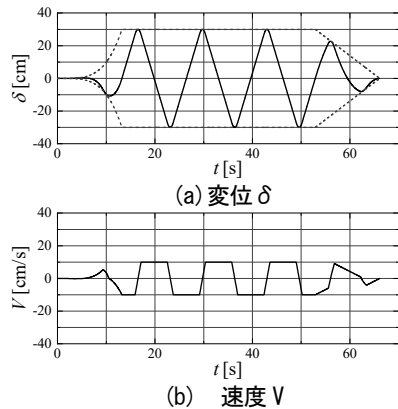
の場合の小形シリンダの回帰特性を図一 8 (a) に示す。最短で 226 秒で原点復帰しているが、平均で概ね 270 秒であり、圧縮側・引張側ともに同程度で原点復帰した。また、図一 8 (b)、(c) に示すように、強制変位  $X_{cmax}$  によらず、実用上問題のない範囲で回帰性・再現性を有していることが分かった。

3.3 性能変化の時間依存性

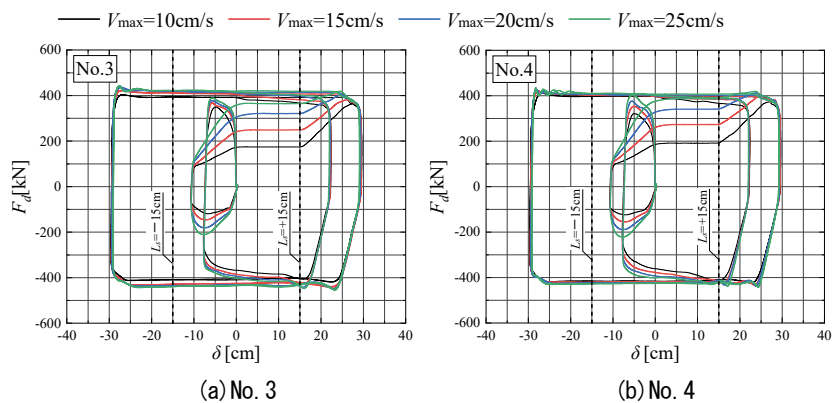
小形シリンダが作動してから、減衰性能が変化するまでの時間遅れ  $T_L$  を確認した。No.3 と No.4 のダンパーを対象に、基本性能と同じ実験装置にダンパーを設けた。ここで、ダンパーのシリンダとガイドロッドを連結して、ダンパー変位に応じて小形シリンダが作動するようにした。サンプリング周波数は 2,000Hz とし、減衰力が増加するまでの時間を測定できるように配慮した。加振波は最大変位を 30cm、最大速度を 10、15、20、25cm/s とした三角波とした。なお、入力波の速度符号が切り替わる付近で平滑化処理を行い、試験機に過度な加速度が生じないように配慮した。また、加振波は定常 3 サイクルの前後に 1 サイクル分のテーパを設け、定常になる前のテーパ部分の変位が  $L_s$  (=15cm) 以下になるように設定し、テーパ部分で小形シリンダが作動しないようにした。図一 9 に入力した加振波の一例を、図一 10 にダンパー変位と減衰力の関係を示す。図より、最大速度の違いによらず、ダンパー変位が 15cm を超えた時点で減衰力が増加し、減衰性能が変化していることが分かる。次に、減衰力  $F_d$  と小形シリンダの作動距離  $X_c$  の時刻歴を図一 11 に示す。最大速度が速いほど、 $T_L$  が短くなる傾向を示すが、最大でも 0.05 秒以下であることを確認した。



図一 8 小形シリンダの回帰特性



図一 9 三角波 (Vmax=10cm/s)



図一 10 ダンパー変位と減衰力の関係



次に、ダンパーNo.4 に図-12(a)に示した長周期地震動を想定した変位波形  $\delta$  を入力し、減衰性能が変化するまでの時間遅れ  $T_L$  がダンパーの履歴吸収エネルギーに与える影響について検討した。小形シリンダの作動距離  $X_c$  の時刻歴波形の測定結果を、図-12(b)に示す。ここで、 $X_c$  は圧縮側と引張側の絶対値の和として図示している。測定した  $\delta$  と  $X_c$  を用いて、測定した減衰力と算定した減衰力の差が最も小さくなるようにフィッティングさせ、製造ばらつきを+1.7%として減衰力を算定した。図-12(c)、(d)に、減衰力および履歴吸収エネルギーの時刻歴を示す。図中の黒線が測定結果、青線が  $T_L$  を考慮しない場合、赤線が 0.05 秒の  $T_L$  を考慮した場合を示す。図より、 $T_L$  を考慮しない場合の履歴吸収エネルギーは測定結果の -2.91%、 $T_L$  を考慮した場合は -2.96%となり、 $T_L$  の有無による影響は極めて僅かであることが確認できた。

#### 4. VOD の変位抑制効果と上部構造の最大応答値

##### 4.1 解析モデルと検討用入力地震動

解析モデルは図-13に示した7質点系せん断モデルとし、免震層の水平クリアランスを 40cm とした。免震層には免震装置以外の内部粘性減衰はないものとし、上部

構造の減衰には、免震層固定時の一次固有円振動数に対して 2%の剛性比例型の内部粘性減衰を考慮した。免震層の水平剛性は弾性とし、支承材の製造ばらつき、温度依存性、経年変化などの特性変動を考慮した。一次固有周期は標準特性時で概ね 3.6 秒、最小特性時で 3.9 秒、最大特性時で 3.3 秒である。また、オイルダンパー（以下、OD）を 2 基設けた場合を Case1、1 基増設して 3 基とした場合を Case2、VOD を 2 基設けた場合を Case3 とし、最大応答値を比較した。図-14に OD と VOD の基準性能を示す。ここで、OD は  $\pm 15\%$  の製造ばらつきを考慮し、VOD は 3章で示した基準値に対するばらつきを用いて、最大特性時は +29%、最小特性時は -7% の製造ばらつきを考慮した。さらに、免震層の最大水平変位を安全側に評価するため、測定した小形シリンダの回帰特性よりも早く戻る図-15 の回帰特性を用いて、時刻歴応答解析を行った。数値積分法には、Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=1/6$ ) を用いた。検討用入力地震動は、位相特性が異なる稀に発生する地震（以下、L1）を 6 波、極めて稀に発生する地震（以下、L2）を 6 波、および工学的基盤において中京地域の CH2 エリア<sup>4)</sup>を想定し建設地の地盤増幅を考慮した長周期地震動（以下、Long）を 1 波の計 13 波とした。検討用入力地震動の最大加速度、最大速度を表-3に、加速度応答スペクトルを図-16に示す。

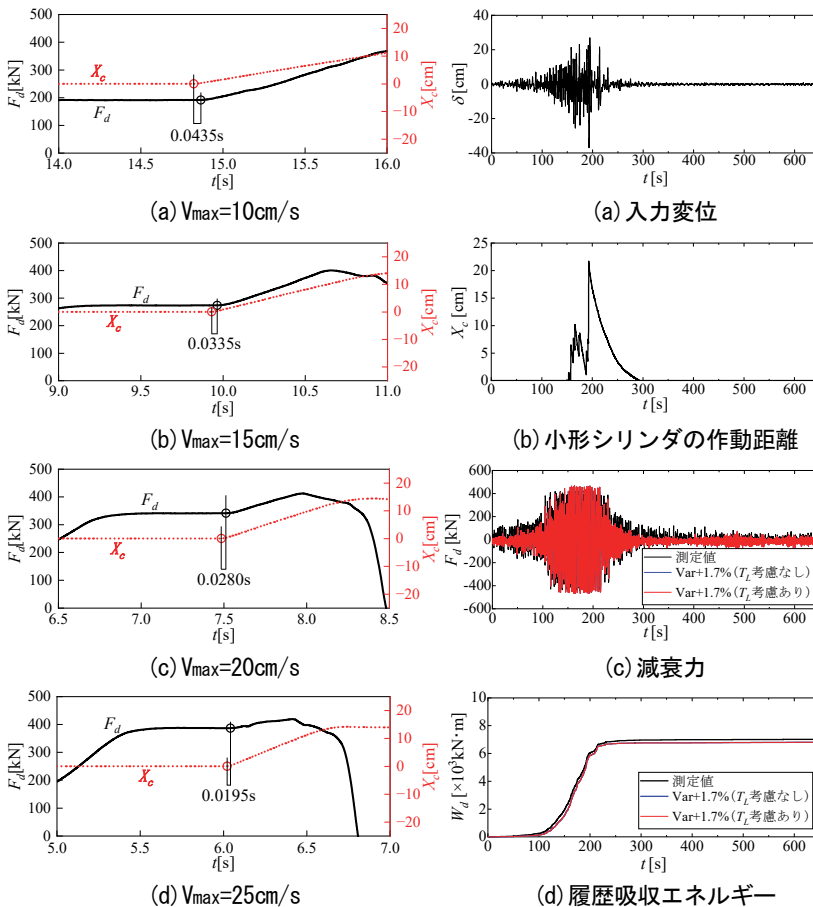


図-11 減衰力と小形シリンダの作動距離の時刻歴 (No. 4)

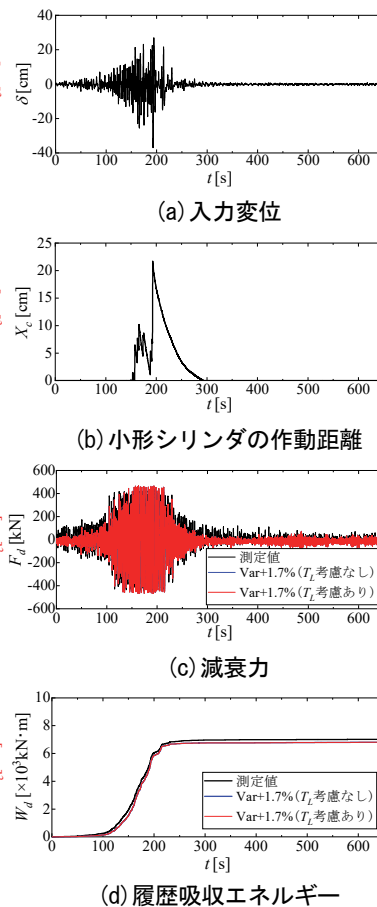


図-12 減衰性能が変化するまでの時間遅れの影響

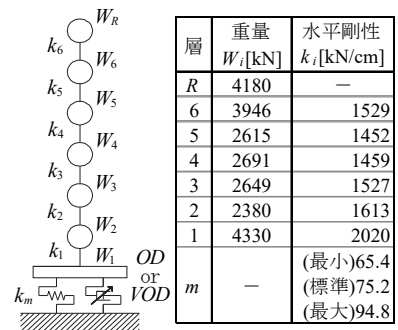


図-13 解析モデル

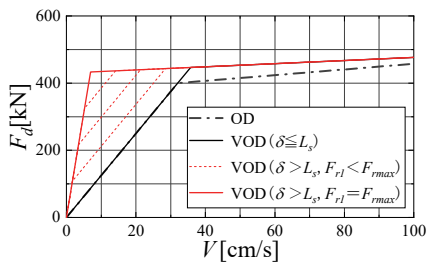


図-14 OD と VOD の基準性能

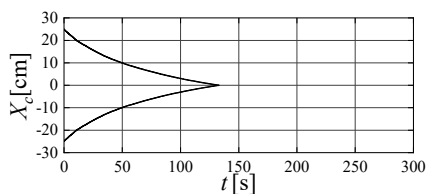


図-15 小形シリンダの回帰特性

4.2 解析結果

Long 時に生じた免震層の最大水平変位  $\delta_{1max}$  を表-4 に示す。標準特性の場合、免震層の最大水平変位は Case1 に比べ Case2 では概ね 26% 減、Case3 では概ね 12% 減となり、ダンパーの変位抑制効果が確認できた。次に、Case1 の場合の L1(6 波)、L2(6 波)時における各層の最大応答値を基準とし、Case2、Case3 の上部構造の最大応答倍率  $\eta$  を求めた。図-17 に、最大加速度、最大層せん断力係数、最大層間変形角の応答倍率  $\eta$  を示す。Case2 は Long 時の免震層変位を小さくするために OD を 1 基追加していることから、L1 や L2 時にも免震層が負担する減衰力が大きくなり、上部構造の最大応答値が Case1 に比べ、平均で 17% ほど大きくなった。これに対して、Case3 の VOD の場合は、L1 時では免震層の最大水平変位が  $L_s$  (=15cm) 未満であることから、標準特性時は Case1 と同じ最大応答値となった。また、L2 時では免震層の最大水平変位が  $L_s$  以上となり減衰力が増加しているが、最大応答値は 3% 程度の増加に留まり、概ね Case1 と同程度であることが分かった。

5. まとめ

4 基の VOD の性能確認を行い、個体間のばらつきが少ないことを確認し、設計基準値に対する減衰力の製造ばらつきを評価した。また、小形シリンダの回帰特性および減衰性能が変化するまでの時間遅れを確認した。次に、算定した減衰力のばらつき、および小形シリンダの

回帰特性を考慮した時刻歴応答解析を行い、対象建物において、VOD を用いた場合、稀に発生する地震や極めて稀に発生する地震動時には上部構造の最大応答値が抑えられ、長周期地震動時には、免震層の最大水平変位が抑制されることを確認した。

6. あとがき

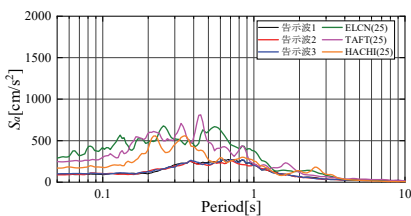
(国) 東北大学、(有) シズメテックと (株) 奥村組の共同研究の成果の一部である。東北大学の井上範夫名誉教授、五十子幸樹教授、および、シズメテックの鎮目武治氏、鎮目真喜子氏に感謝を示す。

【参考文献】

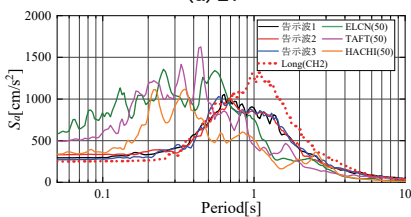
- 1) 小山慶樹、山上 聡、舟木秀尊、「免震建物に適用する過大変位抑制用性能可変オイルダンパーの開発 (500kN 級ダンパーの性能確認)」、奥村組技術研究年報、No.48、2022.9
- 2) 平田編、「平成 15 年 (2003 年) 十勝沖地震に関する緊急調査研究報告書」、東京大学地震研究所、2004
- 3) 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震被害調査報告、国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所、2012.3
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課、「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」、国住指第 1111 号他、2016.6
- 5) 根本真孝、五十子幸樹、池永昌容、井上範夫、「戸建住宅における性能可変オイルダンパーを用いた免震システムの設計法」、日本建築学会構造系論文集、Vol.76、No.660、pp.291-299、2011.2

