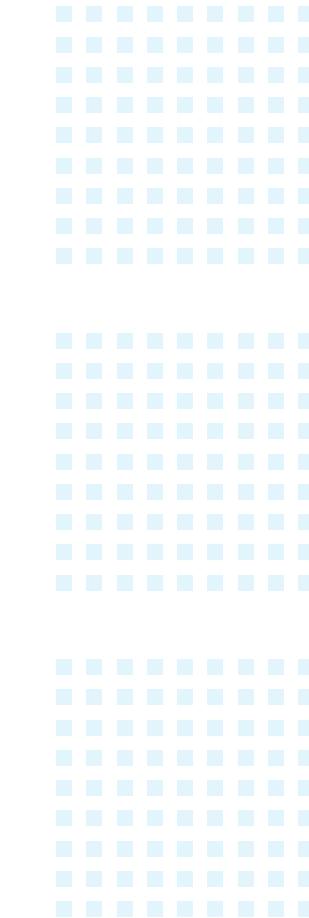


奧村組技術研究年報

No.51 2025



奧村組技術研究年報

OKUMURA TECHNICAL RESEARCH REPORT

No.51

2025

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.51 2025年

目 次

■土木系■

(施工管理)

1. 覆工コンクリート施工の自動打設システムの開発 1
－実大施工実験による施工性の検証－

松本隆太郎・御器谷直子・Biswas Rajib Kumar・齋藤隆弘

(リニューアル)

2. プレキャストP C床版による道路橋更新技術の開発 2
－ループ継手工法の施工性を改善した新たな継手工法の開発－

川口昇平・守屋裕兄・藤井伸介・三澤孝史

(情報化施工)

3. チルトローテータを搭載した油圧ショベルによる自動掘削システムの開発 3
－自律施工技術基盤O P E R Aを利用したシステム概要および実証実験－

藤沼花奈・三澤孝史・川澄悠馬・松田顕伍

■建築系■

(基 础)

4. 既製杭埋込み方式による杭頭接合部の設計合理化のための実験的研究 4
－和田湧氣・山上 聰・岸本 剛・反町 敦

(材 料)

5. 高炉スラグ微粉末を使用した再生骨材コンクリートの開発 5
－伊藤 淳・河野政典

(木造・木質)

6. 中高層木造建築の設計と施工 6
－C L T耐震壁の構造実験と実大モックアップを用いた施工性の検証－

富田直樹・佐藤太輝・小妻靖知
山際 創・秋竹壯哉・伊藤 淳

■環境系■

(廃棄物処理)

7. 災害廃棄物処理機械の選定・配置システムの開発 7

－遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化－

羽渕博臣・今井亮介・鈴木獎士・大角藤子

(ウェルネス)

8. オフィスの知的生産性・環境満足度に関する研究 8

－オフィス等におけるウェルネス設計提案手法の研究－

矢野香里・稻留康一・作野祐子・小川洋行・神長侑磨

英文サマリー	9
社外発表報文一覧	13
表彰	21
学位論文要旨	27
トピックス	35

－中高層木造建築の奥村組西川口寮が完成－

奥村組技術研究年報 No.51 2025 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 2025  検索

■表紙の写真■

一段：大阪・関西万博 ガスパビリオン おばけワンダーランド（大阪府大阪市）写真撮影：笛の倉舎/笛倉洋平

二段：大阪・関西万博 NTTパビリオン（大阪府大阪市）

三段：萬大線 C Q 8 6 0 （台湾）

四段：奥村組西川口寮（埼玉県川口市）写真撮影：志摩大輔

覆工コンクリート施工の自動打設システムの開発 —実大施工実験による施工性の検証—

Development of Automatic Casting System for Tunnel Lining Concrete
- Verification of Usability Based on the Full-Scale Casting Experiments -

松本隆太郎* 御器谷直子* Biswas Rajib Kumar* 斎藤隆弘*
Ryutaro Matsumoto, Naoko Gokitani, Biswas Rajib Kumar, Takahiro Saito

研究の目的

山岳トンネルにおけるコンクリート施工では、品質を確保するための打込み作業や締固め作業に多くの熟練技能労働者や施工管理者を必要としている一方、熟練技能労働者の不足や高齢化が問題となっており、技術革新による省力化や省人化が求められている。そこで、覆工コンクリート打設において、移動式型枠（以下、セントル）に設置した圧力計から得られる定量的な打上がり高さに基づき、ポンプ圧送と型枠バイブレータの稼働を制御する自動打設システム（以下、本システム）を開発した。実施工への適用を目的に実大規模の施工実験を行い、本システムの実用性の検証および施工後の品質確認を実施した。

研究の概要

自動打設システムの概要を図-1に示す。本システムは制御用 PLC と操作 PC を主として構成される。制御用 PLC は、セントルに設置した圧力計により得られた圧力値からコンクリートの打上がり高さを算出し、その値に応じて制御方法を任意にプログラムできる。圧送ポンプと型枠バイブレータの制御盤は有線で本システムに接続しており、所定の打上がり高さに達するとあらかじめ設定した条件でポンプ圧送の停止、型枠バイブレータの稼働、およびポンプ圧送の再開を自動で行う。また、締固めを行う打上がり高さやバイブレータの回数、稼働時間、圧送速度の設定の他に、左右の打上がり高さに偏りが生じた際に圧送停止を行う打上がり高さの差の閾値を任意に設定できる。

本システムの実用性の検証と覆工コンクリートの品質確認を目的に実大規模の施工実験を行った。覆工の規模は片側 1 車線の道路トンネルを模擬した内空断面積約 61m²で、中流动コンクリートを使用した。実験ケースは、ポンプ車の種類や配管系統数、配管切替回数、圧送ポンプ制御方法、打込み完了判断方法を組み合わせた計 4 ケースを設定した。圧力計に基づく打上がり高さの精度の検証（図-2）の他、測定項目は、フレッシュ性状の把握を目的にスランプフローと空気量試験、硬化物性として圧縮試験と表層透気係数試験（図-3）、出来栄えとして脱型後の目視による評価を行った。

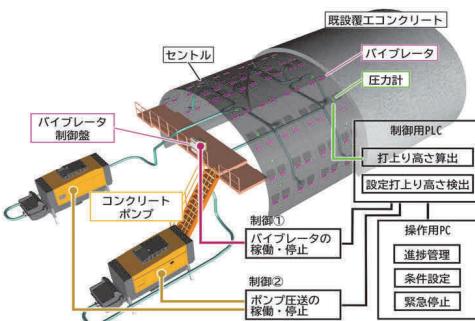


図-1 自動打設システムの概要

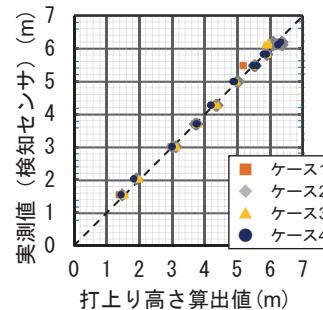


図-2 圧力計から求まる打上がり高さ算出値と検知センサ

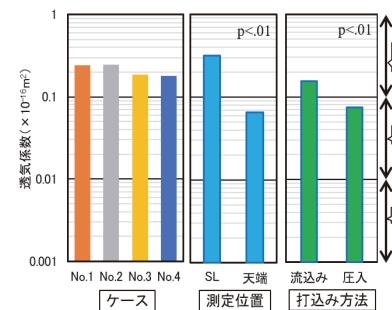


図-3 表層透気係数試験の結果

研究の成果

- i. 型枠バイブルータと圧送ポンプの稼働を制御し施工完了までコンクリートを打ち込むことができ、施工管理において本システムの実用性を確認した
- ii. 圧送ポンプを操作する技能労働者は不要で、型枠バイブルータは自動稼働で必要に応じ操作 PC から操作可能である
- iii. 圧力計の打上がり高さの精度は平均誤差の絶対値で 67mm（図-2）となり、施工管理に支障ない精度が得られた
- iv. 表層透気試験では一般的に求められる水準「一般」に対し、「一般」およびそれ以上の「良」が得られた（図-3）。一般的な施工と比べ作業に関わる人員を削減することができ、省人化につながる技術である。本システムの普及展開を見据え一部機能を実施工に適用しており、現場適用に向けてブラッシュアップを実施している。

*技術本部技術研究所土木研究グループ

プレキャスト PC 床版による道路橋更新技術の開発

—ループ継手工法の施工性を改善した新たな継手工法の開発—

Method for Renewing Precast Prestressed Concrete Slabs Applicable to Highways
- A New Joining Method for Improved Efficiency vs. the Loop Joint Method -

川口昇平* 守屋裕兄** 藤井伸介*** 三澤孝史****
Shohei Kawaguchi, Hiroshige Moriya, Shinsuke Fujii, Takashi Misawa

研究の目的

近年、高速道路が果たす役割はますます重要となっており、高速自動車国道などの幹線道路網は、物流用に一定の通行量を確保することが求められる。そのため、道路網の更新工事においては、車線減少や片側通行など、完全通行止めとならないように施工されることが多い。複数車線の一部車線を開放する半断面施工の場合、PC 床版の継手箇所および延長が増えることから、継手の施工性の向上が課題となっている。このような背景から、道路橋のプレキャスト PC 床版の取替工事（写真－1）の施工性向上を目的として新たな接合工法（Zスパイラル工法）（図－1）を考案した。

研究の概要

PC 床版の継手に要求される性能について、NEXCO3 社では 2019 年より「接合構造の疲労耐久性は、耐用年数 100 年以上確保できることを確認する」ために、動的載荷による輪荷重走行試験（写真－2）を行い、疲労耐久性の確認ならびに性能証明書の提出を求めている。耐用年数 100 年間に相当する疲労耐久性として、荷重（250kN）と繰り返し載荷回数（10 万回）の試験条件を満たした接合構造が、実際の床版取替工事で適用されている。新たな接合工法の開発にあたっては、載荷時の挙動の把握、補強効果の確認、想定荷重に対する安全性の確認、設計法の妥当性の確認などを目的に、床版試験体による静的曲げ載荷試験を実施し、加えて、上記の輪荷重走行試験により 10 万回の繰り返し荷重を加えることで、疲労による押抜きせん断抵抗性を確認した。また、新たな接合方法の施工性を確認するため、ループ継手工法と Zスパイラル工法の施工性確認試験を行った。



写真-1 PC床版の取替工事における新床版架設の状況

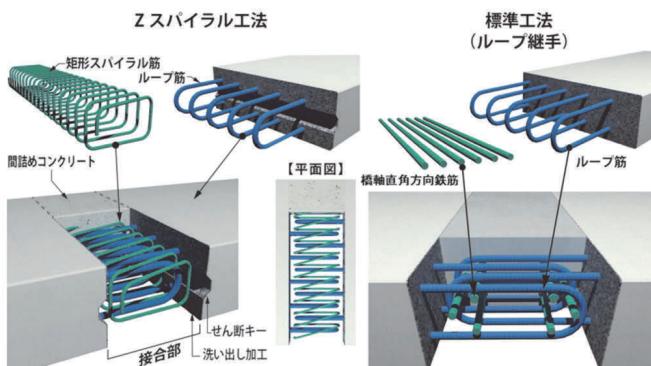


図-1 Zスパイラル工法とループ継手の接合部配筋の比較



写真-2 輪荷重走行試験の状況(土木研究所)

研究の成果

- i. 静的曲げ載荷試験の結果、Zスパイラル工法は標準工法であるループ継手工法と同等の継手性能が確認された
- ii. 輪荷重走行試験の結果、漏水は無く、耐用年数 100 年間に相当する疲労耐久性を有することを確認した
- iii. ループ継手工法と Zスパイラル工法の施工性を比較した結果、ループ継手工法の鉄筋挿入により生じるエポキシ塗装鉄筋の傷のタッチアップの作業時間をゼロにすることことができ、鉄筋挿入や結束など全ての接合部の配筋にかかる作業時間を 4 分の 1 に短縮できることを確認した

*技術本部技術研究所新領域研究グループ **土木本部土木技術部 ***土木本部土木設計部 ****技術本部技術研究所

チルトローテータを搭載した油圧ショベルによる自動掘削システムの開発

—自律施工技術基盤OPERAを利用したシステム概要および実証実験—

Development of Automated Excavation System Based on Tiltrotator-Equipped Hydraulic Excavator
- System Overview and Verification -

藤沼花奈* 三澤孝史** 川澄悠馬*** 松田顕伍****
Kana Fujinuma, Takashi Misawa, Yuma Kawasumi, Kengo Matsuda

研究の目的

近年、建設業において、生産性向上のために建設機械の自動化技術の開発、実用化が意欲的に進められている。そこで、機械土工における生産性向上を目的に、効率的な施工が可能なチルトローテータを搭載した油圧ショベルを用いた自動掘削システムの開発を目指して、自律施工技術基盤 OPERA を利用したシステムを構築し、本システムの性能を確認するため、実証実験を実施した。

研究の概要

1. 自動掘削システムの概要

自動掘削システムは、日本キャタピラー(株)製の電気油圧式制御による油圧ショベル(0.45m³ 級、型式 : CAT315)をベースマシンとして構築した(図-1)。本マシンはバケットの姿勢を変えられるチルトローテータを搭載しており、機体の旋回や移動が難しい狭隘な箇所等においても効率的に施工できる。本システムのソフトウェアは、(国研)土木研究所が整備している共通制御信号をコアとしたオープンなプラットフォームである自律施工技術基盤 OPERA を利用している。本システムは、計画掘削形状より掘削計画を作成し、それに従って遠隔で自動掘削する。キャビン上の3D-LiDARにより、計画掘削深さよりも浅い個所を自動判別して再掘削し、設定値以下になると自動掘削を終了する。

2. 実証実験

本システムの性能確認のために、斜面を側面あるいは正面に配置した場合および左右に配置した場合の計3ケースの計画掘削形状について、出来形の掘削精度および掘削時間を確認した。写真-1に油圧ショベルから見て右側に斜面があるケース1の出来形を、3Dスキャナ計測による点群データ示す。計画掘削形状に対する出来形の差の平均は±50mm以内と、概ね計画形状通りに自動掘削できている。

ケース1について、自動掘削とオペレータによる掘削の掘削時間を比較した(図-2)。掘削時間は、オペレータ掘削では土砂をかき集めてバケットにできるだけ多くの土砂をすくった状態で旋回、排土動作をしているのに対し、自動掘削ではバケット内に十分な土砂がない状態でも設定した掘削計画に従い旋回・排土動作をしている場合があるため回数が増え、時間を要している。しかし、オペレータ掘削では地均しや土砂をすくう前に土砂をかき集める動作時間と、オペレータへ残りの掘削量や掘削位置を指示するために途中で行うレベル計測に時間を要し、全体としては自動掘削が73分間にに対し、オペレータ掘削が67分間と大きな差はなかった。

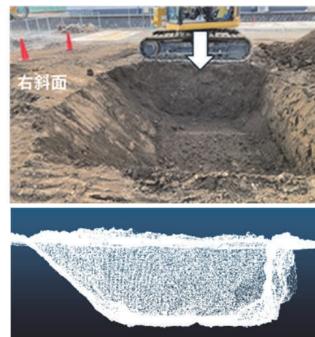


写真-1 出来形 (ケース1)



図-1 自動化した油圧ショベル

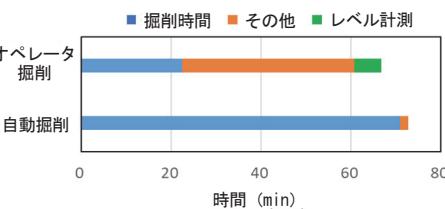


図-2 掘削時間の比較 (ケース1)

研究の成果

自動掘削システムの実証実験より、得られた知見を以下に示す。

- i. 出来形の異なる3ケースの計画掘削について、概ね計画掘削形状通りに掘削できた
- ii. オペレータによる掘削と同等の時間で自動掘削が可能であり、丁張の作業、レベル計測が不要のため省力化が可能である

今後は、自動掘削システムのさらなる施工精度向上や施工時間短縮等のブレイクスルーを図るとともに、油圧ショベル本体の自走についても機能拡張したいと考えており、本システムを現場適用できるように取り組んでいく予定である。

※本開発は、(国研)土木研究所との共同研究である。

*東日本支社機電部 **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 ****東日本支社東京土木第1部

既製杭埋込み方式による杭頭接合部の設計合理化 のための実験的研究

Experimental Study on Rationalization of Design for Pile Cap Using Precast Pile Embedment Method

和田湧氣* 山上 聰* 岸本 剛** 反町 敦***
Yuki Wada, Satoshi Yamagami, Takeshi Kishimoto, Atsushi Sorimachi

研究の目的

既製杭の杭頭接合法のひとつである埋込み方式（杭頭部をパイルキャップに埋め込む接合方法）では、パイルキャップ辺長 (D_p) を杭外径 (D) の 2.5 倍以上とすることが一般的である。また、設計に用いる既往の限界せん断力の評価式では、パイルキャップの配筋のせん断抵抗への寄与は考慮されず、実験データや研究の蓄積による精度の向上が望まれている。そこで、より合理的な杭頭接合部の設計のため、従来の $D_p = 2.5D$ よりも縮小したパイルキャップの実現、およびせん断補強筋の効果を考慮した評価式の確立を目的に、パイルキャップを模擬した試験体による曲げせん断実験を行った。

研究の概要

本研究では、パイルキャップを模擬した鉄筋コンクリート部に SC 杭を埋め込んだ形状の全 8 体の試験体について、図-1 に示す 加力装置により曲げせん断実験を行った。標準試験体は杭頭埋込み長さ $1.0D$ 、 $D_p = 2.0D$ であり、定着筋の有無、杭頭埋込み長さ、パイルキャップ辺長、パイルキャップのコンクリート強度、パイルキャップのせん断補強筋量をパラメータとした。

実験結果より、従来よりも小さい $D_p = 2.0D$ とした試験体の荷重変形関係と、ひび割れや鉄筋降伏などのパイルキャップの損傷過程を把握した。なお、いずれの試験体もパイルキャップのコンクリートが杭により前方に押し出される破壊状況が顕著に見られた（写真-1）。また、せん断補強筋比 p_w などの各試験体のパラメータによる荷重 Q と部材角 R の関係の比較を行った（図-2）。

実験結果をもとに、杭頭埋込み部の設計用限界値の評価式を検討し、日本建築学会「鋼構造接合部設計指針」の埋込み柱脚の最大曲げ耐力式と、日本建築学会「基礎部材の強度と変形性能」の式にせん断補強筋のパラメータを加えた式により、高い精度で各試験体の最大耐力を評価できることを確認した。この計算値 Q_{cal} と実験値 Q_{max} の比較を図-3 に示す。

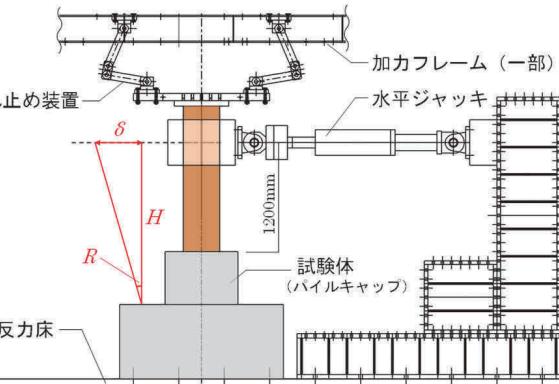


図-1 加力装置の概要

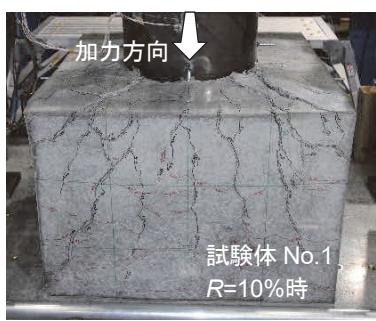


写真-1 実験最終時の破壊状況

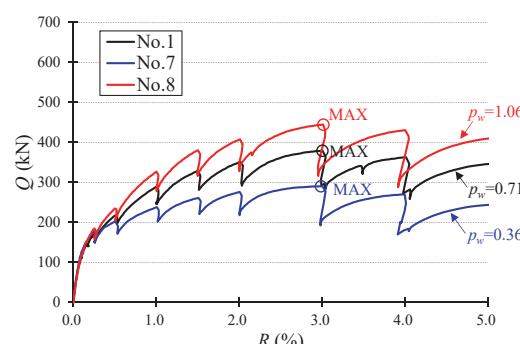


図-2 Q-R 関係の包絡線

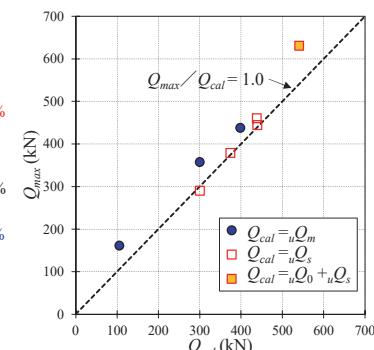


図-3 計算値と実験値の関係

研究の成果

本研究で行ったパイルキャップの曲げせん断実験から以下のことを確認した。

- i. せん断補強筋量が多いほど最大耐力は大きくなり、従来よりも小さい $D_p = 2.0D$ の場合も急激な水平抵抗の喪失は生じない
- ii. せん断補強筋量と杭頭埋込み部の最大耐力の関係から設定した有効係数により、「基礎部材の強度と変形性能」の評価式にせん断補強筋の影響を考慮することができる
- iii. せん断補強筋の影響を考慮することで、最大耐力評価の精度が向上する