表-3 入力地震動の最大値一覧

	最大加速度[cm/s <sup>2</sup> ]			最大速度[cm/s]		
	L1	L2	Long	L1	L2	Long
告示波1	91	293	—	12	52	—
告示波2	89	331	—	16	58	—
告示波3	97	270	—	12	57	—
ELCN	254	508	—	25	50	—
TAFI	248	497	—	25	50	—
HACHI	167	334	—	25	50	—
Long(CH2)	—	—	249	—	—	57



(a) L1

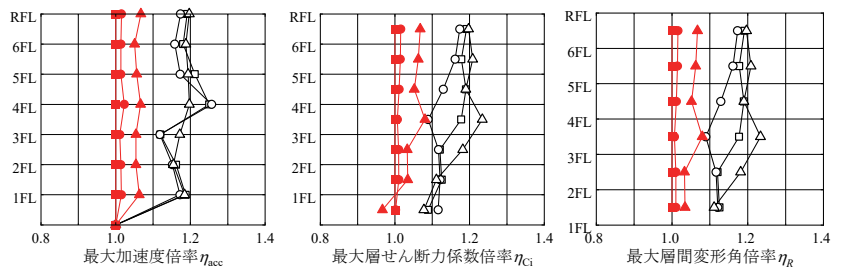


(b) L2+Long

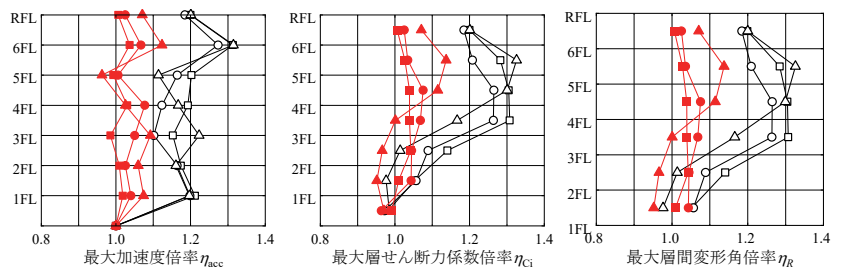
図-16 入力地震動の加速度応答スペクトル (h=0.05)

表-4 免震層の最大水平変位 (Long (CH2))

Long (CH2)	免震層の最大水平変位 $\delta_{1max}$ [cm]		
	最小特性	標準特性	最大特性
Case1(OD2)	44.2	43.6	40.7
Case2(OD3)	35.4	32.1	28.8
Case3(VOD2)	38.8	38.5	31.6



(a) L1



(b) L2

図-17 最大値の応答倍率  $\eta$

# ハイパースペクトルカメラを用いた災害廃棄物の種類と量の推定に関する基礎研究

## Estimation of Type and Volume of Disaster Waste Using Hyperspectral Camera

羽瀨博臣\* 清水祐也\* 岩下将也\*\* 吉村藤子\*\*\*

### 要 旨

近年、気候変動等に伴い自然災害が頻発化・激甚化しており、その度に災害廃棄物が大量に発生している。自治体では、急に発生する災害廃棄物の迅速な処理のために、事前に処理計画を立案している。また、被害情報や新たな統計手法が見いだされる度に災害廃棄物の種類と量を予測・更新し、それに合わせて処理計画を更新している。しかしながら、災害廃棄物は災害の種類や発生箇所等により、種類と量が異なるため、その予測精度は十分とは言えない。予測と実績の乖離、さらには発生量の把握が遅れることで、実際の災害発生時に作られる災害廃棄物処理実行計画の策定自体が遅れ、災害廃棄物の処理効率の低下を招くこと等が問題としてある。そのため、ICT やリモートセンシング技術等により、さらに簡便かつ正確に発生量・要処理量を推計する手法の開発が望まれている。

そこで本研究では、可視光の波長領域外（900～1700nm）を撮像するハイパースペクトルカメラ（以下、HSC）に着目し、災害廃棄物の種類と量を推定する検討を行った。その結果、HSC を用いることで、災害廃棄物の種類を分類できる可能性がある、従来の分類方法の代替法となり得る等の知見が得られた。

キーワード：ハイパースペクトルカメラ、災害廃棄物、種類、発生量、推計

### 1. はじめに

近年、世界中で災害をもたらす異常気象が毎年のように発生し、世界各地で被害が生じている。我が国においても、平成 30 年 7 月の豪雨、令和元年 10 月の東日本台風や令和 2 年 7 月の豪雨をはじめ令和 4 年 7 月・8 月の大雨および 8 月の台風第 8 号等、毎年のように豪雨災害による被害が生じている。加えて、我が国は、地震災害も多く、平成 7 年 1 月の阪神・淡路大震災や平成 23 年 3 月の東日本大震災、令和 4 年 3 月の福島県沖を震源とする地震が発生し、各地に甚大な被害をもたらしている。

このような、自然災害等が生じる度に、大量の災害廃棄物が発生している。災害発生時に、公衆衛生の悪化を軽減させ生活環境を保全するとともに、速やかな復旧・復興を実現するためには、災害対応の関係者が連携・協力し、災害廃棄物処理を適正かつ円滑・迅速に実施することが重要である。災害廃棄物処理については、環境省の災害廃棄物対策指針<sup>2)</sup>（以下、指針）や過去の検証等から様々な知見が蓄積されており、自治体が策定する災

害廃棄物処理計画などに反映されている。平成 30 年 3 月には指針が改訂され、平時と被災時の取組み、災害復旧・復興までの対応および災害廃棄物処理についての実用的な技術情報が示されている。

災害廃棄物の発生量は、指針（表-1）<sup>3)</sup>では、発災前や発災後のフェーズに応じて、各地域の被害想定調査等の結果をもとに災害情報に基づく被害情報（被害想定）に予め設定した発生量原単位を乗じて推計される。また、災害の種類やタイミングに応じて推計方法を選択、活用することの重要性も示されている。したがって、これら災害廃棄物の発生量の推計は、災害廃棄物処理を適正かつ円滑・迅速に進めるうえでの基礎的な資料になるといえる。

他方、仮置き場への搬入済量については「現地計測や重量測定により把握する」ことが指針に示されている（表-1 の下線部）。具体的な推計方法としては、現場で直接、選別、計量して組成を分類する方法や、災害廃棄物表面を撮影した RGB 画像の 1m×1m を代表領域として、この範囲を 0.1m のメッシュで区分し、メッシュご

\* 技術本部技術戦略部環境ソリューション室 \*\* 技術本部技術研究所環境研究グループ

\*\*\* ICT 統括センターイノベーション部

との種類を目視により分類する手法がある(図-1)4)。しかしながら、これらの方法には、重機や計量器等の手配、作業員の安全確保などが必要であり、目視作業者によって判断が異なる・判別できない、広範囲の分類を行うには効率的ではないといった問題もある。そのため、作業の効率化を目的にICT活用等により、さらに簡便かつ正確に発生量・要処理量を推計する手法の開発が望まれている<sup>5)</sup>。

そこで本研究では、可視光の波長領域外(900~1700nm)を撮像するHSCに着目し、災害廃棄物の種類と量を推定する検討を行ったので、報告する。

表-1 災害フェーズに応じた災害廃棄物発生量の推計

1. 発災前の災害廃棄物処理計画の策定又は改定時の推計
発災前に災害情報に基づく被害情報(被害想定)に予め設定した発生量原単位を乗じることで発生量を推計する。
2. 発災から2週間程度の間に行う災害廃棄物の発生量の推計
発災後に災害対策本部等から出される被害情報(建物被害棟数)に予め設定した発生量原単位を乗じることで発生量を推計する。
3. 災害廃棄物処理実行計画(発災から1か月程度)の策定時の推計
・ 片付けごみの排出が概ね終了している場合は、仮置場への片付けごみの搬入済量と今後建物の撤去により発生する量を合算することで推計する。
・ 仮置場への片付けごみの搬入済量は <b>現地計測により把握する</b> 。
・ 今後建物の撤去により発生する量は、被害情報や災証明に基づく建物撤去予定棟数に予め設定した原単位を乗じるにより推計する。
4. 災害廃棄物処理実行計画の見直し時の推計
・ 発生量推計の方法と発生量原単位は、今後建物の撤去により発生する量、仮置場への搬入済量および処理施設における処理済量を合算することで推計する。
・ 仮置場への搬入済量は <b>現地計測や重量測定により把握する</b> 。処理施設における処理済量は実績値を用いる。
・ 今後建物の撤去により発生する量は、残りの建物撤去予定棟数又は建物撤去申込棟数に予め設定した原単位又は処理実績に基づき見直した発生量原単位を乗じるにより推計する。

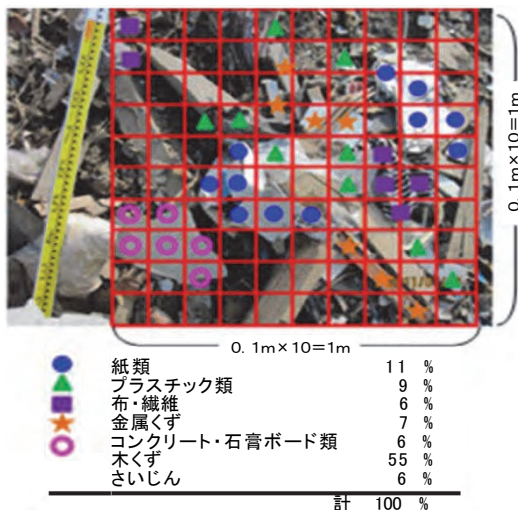


図-1 写真を用いた表面組成の分類

## 2. HSCの画像識別技術

一般的なカメラでは、入射光を光の三原色であるR(650nm波長)、G(550nm波長)、B(450nm波長)の3バンドに分解し、その重ね合わせによって可視光情報

(約380~750nm波長)を表現するが、HSCでは、より広範囲な波長領域を多くのバンド帯で分解することができる。例えば、本研究で用いたHSC(RESONON社製PIKANIR-320)では、図-2に示すように900~1700nmの波長領域の入射光を波長分解能4.9nmで164バンド帯に分解することができる。また、各チャンネルの波長強度を結ぶことで、スペクトルを表現することもできる。これらのスペクトル特性を分析することで、一般的なカメラでは困難な対象物の識別が可能となる。



HSC(PIKA NIR-320)の波長領域900~1700nm

図-2 HSCの波長領域

## 3. 実験概要

### 3.1 実験対象

災害廃棄物総量のうち、ある特定の組成の廃棄物量は、「総体積×組成(区分別割合)×みかけ比重」で算出される。

総体積の算出については、仮置場に集積された災害廃棄物の山の底面積をGPS測量等で、高さをレーザー距離計や水準測量等により測定して算出する方法や、トータルステーションなどの測量器機を使用して、集積された災害廃棄物の山の体積を求める既存手法等がある。みかけ比重は、廃棄物同士の空隙も含んだ体積で重量を除去して求められる値であり、体積の測定方法や測定時の状態(水分量、圧密度、他)によって値が変化し、内容物によって大きく変動するものであるが、過去の災害における実績値<sup>5)6)</sup>や、環境省が示した体積重量換算係数<sup>7)</sup>等によって推定される。

一方、災害廃棄物の組成(区分別割合)は災害ごとに異なり、発災後の仮置場での現地作業によって算定することから、HSCを導入することにより効率化と精度向上を図れる可能性があるかと判断した。

そこで本報では、HSCを用いて災害廃棄物の組成(区分別割合)を分類した、以下の3種の実験とその結果から得られた知見について報告する。

- i. 混合廃棄物の撮影実験
- ii. 不燃物および土砂の撮影実験
- iii. 集積された災害廃棄物の山の撮影実験

### 3.2 HSCで取得した画像の分類方法

災害廃棄物の組成(区分別割合)の算定に際し、HSCで取得した画像は汎用画像解析ソフトSpectron(RESONON社)を用いて、Spectral Angle Mapper(SAM:スペクトル角マッパー)で分類した。SAMでは、まずスペクトルがnバンド帯の場合、各素材のスペクトル情報を予め教師データ(正解データ)として機械学習させる。次に、学習させた各素材のスペクトルをn

次元空間にベクトル表示しておき、分類対象の計測されたターゲット・スペクトルをプロットしてスペクトル角が一番小さい素材ほど類似性が高いと判定して分類する。図-3に、3次元の場合のSAMの概念図を示す。

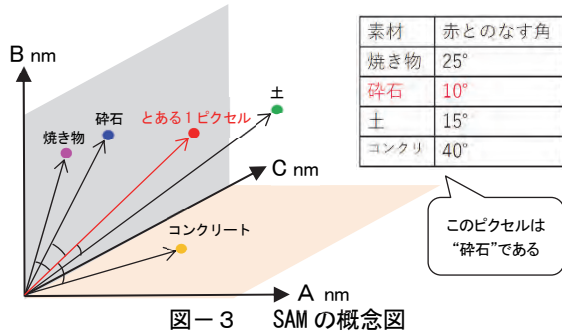


図-3 SAMの概念図

分類対象の教師画像（正解画像）は、RGB画像で撮影し、画像編集ソフトGimpに取り込み作成した。この教師画像をもとに、Gimpを用いて手作業で災害廃棄物の素材ごとの領域を区分し、領域ごとのピクセル数をカウントすることで、区分別割合を算出した。解析結果の性能評価については、ピクセル数を用いて、HSCで識別された領域と、実際の正しい領域の2つの重なり度合いを表すIoU（Intersection over Union、2つの領域の論理積を論理和で割った値）で行った。

HSCで取得した画像データは、Spectrononで読み込み、素材ごとの領域を画像上から目視で特定し、紐づけることで、その領域のスペクトル情報を機械学習させる。この学習作業をライブラリ作成という。領域の紐づけは、図-4の手法①～③に示すように、紺色が解析対象（ここではレンガ）、緑色が解析対象以外の領域といったように目視と手作業で行う。手法①では、解析対象以外の領域指定（緑色）に当たり分類対象素材とは無関係の地面や容器等を指定しているのに対し、手法②では、分類対象素材を指定し、手法③では、分類対象素材の領域を限なく指定している。実験に当たり、これら手法①～③による違いを予め検証した。その分類結果が図-4の下段の3つの画像であり、各手法のIoUを比較したものが表-2である。手法①はIoUが低く、手法②と③は、IoUに大きな差がなかったため、本報の実験では、作業効率を考慮し、手法②をライブラリ作成の方法とした。その他にも一度に複数の素材領域を指定する方法もあるが、素材一つずつの領域を指定し、解析を行う方が全34組中24組でIoUの平均値が良い値となったため、本手法を採用した。このとき、同素材の複数ピクセルを指定することになるが、これらは平均化（波長ごとに強度を平均）される。ただし、この領域指定の方法によっては更なる精度向上も見込めるため、今後の課題である。なお、Spectrononでは、プロジェクト単位でのデータ保存ができず、波長帯を抜き出しての解析もできないことから適用性に劣ることが判明したので、3.4節の実験から別の画像解析ソフトperClass Miraに変更している。

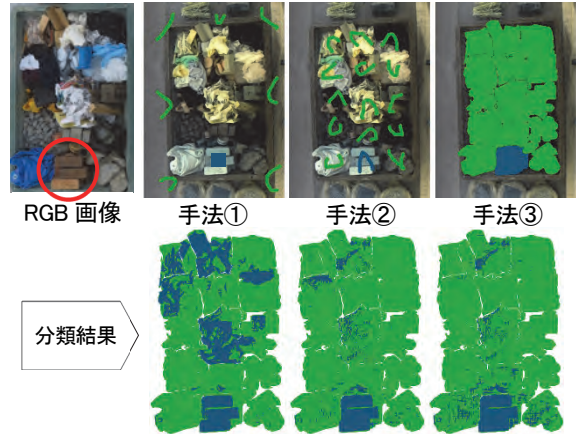


図-4 ライブラリ作成の例（レンガ）

表-2 ライブラリ作成方法によるIoU比較表（単位%）

手法	布	コナリ	金属	砕石	レンガ	褐色ガラス	透明ガラス	木材	紙	ビニール	プラ	平均
①	26.1	9.4	9.1	13.3	18.8	6.8	4.4	16.7	27.3	32.3	29.2	17.6
②	71.6	37.3	19.5	25.7	49.5	14.7	13.4	10.8	63.4	56.8	37.2	36.4
③	71.2	32.9	20.3	40.5	47.7	15.4	12.5	22.6	63.5	59.4	36.8	38.4

### 3.3 混合廃棄物の撮影実験方法

HSCで混合廃棄物の識別の可能性を検証するために、発災後の仮置場に集積された混合廃棄物を想定し、撮影実験を行った。ここでは、土砂を含まない可燃物の模擬災害廃棄物を3m<sup>3</sup>ベッセル内に投入・混合し、被写体を作製した後、撮影を行った。表-3に使用した模擬災害廃棄物を示す。撮影は、HSCの準備時間や被写体の変形、飛散防止を考慮し、ベッセル内に残置したまま行った。また、次段階の実験ではHSCをUAVに搭載する計画があったため、表-4に示す撮影条件のもと直上の高さ20mから被写体の撮影を行った。被写体とHSCによる撮影状況を図-5に示す。図-6に、一例として砕石の任意の1ピクセル上のスペクトル強度を示したが、取得したスペクトルは、いずれの素材においても波長領域900～1700nmのうち、940nm近傍や1100nm近傍、1400nm近傍は大気中の水蒸気等による吸収が大きく、解析への使用に適さない。そこで、1160～1310nmあるいは1500～1700nmのスペクトル情報を取得し、1160～1310nmの場合は30のバンド帯、1500～1700nmの場合は40のバンド帯に分解してSpectrononを用いて区分別割合を算出した。表-5に各実験ケースを示す。

表-3 使用材料

区分	種類	備考
可燃物	ビニール	45L枚、厚0.03mmのポリエチレン製の業務用ゴミ袋等
	プラスチック	ポリエチレン製バケツを5cm角程度に裁断したもの等
	紙	古新聞
	布	綿製の古着をリサイクルして販売されているガス
	木材	長さ50～100mm程度の細長い形状で合板用にリサイクルするために破碎されたもの等

表-4 撮影条件

HSC	RESONON社 PIKA NIR-320
空間チャンネル数	320
1pixelのセンサ幅	30mm
レンズ焦点距離	25mm
撮影距離	20m
地上解像度(GSD)	7.5cm/pixel



図-5 被写体とHSCによる撮影状況

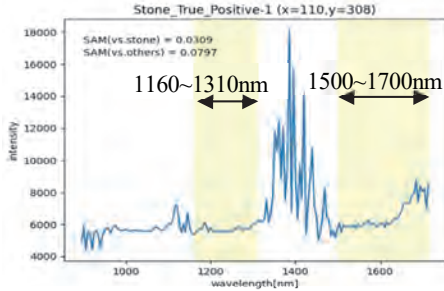


図-6 スペクトル情報の取得領域

表-5 混合廃棄物の撮影実験ケース

No	使用波長帯	各実験ケースの概要
1	1500~1700	波長帯 1500~1700nm を使用
2	1160~1310	波長帯 1160~1310nm を使用
3	1500~1700	No.1 の再現性を確認
4	1500~1700	混合前の撮影画像をもとにライブラリ作成

### 3.4 不燃物および土砂の撮影実験方法

HSC で不燃物および土砂の混合廃棄物の識別の可能性を検証するために、表-6に示す撮影条件で被写体の直上の高さ2mから撮影を行った。前述の可燃物の実験において、教師データに含まれる木材の面積割合が少なく、木材の誤判定が全体的にIoUの低下を生み出したことが考えられた。また、教師画像の領域区分、ライブラリ作成時のタグ付け作業を簡略化し、人為的な誤認識を抑制するため、被写体は、各材料の体積や表面積を一定程度に保てるように、内寸 L950mm×W600mm×H187mm の容器の中に、格子状(L190mm×W200mm×H187mm)の木枠で区分し、各格子内に表-7に示す材料を入れた。実験ケースによっては各材料を混合し、被写体とした。表-8、図-7に各実験ケースの被写体の状態を示す。波長領域は、900~1700nmのうち、1160~1310nm および 1500~1700nm の両区間のスペクトル情報を取得し、汎用画像解析ソフト perClass Mira を用いて分類解析を行った。なお、perClass Mira での分類も Spectronon と同様、スペクトル情報を基準とした類似性に基づいて行ったが、領域の指定時に一定数以上のピクセルの指定が必要という条件が Spectronon と異なる。

表-6 撮影条件

HSC	RESONON 社 PIKA NIR-320
空間チャンネル数	320
1pixel のセンサ幅	30 mm
レンズ焦点距離	25 mm
撮影距離	2 m
地上解像度 (GSD)	0.75 cm/pixel

表-7 使用材料

区分	種類	備考
不燃物	砕石	粒径 30~40mm のバザン材
	金属くず	異形棒鋼 SD345 等
	コンクリート	強度試験用供試体 φ100×200mm を破砕したもの等
	ガラス	透明 450ml カップル瓶、茶褐色スリェ瓶等
土砂	レンガ	約 150×50×50 のレンガ
	真砂土	茨城県産の真砂土

表-8 不燃物および土砂の撮影実験ケース

case	被写体の概要
2-1	ガラス以外の5材料について、区分けして配置、木枠あり
3-1	ガラスと土を含めた6材料について、混合したもの、水分なし
3-2	case3-1を再度区分けしたもの、木枠あり
3-3	case3-2の木枠なし



図-7 各実験ケースの模擬災害廃棄物の状態

### 3.5 集積された災害廃棄物の山の撮影実験方法

第1章で紹介した分類手法(図-8)(以下、従来法)とHSCによる分類(以下、HSC法)の分類精度を比較した。模擬災害廃棄物は、東日本大震災の実績<sup>9)</sup>をもとに、種類別の質量割合(表-9)で作成し、混合後に堆積させ、日照条件が異なる側方6方向からHSCで撮影(図-9)した。波長領域は、1160~1310nm および 1500~1700nm とし、画像解析は perClass Mira を用いた。

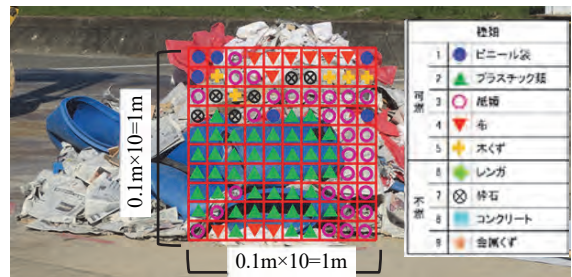


図-8 目測による分類

表-9 使用材料

災害廃棄物の種類	質量 (kg)	質量割合 (%)
1	9	24
2	26	
3	50	
4	13	
5	57	
6	24	76
7	330	
8	50	
9	77	

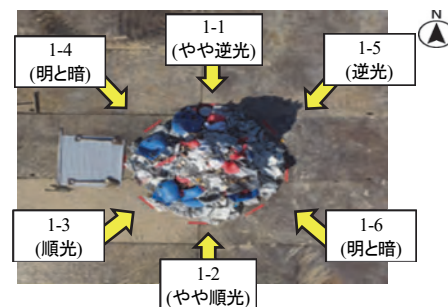


図-9 側方6方向からの撮影状況

4. 実験結果

4.1 混合廃棄物の撮影実験

実験ケース No.1 と No.2 は使用波長帯が異なり、No.1 は 1500~1700nm、No.2 は 1160~1310nm を使用している。No.3 と No.4 は No.1 と同じ波長帯 1500~1700nm であるが、No.3 は No.1 と No.2 と同様、撮影した画像でライブラリを作成し、No.4 は被写体を混合する前に撮影した素材の画像をもとにライブラリ作成したものを画像解析に適用している。実験ケース No. ごとの種類別の IoU を表-10 に、種類別の区分別割合（表面積割合）を図-10 に示す。IoU の結果では、No.1 の IoU 平均値が No.2 よりも 3 ポイント高く、区分別割合でも No.1 の方が No.2 よりも布を除き、教師データに近い割合であった。No.1 と No.3 では、概ね再現性が確認できているものの、No.3 と No.4 では、いずれの素材も No.3 の IoU が高く、区分別割合でも No.4 は教師データと比べ、ビニールや紙で 30 ポイント近く乖離し、同じ素材であってもライブラリ作成のタイミングや被写体形状、日照条件等が異なると IoU に差が生じることが示唆された。

表-10 実験ケース No. ごとの種類別の IoU (単位%)

No	波長帯	IoU					
		ビニール	プラ	紙	布	木材	平均
1	1500~1700	35.7	67.3	32.7	23.0	2.0	32.1
2	1160~1310	28.7	54.2	31.3	28.7	2.4	29.1
3	1500~1700	35.6	67.1	38.7	22.9	2.0	33.3
4	1500~1700	13.2	44.1	5.7	22.3	0.3	17.1

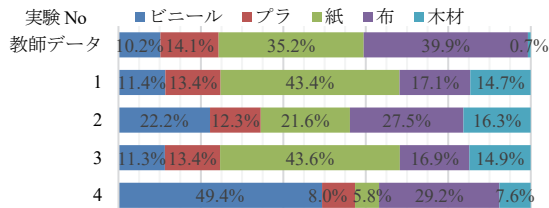


図-10 実験ケース No. ごとの種類別の区分別割合

4.2 不燃物および土砂の小規模撮影実験

実験の結果、不燃物および土砂は、総じて IoU が低い傾向にあった。面積比では、各素材の面積割合をある程度一定に保った条件下の case2-1 (表-11) の土砂、金属およびコンクリートは、正解面積比との差が 10 ポイント以下であるが IoU が低く、面積比 RMSE (二乗平均平方根誤差) も Case3-1~3-3 (表-12) と比べて最も高く、対象物でない領域も対象物と誤認識しているのが分かる。Case3-1~3-3 も同様に全体的に IoU が低く、前述の可燃物実験の IoU 平均値と比べても IoU は低い傾向にあった。個別の素材で見ると、レンガがいずれのケースも IoU が高く、金属やガラスが低い傾向にあった。また、教師データの面積割合が小さいと、IoU 低下に影響を及ぼすことが考えられたが、正解面積比が小さい case2-1 や case3-2、case3-3 のレンガの IoU が他の素材より高くなったことからすると、IoU 低下の原因になるとは言い難い結果であった。

表-11 不燃物および土砂の分類結果 (case2-1)

項目	レンガ	砕石	土砂	金属	コンクリート	平均
2-1 正解 px	11,846	13,310	13,161	11,282	10,012	-
正解面積比	19.9%	22.3%	22.1%	18.9%	16.8%	面積比
HSC px	6,682	37,744	31,563	20,576	16,004	RMSE
HSC 面積比	5.9%	33.5%	28.0%	18.3%	14.2%	8.5%
IoU	51.1%	16.0%	36.8%	6.2%	13.6%	24.7%

表-12 不燃物および土砂の分類結果 (case3-1~3-3)

項目	レンガ	砕石	土砂	金属	コンクリート	ガラス1	ガラス2	平均
3-1 正解 px	12,521	2,757	12,495	11,083	5,298	19,464	3,633	-
正解面積比	18.6%	4.1%	18.6%	16.5%	7.9%	28.9%	5.4%	面積比
HSC px	13,168	11,792	15,905	29,939	36,088	38,148	14,377	RMSE
HSC 面積比	8.3%	7.4%	10.0%	18.8%	22.6%	23.9%	9.0%	8.1%
IoU	48.0%	10.6%	18.6%	9.3%	9.1%	30.9%	18.2%	20.7%
3-2 正解 px	6,236	11,215	10,406	7,580	9,182	7,589	638	-
正解面積比	11.8%	21.2%	19.7%	14.3%	17.4%	14.4%	1.2%	面積比
HSC px	1,824	24,757	20,907	9,265	14,579	10,283	8,074	RMSE
HSC 面積比	2.0%	27.6%	23.3%	10.3%	16.3%	11.5%	9.0%	5.8%
IoU	26.0%	22.5%	23.7%	14.4%	25.5%	16.3%	4.7%	19.0%
3-3 正解 px	6,905	16,151	9,966	11,351	9,090	8,629	634	-
正解面積比	11.0%	25.7%	15.9%	18.1%	14.5%	13.8%	1.0%	面積比
HSC px	6,126	28,188	19,579	10,914	19,814	7,778	6,348	RMSE
HSC 面積比	6.2%	28.5%	19.8%	11.1%	20.1%	7.9%	6.4%	5.2%
IoU	39.4%	23.5%	23.2%	10.1%	22.9%	15.6%	6.6%	20.2%