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

高炉スラグ微粉末を使用した再生骨材コンクリートの開発

Recycled Concrete Aggregate Incorporating Blast Furnace Slag

伊藤 淳* 河野政典**
Atsushi Ito, Masanori Kono

研究の目的

昨今、カーボンニュートラルの実現に向けて、コンクリートや他の材料に CO₂ を吸収・固定化する技術開発が進められている。解体コンクリート塊から製造された再生骨材は、構造物が解体された後の再資源化の過程において CO₂ を吸収し、固定化する。高炉セメント C 種相当の低炭素コンクリートに再生骨材を使用することで、低炭素性と資源循環性を兼ね備えたコンクリートの製造が可能となる。本開発では、高炉スラグ微粉末（BF）を使用した再生骨材コンクリートの実用化に向けた実機実験を実施し、フレッシュ性状や圧縮強度などの品質を確認した。さらに、BF を使用した再生骨材コンクリートの材料由来の CO₂ 排出量と削減効果を試算した。

研究の概要

開発目標とした再生骨材コンクリートの仕様を表-1 に示す。コンクリートは、普通ポルトランドセメントの 70% を BF で置換した高炉セメント C 種相当である。再生骨材の組合せは、再生骨材 M の細骨材 (RMS) と再生骨材 M の粗骨材 (RMG) の組合せ (MM 調合)、RMS と再生骨材 L の粗骨材 (RLG) に普通粗骨材の碎石 2005 (G) を容積比で 50% 混合した組合せ (ML 調合) の計 2 種類である。

実機実験におけるフレッシュ性状は、骨材の組合せにかかわらず、良好であることを確認した。また、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの塩化物量およびアルカリシリカ反応については迅速法において、ともに管理値を満足した。

材齢 91 日のコア強度と構造体強度補正 $28S_{91}$ を図-1 に示す。設計基準強度 36N/mm² 以下の場合、JASS 5 に示される高炉セメント C 種相当と同様に構造体強度補正值を 3N/mm² または 6N/mm² として設定できることを確認した。また、設計基準強度が 36N/mm² を超えて 48N/mm² 以下の場合は、高炉指針に示される 9N/mm² 以下となり、構造体強度補正值を 9N/mm² に設定できることを確認した。

再生骨材コンクリートの CO₂ の排出量と削減効果の試算結果を呼び強度ごとに図-2 に示す。CO₂ 削減効果は、再生骨材の組合せや呼び強度にも拠るが、普通コンクリートと比較して、65~71% 程度期待できることが示された。CO₂ 排出量を削減できた要因としては、BF を使用したことによる効果が大きく、169~217kg-CO₂/m³ 程度の CO₂ 排出量が削減された。さらに再生骨材を使用することにより、18~24kg-CO₂/m³ 程度の CO₂ 排出量が削減された。

研究の成果

実機実験の結果、BF を使用した再生骨材コンクリートは、再生骨材コンクリートの JIS 規格を十分に満足する品質であった。表-1 の再生骨材コンクリートについて、実験結果に基づき定めた再生骨材コンクリート用の製造・品質管理基準により、第三者機関の建築材料の性能評価および国土交通大臣認定 (MCON-4754・4755) を生コン工場と共同で取得した。

※本開発は、13 社で構成された「再生骨材を用いた CELBIC の実用化に関する研究会」において実施したものである。

参加会社：青木あすなろ建設、浅沼組、安藤ハザマ、奥村組、熊谷組、鴻池組、五洋建設、鉄建建設、東急建設、東京テクノ、東洋建設、長谷エコーポレーション、矢作建設工業

表-1 開発目標とした再生骨材コンクリートの仕様

項目	適用範囲
BF の種類	高炉スラグ微粉末 4000 (JIS A 6206)
BF の使用率	70% (高炉セメント C 種相当)
再生骨材の品質と組合せ	・再生細骨材 M、・再生粗骨材 M 2005 ・再生細骨材 M、 ・再生粗骨材 L 2005 + 碎石 2005
設計基準強度	管理材齢 28 日 : 18~42N/mm ² 管理材齢 56 日 : 18~45N/mm ²
スランプ	15cm・18cm・21cm・23cm
スランプフロー	45cm・50cm・55cm・60cm

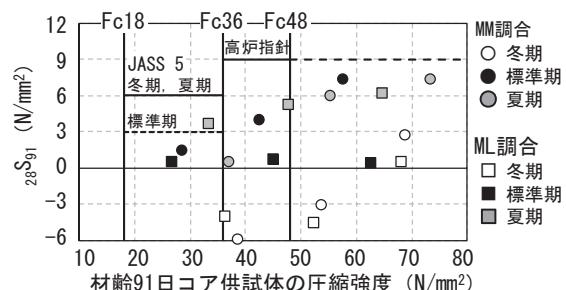


図-1 材齢 91 日のコア強度と構造体強度補正值 $28S_{91}$

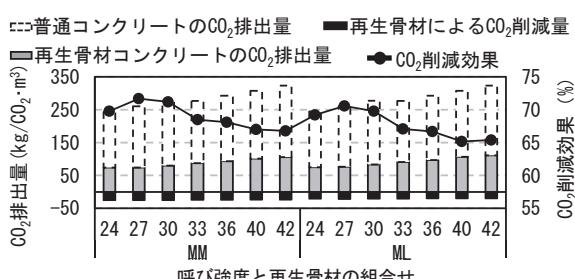


図-2 再生骨材コンクリートの CO₂ 排出量と削減効果

*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

中高層木造建築の設計と施工

—CLT耐震壁の構造実験と実大モックアップを用いた施工性の検証—

Design and Construction of Large Timber Structure
- Experiments of CLT seismic walls and Verification of Constructability -

富田直樹* 佐藤太輝** 小妻靖知** 山際創** 秋竹壮哉* 伊藤淳*
Naoki Tomita, Taiki Sato, Yasutomo Kozuma, Hajime Yamagiwa, Masaya Akitake, Atsushi Ito

研究の目的

ESG・SDGsの取り組みの一環として、建築物の木造化・木質化が推進されている。そこで、自社寮を対象に木造と鉄筋コンクリート造との混合構造からなる中高層木造建築の実現に取り組んだ。木造の構造体には、耐震壁としてCLTを採用する計画とした。採用にあたり、新たに提案した接合方法を配置したCLT耐震壁の構造性能を確認するために各種構造実験を行った。施工面では、実大モックアップを用いて、木造躯体構築時の施工手順や工期短縮の検討、建方精度の確認を行った。また、建物に木材と環境配慮型BFコンクリートを使用したことによる地球温暖化防止への貢献として、CO₂の固定量およびCO₂排出の削減量を算出した。

研究の概要

CLT耐震壁の構造フレームへの取り付けには、CLT四隅の上下に鋼板插入型ドリフトピンを、CLT中央の上下にせん断コッターを配して接合した。本接合方法によるCLTの構造性能を確認するため、せん断コッターパーのせん断実験と、2/3スケールによるCLT壁構面の水平加力実験を実施した。その結果、本接合方法のせん断耐力の実験値を得た。図-1に水平加力実験結果の一例として荷重変形関係と破壊状況を示す。これらの実験結果に基づき、許容せん断耐力および剛性の評価方法を提案し、実大スケールのCLT耐震壁におけるせん断耐力を求めた。異なる壁長の各解析結果を基に、壁の復元力特性を一律に定めた(図-2の赤線)。

施工性を検証するために構築した実大モックアップを図-3に示す。図-4に示す施工手順により混合構造の躯体工事の工期短縮が可能で、施工精度が確保されることを確認した。また、木質部材の輸送・組立時においての汚れを防止する塗布剤の選定にあたり、モックアップを用いて屋外曝露試験を実施した。

建物に木材を使用したことによるCO₂固定量を算出した。また基礎地中梁には、コンクリート材料の普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末で代替した環境配慮型BFコンクリートを採用し、セメントの製造過程におけるCO₂排出の削減量を算出した。

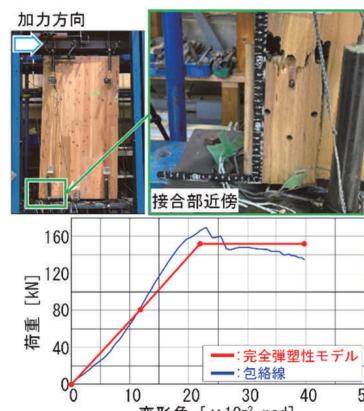


図-1 荷重変形関係と
破壊状況

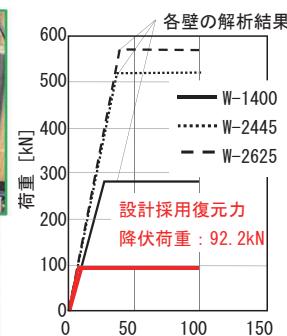


図-2 解析モデルの
荷重変形関係



図-3 実大モックアップ

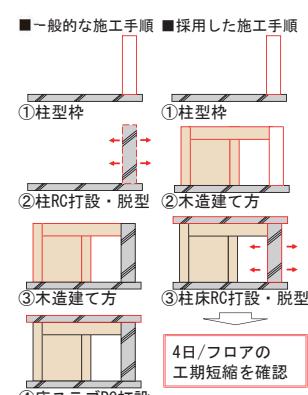


図-4 混合構造の施工手順

研究の成果

- i. CLT耐震壁の構造性能の検証実験を踏まえて、せん断接合部にグラウトを充填した新たなコッター形式を有するCLT耐震壁は、構造要素として高い初期剛性を有することが確認された
- ii. せん断コッターを用いたCLT耐震壁の許容耐力及び剛性の評価方法を提案し、耐震要素として必要な性能を満足するCLT耐震壁の設計方法を確立した
- iii. 実大モックアップの曝露試験に基づき木質部材の保護塗料を選定し、工事中の木質部材の美観性を確保した
- iv. RC柱の型枠に木質梁を設置する施工法を実大モックアップで検証し、実施工での躯体工事の工期短縮を実現した
- v. 建物に木材を約208m³使用することで約148tのCO₂が固定化され、また、基礎地中梁に環境配慮型BFコンクリートを214m³採用することで、約45tのCO₂の排出を削減した

*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

災害廃棄物処理機械の選定・配置システムの開発

—遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化—

System for Selecting and Positioning Disaster Waste Treatment Machinery
- Multi-objective Optimization Based on Genetic Algorithms -

羽渕博臣* 今井亮介* 鈴木獎士* 大角藤子**
Hiromi Habuchi, Ryosuke Imai, Shoji Suzuki, Fujiko Osumi

研究の目的

近い将来、巨大地震等の大規模な自然災害の発生が予想されている。一方で、突如として発生する自然災害に対して、発災後、その最前線で災害廃棄物処理を行う地方公共団体や建設会社職員等の多くは、未経験の事象に対処しなければならなくなる。そのため、これまで不慣れな処理計画策定に労力を費やすことになり、着手の遅れ、処理費用・期間の増加等の問題が生じていた。

そこで、災害廃棄物の種類、量、仮置場等の情報を入力することで、3つの目的（処理期間、処理費用、CO₂排出量）の最適解を算出できる遺伝的アルゴリズムを用いた「災害廃棄物処理機械の選定・配置システム」を開発した。

研究の概要

「災害廃棄物処理機械の選定・配置システム」は、災害廃棄物処理における仮置場（図-1）で用いる、機械の選定および配置計画の立案を支援するシステムである。災害廃棄物処理は、通常、発災後、被災地付近の仮置場に災害廃棄物が一時的に集積・保管され、処理機械等により種類毎に分別された後、再資源化施設等に搬出される。具体的な分別工程は、バックホウでの粗選別、破碎機でのサイズ調整、磁選機での金属除去、回転篩機での土砂除去、風力選別機での可燃物分離、人力での手選別等がある。本システムは、処理機械（図-2）の能力、仮置場の形状（図-3）をもとに、遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化の計算を行い、自動的に複数の機械配置を計画する（図-4）。「費用は高いが、期間は短い」「費用は安いが、期間は長い」「費用と期間のバランスをとる」といった複数の計画（図-5）の中からユーザが選択できる。



図-1 本システムの適用範囲



図-2 処理機械のデータベース



図-3 仮置場の範囲指定

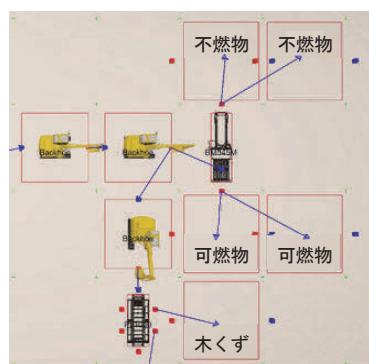


図-4 機械の自動配置

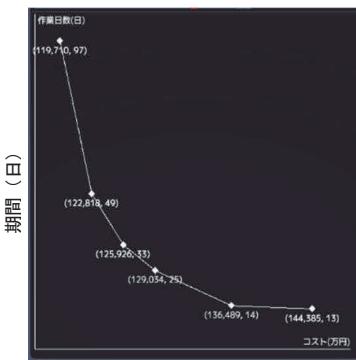


図-5 複数解の算出

研究の成果

- i. 災害廃棄物処理機械の選定および配置システムにおける遺伝的アルゴリズムを実装した
- ii. 災害廃棄物処理に要する期間、費用、CO₂排出量の3つの目的に対する多目的最適化が可能となった

*技術本部環境ソリューション部 **ICT統括センターイノベーション部

オフィスの知的生産性・環境満足度に関する研究

—オフィス等におけるウェルネス設計提案手法の研究—

Research on Intellectual Productivity and Environmental Satisfaction in Innovation Hubs
- Methods for Wellness Design in Offices -

矢野香里* 稲留康一* 作野祐子** 小川洋行*** 神長侑磨****
Kaori Yano, Koichi Inadome, Yuko Sakuno, Yoko Ogawa, Yuma Jincho

研究の目的

近年、オフィスワーカーの快適性や心理的健康を考えたウェルネスオフィスは、オフィス環境への満足度向上だけではなく、知的生産性や従業員のエンゲージメントの向上に寄与すると注目されている。2023年10月に、大学や企業との技術交流や連携などによるイノベーション推進を目的とした拠点として、クロスイノベーションセンター（以降、クロスアイ）を開設した。この拠点整備では執務者のウェルビーイングの実現に貢献する空間づくりも目指した。クロスアイの室内環境が執務者のウェルネスや満足度、知的生産性に与える影響を把握するため、アンケートによる調査を実施した。

研究の概要

ウェルネスの評価方法として、執務者が主観的に環境を評価する CASBEE オフィス健康チェックリスト（以降、OHC）が開発されており、スコアが高いほど執務者の健康、快適性、知的生産性が高いオフィスであるとされている。クロスアイへの移転直後および移転 1 年後に執務者を対象に、CASBEE-OHC 調査を実施した。CASBEE-OHC スコアの分布を図-1 に示す。いずれも既往研究の平均点を大きく上回る結果となり、執務環境がウェルネスに効果的であることがわかった。

既往研究の CASBEE ウェルネスオフィス（以降、WO）スコアと CASBEE-OHC スコアの関係を図-2 に示す。この図に当社技術研究所管理棟（CASBEE-WO : A ランク）およびクロスアイのスコアをプロットした。どちらも既往調査におけるサンプルの近似式に近い値となり、CASBEE-WO と CASBEE-OHC のスコアには高い相関がみられた。CASBEE-WO のスコアが高い場合、健康、快適性、知的生産性を促進するオフィスであることを示唆している。

執務環境の総合満足度と知的生産活動の満足度を図-3 に示す。いずれも移転直後、1 年後ともに満足側的回答が 8 割程度であり高い満足度を示している。

移転直後の自由記述から、「会議スペースの不足」やフリーアドレス導入による「グループ作業のしづらさ」を指摘する意見があった。そこで任意のグループが利用できるグループアドレスエリアを設定し、これらの指摘を解消できるか検証した。作業のしやすさについては周囲のサポートを必要とする 20 歳代から高い評価が得られた（図-4）。入社間もないサポートを必要とする年代では、チームで働くグループアドレスが有効に機能していることを示唆している。

研究の成果

クロスアイの室内環境についてのアンケート結果より、以下の知見が得られた。

- i. 客観評価である CASBEE-WO のスコアと、主観的評価である CASBEE-OHC のスコアの相関関係が既往研究と同等の傾向であり、CASBEE-WO のスコアが高い場合、健康、快適性、知的生産性を促進するオフィスであることを示唆している
- ii. 執務者の室内環境に対する満足度は 75%を超えており、良好なオフィス環境を構築できた
- iii. 「グループアドレス」の導入により、フリーアドレス導入時の課題とされるコミュニケーションにおいて満足側の評価が得られ、特に、周囲のサポートを必要とする若年層にとっては効果的であることが示唆された

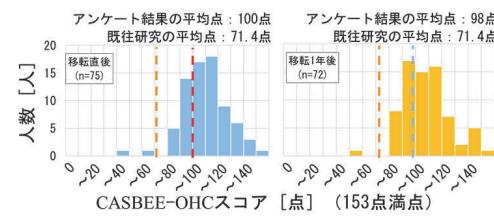


図-1 CASBEE-OHC スコア分布

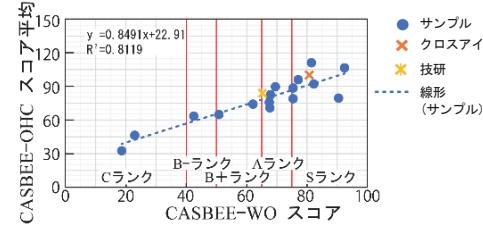


図-2 CASBEE-WO、OHC 相関図

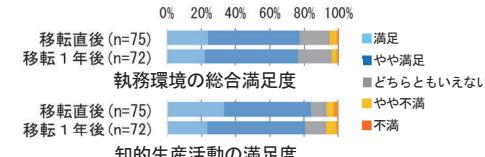


図-3 執務者の総合満足度

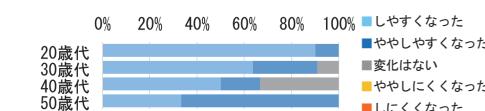


図-4 年代別グループアドレス作業しやすさ

*技術本部技術戦略部 **西日本支社建築設計部 ***建築本部 ****技術本部技術研究所新領域研究グループ

1. Development of Automatic Casting System for Tunnel Lining Concrete - Verification of Usability Based on the Full-Scale Casting Experiments -

Ryutaro Matsumoto, Naoko Gokitani, Biswas Rajib Kumar, Takahiro Saito

The development of new construction methods in mountain tunnels has emerged. At the same time, such construction typically involves a series of repetitive tasks, leaving room for automation and other labor-saving measures.

Based on the previously-reported height control technology based on pressure gauges, we developed an automatic pouring system that incorporates control of concrete pump pressure and formwork vibrator operations. The results of full-scale construction experiments confirm that automatic control of pump pressure and formwork vibrators based on pouring height is possible from the start to the completion of the pouring process, contributing to labor-savings and ensuring construction quality after the formwork is removed.

Keywords: mountain tunnel, labor-savings, concrete pump, mold-type vibrator, medium fluidity concrete

2. Method for Renewing Precast Prestressed Concrete Slabs Applicable to Highways - A New Joining Method for Improved Efficiency vs. the Loop Joint Method -

Shohei Kawaguchi, Hiroshige Moriya, Shinsuke Fujii, Takashi Misawa

To reduce the time required to work with precast PC deck slabs for road bridges, we developed a new joining method that provides performance equivalent to the conventional loop joint method. The new method involves restraining the reinforcing bars of the joints of the PC deck slabs with rectangular spiral bars. While the loop joint method requires the insertion of reinforcing bars perpendicular to the bridge axis (i.e., the length of the bridge) from the sides to inside the loop bars, rectangular spiral bars can be inserted from the upper surface of the deck slab, a significantly more efficient approach to reinforcement.

We performed static bending loading tests and running wheel load tests for the new joining method, confirming load-bearing performance and fatigue durability against traffic loads adequate for 100 years of use. We also performed a construction test involving a full-scale test specimen, confirming that this method can reduce the time required to perform joint reinforcement by 75% compared to the loop joint method.

Keywords: precast PC deck slab, joining method, running wheel load test, fatigue durability, partial-width construction

3. Development of Automated Excavation System Based on Tiltrotator-Equipped Hydraulic Excavator - System Overview and Verification -

Kana Fujinuma, Takashi Misawa, Yuma Kawasumi, Kengo Matsuda

To improve productivity, the construction industry in recent years has energetically pursued the development and implementation of construction automation. We have developed an automated excavation system using a hydraulic excavator equipped with a tiltrotator, which allows for efficient construction.

This system creates an excavation plan by generating an excavation trajectory that leverages the tiltrotator's features based on the planned excavation shape. Based on this plan, the system executes automated excavation via remote control.

The software for this system utilizes the Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy (OPERA), an autonomous construction technology platform developed by Japan's Public Works Research Institute (PWRI). We undertook demonstrations for three varying planned excavation shapes, including varying slope arrangements, and confirmed that the system is capable of performing automated excavation almost exactly as designed.

Keywords: hydraulic excavator, tiltrotator, automated excavation, OPERA, 3D-LiDAR

4. Experimental Study on Rationalization of Design for Pile Cap Using Precast Pile Embedment Method

Yuki Wada, Satoshi Yamagami, Takeshi Kishimoto, Atsushi Sorimachi

The width of precast pile caps is typically set at $2.5D$ (where D = pile diameter). Numerous experiments on specimens with $2.5D$ have also been reported in previous studies. Furthermore, according to the literature from the Architectural Institute of Japan, shear reinforcement effects cannot be considered in design formulas for the pile head embedded portion.