※ガラス1は茶褐色ガラス、ガラス2は透明ガラス

4.3 集積された災害廃棄物の山の撮影実験

従来法と HSC 法の表面積割合を比較した結果、両者は同等であった (表-13)。従来法は作業者が人為的に判別するため、例えば、Case1-2 の従来法には、金属 1.6%を 0.0%、コンクリート 0.0%を 2.0%のように、「ある」ものが「ない」、「ない」ものが「ある」といった人的ミスが所々あったのに対し、HSC 法は見落としがない結果であった。各ケースの画像解析結果を表-14 に示す。順光下の Case1-3 の面積比 RMSE が 4.5%と最も低い値であるが、IoU 平均値で見ると Case1-2 の 46.0%の方が若干高いため、Case1-3 は対象物とは異なる領域を判定していると考えられる。また、全体的に逆光や影があると識別精度が低下する傾向であった。Case1-3 の表-13 従来法と HSC 法の表面積割合の比較 (単位%)

種類	Case1-1 (やや逆光)			Case1-2 (やや順光)			Case1-3 (順光)		
	教師	従来法	HSC	教師	従来法	HSC	教師	従来法	HSC
1 ビニール	11.6	14.0	9.3	4.8	8.0	3.8	7.3	6.0	5.1
2 プラスチック	25.4	13.0	11.2	30.0	19.0	20.7	32.7	43.0	25.9
3 紙	45.2	30.0	22.0	46.8	54.0	36.9	39.3	30.0	35.1
4 布	8.8	21.0	5.8	8.7	4.0	5.1	11.8	10.0	7.5
5 木材	3.8	4.0	18.9	3.4	7.0	11.6	3.5	5.0	9.4
6 レンガ	0.4	0.0	4.0	0.1	0.0	3.9	0.7	0.0	1.3
7 砕石	1.7	3.0	8.7	4.5	6.0	10.6	3.5	6.0	9.3
8 コンクリート	2.7	6.0	10.9	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9 金属	0.4	0.0	9.3	1.6	0.0	7.4	1.3	0.0	6.5
10 不明	-	9.0	0.0	-	0.0	0.0	-	0.0	0.0
計	100.0	100	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

種類	Case1-4 (明と暗)			Case1-5 (逆光)			Case1-6 (明と暗)		
	教師	従来法	HSC	教師	従来法	HSC	教師	従来法	HSC
1 ビニール	9.6	10.0	6.8	12.7	12.0	9.7	6.6	7.0	4.3
2 プラスチック	27.7	22.0	17.0	13.5	10.0	9.4	21.1	17.0	14.4
3 紙	46.4	41.0	30.0	58.1	45.0	30.7	56.4	50.0	38.9
4 布	9.0	10.0	8.8	5.8	4.0	8.3	6.1	4.0	10.4
5 木材	3.1	6.0	6.9	4.2	0.0	12.9	3.6	3.0	10.5
6 レンガ	0.4	1.0	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7 砕石	2.1	4.0	8.3	3.2	0.0	18.3	3.8	2.0	14.8
8 コンクリート	1.5	1.0	13.5	1.8	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0
9 金属	0.3	0.0	3.3	0.9	0.0	5.1	2.5	0.0	6.8
10 不明	-	5.0	0.0	-	29.0	0.0	-	17.0	0.0
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

RGB 画像を図-11、プラスチック類のライブラリ作成画像を図-12、解析画像のうち、IoU が 91.3%と最も高いプラスチック類を図-13、67.8%の紙類を図-14、6.3%と最も低い金属を図-15 に示す。各図とも紺色が解析対象、緑色が解析対象以外の領域である。

表-14 各材料の画像解析結果

Case	ビニール	プラ	紙	布	木材	レガ	砕石	コンクリート	金属	平均
Case 1-1	11,255	24,710	43,947	8,576	3,669	423	1,602	2,619	342	—
正解 px	11.6%	25.4%	45.2%	8.8%	3.8%	0.4%	1.6%	2.7%	0.4%	RMSE
HSC 面積比	9.3%	11.2%	21.9%	5.8%	18.9%	4.0%	8.7%	10.9%	9.3%	11.5%
IoU	42.3%	88.4%	63.9%	51.5%	6.6%	3.3%	4.4%	8.1%	1.3%	30.0%
Case 1-2	4,616	28,723	44,748	8,324	3,233	137	4,277	—	1,566	—
正解 px	4.8%	30.0%	46.8%	8.7%	3.4%	0.1%	4.5%	—	1.6%	RMSE
HSC 面積比	3.8%	20.7%	36.9%	5.0%	11.6%	3.9%	10.6%	—	7.4%	6.3%
IoU	62.7%	93.0%	78.0%	84.6%	16.5%	2.5%	20.6%	—	10.2%	46.0%
Case 1-3	7,055	31,626	37,999	11,360	3,346	660	3,416	—	1,210	—
正解 px	7.3%	32.7%	39.3%	11.8%	3.5%	0.7%	3.5%	—	1.3%	RMSE
HSC 面積比	5.1%	25.9%	35.1%	7.5%	9.4%	1.3%	9.3%	—	6.5%	4.5%
IoU	50.5%	91.3%	67.8%	61.7%	20.2%	33.3%	20.1%	—	6.3%	43.9%
Case 1-4	9,017	25,910	43,415	8,394	2,893	384	1,952	1,397	296	—
正解 px	9.6%	27.7%	46.4%	9.0%	3.1%	0.4%	2.1%	1.5%	0.3%	RMSE
HSC 面積比	6.8%	17.0%	30.0%	8.8%	6.9%	5.4%	8.3%	13.5%	3.3%	8.2%
IoU	40.3%	80.2%	68.0%	39.9%	11.4%	3.6%	8.7%	5.4%	2.7%	28.9%
Case 1-5	12,045	12,808	55,196	5,497	3,960	—	3,033	1,664	847	—
正解 px	12.7%	13.5%	58.1%	5.8%	4.2%	—	3.2%	1.8%	0.9%	RMSE
HSC 面積比	9.7%	9.4%	30.7%	8.3%	12.9%	—	18.3%	5.6%	5.1%	11.1%
IoU	39.2%	67.4%	55.5%	33.0%	10.4%	—	7.6%	9.3%	7.9%	28.8%
Case 1-6	6,354	20,417	54,645	5,941	3,471	—	3,672	—	2,426	—
正解 px	6.6%	21.1%	56.4%	6.1%	3.6%	—	3.8%	—	2.5%	RMSE
HSC 面積比	4.3%	14.4%	38.9%	10.4%	10.5%	—	14.8%	—	6.8%	8.9%
IoU	54.1%	78.1%	73.7%	29.0%	15.2%	—	12.3%	—	10.2%	38.9%



図-11 Case1-3 RGB 画像

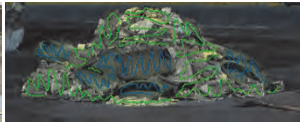


図-12 ライブラリ (Case1-3 プラスチック)



図-13 Case1-3 プラスチック (左:教師、右:HSC)

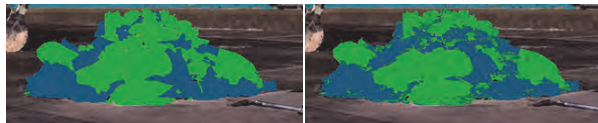


図-14 Case1-3 紙 (左:教師、右:HSC)



図-15 Case1-3 金属 (左:教師、右:HSC)

5. 考察

IoU は一辺 9cm の正方形が縦横方向に 1/9 (1cm) ズレただけでも、 $64 \div 98 = 0.65$  になる中、プラスチックは概ね 60%以上の IoU が得られた。また、災害廃棄物量は、IoU が低くとも面積比がある程度合っていれば、体

積とみかけ比重を乗じることで推定できるため、個別の素材や適用場面によっては分類できる可能性がある。しかしながら、HSC による分類は、土砂の付着や日照、表面の乾燥状態等により、スペクトル特性が大きく異なるため、特に日照条件が異なると事前のライブラリ作成が難しく識別に影響する。画像の分類手法も、例えば、SAM はベクトルの角度をみており、強度は考慮されていないため、反射強度が全体的に異なっても、スペクトルの形状 (=SAM の角度) が似ていれば、類似性が高いと判定される。個別の素材でみても、不均一な素材や、金属などの素材は識別が難しいこと等が明らかとなり、実際の災害廃棄物はさらに多種多様であることを鑑みると、分類手法や使用波長帯を素材ごとに設定する、撮影時に光源を一定に保つための工夫、設備の付加等が必要になると考える。これらの点は、今後の課題である。

6. まとめ

HSC による災害廃棄物の種類の分類に関して、得られた知見を以下にまとめる。

- i. HSC を用いて、種類が分類できる可能性がある
- ii. HSC による分類は、適用場面を限定する
- iii. HSC 法は、従来法の代替となり得る

実用化に向けては、更なる精度向上と画像データや経験の蓄積が必要である。

【参考文献】

- 1) 多島 良、平山修久、高田光康、宗 清生、大迫政浩、「災害対応マネジメントの観点からみた災害廃棄物発生量推計方法の現状と展望」、廃棄物資源循環学会論文誌 Vol.29、pp.104-118、2018
- 2) 環境省環境再生・資源循環局災害廃棄物対策室、「災害廃棄物対策指針 (改定版)」、2018
- 3) 環境省環境再生・資源循環局災害廃棄物対策室、「災害廃棄物対策指針 (改定版)」、技 14-2 災害廃棄物等の発生量の推計方法、2018
- 4) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部、「東日本大震災等の経験に基づく災害廃棄物処理の技術的事項に関する報告書」、pp.5-14、2017
- 5) 高月 紘、酒井伸一、水谷 聡、「災害と廃棄物性状—災害廃棄物の発生原単位と一般廃棄物組成の変化—」、廃棄物学会誌、Vol.6、No.5、pp.351-359、1995
- 6) 宮城県環境生活部震災廃棄物対策課、「災害廃棄物処理業務の記録」、p.249、2014
- 7) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部産業廃棄物課長、「産業廃棄物管理票に関する報告書および電子 manifests の普及について (通知)」、環産産 061227006 号、2006
- 8) 環境省災害廃棄物対策情報サイト、「災害廃棄物等の発生量の推計 資料 2」、2013



# 環境変化に伴う掘削岩からの 自然由来砒素溶出に関する基礎的研究

## Basic Research on Arsenic Leaching from Naturally Contaminated Rocks Attributable to Environmental Change

鈴木奨士\* 清水祐也\*\* 白石祐彰\* 倉品 悠\*\*\*

### 要 旨

トンネル工事等で発生する、砒素を含有する掘削岩は拡散防止対策が施された処分場等に埋め立てられる。拡散防止対策の設計には、掘削直後の砒素溶出性が考慮される。しかしながら、還元環境に曝されるなど、掘削岩が対策後に受ける環境変化は考慮されていないのが現状である。本研究では、埋め立て後の環境変化に伴う掘削岩からの砒素溶出性を把握することを目的に、処分場内の環境モニタリングの結果をもとにして、大気曝露酸化および還元剤を使用した酸化還元電位、周辺酸素濃度による硫化砒物の酸化遅延および温度変化の影響を考慮した各種環境模擬試験を実施した。その結果、砒素溶出濃度は酸化還元電位、養生素濃度および温度の影響を強く受け、対策設計には、環境変化による砒素溶出性を考慮する必要性が示唆された。

キーワード：掘削岩、砒素溶出、酸化還元電位、周辺酸素濃度、温度変化

### 1. まえがき

山岳トンネル工事で発生する大量の掘削岩は、人体に有害な重金属等を潜在的に含有している場合がある。半金属の一つである砒素（以下、As）は岩中の硫化砒物に含まれて存在するケースがあり、多くの発生事例が報告されている<sup>1)</sup>。掘削岩から土壌溶出量基準値を超過して重金属等が溶出すると想定される場合には、周辺環境に悪影響を及ぼさないように遮水工封じ込め、不溶化処理、吸着層工法などの拡散防止対策が施される<sup>2)</sup>。

掘削直後から拡散防止対策の埋め立て後において、掘削岩は溶媒の酸化還元電位（以下、Eh）や温度、岩周辺の酸素濃度などの環境変化に曝される。掘削後の大気曝露では、掘削岩中の硫化砒物の酸化分解により、硫化砒物に含有していた As が溶出される可能性がある。また、還元環境下では、還元溶解により As が溶出される可能性がある。しかしながら、環境変化に伴う As 溶出変化に関する知見は少なく、加えて、拡散防止対策後の掘削岩が受ける環境変化をモニタリングした報告も少ないため<sup>3)</sup>、対策後の実態的な環境変化および、その環境変化に伴う重金属等溶出がどの程度変化するのか不明である。環境変化を考慮した重金属等溶出性の把握は、合理的な拡散防止対策の設計に寄与すると考えられる。

そこで本研究では、拡散防止対策後の重金属等溶出性を把握するため、その影響因子となる、Eh、温度、酸素濃度について、掘削岩が埋め立てられた処分場内でモニタリングを実施した。また、処分場から As を含有する掘削岩をサンプリングし、上記モニタリング結果に基づく環境変化（Eh、温度、酸素濃度）を考慮したバッチ試験および不飽和カラム試験を行い、その溶出濃度の変化を確認した。

### 2. 処分場内のモニタリング

#### 2.1 処分場内環境の測定

モニタリングした処分場の外景およびボーリング孔内のセンサー設置位置を図-1に示す。処分場には約 18 万 m<sup>3</sup> の掘削岩がベントナイト混合土で封じ込められている。処分場内の 1ヶ所にボーリングを実施し、ボーリング孔の深度 2.0、6.0、10.0 および 14.0 m に温度センサー（ATMOS-12、メーター社）、酸素濃度センサー（OXYMAN、泰榮エンジニアリング社）をそれぞれ設置した。測定空間を確保するため、各センサー上下 15 cm 程度に珪砂 3 号 A を充填し、各深度のセンサー間には、孔内での通気・通水を防止するため、粒径 0.09 mm 以下の含有量が 80%以上の珪砂粉を充填した。

\*技術本部技術研究所環境研究グループ \*\*技術本部技術戦略部環境ソリューション室

\*\*\*技術本部技術戦略部知的財産管理室

図-2に浸出水排水管およびセンサーの位置を示す。処分場内の浸出水は約80mの浸出水排水管を通り、水槽へ排出される。その際に、浸出水をポリ容器で受け、ポリ容器内に水温やEhを測定するマルチ水質センサー(HI9829、ハンナインストルメント社)を設置した。なお、浸出水は中和処理を行い、As濃度が基準値以下であることを確認し放流している。酸素濃度および温度は2021年11月、水温およびEhは2022年3月からモニタリングを開始した。本報では2023年2月までの結果を報告する。

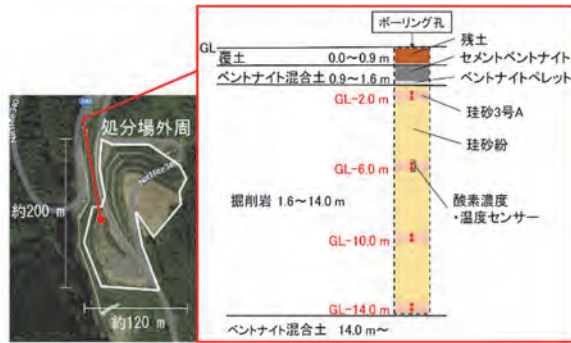


図-1 処分場外景とボーリング孔内センサー設置位置

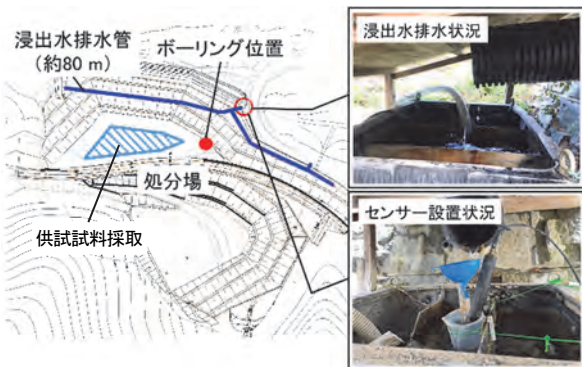


図-2 浸出水排水管とセンサーの位置

## 2.2 処分場内環境の変動

図-3に処分場内の深度別における温度および酸素濃度の経時変化を示す。温度は処分場内の気相、液相、固相で構成される地中の温度を指し、酸素濃度は処分場内の気相中の酸素濃度を指す。処分場内の温度変化は、深度が小さいほど変動幅が大きくなり、地表に最も近いGL-2.0mでは、約5~18°Cの範囲で変動し、夏季と冬季で約13°Cの差があった。また、GL-6.0mでは約10~15°Cの間で推移し、GL-10.0mおよびGL-14.0mでは12°C前後を推移した。GL-2.0mおよびGL-6.0mの温度は外気温のピークから約2ヶ月、約4ヶ月それぞれ遅れてピークに達した。なお、これは地表面と地中の温度差で生じる熱移動が影響していると考えられ、GL-10.0mより深い位置では外気の温度変化の影響は少なかった。

酸素濃度は、夏季に低く冬季に高い傾向であった。深度により酸素濃度の増減幅は異なり、最大の増減幅は

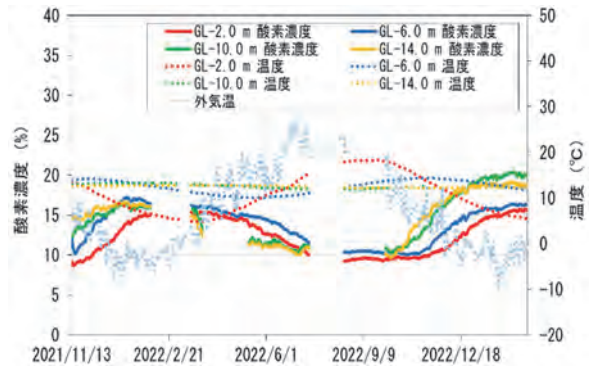


図-3 処分場内の温度および酸素濃度の経時変化

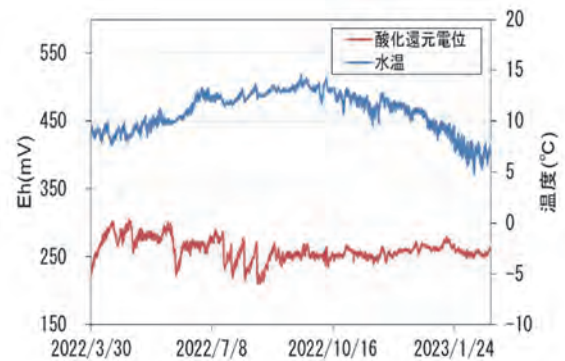


図-4 処分場内の水温およびEhの経時変化

GL-10.0mの約10%であった。浸出水排水管が処分場底面部に設置され、外部と繋がっているため、酸素は処分場の底面部から浅部への供給が予想される。夏季では、処分場浅部の温度上昇により好気性微生物の活性が促進され、酸素消費量が增大する。したがって、処分場底面部から供給された酸素を、活性化された好気性微生物が消費したため、地中の深さによらず酸素濃度が約10%と低かったと推察した。一方冬季では、処分場浅部の温度低下に伴い微生物活性が低減し、酸素消費量は減少すると予想される。そのため、深部では酸素濃度が高く、浅部での酸素濃度は深部よりも低かったが夏季よりは高くなったと推察した。

図-4に処分場内からの浸出水における水温およびEhの経時変化を示す。浸出水の水温は約5~15°Cを推移し、平均値は10.8°Cであった。一方、Ehは季節に関係なく、約+200~+300mVを推移し、平均値は約+260mVであった。後述するが、高純度精製水(以下、精製水)のEhが約+460mVであったことから、浸出水は精製水より還元力が強いことが示された。センサーは浸出水排水管の出口に設置されているため(図-2)、処分場内では、Ehが+200mVよりも低くなっており、より強い還元環境にある箇所もあると推察された。

## 3. 処分場内環境模擬試験

### 3.1 供試試料および試料調製

本研究で供試した掘削岩は、覆土完了前の処分場からバックホウで掘り起こし採取した。採取箇所は、**図-2**の水色のハッチングで示した。掘削岩は頁岩と砂岩で構成され、採取試料のほとんどは、白色の石英または方解石の脈を含んでいた。また、電子線マイクロアナライザー（EPMA）を用いて、頁岩中の磁硫鉄鉱（FeS）および磁硫鉄鉱中に As が含まれていることを確認した。

次に、掘削直後の状態を模擬するため、岩塊の表面約 1 cm を切り取り、酸化が進んでいないと思われる内部試料を得た。この内部試料をジョークラッシャーで粉砕し、粒径を 2 mm 以下および 2~10 mm に篩分けした。

### 3.2 実験方法

#### a. 模擬酸化還元条件によるバッチ試験

岩石は、掘削後の仮置き時に大気曝露され、酸化環境となるが、その後、処分場に埋め立てられると還元環境に変わる。この過程を模擬するため、前節で調製した掘削岩試料に対して大気曝露養生を行った後に、還元剤による溶出試験を行った。2 mm 以下に篩分けした試料をバットに入れ、大気曝露養生 0、14、31、60、120 日目で試料を約 30.0 g ポリ瓶に入れ、還元剤溶液を 300 mL 添加した。本研究では、還元剤としてギ酸 Na、アスコルビン酸 Na を使用した。**表-1**に抽出溶媒種および濃度等を示す。処分場の浸出水排水管出口付近の Eh は約 +200~+300 mV であった。しかしながら、外気の影響を受けにくい処分場内の掘削岩は、より還元環境にある可能性があるため、抽出液の Eh が約 -50~+300 mV になるよう溶媒濃度を設定した。各溶媒を添加後、200 rpm で 3 時間振とうし、その後 2200 G (5000 rpm) で 10 分間遠心分離をした。上澄み液を 0.45 μm メンブレンフィルター（以下、0.45 μmMF）でろ過し、抽出液を得た。抽出液の pH および ORP（比較電極（3.3 mol/L-KCl-AgCl）に対して測定された酸化還元電位）をマルチ水質計（品番 D-74、HORIBA 社）、As 濃度を誘導結合プラズマ質量分析（以下、ICP-MS）、鉄（以下、Fe）濃度および硫酸イオン（以下、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>）濃度をイオンクロマトグラフィー（以下、IC）でそれぞれ測定した。式(1)より、標準水素電極での酸化還元電位（Eh）に換算できる。ORP 測定時の検液の温度は 20°C であったため、補正値の +210 mV を足し、Eh に換算した。

表-1 バッチ試験の抽出溶媒

抽出溶媒種	濃度 (mol/L)	溶液 Eh (mV)	表記
精製水	-	460.0	精製水
ギ酸 Na	0.05	316.3	ギ酸-0.05
	0.1	265.8	ギ酸-0.1
	0.2	222.2	ギ酸-0.2
アスコルビン酸 Na	0.05	86.7	ア酸-0.05
	0.1	59.7	ア酸-0.1
	0.2	29.7	ア酸-0.2

$$Eh = ORP + 206 - 0.7 (t - 25) \quad ; t = 0 \sim 60^\circ C \quad (1)$$

#### b. 異なる酸素濃度養生でのバッチ試験

処分場内の酸素濃度は深度により異なり、GL-2.0 m では約 10~15%、GL-10.0 m では約 10~20% であった（**図-3**）。大気中の酸素濃度（約 20%）と比較して低い酸素濃度は頁岩中の磁硫鉄鉱の酸化を遅らせ、また、試料の含水状態により磁硫鉄鉱の酸化速度は異なると考えた。そこで、乾燥試料および湿潤試料において、酸素濃度別に頁岩を養生し、所定の日数で溶出試験を行った。

湿潤試料として、2 mm 以下に篩分けした試料に含水率約 10% となるように精製水を添加した。密閉容器に乾燥試料と湿潤試料を分けて入れ、酸素窒素混合ガスを注入して容器内の酸素濃度を調整した。既往の文献では、覆土盛土内の酸素濃度は 0~20% であったこと<sup>3)</sup>、また、拡散防止対策の規模や形状、埋め立て材料により、対策後の掘削岩が受ける酸素濃度は異なることから、本研究では酸素濃度を 0、5、10、15、20% で実施した。養生 0、34、54 日目で試料を約 20.0 g ポリ瓶に入れ、精製水を 200 mL 添加し、200 rpm で 6 時間振とうした。振とう後、2200 G (5000 rpm) で 10 分間遠心分離した。上澄み液を 0.45 μmMF でろ過し、抽出液を得た。抽出液中の As 濃度を ICP-MS、Fe 濃度および SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度を IC でそれぞれ測定した。

#### c. 不飽和カラム試験

処分場内の温度変化に伴う As 溶出挙動を検証するため、室温を 10~35°C に変化させた不飽和カラム試験を実施した。**表-2**に不飽和カラム試験の運用条件を示す。内径 106 mm のアクリル製カラムに粒径 2 mm 以下および 2~10 mm の試料を 1:0、2:1、1:2、0:1 で混合し、高さ 70 cm となるように充填した。各ケースの試料重量は、Case-1~4 でそれぞれ 8.6、9.4、9.1、7.7 kg であった。また、カラム下部から 20 cm のところに水分センサー（品番 ZL-6、メータージャパン社）を設置し、カラム内の単位体積含水量を測定した。室温 20°C において、水道水を純水器でろ過した純水をカラム上部から 85 mL/hr の流量で散水した。カラム試験は 2022 年 8 月 3 日に開始し、カラム下部からの浸出液を定期的に回収して As 濃度を ICP-MS で測定した。室温については、As 溶出が一定の推移に収まった後、2023 年 1 月 11 日に 35°C に上げ、1 月 16 日に 20°C に戻した。その後、1 月 20 日に 10°C に下げ、1 月 26 日に再び 20°C に戻した。

表-2 不飽和カラム試験の運用条件

	混合比 (<2 mm : 2~10 mm)	試料重量 (kg)	散水量 (mL/hr)
Case-1	1:0	8.6	85
Case-2	2:1	9.4	85
Case-3	1:2	9.1	85
Case-4	0:1	7.7	85

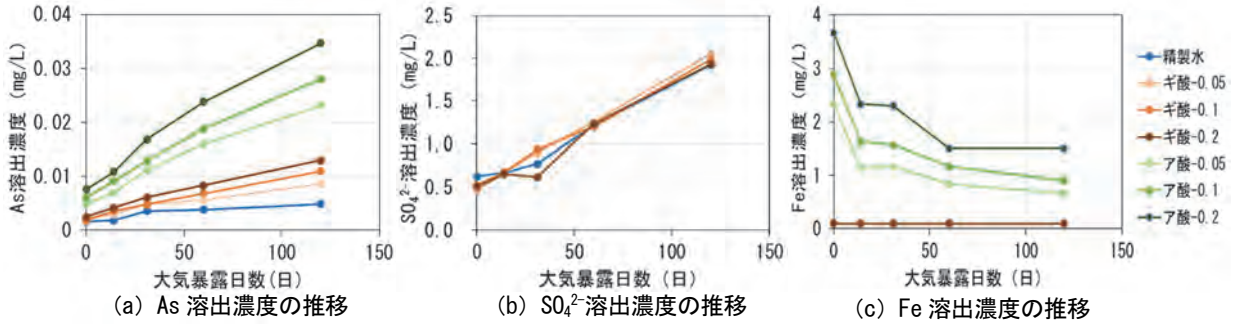


図-5 バッチ試験における大気曝露に伴う各種溶出濃度の推移

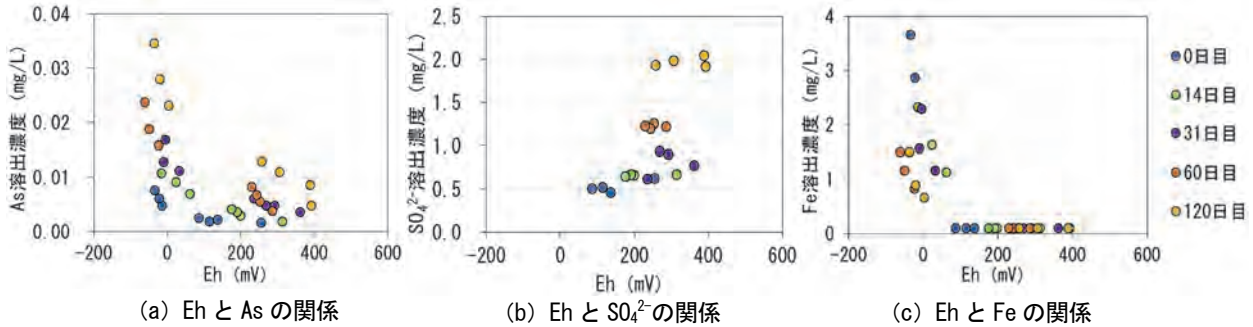


図-6 バッチ試験における抽出液中の Eh と各種溶出濃度との関係

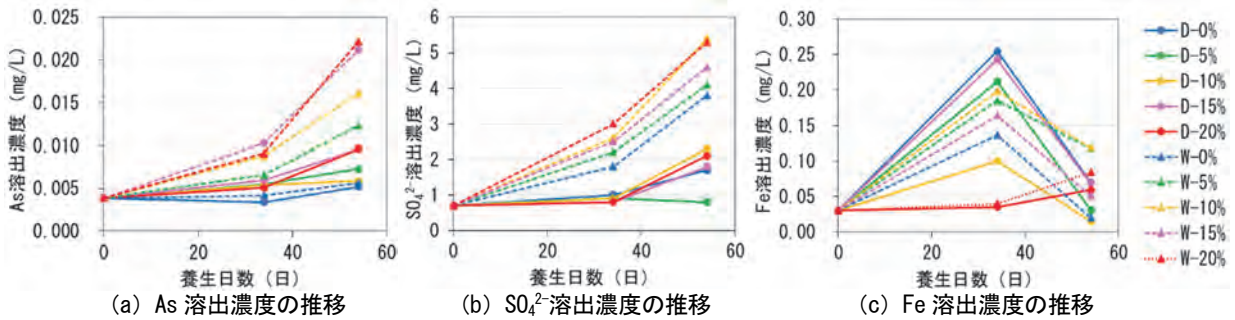


図-7 酸素濃度別養生日数に伴う各種溶出濃度の推移 (乾燥試料 : D、湿潤試料 : W - 酸素濃度 (%))