In this study, we performed bending shear experiments using specimens with a pile cap width of $2.0D$ to present the damage process of the pile caps and the effects of various parameters on the results. Additionally, we considered shear reinforcement effects to propose a formula for evaluating the maximum strength of the pile head embedded portion.

Keywords: precast pile, pile cap, pile head embedded, bending shear experiment, shear reinforcement

5. Recycled Concrete Aggregate Incorporating Blast Furnace Slag

Atsushi Ito, Masanori Kono

The recycled aggregates produced from concrete blocks remaining after the demolition of a structure absorb and immobilize CO₂ during the re-resourcing process. Concrete made with blast furnace slag cement type C equivalent and recycled aggregate allows the production of concrete that combines low-carbon characteristics and resource circulation. We performed practical studies of recycled concrete aggregate incorporating ground granulated blast furnace slag, confirming quality in terms of fresh properties and compressive strength. We also estimated the CO₂ emissions generated by this recycled concrete aggregate and the reduction in CO₂ emissions achieved. As a result, the fresh properties and the required quality standards were satisfactorily met. It was also confirmed that a CO₂ reduction effect of 65 to 71% can be expected compared to ordinary concrete.

The concrete we developed meets JIS standards for recycled concrete aggregate. Based on the results of this study, we established manufacturing and quality control standards for recycled concrete aggregate. In collaboration with a ready-mix concrete plant, we obtained performance evaluations from a third-party organization and certification from the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MCON-4754 and 4755).

Keywords: recycled aggregate concrete, blast furnace slag, CO₂ emissions

6. Design and Construction of Large Timber Structure

- Experiments of CLT seismic walls and Verification of Constructability -

Naoki Tomita, Taiki Sato, Yasutomo Kozuma, Hajime Yamagiwa, Masaya Akitake, Atsushi Ito

We designed and constructed a large timber structure of eight stories. The building structure consists of a combination of timber and reinforced concrete elements. The timber structure is comprised of a frame of timber columns and beams, along with cross laminated timber (CLT) seismic walls. Connections to the frame were formed from combinations of commonly used steel plate inserted drift pin connections and a newly-devised shear cotter joint, resulting in high initial stiffness.

A performance evaluation was carried out based on the results of structural performance tests conducted on the joining method. We reduced construction times by simultaneously constructing the reinforced concrete and timber structures on each floor. The construction process of the timber structure was verified using a mockup. The approximately 208 m³ of timber incorporated into the structure corresponds to the sequestration of about 148 tons of CO₂, and the use of 214 m³ of environmentally friendly concrete to construct the foundations enabled a reduction in CO₂ emissions of approximately 45 tons, enabling to reduce the building's environmental impact.

The results of this study will help build knowledge and understanding in this field, in particular when designing and building large timber structures.

Keywords: large timber structure, mixed structure, cross laminated timber (CLT) seismic walls, mockup, environmentally friendly concrete

7. System for Selecting and Positioning Disaster Waste Treatment Machinery - Multi-objective Optimization Based on Genetic Algorithms -

Hiroomi Habuchi, Ryosuke Imai, Shoji Suzuki, Fujiko Osumi

Several large-scale natural disasters, including the Nankai Trough earthquake, Nemuro Peninsula offshore earthquake, and eruptions of Mount Fuji, are anticipated in the relative near future. Many local government and construction company staff stationed on the front lines of disaster waste disposal after such disasters are likely to face unprecedented circumstances. As a result, during the disaster, they will spend effort on unfamiliar processing plan development, leading to delays in action, increased processing costs, and prolonged processing periods. It is essential to establish a framework and response strategies that can be effective in the next disaster while in normal times, as this will contribute to the promptness and appropriateness of initial response efforts.

To facilitate the rapid selection and placement planning of optimal processing machinery for disaster waste disposal, we have developed a system that confirms the optimization of processing period, costs, and CO₂ emissions as the three objectives.

Keywords: temporary storage areas, sorting, processing period, processing costs, CO₂ emissions

8. Research on Intellectual Productivity and Environmental Satisfaction in Innovation Hubs - Methods for Wellness Design in Offices -

Kaori Yano, Koichi Inadome, Yuko Sakuno, Yoko Ogawa, Yuma Jincho

In recent years, wellness offices that consider the comfort and psychological health of office workers have attracted attention for their potential to enhance productivity and employee engagement. Our company has established the X-Innovation Center, which serves as a hub for promoting innovation. At the same time, we incorporated various design strategies aimed at contributing to the improvement of employee well-being.

This study was conducted to investigate how the office environment we designed affects wellness, satisfaction, and productivity. A questionnaire survey revealed that more than 75% of office workers were satisfied with the office environment, confirming the success of our efforts to create a positive office space.

Furthermore, the correlation between the CASBEE-WO (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency – Wellness Office), an objective evaluation, and the CASBEE-OHC (Office Health Checklist), a subjective evaluation, was consistent with previous studies. In addition, it

was confirmed that the X-Innovation Center generates higher levels of satisfaction compared to our other office facilities.

Keywords: Wellness, Comprehensive Assessment Systemwellness, comprehensive assessment system for Built Environment Efficiency, Intellectualbuilt environment efficiency (CASBEE), productivity, office environment satisfaction

【土木系】(2024年4月～2025年3月)

査証付論文

	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
1	Flexural and Shear Strengthening of Reinforced-Concrete Beams with Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)	サウスダコタ州立大学 奥村組 アフサヌラ科学技術大学	Farabi Bin Ahmed ビスマス ラジブ・カマル Debasish Sen	Construction materials 4(2)	MDPI	5月
2	An experimental and numerical investigation on the flexural strengthening of full-scale corrosion-damaged RC columns using UHPC layers	奥村組 " " 東京工業大学	ビスマス ラジブ・カマル 三澤孝史 齋藤隆弘 岩波光保	Construction and Building Materials 449	ELSEVIER	9月
3	Flexural strengthening of non-uniformly corroded RC bridge piers using ultra-high-performance concrete layers	奥村組 " " 東京工業大学	ビスマス ラジブ・カマル 三澤孝史 齋藤隆弘 岩波光保	Forensic Engineering 2024	American Society of Civil Engineers	10月
4	山岳トンネル施工における補助工法判定シートの提案と試行	ケーエフ・シー エイト日本技術開発 鴻池組 奥村組	岡根三千夫 永田常雄 橋高豊明	トンネル工学報告集 Vol.34 I-19	土木学会	12月
5	未固結地山区間の長尺鋼管先受工法に関する検討	奥村組 " 地域地盤環境研究所 " "	松尾 勉 木下茂樹 稻垣祐輔 譽田孝宏 中井照夫	トンネル工学報告集 Vol.34 I-25	土木学会	12月

講演会発表論文

	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
6	ニューマチックケーソンの初期沈設挙動に関する実験的研究	奥村組 東京工業大学 オリエンタル白石 " "	下村双葉 高橋章浩 忍田祥汰 倉知禎直	第59回地盤工学研究発表会 24-10-2-03	地盤工学会	7月
7	放射性セシウムを含む焼却飛灰のセメント固化化配合設計検討事例	応用地質 " " 奥村組 " " 環境省 " 国立環境研究所	島村章吾 上堂蘭四男 宮田 彰 近藤晋 齋藤隆弘 濱谷洋平 小川理士 遠藤和人	第35回 廃棄物資源循環学会研究発表会 F1-3-O	廃棄物資源循環学会	9月
8	URTエレメントを活用した反力装置の実験的検討	奥村組 " " IHI建材工業	天川 航 川嶋英介 鈴木 衛 若林正憲	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 III-40	土木学会	9月
9	コンクリート湿潤状態自動認識ロボットの開発 —光学センサと自立走行式ロボットによる自動評価システムの構築—	奥村組	増田貴之	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-113	土木学会	9月
10	教示・再生方式による多軸継手を装備した油圧ショベルの自動化技術の開発	奥村組 " " " ARAV " "	三澤孝史 松田顯吾 川澄悠馬 石井敏之 今泉克彦 佐藤洸太 久保貴嗣	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-119	土木学会	9月
11	多亜裂性地山におけるプレスプリッティングの余掘り低減効果	奥村組 " " "	浜田 元 徳永満善 三浦良平	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-378	土木学会	9月
12	PC床版の新しい接合工法(Zスパイラル工法)の開発 その1(静的載荷試験)	奥村組 昭和コンクリート工業 " " 大阪工業大学	御器谷直子 守屋裕兄 三澤孝史 川口昇平 坂井 悟 吉田辰也 岩山健治 国井優嗣 松井繁之	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-526	土木学会	9月
13	PC床版の新しい接合工法(Zスパイラル工法)の開発 その2(輪荷重走行試験)	昭和コンクリート工業 " " 奥村組 " " 大阪工業大学	坂井 悟 吉田辰也 岩山健治 国井優嗣 守屋裕兄 三澤孝史 川口昇平 藤井伸介 松井繁之	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-527	土木学会	9月

	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
14	高速道路トンネルにおける供用車線を確保したインバート設置工事	東日本高速道路 奥村組 西松建設 三井住友建設	金藤和慶 小暮英雄 赤崎修一 北村隆宏 小川豊	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-557	土木学会	9月
15	山岳トンネルのインバート掘削に関する出来形管理システムの現場実証	奥村組 東日本高速道路	松田顯伍 赤崎修一 川澄悠馬 今泉克彦 小暮英雄 金藤和慶	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-559	土木学会	9月
16	RC巻立て(橋脚耐震補強)における大型型枠の使用による効率化	奥村組 中日本高速道路	津村朔哉 菊池亜偉人 齊藤亮祐 高木宗男	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-633	土木学会	9月
17	建設作業員を対象とした主観データの取得方法の検討	奥村組 ユーフオリア 東京大学大学院	麻生真司 山口治 森井貴弘 一原克裕 八田秀雄	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-713	土木学会	9月
18	平面2次元逆解析によるトンネル湧水量予測	奥村組 ハイドロ総合技術研究所	外木場康将 森田修二	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-749	土木学会	9月
19	次世代シールド広報ツールの開発	奥村組 アクティオ	後藤大青 川嶋英介 張志瑄 南部忍 乘原賢司	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-960	土木学会	9月
20	硬化型充填材クレーショックハードの開発と施工実績	奥村組 タック "	根来将司 曾我部貴久 長江崇生 瀧川信二 吉田智哉 吉田修康	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-978	土木学会	9月
21	コンクリート圧力に基づく高さ管理による覆工の自動打設に関する実大施工実験	奥村組 "	松本隆太郎 齋藤隆弘 御器谷直子 ビススラジブマル	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VI-1072	土木学会	9月
22	MIG-seq法による絶滅危惧種(ハナムグラ)の種内集団レベルの遺伝的関係の解析	奥村組 東北大学 茨城県霞ヶ浦環境科学センター 筑波大学	白石祐彰 陶山佳久 高橋大樹 小幡和男 津村義彦	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 VII-65	土木学会	9月
23	鉄筋腐食したRC橋脚の超高強度繊維補強コンクリート巻立てによる補強効果の実験的検討	奥村組 東京工業大学	ビススラジブマル 三澤孝史 齋藤隆弘 岩波光保	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 CS3-24	土木学会	9月
24	インタビューにより把握する女性技術者の坑内労働の実態	ソーシャル・デザイナーズ・ベース 地域未来研究所 奥村組 鹿島建設 建設技術研究所	山田菊子 阿部友美 竹之内綾子 米山賢	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 CS4-10	土木学会	9月
25	放射性セシウムを含む一般廃棄物焼却飛灰のセメント固化処理の実機試験	奥村組 応用地質 "	齋藤隆弘 有川健 濱谷洋平 宮田彰 上堂薦四男 島村章吾	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 CS12-03	土木学会	9月
26	教師なし異常検知モデルを用いた下水道管路点検のAI損傷検出技術	奥村組 燈 "	檜崎雄一 山口治 福本郷介 北田敦也	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 CS14-13	土木学会	9月
27	労働災害事例データに見る協調領域としてのデータベースの在り方に関する考察	鹿島建設 奥村組 五洋建設	後閑淳司 中村誠喜 光永勝巳	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会 CS17-08	土木学会	9月
28	新生代(古第三紀以降)の泥岩を含む地山における盤ぶくれ対策について —北海道新幹線 立岩トンネル(ルコツ) —	奥村組 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 奥村組	中村正樹 若林功起 近藤弘明	第94回(山岳)施工体験発表会 「様々な課題にチャレンジした山岳トンネルの建設およびトンネルリニューアル工事」—創意工夫・生産性・安全性向上、働き方改革—	日本トンネル技術協会	10月
29	玉石混じり砂礫層における安定したシールド掘進とリスク対策 —新東京ライン建設第五期工事の内、神流川横断工事—	奥村組	崎山直人 薮ノ和洋	第95回施工体験発表会(都市部門) 「都市におけるトンネル・地下構造物の新設・改良工事」—環境配慮、施工改善、近接物対応事例—	日本トンネル技術協会	10月
30	OPERAを活用したチルトローテータ搭載油圧ショベルの自動掘削システムの開発 —自動掘削システムの概要と取組状況について—	奥村組 土木研究所	藤沼花奈 三澤孝史 石井敏之 川澄悠馬 遠藤大輔	第22回 建設ロボットシンポジウム P1-01	建設ロボット研究連絡協議会	10月

	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
31	プレキャストPC床版の新しい接合方法に関する研究	奥村組 昭和コンクリート工業 大阪工業大学	川口昇平 守屋裕兄 三澤孝史 御器谷直子 坂井 智 松井繁之	第13回 道路橋床版シンポジウム 論文報告集	土木学会	10月
32	山岳トンネルのインバート掘削に関する出来形管理システムと 現場検証結果	奥村組	藤沼花奈 松田頤伍 川澄悠馬	令和6年度 建設施工と建設機械シ ンポジウム	日本建設機械 施工協会	11月
33	コンクリート打設統合管理システムの開発	奥村組	今泉克彦 廣中哲也	令和6年度 建設技術報告会	全国建設業協 会	2025年 1月
34	補修材料のトレーサビリティシステムの現場適用とシステムの 改良	奥村組	長谷歩香 太田原和基 山口 治	インフラメンテナンス実践フォーラム Vol. 2 No.1 pp.10-13	土木学会	2025年 3月
35	UFCIにより補強したRC橋脚の交番載荷実験	奥村組 東京工業大学	ピスカリジンブル 三澤孝史 齋藤隆弘 岩波光保	インフラメンテナンス実践フォーラム Vol. 2 No.1 pp.34-38	土木学会	2025年 3月

雑誌掲載報文

	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
36	生産性向上と品質を確保した覆工コンクリートの毎日打設 －東海環状自動車道 船来山トンネル－	中日本高速道路 奥村組	近藤孝則 遠藤宏朗 板谷裕次 黒木孝洋	トンネルと地下 Vol.55 No.5(645) pp.51-61	日本トンネル 技術協会	5月
37	下水道管路包括民間委託における効率化技術 管路調査と水位モニタリングの技術開発事例	奥村組	山口 治 南雲裕樹 澤 裕俊	土木施工 Vol.65 No.7(811) pp.118-121	オフィス・ス ペース	7月
38	データ利活用型ICT土工管理システムによる現場の生産性向上 を実証 土工事における施工管理の効率化および高度化に向けた取り 組み	奥村組 戸田建設 西松建設	高尾篤志 本木章平 黒田卓也	建設機械施工 Vol.76 No.7(893) pp.19-23	日本建設機械 施工協会	7月
39	陣之原橋(上り線)他1橋床版取替工事 構造の異なる2橋の 事例紹介	奥村組	中迫哉太 池田拓海 西村拓真	土木施工 Vol.65 No.8(812) pp.146-149	オフィス・ス ペース	8月
40	ヘテロニア光ファイバセンサの産業応用	コアシステムジャパン、創価大学 コアシステムジャパン 福島工業高等専門学校 奥村組	山崎大志 佐々木博幸 丹野 淳 山口 治	レーザー研究 Vol.52 No.8 pp.401-405	レーザー学会	8月
41	アンカー自動削孔装置の開発および現場適用 既設コンクリート構造物の耐震補強工事に伴う削孔作業の自動 化	奥村組	三澤孝史 川澄悠馬 山口 治	建設機械施工 Vol.76 No.9(895) pp.64-69	日本建設機械 施工協会	9月
42	千葉県柏市の下水道管路における包括的民間委託の取組 ～官民連携による管路の予防保全型維持管理～	柏市下水道局 奥村組	中島愛子 山口 治	公営企業 2024.9 pp.33-44	地方財務協会	9月
43	アンカー自動削孔装置の現場適用 耐震補強工事に伴う削孔 作業の自動化	奥村組	三澤孝史 川澄悠馬 山口 治	建設機械 Vol.60 No.11(717) pp.25-30	日本工業出版	11月
44	新技術を活用した水処理施設の耐震補強 －八王子水再生センター放流渠耐震補強工事－	奥村組	斎藤隆弘 川澄悠馬 加藤清孝	コンクリート工学 Vol.62 No.11 pp.958-964	日本コンク リート工学会	11月
45	切羽鏡面の吹付けコンクリートのひび割れ検出により肌落ちの 予兆を知らせるシステムの開発 切羽画像から肌落ちの予兆をAIで検知	奥村組 システム計画研究所	浜田 元 清水隆司 久保陽平	建設機械施工 Vol.76 No.12(898) pp.70-74	日本建設機械 施工協会	12月
46	官民連携を活用した新技術の導入	柏市下水道局 奥村組	小泉雄司 山口 治 亀谷佳宏	下水道協会誌 Vol.61 No.12(746) pp.20-24	日本下水道協 会	12月
47	パラメトリックツール活用による業務の自動化 自動化がもたらす業務効率化と生産性向上	奥村組	平井 崇 全 青青	土木施工 Vol.66 No.1(817) pp.73-76	オフィス・ス ペース	2025年 1月
48	ICTを活用した大規模造成工事の施工事例	奥村組 コマツカスタマーサポート	平井 崇 松本将和	建設機械施工 Vol.77 No.2(900) pp.80-85	日本建設機械 施工協会	2025年 2月
49	ウォーターPPP分野への投資開発	奥村組	亀谷佳宏 大久保忠彦 長 和臣	月間下水道 Vol.48 No.2 pp.45-46	環境新聞社	2025年 2月
50	長距離・大深度・高水圧下でのシールド高速施工 霞ヶ浦導水事業 石岡トンネル第5工区	国土交通省関東地方整備局 奥村組	赤羽 浩 前田卓見	土木施工 Vol.66 No.2(818) pp.87-90	オフィス・ス ペース	2025年 2月

【建築系】(2024年4月～2025年3月)

査読付論文

No.	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
1	被災後の継続使用評価のための中層鉄骨造建物の損傷度と 残留変形角の関係	奥村組 京都工芸繊維大学 〃	徳永真彦 小島紘太郎 金尾伊織	日本建築学会構造系論文集 Vol.90 No.828 pp.252-261	日本建築学会	2025年 2月

講演会発表論文

No.	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
2	Results of a Simple Pile Loading Test Using Human Power and Numerical Simulation of the Results	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 福田 健 小阪宏之 小谷直人 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8回 国際地震地盤工学会議	地盤工学会	5月
3	高炉スラグ微粉末を高含有した再生骨材コンクリートの性状 その4 実機実験概要	東洋建設 青木あすなろ建設 浅沼組 奥村組 五洋建設 東京テクノ 長谷エコーポレーション	岸本豪太 村井克綺 新田 稔 伊藤 淳 李 晓赫 松田信広 井出朋孝	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 1175	日本建築学会	8月
4	高炉スラグ微粉末を高含有した再生骨材コンクリートの性状 その7 実機実験における圧縮強度試験結果	青木あすなろ建設 奥村組 鴻池組 熊谷組 五洋建設 東京テクノ 長谷エコーポレーション	林 晴佳 伊藤 淳 住 学 野中 英 高橋祐一 松田信広 井出朋孝	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 1178	日本建築学会	8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7:大型断面梁 開先の向きを因子とした載荷実験	奥村組 京都大学大学院 〃 神戸大学大学院 角藤 〃	上田 遼 高塚康平 田原侑季 田中 剛 西澤 淳 塙大空哉	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 1524	日本建築学会	8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8:大型断面梁;開先の向きを因子とした場合の亀裂進展 状況および変形能力	京都大学大学院 〃 神戸大学大学院 奥村組 角藤 〃	田原侑季 高塚康平 田中 剛 上田 遼 西澤 淳 塙大空哉	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 1525	日本建築学会	8月
7	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9:中型断面梁;欠陥高さを因子とした有限要素数値解析	神戸大学 〃 奥村組 角藤 〃	松本優大 田中 剛 上田 遼 西澤 淳 塙大空哉	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 1526	日本建築学会	8月
8	様々な杭配置に対する群杭効率評価法の研究 (その3:粘性土地盤及び杭径が2種類の群杭の3次元有限要素法解析)	マインド 奥村組 鋼管杭・鋼矢板技術協会 〃 芝浦工业大学	藤原良博 塩見忠彦 和田湧気 内藤綾乃 南 貴士 廣瀬智治 土方勝一郎	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 20207	日本建築学会	8月
9	様々な杭配置に対する群杭効率評価法の研究 (その4:粘性土地盤及び2種類の杭から成る群杭への適用)	芝浦工业大学 マインド 奥村組 鋼管杭・鋼矢板技術協会 〃 マインド	土方勝一郎 塩見忠彦 和田湧気 内藤綾乃 南 貴士 廣瀬智治 藤原良博	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 20208	日本建築学会	8月
10	高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭の付着性能 (その2 試験概要)	安藤ハザマ 長谷エコーポレーション 奥村組 西松建設 戸田建設 佐藤工業 鉄建建設 三井住友建設 広島工业大学	森 清隆 田附遼太 和田湧気 郡司康浩 佐野大作 浦川和也 尻無濱昭三 高橋直樹 金子 治	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 20219	日本建築学会	8月

No.	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
11	高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭の付着性能 (その3 鉄筋の引抜き試験)	長谷工コーポレーション 奥村組 西松建設 戸田建設 鉄建建設 広島工業大学	田附遼太 太田雄介 森 泰夫 森 清隆 和田湧氣 熊田健太 福田 健 Phan Van Quang 金子 治	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 20220	日本建築学会	8月
12	高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭の付着性能 (その4 重ね継手を有する鉄筋の引抜き試験)	奥村組 安藤ハザマ 長谷工コーポレーション 戸田建設 東急建設 広島工業大学	和田湧氣 舟木秀尊 岸本 剛 森 清隆 田附遼太 中村光男 田口智也 葛西勇紀 金子 治	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 20221	日本建築学会	8月
13	高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭の構造性能 (その3 結果の比較と変形性能の評価)	戸田建設 奥村組 長谷工コーポレーション 西松建設 鉄建建設 三井住友建設 東急建設 広島工業大学	田口智也 福田 健 和田湧氣 田附遼太 新井寿昭 Phan Van Quang 新上 浩 葛西勇紀 金子 治	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 20223	日本建築学会	8月
14	ビル物免震建物に適用可能な過大変位抑制用性能可変オイルダンパーの開発 (その2)自己復元特性の確認	奥村組 東北大学	洲鎌 星 小山慶樹 山上 聰 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 (関東) 21430	日本建築学会	8月
15	ビル物免震建物に適用可能な過大変位抑制用性能可変オイルダンパーの開発 (その3)変位抑制効果と自己復元特性の影響	奥村組 東北大学	小山慶樹 洲鎌 星 山上 聰 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 (関東) 21431	日本建築学会	8月
16	鉄骨構造の建物に用いる鉄骨基礎梁工法の研究	奥村組	山上 聰 岸本 �剛 和田湧氣	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 22522	日本建築学会	8月
17	嫌振機器の振動許容値と影響に関する検討 その1 電子顕微鏡を対象とした実験概要	竹中工務店 鹿島建設 竹中工務店 三井住友建設 奥村組 日建設計 大林組 鴻池組 清水建設 戸田建設 大成建設 大和ハウス工業	村山広樹 田中 彩 井上竜太 長谷川毅 山上 聰 小山慶樹 朝日智生 三輪田吾郎 成島 廉 森井雄史 鈴木健司 田口典生 中川 学	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 40153	日本建築学会	8月
18	嫌振機器の振動許容値と影響に関する検討 その2 電子顕微鏡を対象とした実験結果	鹿島建設 竹中工務店 三井住友建設 奥村組 日建設計 大林組 鴻池組 清水建設 戸田建設 大成建設 大和ハウス工業	田中 彩 村山広樹 井上竜太 長谷川毅 山上 聰 小山慶樹 朝日智生 三輪田吾郎 成島 廉 森井雄史 鈴木健司 田口典生 中川 学	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 40154	日本建築学会	8月

雑誌掲載報文

No.	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
19	西川口寮新築計画 —木とRCによる平面・立面混構造と中間階免震構造で耐震性能を確保—	奥村組 シェルター	山際 創 小妻靖知 伊藤克彦	ビルディングレター No.706 pp.1-7	日本建築センター	9月
20	カーボンニュートラルの実現に向けた取り組み 環境に配慮したコンクリートの実適用	奥村組	河野政典 伊藤 淳	土木施工 Vol.65 No.11(815) pp.101-104	オフィス・スペース	11月

【環境系】(2024年4月～2025年3月)

査読付論文

No.	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
1	Evaluation of the conservation value and conservation difficulty of local populations of the rare plant <i>Viola raddeana</i> based on genetic diversity and gene expression information using next-generation sequencers	筑波大学、奥村組 東北大學 東北大學 大阪公立大學 茨城県霞ヶ浦環境科学センター 全南大學 昌原大學 筑波大学	白石祐彰 陶山佳久 牧野能士 廣田 峻 小幡和男 Jung-Hyun Lee Hyeok Jae Choi 津村義彦	Plants Species Biology	WILEY	2025年 2月

講演会発表論文

No.	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
2	ケーススタディを用いた地歴調査における課題の抽出について	土壤汚染対策コンソーシアム(奥村組) 和歌山大学 土壤汚染対策コンソーシアム " " " 和歌山大学	長 千佳 上野素輝 大団啓史 吉田宗久 奥田清明 江種伸之	第29回 地下水・土壤汚染とその防 止対策に関する研究集会 S2-07	廃棄物資源循 環学会ほか	6月
3	地下水保護に関する汚染土壤の特性付け(ISO 15175)につい ての検討	土壤環境センター " 土壤環境センター(奥村組) 土壤環境センター " ISO/TC190 検討部会	中島 誠 平田 桂 小河篤史 山田優子 ISO/TC190 検討部会	第29回 地下水・土壤汚染とその防 止対策に関する研究集会 S3-04	廃棄物資源循 環学会ほか	6月
4	塩素化エチレン類による土壤・地下水汚染の原位置生物処理 に関する適用可能性試験の検討 —地下水を用いる場合 第2報—	土壤環境センター " " " " "	羽淵博臣 藤井雄太 山野辺純一 伊藤雅子 西田憲司 土壤汚染の除去等の措置の適用可能性試 験に関する調 査・検討部会	第29回 地下水・土壤汚染とその防 止対策に関する研究集会 S3-25	廃棄物資源循 環学会ほか	6月
5	事業所内土壤・地下水汚染発見契機への対応 ～土壤・地下水汚染への総合的な対応に関する指針(案)～	土壤環境センター " " " " "	佐藤徹朗 嶋本直人 清水祐也 藤安良昌 三原洋一 土壤・地下水汚 染の総合的な対応に関する指針検討部会	第29回 地下水・土壤汚染とその防 止対策に関する研究集会 S3-27	廃棄物資源循 環学会ほか	6月
6	塩素化エチレン類による土壤・地下水汚染の原位置生物処理 に関する適用可能性試験の検討 —土壤を用いる場合—	土壤環境センター " " " " "	山野辺純一 羽淵博臣 藤井雄太 伊藤雅子 西田憲司 土壤汚染の除去等の措置の適用可能性試 験に関する調 査・検討部会	第29回 地下水・土壤汚染とその防 止対策に関する研究集会 S4-25	廃棄物資源循 環学会ほか	6月
7	酸化触媒を用いた1,4-ジオキサン分解試験	奥村組 " " 名古屋大学	清水祐也 小河篤史 鈴木獎士 山田泰之	第59回地盤工学研究発表会 DS- 2-05	地盤工学会	7月
8	ハイパースペクトルカメラによる鉱物や岩石の種類の判別	奥村組 " "	清水祐也 鈴木獎士 羽淵博臣	第59回地盤工学研究発表会 23- 5-1-02	地盤工学会	7月
9	過熱水蒸気を用いたPFASを吸着させた活性炭の再生	奥村組 " " 国立環境研究所	清水祐也 鈴木獎士 小河篤史 松神秀徳	第59回地盤工学研究発表会 23- 8-1-01	地盤工学会	7月
10	特性の異なる二つのイノベーション拠点の知的生産性・環境満 足度の比較調査	明治大学大学院 明治大学 奥村組 "	松原明香 樋山恭助 岩下将也 神長侑磨	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 40009	日本建築学会	8月
11	CLT複合壁の隙間処理の違いによる音響透過損失測定事例	奥村組 " "	柳沼勝夫 阪本一生 稻留康一	日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 40104	建築学会	8月
12	特性の異なる二つのイノベーション拠点に対する執務者評価の 比較	明治大学大学院 明治大学 奥村組 "	松原明香 樋山恭助 岩下将也 神長侑磨	令和6年度 空気調和・衛生工学会 大会(佐賀)	空気調和・衛 生工学会	9月
13	不飽和カラム試験によるトンネル掘削ずり処分場内のひ素溶出 特性に関する研究	奥村組 " ハイドロ総合技術研究所 岩手大学	清水祐也 鈴木獎士 森田修二 大河原正文	廃棄物資源循環学会論文誌 Vol.35 pp.61-72 2024	廃棄物資源循 環学会	10月

No.	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
14	ビオトープにおける湿地性植物保全の取組と自生地の環境の把握について	奥村組 " " 筑波大学	長千佳 鈴木槙士 富山陽子 上條隆志	植生学会 第29回年次学術大会 B02 p.39	植生学会	10月
15	建物の不思議音に関する昔と今の変化	奥村組 東急建設	稻留康一 井上 諭	日本騒音制御工学会 秋季論文発表会講演論文集 2-1-04 pp.121-124	日本騒音制御工学会	11月

雑誌掲載報文

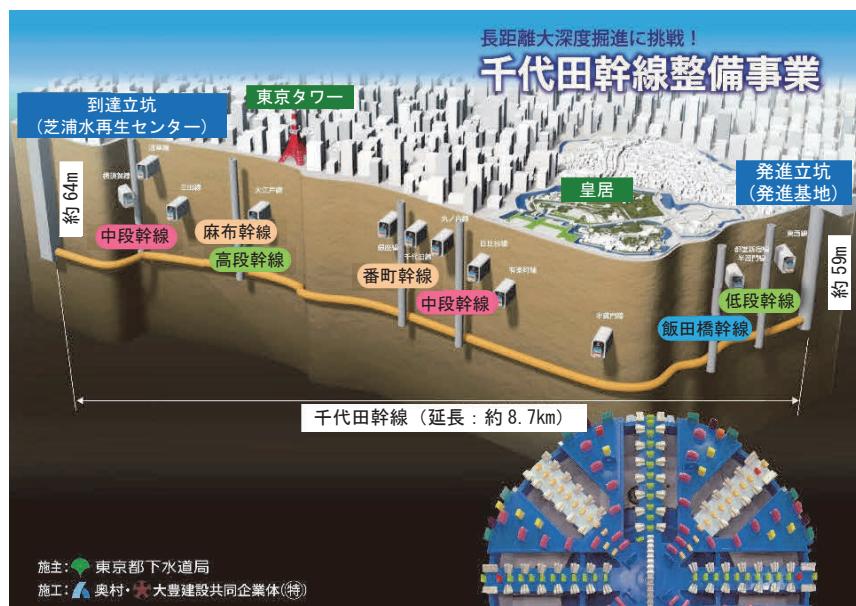
No.	標題	所属	氏名	掲載論文集	主催	2024年
16	〈特集〉不思議音の現状と測定技術 1.不思議音の現状概説 1.1不思議音の現状、展望	奥村組	稻留康一	音響技術 Vol.53 No.3(207) pp.3-6	日本音響材料協会	9月
17	〈特集〉不思議音の現状と測定技術 1.不思議音原因解明のための測定技術 3.1不思議音調査のための長期計測システム	リオン 奥村組 "	風間亮介 菊地 哲 阪本一生 柳沼勝夫	音響技術 Vol.53 No.3(207) pp.47-52	日本音響材料協会	9月
18	焼却施設解体トータルマネジメントシステム(DiT's)	奥村組 " " "	羽渕博臣 梅月綾華 今井亮介 大塚義一	都市と廃棄物 Vol.54 No.10 (2024) pp.47-54	環境産業新聞社	10月
19	不思議音の発生原因と対策事例	奥村組 東急建設	稻留康一 井上 諭	騒音制御 Vol.49 No.1 pp.29-32	日本騒音制御工学会	2025年2月
20	掘削岩周辺の酸化還元環境変化が砒素溶出特性に与える影響	奥村組 岩手大学 " " "	清水祐也 鈴木槙士 晴山 渉 中村大樹 竹花和浩 大河原正文	地盤工学ジャーナル Vol.20 No.1 pp.103-117 2025	地盤工学会	2025年3月

令和6年度土木学会賞（技術賞） (公益社団法人土木学会)

プロジェクト名：～千代田幹線整備事業～ 日本最長の超長距離下水道シールド施工について

土木学会技術賞とは、1920年（大正9年）に創設された伝統ある土木学会賞10種のうちの一つであり、土木技術の発展に顕著な貢献をなし、社会の発展に寄与したと認められるインフラの計画、設計、施工または運用やメンテナンス等の画期的な個別技術、画期的なプロジェクトに授与されるものである。

千代田幹線整備事業は、既設下水管の下に千代田幹線を構築し、既設下水の水位を下げて老朽化した下水道管をリニューアルすることが目的である。都心部に位置していることで、中間立坑を設けることが難しくトンネル延長が8.7kmと超長距離となり、既設構造物を避けるため平均土被り51mと大深度（高水圧）での施工となった。東京都心部のため、皇居や東京タワーの近傍を通り、地下鉄12路線、また東海道新幹線を縦断した。こうした課題を克服し、極めて困難なシールド工事を無事完了したことが、土木学会技術賞に値するものと評価された。



全体概要図



千代田幹線で使用したシールドマシン



第 26 回 日本免震構造協会賞—2025— 技術賞 (一般社団法人日本免震構造協会)

**対象技術： 巨大地震時の過大な水平変位を抑制する
変位検知型性能可変オイルダンパー(VOD[®])の開発と適用**

国立大学法人東北大学、有限会社シズメテックと共同で「変位検知型性能可変オイルダンパー(以下、VOD)」を開発し、巨大地震による長周期地震動対策として当社名古屋支店に VOD を適用したことが高く評価され、第 26 回日本免震構造協会賞「技術賞」を受賞した。日本免震構造協会賞「技術賞」は、免震建築物等の設計・施工およびこれらに係る装置などに関する技術として優れた成果を上げたものに対して贈られる賞である。

免震建物は、巨大地震時に過大な水平変位が免震層に生じ、建物周囲の擁壁に衝突するなどの被害が懸念されていた。VOD はその被害を防ぐことを目的に巨大地震時の水平変位を抑制するダンパーとして開発した。免震建物である当社名古屋支店は、国土交通省通知「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」に記載のある「設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性が高い地域」に建設されており、巨大地震時において擁壁衝突の被害が想定された。そこで、既設の従来型ダンパーを VOD に全数交換して、長周期地震動対策を行った。開発した VOD は大地震時まで従来と同様の免震性能を維持することができ、交換工事によりそれを超える巨大地震時の擁壁衝突を回避することが可能となった。



名古屋支店外観



名古屋支店に設置した VOD

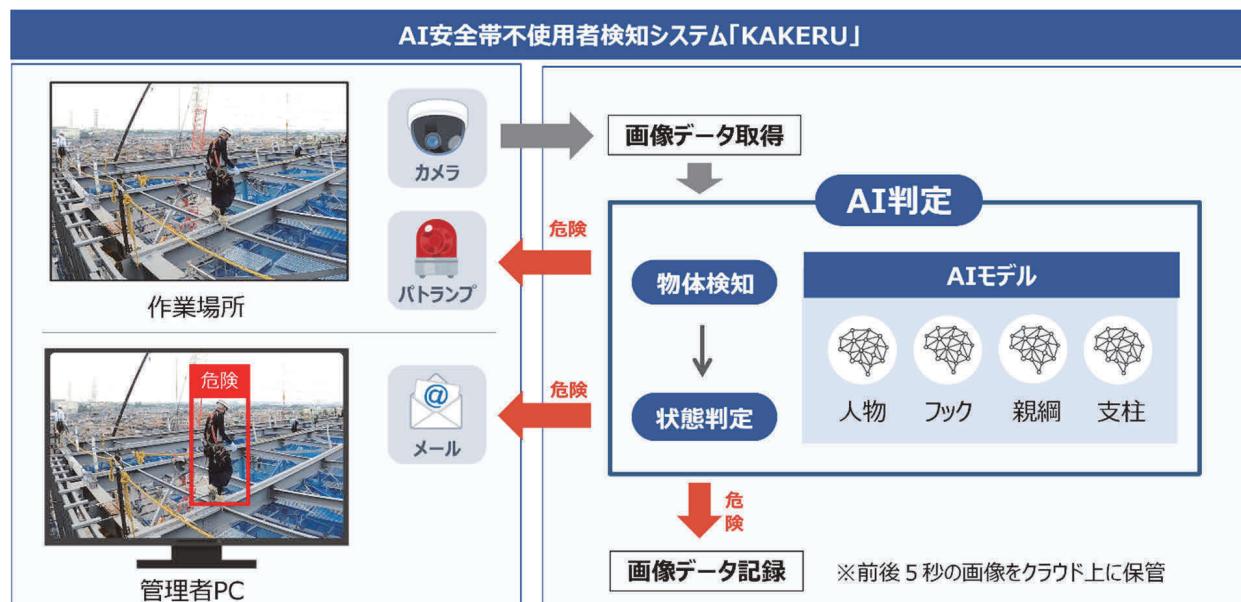


2024年度インフラDXコンペ 優秀技術賞 (国土交通省近畿地方整備局)

対象技術：AI安全帯不使用者検知システム「KAKERU」

2024年度『インフラDXコンペ』において、AI安全帯不使用者検知システム「KAKERU」（以下、KAKERU）が「優秀技術賞」を受賞した。本コンペは、「生産性向上」「安全性向上」「働き方改革」などインフラ分野のDXに活用できる優れた技術の発掘と開発促進を目的に表彰するものである。

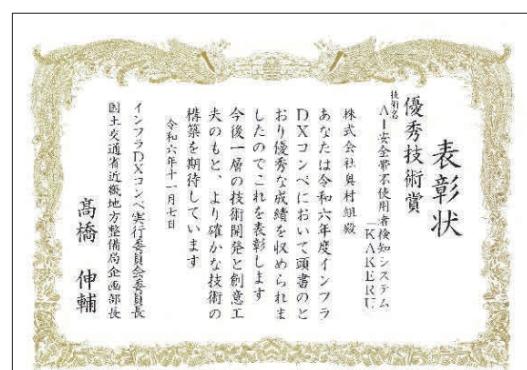
KAKERUは、株式会社日立ソリューションズおよび西尾レントオール株式会社と共同で開発したシステムで、画像認識AI技術を活用し、高所作業における墜落制止用器具（安全帯）フックの不使用者を自動で検知することができるシステムである。フックの不使用状態を検知すると、現地に設置したパトランプによって音と光で警告するとともに、管理者のPCにメール送信も可能である。KAKERUを使用することで、墜落転落災害に繋がる危険行動の抑止だけでなく、監視業務の省力化にもつなげることができる。



システムの概要



検証時の判定画面



第10回ウッドデザイン賞 2024 ハートフルデザイン部門（建築・空間分野） (一般社団法人日本ウッドデザイン協会)

作品名： X-Innovation Center（クロスイノベーションセンター）

2023年10月に開設した当社の新オフィス「クロスイノベーションセンター（東京都千代田区丸の内）」が、一般社団法人日本ウッドデザイン協会が主催する第10回ウッドデザイン賞2024において、ハートフルデザイン部門（建築・空間分野）のウッドデザイン賞を受賞した。ウッドデザイン賞は、木の良さや価値をデザインの力で再構築することを目的とし、その優れた建築や活動を評価・表彰する制度ある。そのうちハートフルデザイン部門は、木を活かして心身を健やかにし、Well-beingの実現が期待されるものが対象となっている。

受賞した本施設は「Innovate Area」「Create Area」「Work Area」の3つのエリアで構成されており、ワーカー自身が多様な環境や働き方を自由に選択できる、「つながりときっかけ」のデザインを追求した空間である。当施設のシンボルとして配置した Innovate Area のナラ木スペースに、当社ゆかりの地である奈良県吉野町の木材をふんだんに使用している。なかでも幅6mにもおよぶ吉野杉の一枚板で作られたカウンターの腰壁には、当社のシンボルマークである人をモチーフにしたデザインを採用している。なお、施設全体には適所に木材を活用しており、ワーカーのウェルビーイングを実現する空間を創出している。



クロスイノベーションセンターの全体図



吉野杉を利用したカウンター



イノベーション創出の中心的な役割を果たす Innovate Area



グループ活動を行う Create Area



効率的かつ快適に活動できる Work Area

(DESIGNSORI、The Chicago Athenaeum 他)

施設名：共英製鋼株式会社山口事業所新事務所棟（山陽小野田市）

共英製鋼山口事業所新事務所棟が ASIA DESIGN PRIZE 2025 - Gold Winner に選ばれた。ASIA DESIGN PRIZE は、世界中のデザイナーやクリエイターが参加し、相互交流するアジアを代表するデザイン賞として確立されてきた。世界 22 カ国から 1,879 件の応募総数のうち Gold Winner は 32 物件あり、Grand Prize 等合わせると 36/1879 件の応募総数の約 2% の賞を受賞した。他には環境配慮に優れたデザインと先進的なテクノロジーを有する製品に与えられる世界的な賞「GREEN GOOD DESIGN AWARDS 2025」も受賞した。持続可能な社会の実現に寄与するため、環境配慮に優れたデザインを評価することで世界中の人々の環境認識を高めることを目的とする国際的な環境賞である。同時に日本から受賞したのは 2025 大阪万博ドイツパビリオンがあり、過去には虎ノ門ヒルズ、熊本城特別見学通路が受賞されている。他に下記の 19 の賞を受賞している。

主要用途	事務所	延べ面積	3,931.89 m ²
所在地	山口県山陽小野田市	構造・規模	RC 造・地上 4 階
発注者	共英製鋼株式会社	竣工年	2024 年
設計・監理者	株式会社奥村組	備考	デザイン監修:エムアールスタジオ株式会社