表-3 養生54日間の各種溶出濃度の変化量 (D : 乾燥試料、W : 湿潤試料)

	酸素濃度 0%		酸素濃度 5%		酸素濃度 10%		酸素濃度 15%		酸素濃度 20%	
	D	W	D	W	D	W	D	W	D	W
As (mg/L)	0.001	0.002	0.003	0.002	0.002	0.012	0.006	0.017	0.006	0.018
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	1.00	3.10	0.10	3.40	1.60	4.70	1.10	3.90	1.40	4.60
Fe (mg/L)	0.04	-0.01	0.001	0.088	-0.015	0.089	0.039	0.021	0.029	0.054

#### 4. 結果

##### 4.1 大気曝露養生による各種溶出濃度の推移

図-5に大気曝露に伴う各種溶出濃度の推移を示す。As 溶出濃度は、還元力が異なるすべての抽出溶媒において、大気曝露日数の増加に伴い増加した (図-5 (a))。還元力が強い抽出溶媒を用いたケースほど、大気曝露に伴う As 溶出濃度は大きく増加する傾向であった。120 日間の大気曝露で、精製水による As 溶出濃度は約 1.9 倍増加したのに対し、0.2 mol/L アスコルビン酸 Na は約 3.6 倍増加した。

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>溶出濃度は、大気曝露日数の増加に伴い増加する傾向であった (図-5 (b))。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>溶出濃度は、い

れの大気曝露日数においても溶媒濃度による SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>溶出濃度に差異はなく、120 日間の大気曝露により、約 0.5 mg/L から約 2.0 mg/L に増加した。なお、アスコルビン酸 Na 抽出については SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>ピークが他物質と重なり定量できなかったため、図中に記載しなかった。

Fe 溶出濃度は、溶媒濃度によらず大気曝露に伴い減少傾向であった (図-5 (c))。0.05 mol/L アスコルビン酸 Na では、120 日間の大気曝露により、約 2.30 mg/L から約 0.67 mg/L まで減少し、0.2 mol/L アスコルビン酸 Na では、約 3.67 mg/L から約 1.50 mg/L まで減少した。なお、精製水およびギ酸 Na 抽出については、Fe 溶出濃度は定量下限値を下回ったため、定量下限値の 0.1 mg/L とした。

図-6 に抽出液中の Eh と各種溶出濃度の関係を示す。図-6 (a) より、いずれの大气曝露日数においても、Eh が低いほど As 溶出濃度は高くなる傾向にあった。また、同程度の Eh では大气曝露日数が多い試料の方が As 溶出濃度は高かった。

図-6 (b) より、同大气曝露日数において、Eh によらず  $\text{SO}_4^{2-}$  溶出濃度は大きく変わらなかった。しかしながら、大气曝露日数の増加に伴い、Eh と  $\text{SO}_4^{2-}$  は共に増加傾向にあり、全てのプロットでは Eh と  $\text{SO}_4^{2-}$  との間に正の相関が見られた。

図-6 (c) より、Fe 溶出濃度は Eh が約+100 mV 以下で高くなり、同程度の Eh では大气曝露日数が多い試料ほど Fe 溶出濃度は低かった。

#### 4.2 異なる養生酸素濃度による各種溶出濃度

図-7 に酸素濃度別養生日数に伴う各種溶出濃度の推移、表-3 に養生 54 日間における各種溶出濃度の変化量を示す。図-7 (a) より、乾燥試料および湿潤試料によらず、すべての養生酸素濃度において、養生日数の増加に伴い As 溶出濃度は増加した。また、同養生酸素濃度では、乾燥試料より湿潤試料の方が As 溶出濃度は高く、養生酸素濃度が高いほどその差は大きくなった。表-3 より、養生酸素濃度 0%の乾燥試料では養生期間による As 溶出濃度の増加はほとんどなく、養生日数 54 日で 0.001 mg/L 増加し、湿潤試料では 0.002 mg/L 増加した。一方、養生酸素濃度 20%の乾燥試料では 0.006 mg/L 増加し、湿潤試料では 0.018 mg/L 増加した。

図-7 (b) より、 $\text{SO}_4^{2-}$  は As と同様の傾向を示し、養生日数の増加に伴い  $\text{SO}_4^{2-}$  溶出濃度は増加した。表-3 より、養生 54 日間において、同酸素養生濃度では、湿潤試料は乾燥試料の約 3 倍以上  $\text{SO}_4^{2-}$  溶出濃度が増加した。養生酸素濃度 0%の乾燥試料では、養生 54 日間で、1.00 mg/L 増加し、湿潤試料では 3.10 mg/L 増加した。一方、養生酸素濃度 20%の乾燥試料では 1.40 mg/L 増加し、湿潤試料では 4.60 mg/L 増加した。

図-7 (c) より、養生日数に伴う Fe 溶出濃度の推移は、養生酸素濃度 20%以外で異なる傾向を示した。養生日数 34 日目は、0 日目と比較して増加傾向にあったが、養生日数 54 日目で減少した。表-3 より、同養生酸素濃度条件下における養生 54 日間での Fe 溶出濃度の変化量は、乾燥試料が湿潤試料よりも高い場合もあれば、湿潤試料が乾燥試料より高い場合もあり、養生酸素濃度や試料の乾燥湿潤状態との関係性が見られなかった。

#### 4.3 温度変化による As 溶出濃度

Case-1~4 の単位体積含水量は、それぞれ 0.36、0.28、0.21、0.06  $\text{m}^3/\text{m}^3$  であった (データ省略)。図-8 に不飽和カラム試験における As 溶出濃度の推移を示す。室温変化前の 2022 年 12 月 26 日からの As 溶出濃度を示した。図中の水温は散水前の純水温度を記載した。また、図中背景には温度変化期間を色分けした。いずれのケー

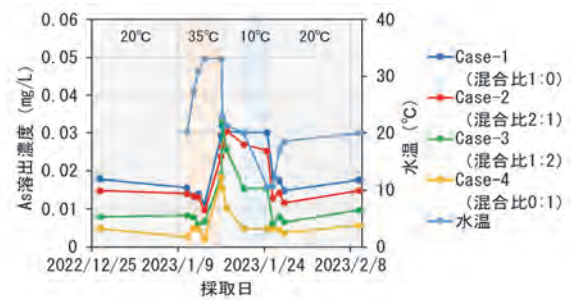


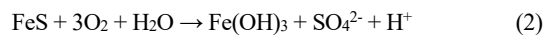
図-8 不飽和カラム試験における As 溶出濃度の推移

スにおいても室温を 35°C に上げた直後、As 溶出濃度はわずかに減少し、その後 As 溶出濃度が増加した。また、Case-3、4 において、As 溶出濃度は、温度を上げる前は土壤溶出量基準値である 0.01 mg/L を下回っていたが、室温を 35°C にすることで、基準値を上回る濃度増加が確認された。その後、室温が 35°C から 20°C、20°C から 10°C に低下すると、各ケースの As 溶出濃度は減少した。これらのことから、試料粒径が大きいケース、つまり単位体積含水量が低いケースほど As 溶出濃度は速やかに減少する傾向があることがわかった。また、室温を 20°C に戻した後、それぞれのケースの As 溶出濃度は、温度変化前の 2022 年 12 月 26 日時点の As 溶出濃度と同程度になった。

## 5. 考察

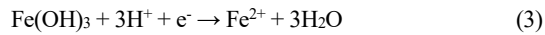
### 5.1 As 溶出における酸化還元電位の影響

掘削岩中の磁硫鉄鉱は、式(2)のように大气曝露により酸化分解反応が進行することが知られている。大气曝露に伴う  $\text{SO}_4^{2-}$  の増加は (図-5 (b))、磁硫鉄鉱の酸化分解による  $\text{SO}_4^{2-}$  の発生が原因と推察した。また、大气曝露に伴う Fe 溶出濃度の減少は (図-5 (c))、酸化分解により発生した Fe イオンが水酸化鉄等として沈殿し、結晶性が上がったことが原因と推察した。



大气曝露による堆積岩からの As 溶出に関する既往研究<sup>4)</sup>では、14 日以上の大気曝露で As 溶出濃度が減少することが示され、硫化鉱物である黄鉄鉱 ( $\text{FeS}_2$ ) の酸化分解後に形成された水酸化鉄に As が吸着して沈殿したこと、および黄鉄鉱の酸化分解による pH の低下が水酸化鉄への As 吸着を促進させたことが原因と報告されている。本研究において、120 日間の大気曝露で As 溶出濃度が増加傾向にあったのは (図-5 (a))、掘削岩中の磁硫鉄鉱の酸化分解により発生する  $\text{H}^+$  を消費する炭酸塩鉱物である方解石が含まれ、掘削岩の pH が高かったことが原因と推察した (pH:8.8~9.3) (データ省略)。

低 Eh は水酸化鉄の還元溶解を引き起こし、式(3)の反応が起こる。



同程度の Eh において、大気曝露日数が多い試料ほど As 溶出濃度が高くなったのは (図-6 (a))、磁硫鉄鉱の酸化分解により、水酸化鉄に沈殿した As が水酸化鉄の還元溶解に伴い溶出したためと推察した。

### 5.2 As 溶出における養生酸素濃度の影響

養生 54 日間で、養生酸素濃度が高いほど  $\text{SO}_4^{2-}$  溶出濃度は高くなった (図-7 (b))。また、養生酸素濃度による  $\text{SO}_4^{2-}$  溶出濃度の差については、乾燥試料の方が湿潤試料と比較して小さかった (表-3)。磁硫鉄鉱の酸化分解には水が必要なこと (式(2)) から、同養生酸素濃度の条件では乾燥試料より湿潤試料の方が  $\text{SO}_4^{2-}$  溶出濃度が高い傾向となった。養生日数 54 日で Fe 溶出濃度が減少したのは (図-7 (c))、酸化分解後の更なる酸化により水酸化鉄の結晶性が上がったためと推察した。

養生日数に伴い As 溶出濃度は増加した (図-7 (a))。また、20%より低い酸素濃度や乾燥試料では、As 溶出濃度は低かった。磁硫鉄鉱の酸化分解によって磁硫鉄鉱中に含まれている As が放出される。そのため、磁硫鉄鉱の酸化分解が進行しにくい低い酸素濃度や乾燥試料では、As 溶出濃度が低かったと推察した。

### 5.3 As 溶出濃度における温度変化の影響

掘削岩からの As 溶出濃度は、室温を 20°C から 35°C に上げた直後は低くなったが、その後増加傾向にあった。また、室温を下げると低くなる傾向にあった (図-8)。このような 35°C への室温変化直後の As 溶出濃度の減少理由は不明であり、今後の検討課題である。高温度による As 溶出の促進は他の研究でも報告されている<sup>5)</sup>。本研究では、As 溶出濃度は、試料粒径が大きいケースや単位体積含水量が低いほど温度変化による影響が強かった。そのため、各ケースにおける温度変化の影響の差異は、カラムの実積率の違いによる熱伝導の影響や単位体積含水量による熱伝達の影響が原因と推察した。

## 6. まとめ

本研究では、処分場に各種センサーを設置し、環境変化をモニタリングした。モニタリング結果を基に磁硫鉄鉱を含む頁岩からの As 溶出における Eh および養生酸素の影響をバッチ試験により検討した。また、不飽和カラムにより As 溶出における温度の影響を検討した。得られた知見は下記のとおりである。

《処分場のモニタリング》

- i. 処分場内の酸素濃度は季節により異なり、約 10 ~ 20% で推移した
- ii. 処分場からの浸出水の Eh は約 +200 ~ +300 mV であった

《処分場内環境模擬試験》

- i. 大気曝露日数が高い試料ほど As 溶出濃度は高くなった
- ii. 抽出液中の Eh が低いほど As 溶出濃度は高くなり、同程度の Eh では大気曝露日数が高い試料ほど高い As 溶出濃度を示した
- iii. 湿潤状態で養生した掘削岩は、乾燥状態よりも磁硫鉄鉱の酸化分解が促進され、As 溶出濃度が高かった
- iv. 養生酸素濃度が低いほど、養生日数に伴う砒素溶出濃度の増加は低くなった
- v. 温度変化により掘削岩からの As 溶出濃度は変化し、試料の粒径によらず室温 20°C から 35°C の温度上昇で、As 溶出濃度は増加した
- vi. 試料粒度が大きいほど、また、単位含水量が低いほど、As 溶出は温度変化の影響を強く受けた