デザインコンセプト 共英製鋼山口事業所は中国・四国・九州の拠点として地域で発生した鉄スクラップを電気炉で溶かし、鉄鋼製品に再生する地産地消型の事業を行っている。新事務所棟は、工場内に分散する事務機能を 1 つに統合し、業務効率と執務環境の改善を図るとともに、福利厚生施設を充実させ従業員のエンゲージメントを高めることを目的に計画された。外観デザインは、工場内にストックされている大量の鉄のビレット材にインスピライアされた。各地から集められた鉄スクラップは電気炉で融解されると、一旦原料の『ビレット』となり、新たな鉄鋼製品へと再生される。このビレットの集積こそが、鉄スクラップが生まれ変わる瞬間を表すものであり、このビレットの組み合わせを外観デザインとして可視化することが、未来創造の瞬間を創出する新事務所に相応しい形状であると共に、共英製鋼の製品がリサイクルを通じてどのように価値を再生し、社会に新たな役割を果たすかを象徴化している。

受賞歴 ※2025 年 7 月 1 日現在

- 01.A' Design Award & Competition 2025 - Architecture Building Design - Golden Award (イタリア)
- 02.A' Design Award & Competition 2025 Interior Space and Exhibition Design - Silver Award (イタリア)
03. A' Design Award & Competition 2025 Architectural Lighting Design - Silver Award (イタリア)
04. ASIA DESIGN PRIZE 2025 - Gold Winner (韓国)
05. Green Good Design Sustainability Awards 2025 - Winner (アメリカ)
06. ICONIC AWARDS 2025 - Winner in the Corporate Category (ドイツ)
07. Sky Design Awards 2025 / Lighting 部門 - Shortlisted (カナダ・香港・日本)
08. Arch Design Award 2025 - Golden Award (フィンランド)
09. MUSE Design Awards 2025 - Gold Winner (アメリカ)
10. 照明学会照明デザイン賞 2025 - 優秀賞 (日本)
11. 照明学会中国支部 優秀施設賞 2025 (日本)
12. IAD International Architecture & Design Awards 2025 Lighting: Workspace and Office Lighting - Platinum Winner (ポーランド)
13. IAD International Architecture & Design Awards 2025 Architecture: Office Building Design - Gold Winner (ポーランド)
14. French Design Awards 2025 - Gold Winner (フランス)
15. Rome Design Awards 2025 - Gold Winner (イタリア)
16. TITAN Property Awards 2025 - Gold Winner (アメリカ)
17. New York Architectural Design Awards 2025 - Silver Winner (アメリカ)
18. London Design Awards 2025 - Gold Winner (イギリス)
19. 第 59 回 SDA 賞 / 日本サインデザイン賞 2025 ショートリスト (日本)

奥村組特定研究報告

No.33

梁の塑性変形能力および亀裂進展に及ぼす
梁端フランジ溶接部の溶接欠陥の影響

2025.3

神戸大学博士(工学) 上田 遼

RYO UETA
Dr. Eng. KOBE UNIVERSITY

この「奥村組特定研究報告」は著者が
神戸大学へ提出した学位論文を再編、
収録し、掲載するものである。

梁の塑性変形能力および亀裂進展に及ぼす梁端フランジ溶接部の溶接欠陥の影響

論文の要旨

我が国の鋼構造建築物で幅広く採用される柱梁接合形式として、通しダイアフラム補剛による角形鋼管柱と H 形断面梁で構成される接合形式がある。本形式では、梁フランジと通しダイアフラム間を完全溶込み溶接にて接合する。耐震構造では、溶接部を含めた梁端部では大地震時に塑性ヒンジを形成する場合があり、設計時に塑性変形を許容している。つまりこの梁端溶接部には、十分な塑性変形能力とエネルギー吸収能力を発揮するために必要な耐力と破壊靱性が求められる。

一方、これらの溶接接合部には溶接施工時に溶接内部に欠陥が生じる可能性があり、梁端溶接接合部における溶接欠陥の発生は梁の塑性変形能力の低下を招くことが報告されている。特に梁端部は梁フランジから通しダイアフラムへの急激な断面変化に伴う歪集中が生じる場所であると同時に、溶接初層の溶接始終端部でのアークスタート位置特有の不安定なアークに伴う溶込み不良などの溶接欠陥が生じ易い位置でもある。溶接始終端部の処理に固形エンドタブを用いた溶接施工では、溶接始終端部に発生した溶接欠陥がエンドタブ内のみに留まらずに梁フランジの幅内にまで渡って発生する可能性がある。また、柱梁溶接接合部の溶接形式には、工場溶接形式と現場溶接形式がある。工場溶接形式では上下フランジとも外開先となるため、溶接部初層における欠陥の位置が、フランジの内面側に入るのに対して、現場溶接形式では下フランジの開先形状が内開先となるため、溶接部初層の欠陥はフランジの外側に入る。梁断面の最外縁側に欠陥が存在する内開先の溶接部初層の欠陥は外開先の場合に比べて、破壊に対して敏感に働くことが指摘されている。

梁端フランジ溶接部の溶接欠陥を対象とした研究は複数報告されているものの、溶接欠陥高さについての研究事例は少ない。またそのほとんどが溶接欠陥を起点とした破壊に至るまでの変形能力の評価に着目しているが、溶接欠陥を起点とした破壊には、脆性破壊を伴い亀裂の進展する場所によっても実験結果にばらつきが生じやすい。さらに、梁端部の破壊までの変形能力には断面寸法比の影響があることが指摘されているが、梁端フランジ溶接部の溶接欠陥と梁断面の寸法比を組合せた研究事例は極めて少ない。

そこで本論文では、溶接欠陥寸法の欠陥高さに特に着目して、欠陥寸法、開先形状および梁断面寸法を因子とした実大載荷実験および有限要素数値解析を実施して、梁端フランジ溶接部の溶接欠陥が梁の塑性変形能力および亀裂進展に及ぼす影響について調べる。さらに、不安定な脆性破壊を伴う破壊ではなく、安定した延性亀裂による溶接部の板厚貫通亀裂が発生するまでに注目して、塑性変形能力の評価を行う。加えて、梁フランジ溶接部に人工的に溶接欠陥を設けた試験体に対して、フェーズドアレイ超音波探傷検査法による検査を行い、欠陥高さの検出可否について調べる。

以上を踏まえて、本論文の構成は次の通りとする。

第 1 章では、研究背景と研究目的を述べ、本研究に関連のある既往の文献についてまとめる。そして、これらをもとに本研究の研究方法について述べる。

第 2 章では、開先形状、溶接欠陥寸法および試験体寸法比を因子とした実大 T 字形試験体による一定振幅繰返し載荷実験である実大載荷実験 I および実大載荷実験 II を実施する。実験 I では、梁せい 500mm の試験体を使用する。開先形状は、工場溶接を想定した外開先と現場溶接を想定した内開先で上下フランジとも同一形状としている。なお、溶接始終端部の処理には L 形固形エンドタブを使用している。欠陥寸法は、無欠陥、欠陥あり（フランジ幅内欠陥長さ（mm）×欠陥高さ（mm）：5×5、5×10、5×15、5×19、15×5）の 6 体を 1 シリーズとして計 12 体製作した。亀裂の進展状況を各サイクルで記録し、溶接欠陥が亀裂の進展に与える影響について調べる。実験 II では、実験 I の試験体寸法を約 1.6 倍した梁せい 800mm の試験体を使用する。開先形状は、実験 I と同様とし、欠陥寸法も約 1.6 倍して寸法比による塑性変形能力および亀裂進展に及ぼす影響について調べる。

第 3 章では、第 2 章で実大載荷実験を行った試験体に供した解析モデルを作成し、有限要素数値解析を行う。溶接欠陥近傍の歪性状および亀裂開口変位（以下、COD）、溶接部に発生する延性亀裂がフランジ板厚方向に貫通するまでの累積塑性変形倍率に着目して、溶接欠陥寸法による違いを考察した。さらに、塑性変形能力の下限値を設定し、その下限値を下回らない許容溶接欠陥長さと高さの組合せを示した。実験 II の解析モデルについては、COD を寸法比の 1.6 で除して基準化して評価した。

第 4 章では、許容欠陥寸法に影響を与える因子の候補として、溶接部強度および接合部係数に着目して有限要素数値解析を行い、その影響について考察する。

第 5 章では、第 1 章～第 4 章についてまとめ、本論文で得られた知見を示す。

奥村組特定研究報告

No.34

山岳トンネル工事で発生する掘削岩の
砒素溶出特性に関する研究

2025.3

岩手大学博士(工学) 清水 祐也

YUYA SHIMIZU
Dr. Eng. IWATE UNIVERSITY

この「奥村組特定研究報告」は著者が
岩手大学へ提出した学位論文を再編、
収録し、掲載するものである。

山岳トンネル工事で発生する掘削岩の砒素溶出特性に関する研究

論文の要旨

地層中には自然現象の影響を受けて人の健康に悪影響を及ぼす元が濃縮していることがある。このような地層を山岳トンネル工事等で掘削した場合、大量の岩石が発生する。これらの処分先には拡散防止対策が必要となる。この対策の計画は「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壤への対応マニュアル」を参考に検討することが多く、各種溶出試験の結果を基に掘削岩からの有害物質の溶出特性が考慮されている。しかし、埋立て後等の周辺の環境変化による溶出特性の変化は十分に考慮されていない。周辺環境への影響評価を定量的に行うための手法として飽和一不飽和移流分散解析が用いられているが、不飽和環境下での解析は難しいのが現状である。また、環境変化による溶出特性の変化をパラメータとして数値解析に利用する検討については報告がない。さらに、建設工事現場では掘削岩処分費を削減するため要対策か否かを判別する必要があり、迅速判定試験等が行われるが 1 日以上の時間を有するため仮置き場が必要となる。

本研究では上記課題を解決するために、①実際に掘削岩をベントナイト混合土で封じ込めた処分場内の環境をモニタリングした。さらに、②酸化還元条件の変化が掘削岩中の砒素溶出に与える影響を、バッチ試験や不飽和カラム試験、シリアルバッチ試験、酸素濃度影響評価試験を実施して確認した。これらの結果と長期の不飽和カラム試験結果の結果を基に、③一般的な移流・分散方程式の改良を行うとともに、酸化還元条件の変化をパラメータとして数値解析に利用できるか、④ハイパススペクトルカメラを用いた掘削岩の対策の要否判別手法を検討した。

①の結果では、処分場内の酸素濃度は夏季に低く、冬季に高くなることが分かった。また、深度によっても異なり、深い方が季節変動は大きい結果であり、その差は 10 %～20 %程度であった。処分場内の気圧が大気圧と連動した結果であったことから、底部に設置された浸出水排水管を通して空気の出入りがあると推察され、冬季に深い深度の酸素濃度が高くなる原因と考えられる。また、温度も同様に季節変動しており、深くなるほどその差は小さくなる傾向であった。最も浅い深度 (2.0 m) では、季節によって 10 ℃程度の差が生じており、砒素の溶出に影響が生じる可能性があることが分かった。また、夏季の温度上昇に伴い、微生物や鉱物による酸素消費量が増加すると考えられ、上記の酸素濃度低下の原因となっていると考えられる。浸出水の酸化還元電位 (Eh) は概ね 250mV で安定しており、一般的な表流水よりもわずかに還元的な条件となっていることが分かった。

②では、まず対象とした掘削岩中の砒素の所在について EPMA 分析により確認した。結果、砒素は磁硫鉄鉱中に点在して存在することを確認した。次に、酸化条件による溶出特性の変化を大気曝露で、還元条件による変化を還元剤（ギ酸 Na とアスコルビン酸 Na）で再現したバッチ試験を行った。還元剤濃度を 0.005～1.0 mol/L で添加することで、Eh を約-50～+300 mV の範囲で調整することができた。また、バッチ試験の振とう後やカラム試験の浸出水でも Eh の上昇はなく低い値を維持でき、ギ酸 Na およびアスコルビン酸 Na を用いた溶出試験の有効性が示唆された。試験の結果、曝露期間が

長い程砒素溶出量が多くなり、さらに強い還元条件になるほど砒素溶出量が多くなることを確認した。カラム試験やシリアルバッチ試験では、破碎直後の酸化されていない試料を対象に還元条件の影響を確認した。結果、バッチ試験同様に、強い還元条件の方が砒素溶出量は多くなる結果であった。また、2つの試験結果を比較すると、シリアルバッチ試験の方が同じ累積砒素溶出量に達するまでの液固比が多い結果（累積砒素溶出量 0.10 mg/kg になる液固比は、カラム試験で約 20、シリアルバッチ試験で約 100）であり、カラム試験での砒素溶出挙動を再現することは困難であることが示唆された。次に、不飽和環境下での酸化条件の違いによる影響を評価するため、酸素濃度の異なる場所で養生した岩石からの砒素溶出量の推移を確認した。結果、掘削岩周辺の酸素濃度が低い場合であっても磁硫鉄鉱の酸化分解が進むことが示唆され、その反応は酸素濃度が高い方が早いと考えられる。したがって、酸素濃度が 20%よりも低い環境下では、砒素溶出は低濃度で長期間継続する可能性が示唆された。

③では、岩石試料の粒径と散水流量の条件をかえた 12 ケースの不飽和カラム試験を行った。この結果から、不飽和条件では、砒素の溶出を体積含水率や粒子の表面積、通水時間の関係で評価できることを確認し、新たに溶出モデルを構築した。さらに、12 ケースの内 1 ケースで 9,700 時間経過時点から散水する精製水にギ酸 Na を添加し、カラム内を還元環境へと変化させた。環境変化直後に、環境基準値未満で安定していた砒素濃度が増加して再度基準値を超過した。このような環境変化に伴う砒素溶出量の変化を解析的に評価する方法を検討した。これにより、現地での掘削岩周辺の酸化還元環境変化による砒素溶出特性の変化を解析的に評価できる可能性があることが確認できた。

④では、鉱物や岩石の標本を被写体として近赤外線～短波赤外線領域の反射スペクトルを記録できるハイパススペクトルカメラで岩種の判別ができるかの撮影試験を行った。結果、種類の異なる鉱物や岩石の反射スペクトルの違いを評価できることを確認した。また、同じ岩種であれば、産地の異なる標本で抽出した教師データを基に判別できる可能性がある。さらに、上記の岩種による反射スペクトルの特性が認められる波長帯で判別することで精度を向上させることができることが確認できた。

中高層木造建築の奥村組西川口寮が完成 ～木造混合構造と中間階免震による地上 8 階建ての社員寮～

ESG/SDGs への取り組みの一環として、木造と RC 造の混合構造を採用した、自社の社員寮（地上 8 階建て、部屋数 60 室）が 2025 年 2 月に完成しました。なお、本建物は国土交通省「令和 5 年度 優良木造建築物等整備推進事業」に採択されました。

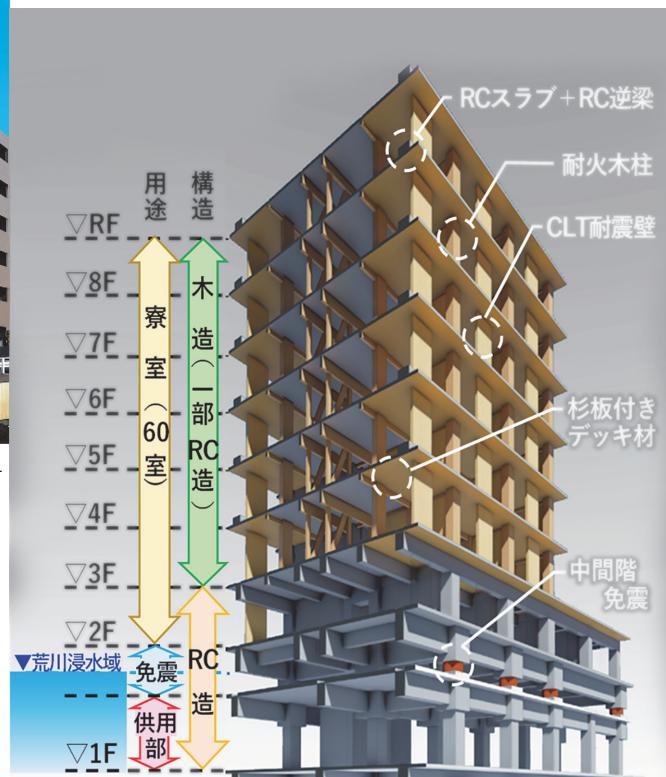
■ 建物概要 / 木造混合構造の採用



用途：寄宿舎	耐火種別：耐火建築物
敷地面積：854.00 m ²	木材・木質材料の使用量：208m ³
建築面積：359.77 m ²	工期：2023 年 11 月～2025 年 3 月
延床面積：1,793.61 m ²	設計：(株)奥村組 東日本支社
階 数：地上 8 階建て	一級建築士事務所
高 さ：30.93m	設計協力：(株)シェルター
構 造：	腰越耕太建築設計事務所
1 階～3 階床まで RC 造	施工：(株)奥村組 東日本支社
3 階柱～8 階 木造（一部 RC 造）	
中間階免震構造（1・2 階間免震層）	

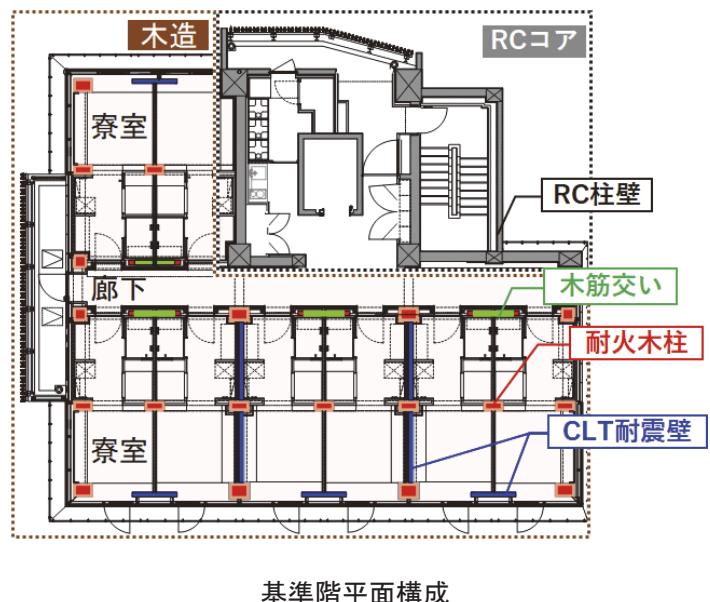
本建物は、建設地が荒川洪水ハザードマップの浸水想定区域にあるため、万が一の浸水に配慮し、1・2 階を RC 造、3～8 階を木造（一部 RC 造）とする木造混合構造を採用しました。また、1・2 階間に免震層を有する中間階免震構造としています。

高さ 10m を超える中層以上の木造建築においては、地震発生時等の水平方向に対する建物強度の確保が課題となるため、本建物では木造混合構造（一部 RC 造）とともに、免震構造を採用し、木造躯体の負担する水平力を軽減しています。また、スラブ等には RC 造を採用し、床の遮音性の確保および風搖れ対策を講じています。



■木質耐火部材を採用

木質耐火部材「SHIELD WOOD (シールドウッド)[®]」を3~8階の柱、梁に採用しました。当社は、株式会社シェルターとOEM契約を締結しています。



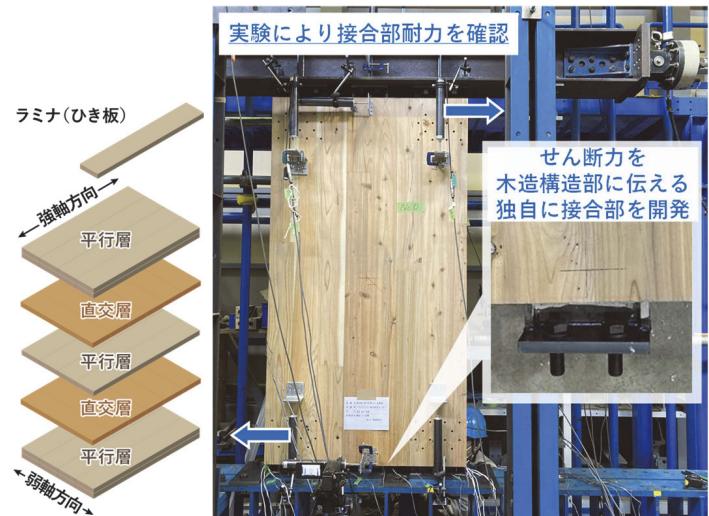
■プレース材としてCLTを採用

本建物には耐火被覆が不要なプレースにCLTを用いることで、構造材の仕上げを木で表現。CLTは新しい建材であり、接合部を含めた一般的な構法がないため、独自の接合法を構造実験で検証し採用しました（本年報で構造実験について報告しています。

pp. 6）

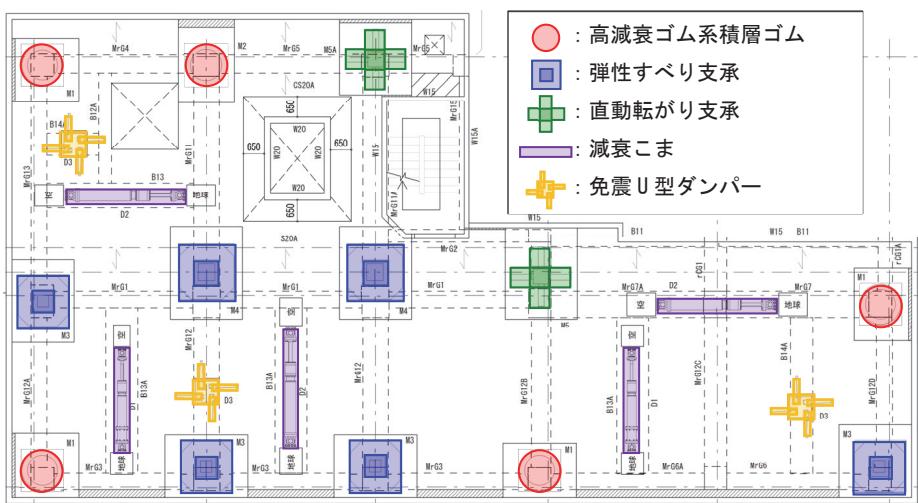
■免震構造

免震材には高減衰ゴム系積層ゴムの他、建物の長周期化を図るため弾性すべり支承や、地震時に生じる引抜き力に対応するための直動転がり支承、免震層の過大な変形を抑制する減衰こま、風荷重の揺れを抑制する免震U型ダンパーを採用し、これらを3次元立体解析により適切な配置としました。