## 7. あとがき

本研究により、埋め立てまでの仮置き期間や処分場内の環境変化は、掘削岩からの As 溶出濃度を変化させることが示唆された。今後は、拡散防止対策の設計に活用できるよう As 溶出濃度変化に関する岩種別の依存性を確認し、As 溶出濃度変化を推測できるよう研究を進めたい。

### 【参考文献】

- 1) 金澤孝仁、門倉伸行、門間聖子、有馬孝彦、汚染土壌等の適正な利用に関する検討部会、「自然由来重金属等含有土壌・岩石への対応事例と適正利用に関する考え方」、第 23 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、S1-16、2017
- 2) 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改訂委員会、「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 年 4 月 11 日閲覧)
- 3) 田本修一、阿南修司、伊藤佳彦、「掘削ずりによるヒ素汚染対策としての覆土処理に関する現場実験」、土木技術資料、52-6、2010
- 4) Kamata, A., Katoh, M.; Arsenic release from marine sedimentary rock after excavation from urbanized coastal areas: Oxidation of framboidal pyrite and subsequent natural suppression of arsenic release, Science of The Total Environment, Vol.670, pp.752-759, 2019
- 5) Kato, T., Takai, A., Iwata, Y., Gathuka, L.W., Katsumi, T.; Evaluating temperature effects on leaching behavior of geogenic arsenic and boron from crushed excavated rocks using shaking and nonshaking batch tests, Soils and Foundations, 63, 101274, 2023

# 音環境プレゼンテーションシステムの拡充

## ーその2 工事騒音評価への利用も考慮したシステム改良ー

### Extending a Sound Environmental Presentation System - Part 2 : System Improvement for Construction Noise Evaluation -

柳沼勝夫\* 阪本一生\*

#### 要 旨

これまで、設計仕様から完成建物の音環境を予測し、実音をもとに音環境性能を反映した音を試聴できる「音環境プレゼンテーションシステム」を開発してきた。本システムは、モバイル端末とクラウドを使用し、小型軽量でかつ高速処理が可能なシステムである。今回、建築音環境だけでなく工事騒音評価への利用も考え、既開発システムの改良を行った。また、改良をきっかけに、従来の建築音環境の評価に対しても利便性が向上する様々な機能向上を図った。

キーワード：音環境、工事騒音、試聴音、クラウド、モバイル端末、プレゼンテーション

#### 1. まえがき

建築音環境性能や音の大きさは、通常、Dr-50 や 50dB など数値で示されることが多く、一般の人にはその性能や大きさをイメージしにくい。このような背景から、設計仕様より完成建物の音環境を予測計算し、実音をもとに音環境性能を反映した音を試聴できる「音環境プレゼンテーションシステム」<sup>1) 2)</sup>（以下、「システム」）を 2021 年度に開発した。

2021 年度に開発したシステムを写真-1 と図-1 に示す。既開発システムは主にクラウド、SIM 搭載型モバイル端末、ヘッドホンで構成され、小型軽量でかつ高速処理が可能である。

クラウド上には、建築音環境に関する予測計算、試聴音作成などのプログラム、録音した音源、および予測計算に用いる材料データ等を保存するデータベースを実装している。クラウド上のデータベースを利用するにはモバイル端末等からインターネット経由で接続し、ブラウザ画面を操作して行う。試聴の対象となる音源の録音には、録音アプリ、モバイル端末の内蔵マイクや端末専用の外付けマイクを使用し、ヘッドホンを利用して試聴音の再生・評価を行う。

今回は、建築音環境だけでなく工事騒音評価への利用も考え、既開発システムのプログラム修正や追加による改良を行った。また、改良をきっかけに、従来の建築音環境の評価に対しても利便性が向上する様々な機能向上を図った。



写真-1 音環境プレゼンテーションシステム

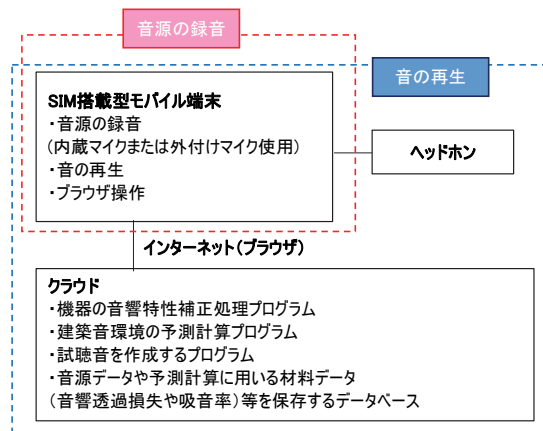


図-1 システム構成

\*技術本部技術研究所環境研究グループ

## 2. システム改良における課題

### 2.1 評価対象の拡充（工事騒音評価への利用）

既開発システムの課題を表-1に示す。

工事で評価対象となる音源は、建築音環境の音源よりも基本的には発生音が大きい場合が多い。また、建設機械はエンジン音など低周波数領域で卓越した音を発生することもあり、低周波音を含めた収録と再生をする必要がある。その他、対象音源や予測計算に用いる材料等、建築音環境の検討とは異なることが多い。システム利用者も建築音環境では設計者、工事騒音は工事関係者が主であるため、それぞれの評価でユーザーインターフェースが分離されていることが望ましい。

### 2.2 予測計算に関する課題

既開発システムは音環境に関する予測計算プログラムを実装しており、計算条件として寸法入力や材料選択を行い計算する。材料選択においては、予め、クラウドのデータベースに登録した材料パラメータ（音響透過損失や吸音率）を選ぶ。しかし、新たな材料を計算条件に利用したい場合には、システムとは別に表計算ソフトにて材料パラメータを入力した CSV データを作成し、クラウドへアップロードする作業が生じる。

工事騒音による工事現場周辺への影響を検討する際には、複雑な地形条件など、システムの予測計算プログラムだけでは予測が難しい場合もある。そのため、高度なシミュレーションソフトの結果も容易に試聴音作成に反映できるようにすることで、利用しやすくなると考える。既開発システムの状態では、この場合も材料データと同様に別途 CSV データを作成してクラウドへアップロードする作業が生じる。

### 2.3 試聴音評価に関する課題

環境によっては、評価点に伝搬する音が1つではない。また、同じ音でも、屋外と室内、室内の空調条件といった暗騒音の状況により聴感が異なる。既開発システムでは、表示画面上で再生できる試聴音は1つのみのため、暗騒音の影響を含めた試聴や複数音源が同時に伝搬する条件時には、適切な試聴音の再生が難しい。したがって、試聴音の再生に関する修正が必要である。

さらに、複数の音を同時に再生する場合には、評価ごとにそれぞれの音の再生開始時間が異なると、同じ試聴音の再生でも聴感が異なるため、複数試聴音の同時再生機能が必要である。

## 3. システムの改良

### 3.1 工事騒音評価への拡充

#### a. システム機器構成

工事騒音のレベルや低周波数領域の評価を考慮し、システム構成を修正した。改良したシステム機器の基本構

表-1 既開発システムの課題

1 評価対象の拡充(工事騒音への利用)
・ 音源のレベルが大きい
・ 低周波数の音が問題になることが多い
・ 評価する音源、予測に利用する材料が建築音環境と異なる
・ 工事騒音評価では不要な予測計算プログラムがある
2 予測計算に関する課題
・ 新材料のシステム予測計算への反映
・ システム以外の予測計算ソフトによる予測計算結果の反映
3 試聴音評価に関する課題
・ 同時に評価点へ複数の音が伝搬する状況の再現
・ 暗騒音の影響を含めた音の再現



写真-2 システム機器（工事騒音評価時）

成を写真-2に示す。

クラウド、SIM 搭載型モバイル端末、ヘッドホンを用いる基本構成に変更はない。ただし、建設機械のエンジン音などは大音量で低周波音の周波数領域も対策対象となることが多く、モバイル端末の内蔵マイクでは最大 80dB、低い周波数は 100Hz 程度までが限界であることから、工事騒音評価時には指定の外付けマイク（例えば、エムアイセブンジャパン社製「i437L Class 2」<sup>3)</sup>）の使用を必須とする。また、試聴音を再生するヘッドホンについても低周波の音が十分に再生できる指定の機器（例えば、SONY 社製モニターヘッドホン「MDR-M1ST」<sup>4)</sup>）を利用する。この構成により、音圧レベルは 30dB～100dB、周波数は 25Hz 帯域～5000Hz 帯域まで対応可能となる。

一方、録音時に 100dB を超える場合には、図-2に示すようなサチュレーションが生じても、これまでのシステムには波形表示機能がないため、システム使用者が気づかず試聴音作成作業を進めてしまう懸念がある。そこで、図-3に示すように、システム上では音源の波形とサチュレーションが生じている可能性を示す閾値ラインを表示させ、システムに登録されている音源が正しく録音されていることを確認する機能を設けた。録音波



形が閾値ラインを超えた際は、警告が表示される。

サチュレーションが生じている可能性がある場合には、距離減衰を期待して音源から離れて録音するか、騒音計等の専用機器での録音を検討する必要がある。

b. ブラウザ画面の構成

建築音環境評価と工事騒音評価を分けるため、システムのブラウザ画面の構成を修正した。モバイル端末等からインターネット経由でクラウドに接続した後のブラウザ画面の構成を図-4、操作画面例を図-5に示す。

対象となる音源や対策に用いる材料が建築音環境を検討する場合と異なることが多いので、ログイン後に「建築音環境」と「工事騒音」の評価対象を選択する画面を追加し、各種機能選択画面以降を分離した。

工事騒音評価の各種機能選択画面においては、床衝撃音や残響時間など不要な計算機能のアイコンを非表示とし、データベースも建築音環境評価用とは別に新しく設け、それぞれの評価で扱う予測計算プログラムやデータを混同せずにシステムを利用できるようにした。

3.2 試聴音を作成するための予測計算に関する課題

予測計算に関しては、図-6に示すようにデータベース画面に CSV データ作成機能を設け、システムとは別に表計算ソフトによる CSV データの作成やアップロード作業を不要にし、利便性を向上させた。また、工事騒音予測時に3次元騒音予測計算ソフトを利用して騒音伝搬の計算を行った場合でも、従来に比べて容易に試聴音作成に反映できるようにした。

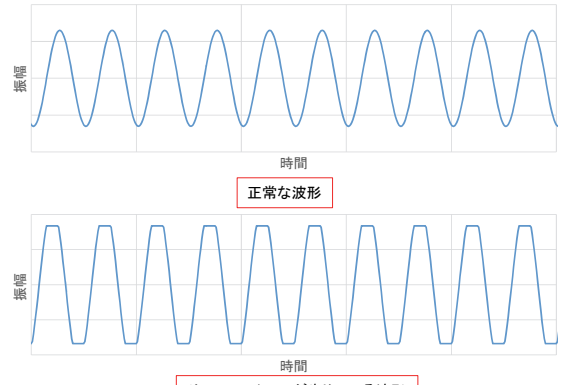


図-2 サチュレーション

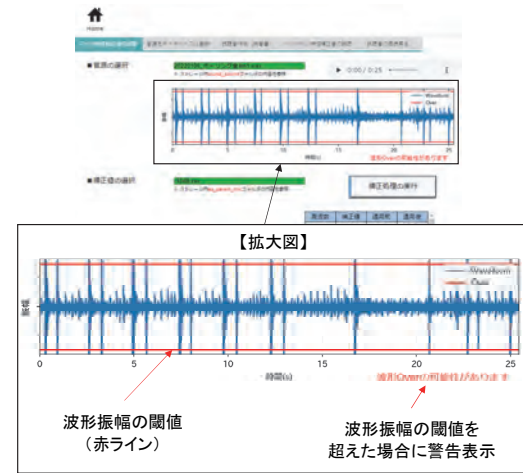


図-3 サチュレーション確認機能

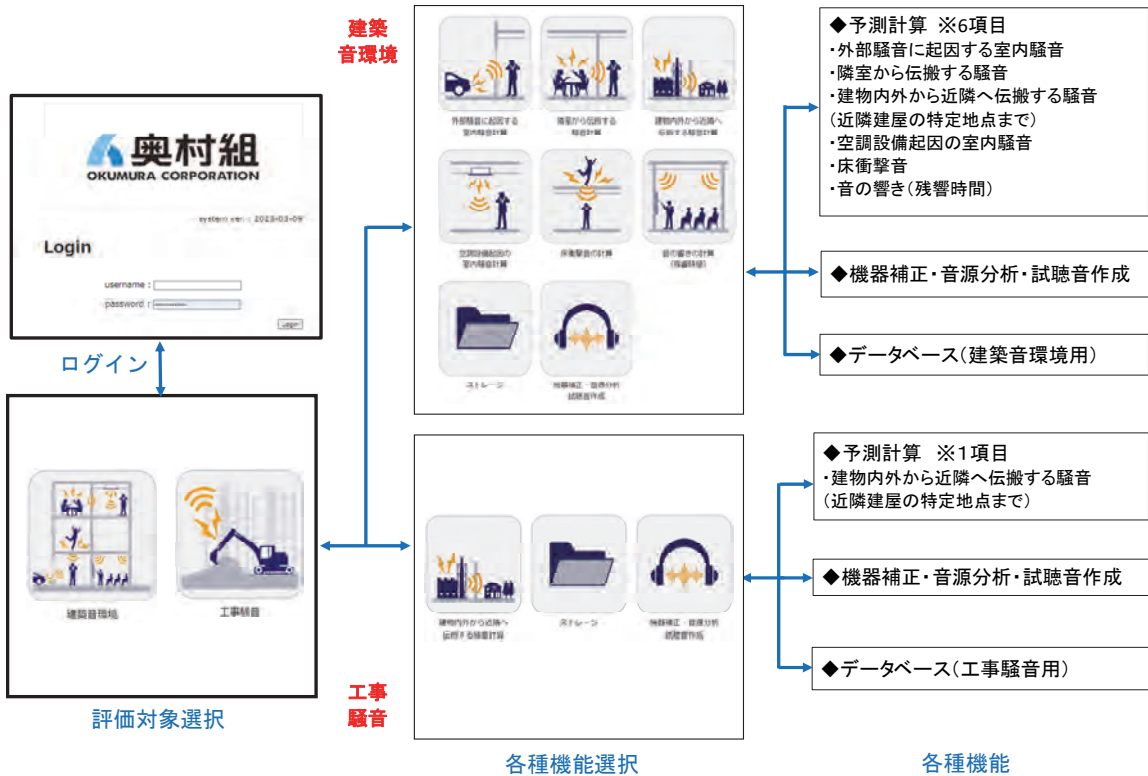


図-4 システムのブラウザ画面の構成

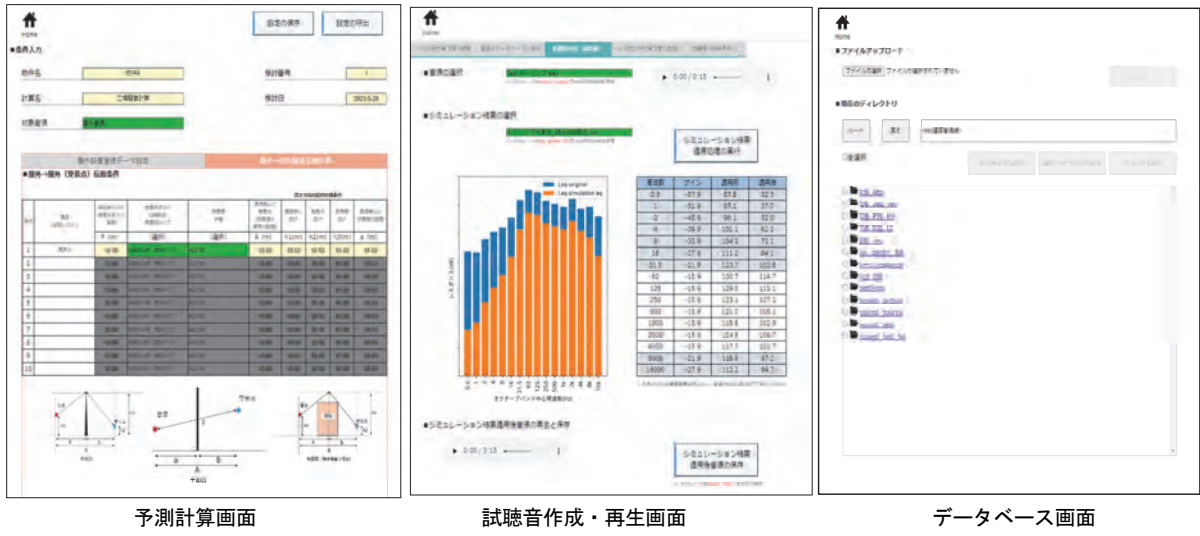


図-5 操作画面例

### 3.3 試聴音再生画面

試聴音再生画面において、既開発システムでは、1画面に1つの試聴音のみ再生可能としていた。改良システムにおいては、同時再生機能だけでなく下記 i ~ iii に記載した対策効果の評価も容易に行えるように、最大3つの試聴音を同画面で再生できるように修正している。

- i. 対策前後の聴感比較  
試聴音 A (対策前) と試聴音 B (対策後) の比較
- ii. 対策方法の聴感比較  
試聴音 B (対策 1) と試聴音 C (対策 2) の比較
- iii. 暗騒音を再生した状態での聴感比較  
暗騒音を再生しながら i または ii の試聴

さらに、図-7に示すように音源選択ボックスの隣にチェックボックスを設け、チェックされた試聴音を同時に再生開始できるようにした。それにより、再生開始時間のずれによる聞こえ方の変化を防ぎ、常に同じ試聴が可能となった。

## 4 システムの利用手順

### 4.1 対象音の収録とアップロード

改良システムを用いて騒音評価を行う際の対象音の録音から試聴音再生までの作業順序を図-8に示す。以下では、操作の流れに従って図-8について詳説する。

始めにサンプリング周波数 48000Hz の WAV 形式 (16ビットまたは 24ビット) で録音できるアプリを利用して対象音の録音を行う。予めシステムのデータベースに対象音が保存されている場合には録音作業は省略する。

SIM 搭載型モバイル端末等からインターネット経由でシステムのクラウドに接続後、ブラウザのログイン画面上でログインする。ログイン後、評価対象を選択する画面にて「建築音環境」または「工事騒音」を選択する。その後、各種機能選択画面にて、「ストレージ」を選択

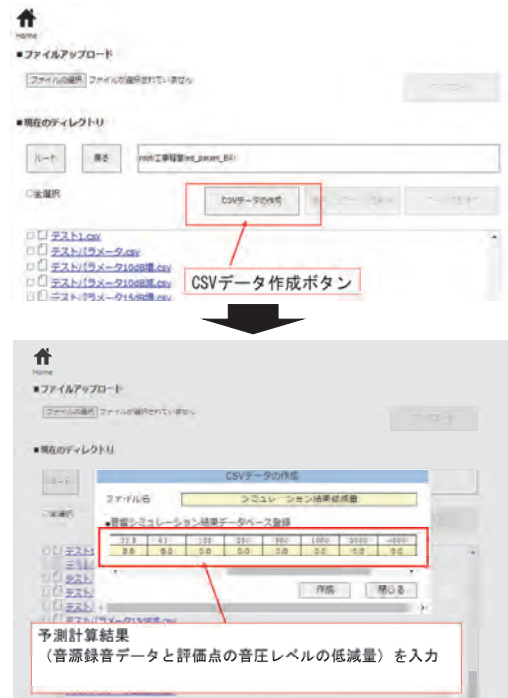


図-6 csv データ作成画面例



図-7 試聴音再生・比較画面

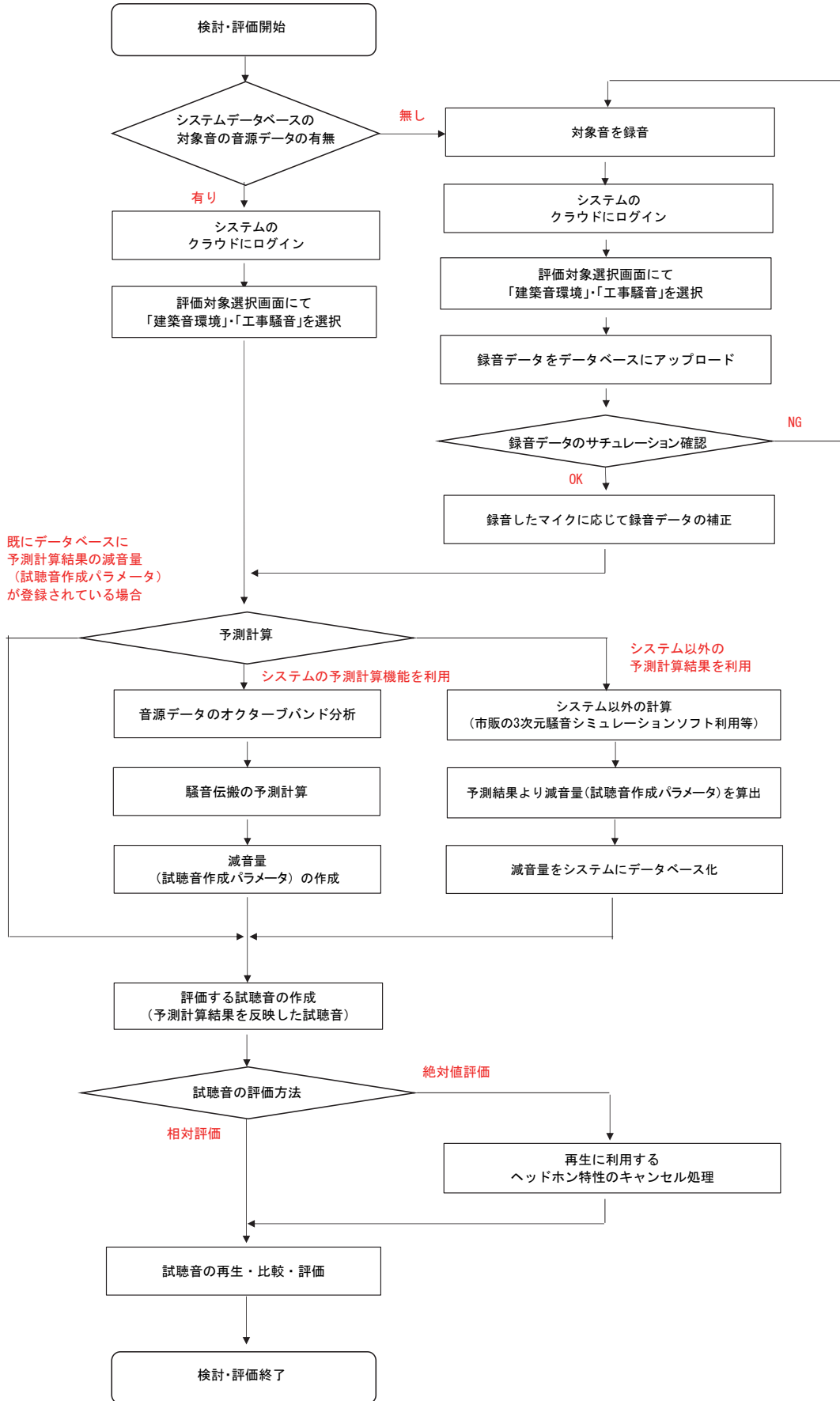


図-8 システム利用の作業順序

し、ストレージ画面にて録音データをシステムのデータベースへアップロードする。

#### 4.2 音源データのマイクロホン補正

録音した音源データは、マイクロホンの特性に依存したデータであることから、マイクロホン補正を行い、マイクロホンの特性をキャンセルする。

各種機能選択画面の「機器補正・音源分析・試聴音作成」を選択後、マイクロホン補正画面にて録音データを使用した外付けマイクとモバイル端末の組み合わせに応じて補正する。補正值には、既報<sup>2)</sup>で報告した実験室実験によりデータベース化した値を用いる。なお、この画面にて、録音データのサチュレーションの有無など、録音波形に問題ないことを確認する。サチュレーションが生じている可能性がある場合には、録音作業に戻る。

#### 4.3 予測計算

システムに実装した波形分析プログラムにより音源データをオクターブバンド分析後、予測計算プログラムを利用し、試聴音を作成するためのパラメータ（周波数帯域別の減音量＝録音位置と評価位置のオクターブバンドレベル差）を算出し、データベースへ保存する。予測計算時にデータベース化されていない材料の音響透過損失や吸音率を利用したい場合には、今回追加した機能によりデータベースへ予め保存しておく。

屋外の騒音伝搬計算において、地形や周囲反射、騒音対策範囲等、条件が複雑な場合、工事騒音の技術提案時に騒音レベルのコンター図マップと合わせて利用したい場合には、システム以外の計算ソフト等で計算を行う。例えば、周波数帯域別に音圧レベルを算出できる市販の3次元騒音シミュレーションソフトを利用し、録音した音源と評価点における音圧レベルの減音量（試聴音作成パラメータ）を算出後、システムのデータベース画面にて、周波数帯域別に減音量を入力後、保存する。

#### 4.4 試聴音作成・再生・比較

マイクロホン補正を行った音源データに減音量（試聴音作成パラメータ）を施して試聴音を作成する。

騒音対策 A と B の効果比較など試聴音の相対評価を行う場合には、試聴音の再生・比較画面にて、比較したい試聴音を選択後、それぞれ再生して評価を行う。

騒音の大きさの良し悪しを判断したいなど絶対値評価を行う必要がある場合には、ヘッドホン特性のキャンセル処理を行い、指定のヘッドホンで再生を行う。なお、ヘッドホン特性のキャンセル処理には、既開発システムと同様に、既報<sup>2)</sup>で報告した実験により予めデータベース化した値を用いる。

以上の作業手順を終えて試聴音の評価を行い、騒音対策の要否や良し悪し等を評価する。

なお、今回は、本システムの波形処理や予測計算プログラムについては既開発から変更を行っていないため、試聴音の作成精度は既開発システムと同等だが、作成し

た試聴音の妥当性については、今後、実工事現場にて検証していく。

## 5. まとめ

今回、既開発システムの操作画面の構成やプログラムの追加・修正を行い、建築音環境の評価だけでなく工事騒音の評価へ利用できるシステムに改良した。

システムの改良点は次の i ～ v である。

- i. 事騒音で発生が多い低音域の録音、再生を行えるようにシステムのマイクやヘッドホンを見直した
- ii. 建築音環境評価と工事騒音評価の操作画面とデータベースを分離し、画面構成を追加・修正した
- iii. 大音量の騒音録音時に生じるサチュレーション確認機能を追加した
- iv. システム外の市販の予測計算ソフト等による騒音予測結果や新材料の音響透過損失や吸音率を容易にシステムに反映できるように、データベース画面を修正した
- v. 複数音源・暗騒音を考慮した試聴が行えるように試聴音の再生・評価画面を修正し、複数試聴音の再生開始時間を合わせて同時再生できるように配慮した

## 6. あとがき

既開発システムを改良したことにより、工事騒音評価だけでなく建築音環境評価においても、評価点へ同時に伝搬する複数音源の評価や暗騒音の影響を反映した試聴等が行える。

改良システムの工事騒音評価への利用については、技術提案時や施工計画時に工事関係者同士や発注者との意思疎通などに利用することを想定している。

今後は、改良システムにて作成した試聴音の妥当性の検証を行い、効果的な工事騒音対策の立案などにも有効活用したい。

### 【参考文献】

- 1) 児玉朗蘭、稲留康一、「音環境プレゼンテーションシステムの開発」、奥村組技術研究年報、No.35、pp.107-112、2009
- 2) 柳沼勝夫、稲留康一、「音環境プレゼンテーションシステムの拡充」、奥村組技術研究年報、No.47、pp.109-114、2021
- 3) エムアイセブンジャパン社ホームページ、<https://www.mi7.co.jp/products/mic-w/i-series/i4371.php>
- 4) SONY 社ホームページ、<https://www.sony.jp/headphone/products/MDR-M1ST/>

## 奥村組技術研究年報 No.49 2023 について

本冊子に掲載した論文の本文は、弊社ホームページ技術研究所サイトからご覧ください。

<https://www.okumuragumi.co.jp/technology/tri/>

奥村組 年報 2023

 検索

---

---

## 奥村組技術研究年報 No. 49

---

2023年9月1日発行

編集発行 株式会社奥村組 技術本部技術研究所

〒300-2612 茨城県つくば市大砂387

電話 (029) 865-1521(代)

印刷 (株)イセブ

電話 (029) 851-2515

---

---

(禁無断転載)



本誌は環境保護のため  
再生紙を使用しております。