CLT (直交集成材)

ラミナ(ひき板)を並べた後、繊維方向が直交するように積層接着した木質系材料



免震層 免震材の配置

■建物の木質化



■木材が仕上げとなる杉板付きデッキ材を採用

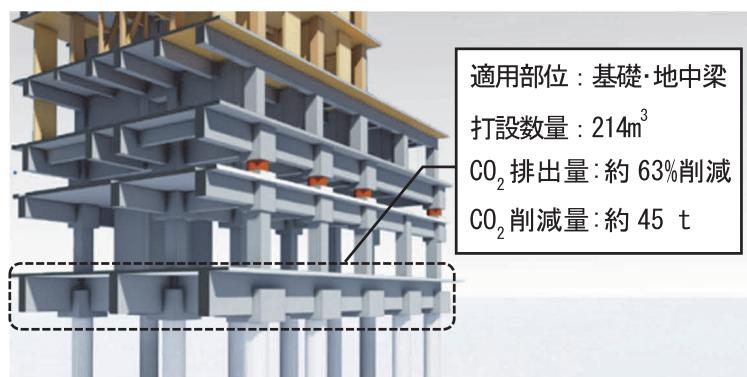
RCコアに水平力を伝達するため、床はRC造としました。一部スラブに杉板付きデッキ材を採用し、支保工が不要になり工期を短縮しました。



写真撮影：志摩大輔

■環境配慮型コンクリートのCELBICを採用

セメントの70%を高炉スラグ微粉末に置き換えてCO₂の排出量を削減したコンクリート「CELBIC」を基礎・地中梁に採用しました。



■木の質感を転写したコンクリート

1階の柱には杉板本実型枠を使用し、コンクリートに杉板の質感を表現しています。中間階免震の外壁部分にはOSB合板を型枠に採用し、冷たい印象のコンクリートとは異なる質感を表現しています。



覆工コンクリート施工の自動打設システムの開発 －実大施工実験による施工性の検証－

Development of Automatic Casting System for Tunnel Lining Concrete - Verification of Usability Based on the Full-Scale Casting Experiments -

松本隆太郎* 御器谷直子* Biswas Rajib Kumar* 斎藤隆弘*

要旨

山岳トンネルにおける覆工コンクリートの施工は、作業負荷の低減や労働者減少への対応が喫緊の課題となっている一方で、一連の施工が繰り返される工種であることから、自動化や省力化の余地がある。そこで筆者らは、既報で検討した圧力計を用いた打上り高さ管理技術を基に、コンクリートのポンプ圧送と型枠バイブレータの稼働の制御を加えた自動打設システムを開発した。実大規模の施工実験の結果、打上り高さに基づくポンプ圧送と型枠バイブルータの自動制御による施工が打込み開始から完了まで可能であり、省力化に寄与すること、セントル脱型後の品質が確保されていることを確認した。

キーワード：山岳トンネル、省力化、ポンプ圧送、型枠バイブルータ、中流動コンクリート

1. はじめに

建設工事におけるコンクリート施工では、品質を確保するための打込み作業や締固め作業、養生作業および施工管理に多くの熟練技能労働者や施工管理者を必要としているが、熟練技能労働者の不足が問題となって久しく、技術革新による省力化が求められている。山岳トンネル工事の覆工コンクリート施工においても、多くの作業で人材を必要とするが、その作業自体は繰り返し同じパターンで行うことが多いことから、施工の自動化による省力化を図る余地が大きい工種と考えられる。

筆者らは既往の研究¹⁾において、施工の高速化を目的に左右同時にコンクリートを圧入する施工方法を取り組み、同工法が品質を損ねることなく急速施工に寄与する技術であることを明らかにした。また、圧力計を用いてコンクリートの打上り高さを測定する方法が、圧力計から1.3~1.5m程度の高さまでは施工管理に必要な精度を有することを明らかにした²⁾。定量的な測定値に基づく打込み管理を行うことで、技能労働者の能力に左右されない施工が可能となる。しかし、これらは要素技術であるため、覆工コンクリート施工の全体的な省力化には至っていない。

そこで筆者らは、覆工コンクリートにおける打込み作業の自動化を目標に、上記の要素技術とコンクリートのポンプ圧送、型枠バイブルータの稼働の制御を統合した自動打設システム（以下、本システム）を開発した。現

場への導入にあたり、実用性の確認を目的とし、本システムを用いた実大規模の施工実験を行った。本報では、本システムの概要と実大施工実験の結果を報告する。

2. 自動打設システムの概要

本システムの概要を図-1に示す。本システムは、移動式型枠（以下、セントル）のスキンプレートの周長方向に複数設置される圧力計、圧力計の変化に応じて制御方法を任意にプログラムすることが可能な装置（以下、制御用PLC）、および操作用PCで構成される。本システムで制御する型枠バイブルータとコンクリートポンプは制御用PLCと有線で接続され、制御用PLCからの信

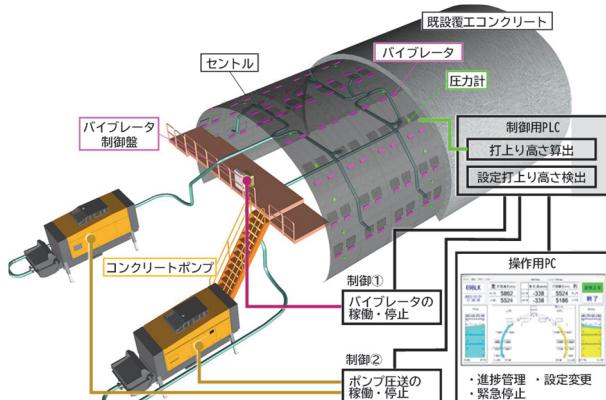


図-1 自動打設システムの概要

*技術本部技術研究所土木研究グループ

号を受けて稼働する。ただし、いずれも緊急時を考慮し直接操作が可能である。操作用 PC モニタには施工管理用のユーザーインターフェースが表示され、施工の進捗確認だけでなく制御設定の変更、緊急停止などの手動操作が行える。また、制御用 PC を外部ネットワークに接続することで、現地に不在でも工事事務所の PC など遠隔地での確認が可能である。

本システムによるコンクリートの打込み方法は、セントルの左右同時の打込みと圧入併用を標準としている。圧送ポンプは 1 台もしくは 2 台配置され、2 台の場合はそれぞれから圧送されるコンクリートがセントルの前後に打ち込まれる。配管は途中 Y 字管で分岐し、左右の打込み口に接続しており、1 系統から左右同時にコンクリートが供給される。一般的なセントル延長である 10.5m~12.5m に対し左右同時に打ち込むことで、左右の偏りを削減でき、時間あたりの圧送量の増加による作業時間の短縮が期待できる。

圧入併用とは、打込み口から下方にコンクリートを流し込んだ後、同じ打込み口から上方の空間に圧送により押し上げるように打ち込む手法である。一つの打込み口からコンクリートを打ち込む範囲を拡大することで配管切替え回数が削減され、省力化および作業時間の短縮が期待できる。

本システムの制御フローを図-2 に示す。施工前の準備として、計画図面に基づき覆工コンクリートの寸法と、圧力計の設置位置から型枠バイブレータの稼働や配管を切り替えるための打上り高さを設定する。この他に、時間あたりの圧送量や打込み完了判断時の圧力、左右の打上り高さが異なる際に圧送停止する打上り高さの左右差の閾値が設定できる。

コンクリートの打込みにおいては、本システムの操作 PC に表示される「圧送開始」ボタンを押下することでポンプ圧送が開始され、コンクリートの圧力はセントルに設置した圧力計で常時測定される。

コンクリートの打上り高さは、圧力計が測定する値を液圧として用いて式 (1) から連続的に算出する。

$$h_{cte} = h_{pgn} + \frac{p_n}{\rho} \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 h_{cte} : 打上り高さ算出値(m)、 h_{pgn} : No.n の圧力計の設置高さ(m)、 p_n : No.n の圧力計が測定する圧力(kPa)、 ρ : コンクリートの単位体積重量(kN/m³)

ただし、傾斜した形状の型枠への圧力は理論値よりも小さくなることから³⁾、圧力計の設置間隔は実験結果²⁾において精度が確認された 1.5m 以内とすることが理想である。打上り高さ算出値は、コンクリートの天端から 1.5m 以内にある圧力計となるよう、コンクリートの圧力を受ける圧力計のうち最も上部に位置するものから算出した（以下、打上り高さ算出値）。

打上り高さ算出値が設定値に達すると、ポンプ圧送の停止、バイブルエタの稼働、ポンプ圧送の再開が自動で制御される。なお、本システムでは最初の圧送開始、配管切替え、配管切替え後の圧送の再開を手動作業とした。

3. 自動打設システムによる実大施工実験

3.1 実験概要

実大規模のトンネルを模擬した覆工コンクリートの施工実験を技術研究所内で実施し、本システムの動作確認と実用性について検証した。

a. 覆工コンクリートとセントルの仕様

実験に用いたトンネルの形状とセントルを図-3 に示す。内空断面積は約 61m²、覆工コンクリートの厚さは 350mm、主鉄筋は D19@250mm、配力鉄筋は D16@300mm、セントルの延長は 3.0m、コンクリートの打込み口は下から両側に SL 口と肩口、天端中央に吹上げ口の計 5 箇所とした。1 ブロックあたりの施工数量は約 21m³ である。圧力計は文献²⁾を参考に、セントル付帯設備の配置を考慮し周長方向 1.5m 程度の間隔で、セントルの下端から打込み口の肩口の近くにあるスキンプレートのヒンジ（以下、肩部）付近までは鉛直距離で 1.5m 以内、肩部以降は 0.8m 程度以内となるよう片側 6 箇所、天端中央に 1 箇所の計 13 個配置した。型枠バイブルエタは片側に 7 箇所の計 14 台設置した。また、実験では地山の代わりとなる組立式の鋼製型枠を設置した。

実験に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。覆工コンクリートに適用されることの多い中流动コンクリートを使用した。

b. 実験ケース

実験のケースを表-2 に示す。圧送ポンプ種、配管系統、配管切替え回数、圧送ポンプ制御方法、打込み完了の判断方法をパラメータとして 4 ケースを設定した。本システムが多様な圧送ポンプに対応するか確認するため、

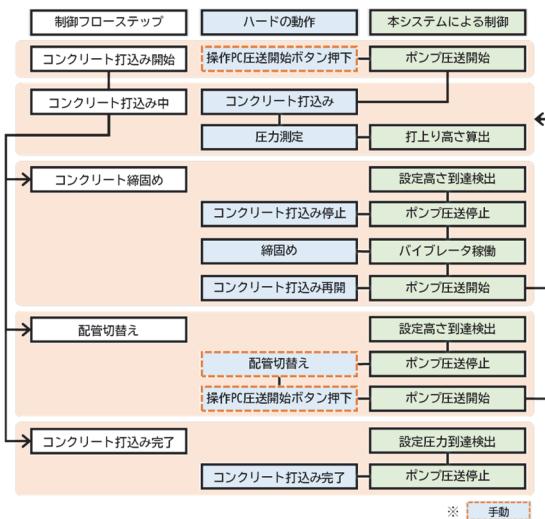


図-2 本システムの制御フロー

圧送ポンプはメーカーが異なる2機種を選定し、リモコン端子から有線で制御用PLCに接続した。ケース1、2、4の配管系統は、圧送ポンプ1台からY字管による左右分岐配管とし、左右同時にコンクリートを打ち込んだ。ケース3では、実際の圧送系統を模擬するため左右別配管とし、圧送ポンプ2台を用いて左右それぞれにコンクリートを打ち込んだ。配管切替え回数は、ケース1と4はSL口から肩口への1回とし、実際の施工では天端中央部の吹上げ口が使用されることから、ケース2と3ではSL口から肩口と、肩口から吹上げ口の2回とした。打込み完了は、ケース1では手動で設計圧力(8kPa)までの充てんを確認するのに対し、ケース2と3は地山替わりの鋼製型枠への負荷を考慮し10kPa、ケース4では設計の約2倍となる15kPaで圧送を停止する制御とした。また、セントル横断方向でコンクリートの偏圧が生じないよう、打上り高さの左右差が300mmを超えた場合に自動停止する制御とし、復旧には左右分岐後の配管途中にある流量調整ピンを使用した。なお、打上り高さ算出

値の導出において、コンクリートの単位体積重量に22.54kN/m³(コンクリートの単位容積質量2.3t/m³、重力加速度9.8m/s²)を用いた。

c. 測定項目

本システムによる圧力、打込み状況の確認のほか、検知センサを用いて実際のコンクリートの打上り高さを記録した。また、打上り高さ算出値の精度確認を目的に、セントルに設けた高さが既知の検知センサがコンクリートを検出した時刻と、同じ時刻に記録された打上り高さ算出値との比較を行った。セントル脱型後には表層評価を目的に表透気試験(トレント法)と目視評価を行った。

3.2 実験結果

実験の全景を写真-1に、コンクリート受入試験の結果を表-3に示す。実験は2024年2月から5月の間で実施し、表-1に示す管理値を満足することを確認した。

a. 本システムによる打込みの制御と省力化

ケース2を施工中の操作PCモニタを図-4に示す。コンクリートが打ち込まれた範囲は左右異なる色でハッ

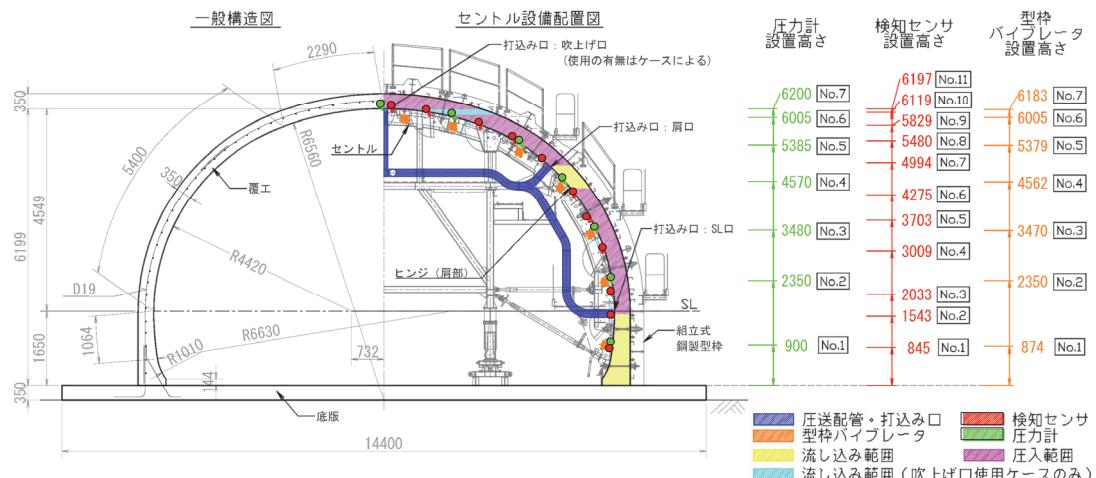


図-3 実験に用いたトンネル構造図とセントル設備配置図

表-1 コンクリート配合

スランプ フロー(cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	粗骨材 最大寸法(mm)	単位量(kg/m ³)				Ad
					W	C	S	G	
50(±7.5)※	4.5(±1.5)※	48.5	51.7	20	175	361	891	837	C×1.5%

※管理値、材齢28日における圧縮強度=24N/mm²、W:地下水、C:普通ポルトランドセメント、密度3.16g/m³、比表面積3260cm²/g、S:細骨材、栃木県宇都宮市東木代町、表乾密度2.59g/cm³、粗粒率3.00%、吸水率2.08%、G:粗骨材、栃木県宇都宮市東木代町(碎石)、表乾密度2.60g/cm³、吸水率1.88%、Ad:高性能AE減水剤、標準型I種、密度1.06g/cm³

表-2 実験ケース

ケース	1	2	3	4
圧送ポンプ種	①定置式 35m ³ /h 1台	②配管車 25m ³ /h 1台	①1台、②1台	①1台
配管系統	Y字管で2系統に分岐し左右同時打込み	Y字管で2系統に分岐し左右同時打込み	2系統で左右それぞれに圧送し打込み	Y字管で2系統に分岐し左右同時打込み
配管切替回数	1回(SL口→肩口)	2回(SL口→肩口→吹上げ口)	2回(SL口→肩口→吹上げ口)	1回(SL口→肩口)
圧送ポンプ 制御方法	左右差300mm以上で自動停止 停止後の流量調整と再開は手動	左右差300mm以上で自動停止 停止後の流量調整と再開は手動	左右差300mm以上で自動停止、左右差300mm未満となるよう圧送を自動制御	左右差300mm以上で自動停止 停止後の流量調整と再開は手動
打込み完了	手動(天端圧力計が8kPa)	天端圧力計が10kPa(設計+2kPa)	天端圧力計が10kPa(設計+2kPa)	天端圧力計が15kPa(設計+7kPa)
セントル型枠 および配管図	打込み口別 打込み範囲 	打込み口別 打込み範囲 	打込み口別 打込み範囲 	打込み口別 打込み範囲

チングされ、打上り高さ算出値の推移と左右差は中央上部、稼働する型枠バイブレータは赤枠で強調表示される仕様となっており、これら制御と稼働の終始はデータとして記録される。本実験では5秒に1回の頻度でデータを取得しており、打上り高さ算出値の推移も同頻度で更新される。これらの表示と型枠バイブルーテタおよびポンプ圧送の稼働が不具合なく連動し、管理用表示から打込みの管理が可能であることを確認した。

ケース2における右側に設置した各圧力計の測定値と打上り高さ算出値の関係を図-5に示す。打上り高さ算出値は、初めに圧力計No.1で測定した圧力に基づき算出され、高さ2350mmに設置された圧力計No.2で圧力を検出した後は圧力計No.2に基づき算出される。圧力計No.1は、圧力計No.2が設置された鉛直距離1450mmの間では打上り高さ算出値と理論値はほぼ同じ値で推移し、それ以降は理論値に対し打上り高さ算出値の方が大きくなる傾向がみられた。圧力計No.2からNo.6についても、ひとつ上に位置する圧力計までは理論値とほぼ同じ値で推移したが、その鉛直距離は上部になるほど短くなる傾向となった。これは、時間の経過による流動性の低下と、セントルの上方ほど傾斜形状となるため理論値よりも圧力が小さくなつた³⁾ことが原因と推察された。

コンクリート打込み時の各圧力計の打上り高さ算出値の推移と検知センサおよび型枠バイブルーテタ、配管切替えの施工記録を図-6に示す。打込み完了時間は開始から4時間20分後、打上がり速さは1.56m/hとなり、現場で施工する際の打上り速さと同程度であった。

検知センサが反応した打上り高さと、同じ時刻の打上り高さ算出値は、施工開始から完了まで大きな差はみられなかった。打込み開始から約70分後に打上り高さ算出値の左右差が設定した閾値の300mmを超えるポンプ圧送が停止した。このときに点検窓からコンクリート天端の高さを実測したところ左右で約300mmの差が生じており、打上り高さ算出値と実測に差異はみられなかった。

ポンプ圧送と型枠バイブルーテタは、打上り高さ算出値に基づいて予め設定した手順の通りに、自動制御で稼働した。技能労働者はポンプ圧送と型枠バイブルーテタの稼働状況を監視し、施工時の主な作業は配管切替え、片付け、清掃などであった。

コンクリートの打込みは、天端頂部に設置した圧力計(図-3のNo.7)が設定した値の10kPa(図-6の6625mmに相当)に到達した後、自動で圧送が停止することで完了した。

点検窓からの目視により、圧入されたコンクリートは打込み口から垂直に上昇し、コンクリートの天端面をわずかに盛り上げながら延長方向の両端に向かって流れる動きがみられた。配管切替え時の打込み口の閉塞や圧入途中で圧送が困難となるなどの不具合は生じなかつた。

4 ケース全てにおいて、本システムに起因する打込み

不可となるトラブルなく施工でき、本システムによる打込みの管理が可能であることを確認した。覆工コンクリートの打込み作業は圧送ポンプの管理を含めて一般的に8名程度で行われるが、圧送ポンプに関わる技能労働



写真-1 実験の全景

表-3 施工日およびコンクリート受入試験の結果

ケース	1	2	3	4
施工日 (2024年)	2/13	2/26	4/25	5/31
スランプフロー(mm)	485	560	515	450
空気量(%)	3.8	4.6	4.0	3.3
コンクリート温度(°C)	14	15	23	26

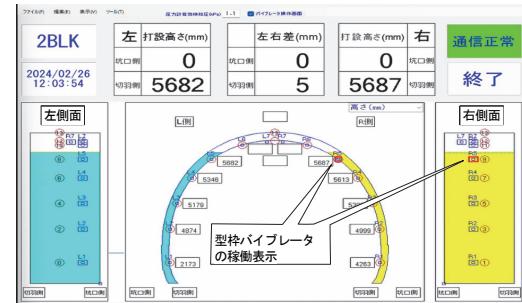


図-4 施工中の操作PCモニタの表示例
(左右は切羽に向かっての表記)

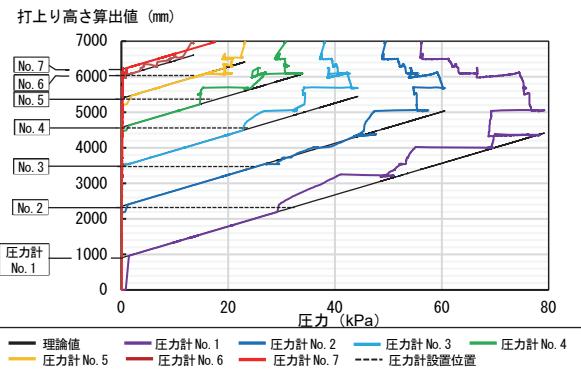


図-5 圧力計の測定値と打上り高さ算出値の関係

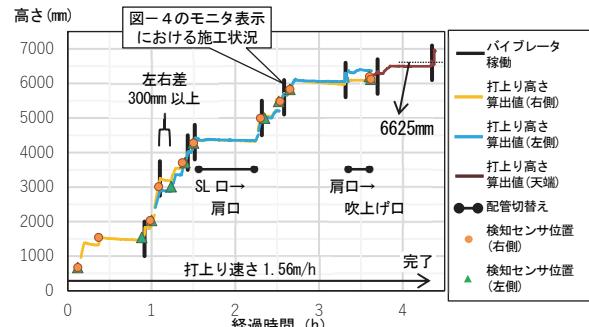


図-6 打上り高さ算出値の推移

者は不要であり、2人程度の省人化が図れる。また、型枠バイブルエタに関する作業は操作用PCの操作および監視が主な業務となり、締固め作業に熟練度は問われず負荷が低減されるため、技能労働者の省力化が図れる。

b. 打上り高さ検出値の精度

縦軸に検知センサの設置高さを、横軸に検知センサが反応した同時刻の打上り高さ算出値をプロットした図を図-7に、検知センサを真値としたときの打上り高さ算出値の差の絶対値（以下、絶対誤差）の平均と標準偏差を表-4に示す。全てのケースで得られた絶対誤差の平均は78mm、標準偏差70mm（n=70）となった。しかし、検知センサNo.10とNo.11の絶対誤差が相対的に大きい傾向がみられ、吹上げ口を使用したケース3では約231mmが生じ、吹上げ口を使用していないケース1では98mmで最も小さく、およそ2.4倍の差がみられた。

ケース3施工時の本システムの記録を調べた結果、検知センサNo.9までが反応し打上り高さ算出値が配管切替え高さに到達し、配管を吹上げ口に切り替え打ち込み始めた直後に、検知センサがNo.11、No.10の順に連続して反応した。これは、吹上げ口から流れ込むコンクリートに反応したためであり、実際の打上り高さと異なる値である。そのため、吹上げ口を使用したケース2と3の検知センサNo.10とNo.11を除いた補正後と打上り高さ算出値を比較した結果、誤差の絶対値の平均は67mm、標準偏差60mm（n=63）となった。本システムによる打上り高さ算出値は、真値に対し±187mm以内に約95%が収まる精度である。本システムによる施工で打上がり高さ算出値に起因するトラブルは生じなかったことから、本システムは施工管理に必要な打上がり高さ算出値の精度を有すると考える。本実験で使用した規模のセントルの場合、セントルの他付帯設備を考慮したうえで、圧力計は周長方向1.5m、鉛直距離は最大で1.5m程度以内の間隔で設置する必要がある。

c. 表層評価

打ち重ね最大時間は配管切替え時の約60分であり、セントル脱型後のコンクリート内空側の目視確認では、ひび割れや未充てんはみられなかったことから、コールドジョイントなどの施工不良は生じないと判断した。

材齢28日に表層透気試験を実施した。測定箇所と評価基準⁴⁾を図-8に示す。透気係数は一般的なコンクリートの場合、 $1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ （一般）以下が求められる。測定箇所はケースごとに内空側のスパン中央においてSL、天端、肩部付近の圧入範囲と流込み範囲、SLとし、SLと天端は妻側も測定した。

測定の結果を図-9に示す。ケース別の平均は全て「一般」の評価となった。実際の覆工コンクリートでは通常よりも小さい値が求められることから、同等の評価が得られたといえる。測定位置別の平均では、SLが「一般」の評価であったのに対し、天端頂部は「良」の

評価が得られ有意差が認められた。SL部は型枠バイブルエタ間の中央に位置するため、締固めの効果が最も小さくなることで相対的に透気係数が大きくなり、天端頂部はコンクリートの底面に位置するため表面で気泡が生じにくく、締固めによりエントラップドエアが上昇しコンクリートの表層が密実になったことで透気係数が小さくなつたと推察された。打込み方法別でも測定位置別と同様に、SLが「一般」の評価に対し天端頂部は「良」の評価が得られ有意差が認められた。

圧入はエントラップドエアが発生しにくいため気泡が少なく、コンクリート表面が比較的緻密になっていると

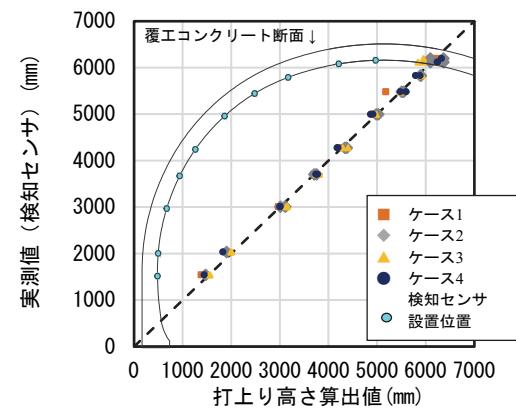


図-7 打上り高さ算出値と検知センサ

表-4 打上り高さ算出値と検知センサの差

ケース	吹上げ口 使用	測点 (箇所)	誤差の絶対値 の平均 (mm)	標準偏差 σ (mm)
1 検知センサ No.1~9 検知センサ No.10, 11	無し	16	77	80
		12	71	
2 検知センサ No.1~9 検知センサ No.10, 11	有り	18	74	61
		14	56	
3 検知センサ No.1~9 検知センサ No.10, 11	有り	19	80	81
		16	52	
4 検知センサ No.1~9 検知センサ No.10, 11	無し	17	81	53
		14	73	
全体会 補正後	—	70	78	70
		63	67	

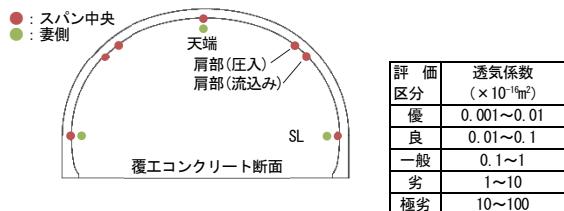


図-8 透気試験の測点とグレーディング⁴⁾

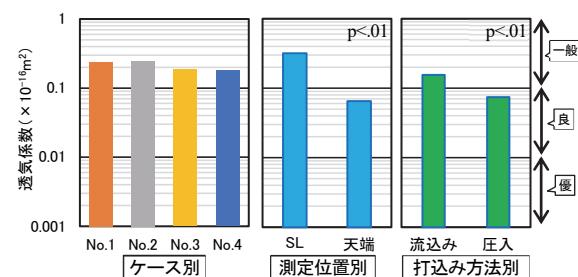


図-9 透気試験の結果

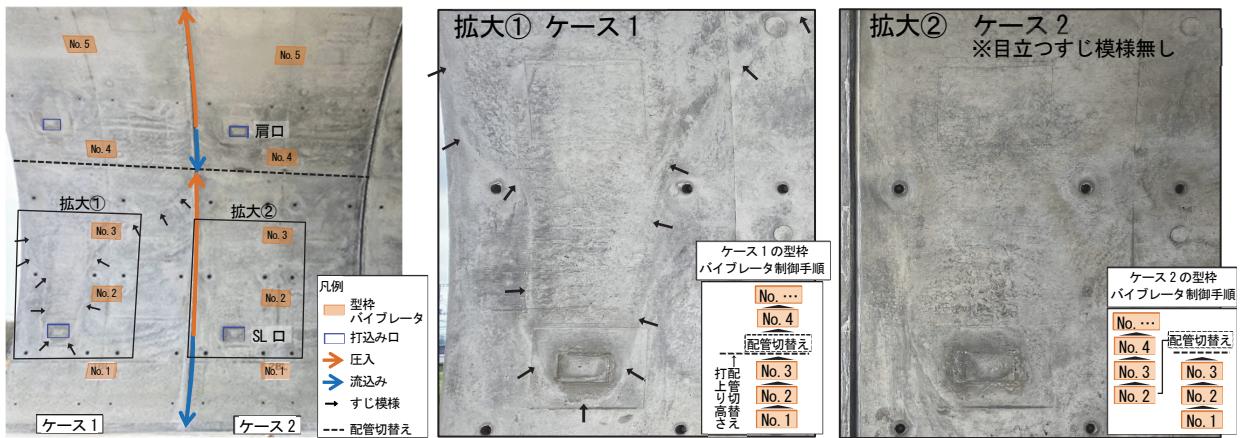


図-10 内空側からみたコンクリートの表層（ケース1とケース2）

推察された。以上より、コンクリートを打込み口から圧入することで、流込みよりも品質向上が期待できる。

施工後の覆工コンクリートを内空側から撮影した写真を図-10に示す。初めに施工実験を行ったケース1において、コンクリートがSL部の打込み口から上方に向かってコンクリートの流動跡（以下、すじ模様）が確認された。覆工コンクリートは仕上がり面であるため美観を損なう現象といえる。すじ模様の形状から圧入が原因と推測されたため、施工記録を見直し改善を図った。

ケース1では、コンクリートの打上り高さの推移に伴い、打上り面の下部に位置する最上段の型枠バイブルータをNo.1から順に30秒稼働させた（図-10 ケース1の型枠バイブルータ制御手順）。圧入範囲において、すでに打ち込まれたコンクリートと打込み口から新しく圧入され上部方向に打ち込まれるコンクリートの境目において、型枠バイブルータから離れた位置ほど一体化の効果が小さくなつたため、すじ模様が残つたと推定した。そのためケース2では、配管切替えの位置までは同じ手順で行い、配管切替え後にSL部の打込み口から打上り面以下にある型枠バイブルータNo.1とNo.2を下から順に再度30秒ずつ稼働させる手順に変更した（図-10 ケース2の型枠バイブルータ制御手順）。その結果、ケース1でみられたすじ模様は発生せず、その他目立つ模様は認められなかったことから、型枠バイブルータの稼働を工夫することで、圧入によって打込み口から上方に生じるすじ模様を改善できることがわかつた。

4. 結論

覆工コンクリートの自動打設システムを開発し、実大規模の施工実験を行つた。得られた結果を以下に示す。

- 実大規模で型枠バイブルータと圧送ポンプの自動制御による打込みができ、施工管理において本システムが実用性を有することを確認した
- 圧送ポンプを常時操作する技能労働者は不要となり、締固めは自動制御により作業負荷が低減でき

るため、省人化および省力化に寄与する

- コンクリートの打上り高さ算出値の精度は、平均誤差67mm、標準偏差60mmとなつたが、圧力計を直壁形状部で1.5m、傾斜部で1.0m程度以内に据え付けることで、施工管理に差し支えない精度で本システムを運用できる
- 圧入した範囲の表層透気試験で、通常の流込み範囲より評価の高い「良」が得られた一方で、コンクリート表面には圧入に起因するすじ模様が生じる場合があるが、型枠バイブルータの稼働方法の工夫によって目立たなくすることが可能である

5. おわりに

本システムは、定量的なコンクリートの打上り高さに基づき高い再現性で打込み管理ができるため、技能労働者の熟練度に依存することなく安定した品質の確保と施工が可能である。実現場へ適用し実績を積み重ね、より実用性の高い技術となるよう開発を進める。

【参考文献】

- 小野 緑、浜田 元、斎藤隆弘、張 志瑄、「覆工コンクリートの急速施工における圧入打設の施工性と品質」、土木学会全国大会第74回年次学術講演会、VI-116、2019
- 斎藤隆弘、張 志瑄、小野 緑、浜田 元、「セントルに設置した圧力計によるコンクリート打設高さ検知システム」、土木学会全国大会第74回年次学術講演会、VI-105、2019
- 土木学会、「コンクリートライブラリー136 高流动コンクリートの配合設計・施工指針 [2012年版]」、p.136、2012
- R.Torrent、G.Frenzer、A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the “covercrete”、International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, pp.985-992, 1995.9

プレキャスト PC 床版による道路橋更新技術の開発

—ループ継手工法の施工性を改善した新たな継手工法の開発—

Method for Renewing Precast Prestressed Concrete Slabs Applicable to Highways

- A New Joining Method for Improved Efficiency vs. the Loop Joint Method -

川口昇平* 守屋裕兄** 藤井伸介*** 三澤孝史****

要旨

道路橋のプレキャスト PC 床版の施工性向上を目的として、PC 床版の継手部の鉄筋を矩形のスパイラル筋で拘束することにより在来工法のループ継手工法と同等の性能をもつ接合工法を開発した。このループ継手工法では、ループ筋の内側に側方より橋軸直角方向の鉄筋を挿入する作業が必要であるが、矩形スパイラル筋は床版上面から挿入が可能なため、配筋作業の効率性が高い。今回、この新たな継手工法について、静的曲げ載荷試験ならびに輪荷重走行試験を実施し、耐荷性能と 100 年相当の交通荷重に対する疲労耐久性を確認した。加えて、実物大の試験体を用いた施工試験を行い、ループ継手工法に比べて、接合部の配筋にかかる作業時間を 75% 低減できることを確認した。

キーワード：プレキャスト PC 床版、継手構造、輪荷重走行試験、疲労耐久性、半断面施工

1. まえがき

近年、高速道路が果たす役割はますます重要となっており、高速自動車国道などの幹線道路網は、物流用に一定の通行量を確保することが求められる。そのため、道路網の更新工事においては、車線減少や片側通行など、完全通行止めとならないように施工されることが多い。複数車線の一部車線を開放する半断面施工の場合、PC 床版の継手箇所および延長が増えることから、継手の施工性の向上が課題となっている。このような背景から、道路橋のプレキャスト PC 床版の取替工事（写真-1）の施工性向上を目的として、PC 床版の継手部の鉄筋を矩形のスパイラル筋（以下、矩形スパイラル筋）で拘束することにより継手部の接合力を高める新たな接合工法を開発した。この工法について、試験により耐荷性と耐久性、施工性について検証した結果を報告する。

2. PC 床版の継手の要求性能

PC 床版の継手に要求される性能について、NEXCO 3 社は、接合構造の疲労耐久性について、耐用年数 100 年以上が確保できることを確認するため、2019 年より、動的載荷による輪荷重走行試験（写真-2）を行い、その性能証明書の提出を求めている。耐用年数 100 年間に相

当する疲労耐久性として、荷重（250kN）と繰り返し載荷回数（10 万回）の事例が設計要領^①の解説に示されており、その条件をクリアした接合構造が、実際の床版取替工事で適用されている。



写真-1 PC 床版の取替工事における新床版架設の状況

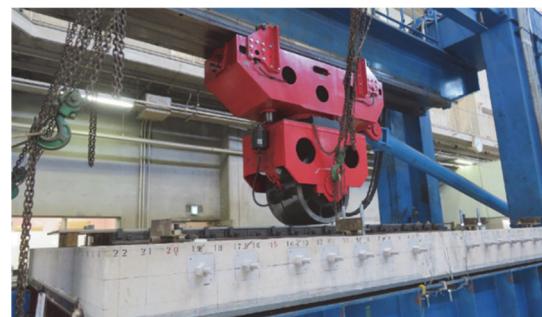


写真-2 輪荷重走行試験の状況(土木研究所)

*技術本部技術研究所新領域研究グループ **土木本部土木技術部 ***土木本部土木設計部 ****技術本部技術研究所

3. Z スパイラル工法の特徴

橋軸方向（車両走行方向）の接合構造の標準工法として NEXCO 3 社が採用しているループ継手工法と、当社と昭和コンクリート工業株式会社が共同開発したループ筋と矩形スパイラル筋を組み合わせた継手工法（以下、Z スパイラル工法）の配筋の比較を図-1 に示す。標準工法であるループ継手工法では、ループ筋の中へ橋軸直角方向に 6 本の鉄筋（以下、通し筋）を後挿入し組み立てることで接合部のループ筋同士を一体化させる。しかし、図-2 のようにループ筋の一部の曲げ半径を変更したり、足場を設置したり、通し筋を挿入するための作業スペースを確保することが施工上の課題となっている。一方、Z スパイラル工法は、ループ筋の構造的なメリットを生かしつつ、矩形スパイラル筋を上から挿入するだけなので、通し筋の配筋および結束作業を大幅に省力化できる。ループ継手の場合、図-3 のようにループ筋の直線部が付着力で抵抗し、曲線部が内側のコンクリートからの支圧力により抵抗することで、直鉄筋の場合より短い継手長で、左右の PC 床版に応力を伝達することができる。しかし、ループ筋に囲まれたコンクリート（以下、コアコンクリート）の応力状態については十分に明らかにはなっていない。一方、Z スパイラル工法についても、ループ筋を用いており、直線部には付着力と曲線部には支圧力が発生する。その上で、矩形スパイラル筋が果たす役割について、以下 3 つの機構があると考える。

- 矩形スパイラル筋の下側の鉄筋が橋軸方向に補強効果を發揮し（図-3 II、III の □）、接合部の橋軸方向の抵抗性が高まる
- ループ筋が引張力により引き抜けようとする際に、コアコンクリートが水平方向の圧縮を受け、挟まれたコンクリートが鉛直方向に膨らもうとする（図-3 II の →）に対し、矩形スパイラル筋が変形を拘束し（図-3 II の ↗）、ループ筋の引き抜け抵抗性が増す
- ループ筋が引き抜けようとする際に、ループ筋の先端から斜め方向に発生するせん断力（図-3 III の 破線 ←）に対し、矩形スパイラル筋が継手部に生じる曲げ応力に対して抵抗するブリッジ効果が生じる。

なお、ii でコアコンクリートが水平方向の圧縮を受ける際、挟まれたコンクリートは鉛直方向だけでなく、水平奥行き方向にも膨らもうとするが、実際の床版は十分に奥行き方向に長く、応力が分散するため、局所的に載荷する輪荷重が奥行き方向の膨張に及ぼす影響は小さいと予想される。そのため、矩形スパイラル筋はループ継手における通し筋が果たす機能のうち、ループ筋の支圧力に抵抗し、膨張を抑制する機能を代替する効果を有していると考えられる。

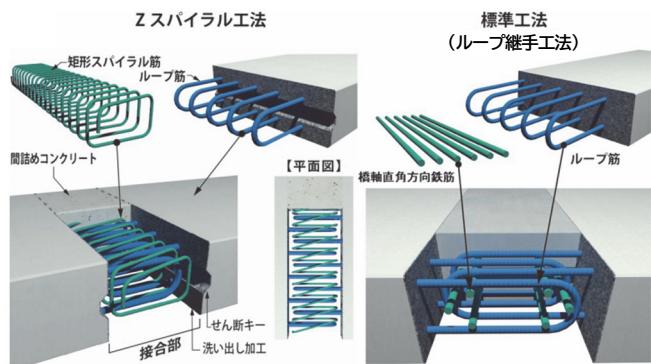


図-1 Zスパイラル工法とループ継手の接合部配筋の比較

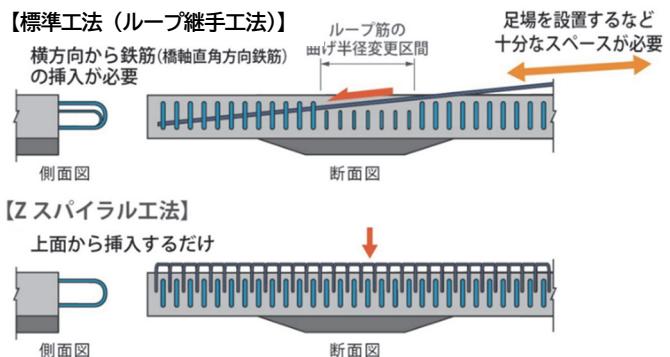


図-2 ループ継手の通し筋と矩形スパイラル筋の配筋の違い²⁾

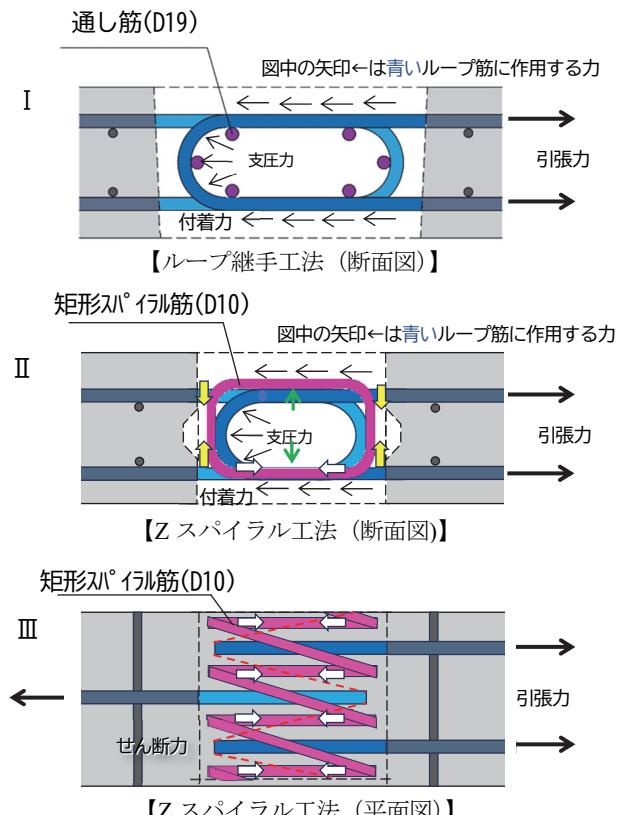


図-3 ループ継手と Zスパイラルの引き抜き抵抗のイメージ

4. 継手構造の性能確認

4.1 静的曲げ載荷試験

載荷時の接合部の補強鉄筋ならびにループ筋に作用する応力の把握を目的に、静的曲げ載荷試験（写真-3）を実施した²⁾。試験体は、矩形スパイラル筋による継手構造（Type-A）と標準工法であるループ継手（Type-B）の2ケースを実施した。図-4に試験体の概要を示す。パネル部および接合部のコンクリートは、床版取替の標準工法の仕様（設計基準強度：50N/mm²）とし、パネル部には普通コンクリート、接合部には膨張材を添加した早強コンクリートを用いた。

a. 試験方法

図-5に載荷方法を示す。載荷試験は、油圧ジャッキ（容量1MN）により、支間2,800mm、載荷幅800mm、二点支持の単調増加で載荷した。配筋の降伏までは荷重制御により、配筋降伏後は変位制御により載荷した。

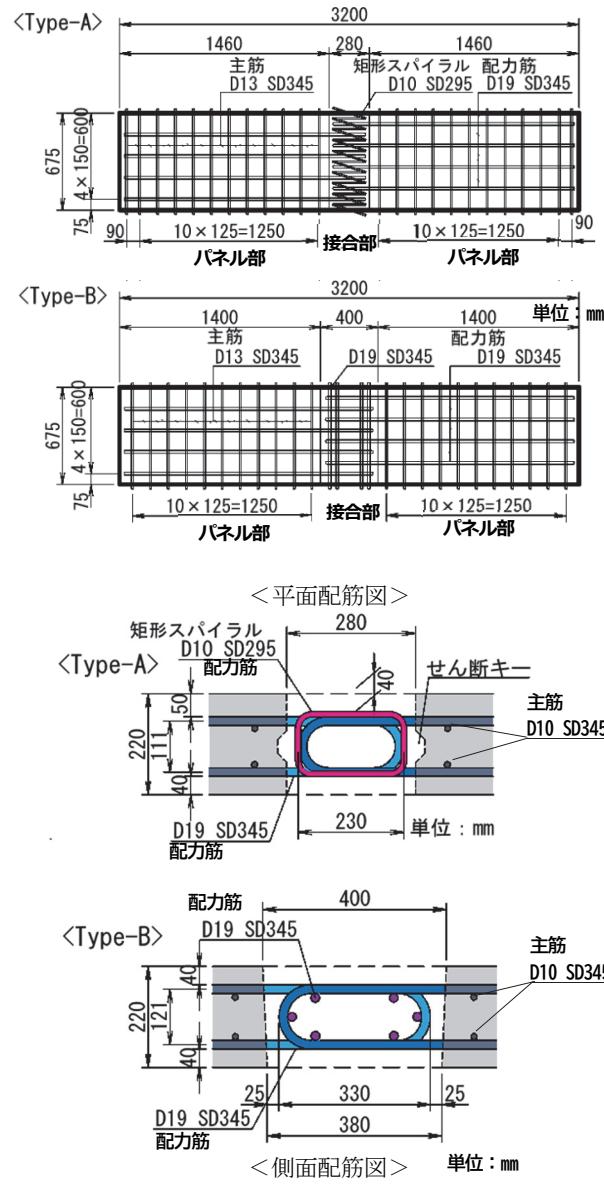


図-4 静的曲げ載荷試験体の配筋図²⁾

b. 試験結果

載荷荷重と変位の関係を図-6に示す。図中の降伏荷重及び設計荷重は、床版部の断面計算で引張鉄筋が降伏強度及び許容応力度（140N/mm²）に達する荷重である。なお、材料試験の結果から、引張鉄筋（D19（SD345））の降伏応力は384N/mm²、その時のひずみは2163μであった。また、最初に配筋が降伏した時の載荷荷重を丸印で示した。荷重と変位の関係が比例関係にある荷重40kN以下の初期剛性については、Type-AとType-Bはほぼ同等であった。

図-7に載荷荷重と矩形スパイラル筋のひずみの関係を示す。下側（引張側）の計測点SP3では、曲げモーメントによる引張ひずみが発生し、80kNを超えて急激に引張ひずみが増加した。側部のSP2、SP4については、小さな荷重の段階から引張ひずみが発生し、変形に伴い引張ひずみが増加した。これは、接合部のループ筋が左右に引っ張られる際に、配筋の曲線部の外側に配置した矩形スパイラル筋が、内部のコンクリートの変形（特に上下への膨張）を拘束するため、引張ひずみが生じたものと考えられる。

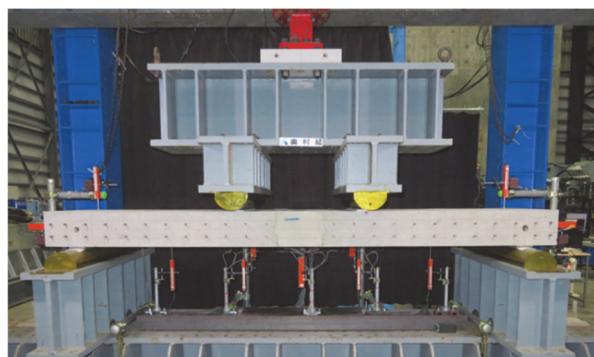


図-5 静的曲げ載荷試験の載荷条件²⁾

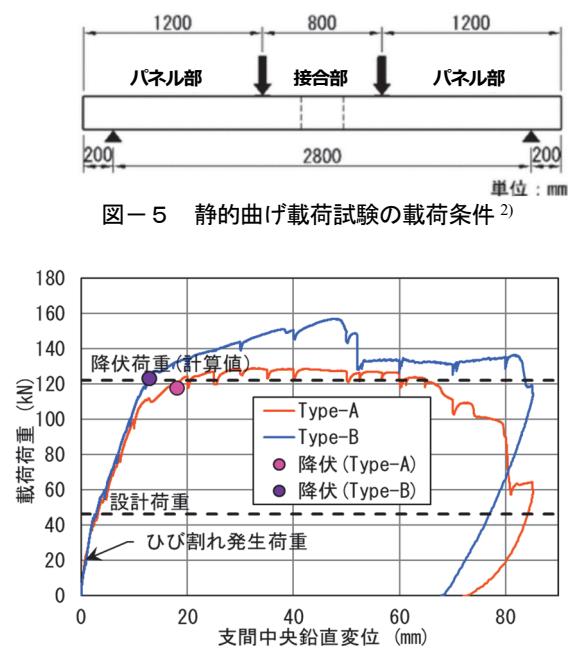
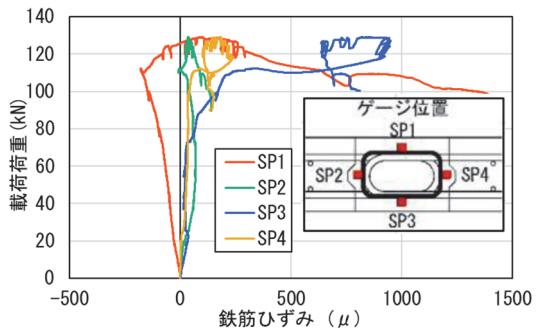


図-6 載荷荷重と変位の関係²⁾

図-7 載荷荷重と矩形スパイラル筋のひずみの関係²⁾

4.2 輪荷重走行試験

a. 試験体の概要

道路全幅に渡る一括取替を想定した横目地のみの場合（以下、横目地試験体）と、半断面施工を想定した横目地+縦目地の場合（以下、縦横目地試験体）の2種類の試験体に対し輪荷重走行試験を行った。試験体の製作ならびに試験方法は NEXCO 試験方法¹⁾に準じて行った。試験体の形状を図-8、図-9に、試験体の主要諸元と使用材料を表-1に示す。横目地試験体と縦横目地試験体の寸法はとともに、長さ 4,500mm、幅 2,800mm、厚さ 220mm である。横目地試験体は別々に製作したプレキャスト PC パネル 2 枚（A パネル、B パネル）の継手部に Z スパイラル工法を用いて接合して製作した。一方、縦横目地試験体は半断面施工を想定し、1 次施工分を模して A パネルと B パネルを Z スパイラル工法で接合した後、2 次施工分を模した C パネルと D パネルを Z スパイラル工法で接合した。その後接合した AB パネルと CD パネルが接する縦目地に無収縮モルタルを充填し、硬化後に PC 鋼棒 1 本あたり 570kN のポストテンション方式のプレストレスを導入して一体化した。なお、接合部の各鉄筋はエポキシ樹脂塗装を施した。試験体は床版支間長 2,500mm で単純支持し、橋軸方向は弾性支持した。輪荷重走行試験は載荷範囲 500mm×3,000mm（図-8、図-9 中の破線）に対し、直径 700mm、幅 500mm の鉄輪を走行させて行った。

b. 輪荷重試験の載荷方法

横目地試験体については、NEXCO 試験方法¹⁾に、耐用年数 100 年相当の評価試験として示されている 250kN×10 万回の載荷を実施し、除荷後に漏水確認試験を行った。一方、縦横目地試験体については、250kN×10 万回を前後に 5 万回ずつに分け、250kN の荷重をセンターライン（A ライン）から 250mm ずつオフセットした載荷範囲（B ライン、B' ライン）に各 3 万回、合計 16 万回の載荷を実施し、除荷後に漏水確認試験を行った。これは、センターラインに曲げとせん断の両方を組み合わせて載荷する目的で行っている。その後、いずれの試験体も破壊時までの性状を把握するため、荷重を漸増して 31 万回まで載荷を行った（表-2 参照）。

c. 輪荷重走行試験の結果

横目地試験体の 10 万回載荷後のひび割れの状況を図-10 に示す。パネル部の載荷範囲を中心に、300mm 程度の幅で梁状化し、一部で横方向に梯子状にひび割れが進展しているものの、接合部はひび割れの進展が限定的であることが分かる。次に縦横目地試験体の 16 万回載

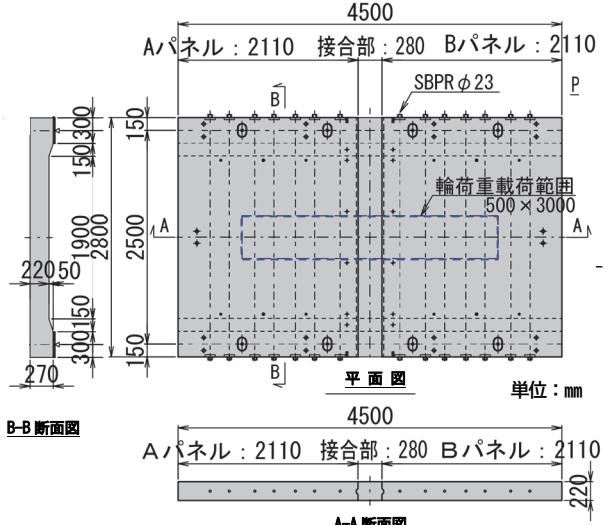


図-8 輪荷重試験体平面図および断面図（横目地）

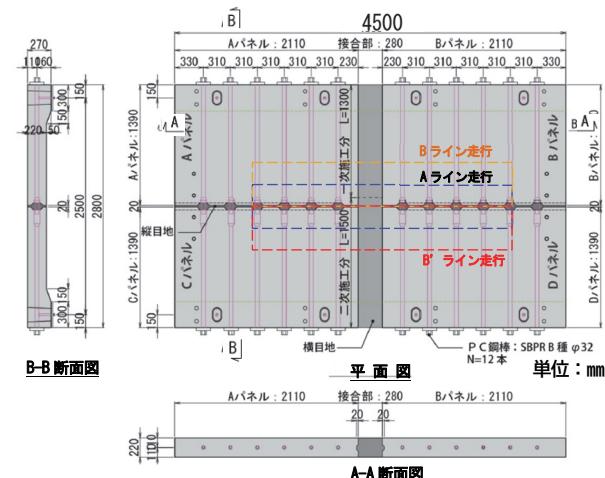


図-9 輪荷重試験体平面図および断面図（縦横目地）

表-1 輪荷重走行試験体の主要諸元と使用材料

		仕様	
寸法		L:4,500mm×W:2,800mm×d:220mm	
床版材	普通コンクリート（設計強度 50N/mm ² ）		
横目地材	早強コンクリート（設計強度 50N/mm ² ） 膨張材 20kg/m ³		
縦目地材	無収縮モルタル（設計強度 50N/mm ² ）		
鉄筋	床版部 横目地	主筋 D13、配力筋 D19 (SD345) 矩形スパイラル筋 D10 (SD295)	
PC 鋼線	SBPR B 種 φ23mm (横目地試験体) SBPR B 種 φ32mm (縦横目地試験体)		

表-2 輪荷重走行試験の載荷荷重と載荷回数

試験体名	載荷位置	載荷荷重					延べ走行回数
		250kN	300kN	350kN	400kN	490kN	
横目地試験体	A ライン	10万回		4万回	4万回	4万回	9万回 31万回
縦横目地試験体	A ライン	5万回		5万回	4万回	4万回	
	B ライン	3万回				1万回	
	B' ライン		3万回			1万回	31万回

荷後のひび割れの状況を図-11に示す。5万回(Aコース1回目終了)までは、支間中央付近から橋軸直角方向ひび割れが進展した。走行コースをBもしくはB'に変更すると主にそれぞれの走行コースの周囲までひび割れが進展する傾向が見られた。なお、除荷時のひび割れ幅は表-3の通りである。いずれの試験体も輪荷重走行試験後に実施する漏水試験において漏水は発生しなかった。なお、縦横目地試験体については、途中で走行路をオフセットしているため、Aラインでの走行回数が10万回に達する16万回で漏水試験を行った。250kN×10万回走行後の試験結果を整理すると以下のようになる。

- i. 横目地試験体および縦横目地試験体について、載荷終了後の漏水確認試験で下面からの漏水は確認されず、100年相当の耐久性を有している
 - ii. 250kN 載荷条件下での載荷開始時からのたわみ増加は、横目地試験体で 0.38mm、縦横目地試験体では 0.03mm であり、いずれもたわみ増加量は微小であった
 - iii. 250kN 載荷条件下での最大ひび割れ幅は、横目地試験体のパネル部 0.10mm、接合部 0.08mm と差がなく、縦横目地試験体ではパネル部 0.10mm、接合部はひび割れがなかったことから、接合部は床版部と同等以上の疲労耐久性を有している

5. ズパイラル工法の施工性確認試験

5.1 施工性確認試験の概要

a. 試験条件

Z スパイラル工法とループ継手工法の実物大模擬床版を製作し、施工性の比較を行った。床版幅を 1.0m、長さを 10.2m とし、この床版を橋軸方向に 4 枚架設することで接合部を 3 列構築した（図-12 参照）。作業員 4 名で鉄筋の地組み、挿入、結束線による緊結（以下、結束）までの配筋作業を行った。矩形スパイラル筋の延長は約 1m/本であり、挿入前に 1 巻き分ラップさせて地組みし、床版上面から挿入後、ループ筋の上筋と矩形スパイラル筋の交差部を結束した。ループ継手では、床版端部からクレーンを利用して 1 本 3.5m の通し筋を順に挿入し仮固定の後、床版上面からループ筋との交点で結束した。

b. 鉄筋挿入時間

模擬床版3列の筋作業にかかる施工時間を計測し、Zスパイラル工法とループ継手の施工時間を比較した。ループ継手工法では、通し筋の挿入時にループ筋と干渉しないよう写真-4のように3~4名の作業員が連携し、奥まで通し筋を挿入し、仮固定するまでに15分を要した。一方、Zスパイラル工法では、1人の作業員約30秒で挿入し、補強筋の仮固定までの作業を3分で完了した。なお、矩形スパイラル筋の配置位置の調整には、写真-5に示すセンタリングスペーサーを使用した。

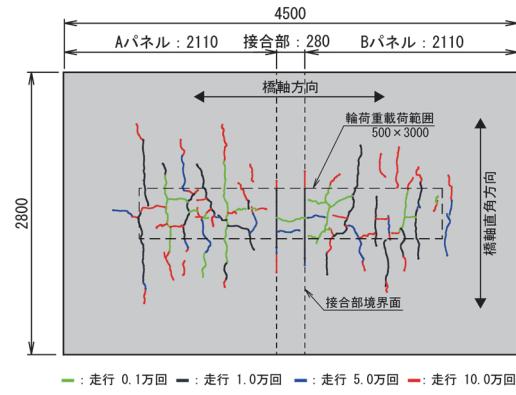


図-10 下面ひび割れ発生状況（横目地試験体）³⁾

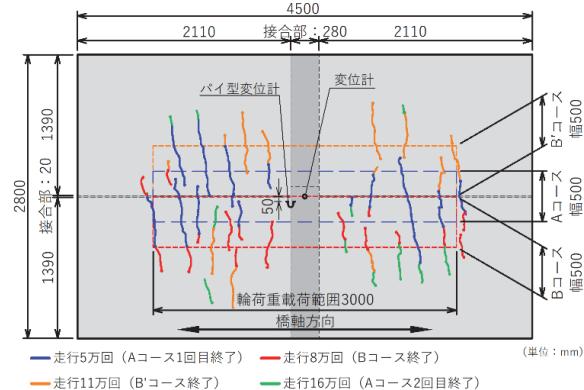
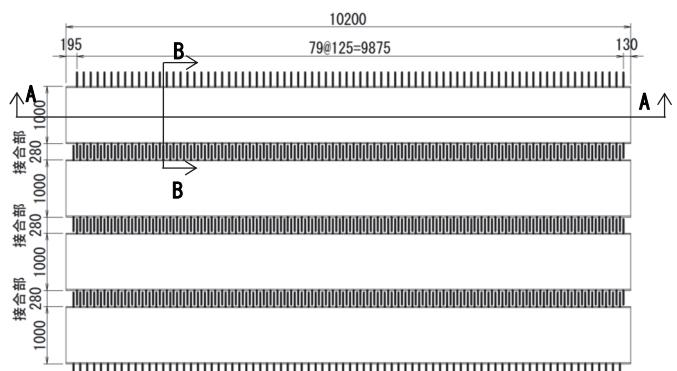


図-11 床版下面のひび割れ状況（縦横目地試験体）

表-3 輪荷重走行試験後のひび割れ幅

試験体名	パネル部	接合部(横目地部)
横目地試験体 (10万回走行後)	0.10mm	0.08mm
縦横目地試験体 (16万回走行後)	0.10mm	ひび割れなし



平面図

10200

320 100 220
100 220

2350 5500 2350

A-A 断面図

1000 255
190 65

220

B-B 断面図

1000 2350

220

単位：mm

図-12 施工性確認試験体の概要図

c. 鉄筋結束時間

矩形スパイラル筋は、下筋は結束せず、上筋のみ 1 カ所と 2 カ所で交互に結束する（写真-6 の赤丸）だけで、らせん形状により鉄筋が一体化され、安定した状態で固定することが可能である。このため、労力のかかるループ継手の中段・下段鉄筋の結束が不要となり、結束時間はループ継手で 25 分を要したのに対し、Z スパイラル工法では 7 分に短縮できた。

d. タッチアップ作業時間

ループ継手工法については、写真-4 に示すように通し筋（ $\phi 19\text{mm}$ 、 $L=3.5\text{m}$ ）を床版側面から挿入する際に、鉄筋間の接触により鉄筋のエポキシ塗装に擦り傷がつく。通常、このような場合はタッチアップ材による補修を行うことになる。一方、Z スパイラル工法では、矩形スパイラル鉄筋を床版上面から挿入するだけのため、タッチアップが必要な塗膜の損傷は発生しなかった。

e. 配筋作業時間

1 列（10.2m）あたりの施工時間を図-13 に示す。鉄筋の地組みから結束までの作業時間は、ループ継手では 40 分であるのに対し、Z スパイラル工法では 10 分となり、接合部の配筋にかかる作業時間を 75% 短縮できた。

6.まとめ

道路橋更新工事の省力化ならびに省人化に繋がる技術として新たな継手工法を開発した。各種試験の結果、Z スパイラル工法について、十分な構造性能に加え、非常に優れた施工性を確認することができた。

7.あとがき

本件は 2022 年度より開発プロジェクトとして取り組んできた成果である。PC 床版については、ほぼ施工実績がなく、知見もない状況から、約 3 年間で現場に適用可能なレベルにまで技術開発を進められたのは、社外連携の賜物と考えている。まずは、プロジェクト全般に渡りご指導頂いた大阪大学名誉教授の松井繁之先生に謝意を表します。また、プレキャストメーカーの昭和コンクリート工業株式会社と共同研究として開発を進められることもスピードアップに繋がったことから、今後も、知見や技術を持つ大学・企業との連携を図り、効率的かつ効果的な研究開発を推進していきたい。

【参考文献】

- 1) 東日本高速道路会社(株)、中日本高速道路会社(株)、西日本高速道路会社(株)、設計要領第二集 橋梁保全編 2024.7
- 2) 御器谷直子、守屋裕兄、三澤孝史、川口昇平、坂井悟、吉田辰也、岩山健治、国井優嗣、松井繁之、PC

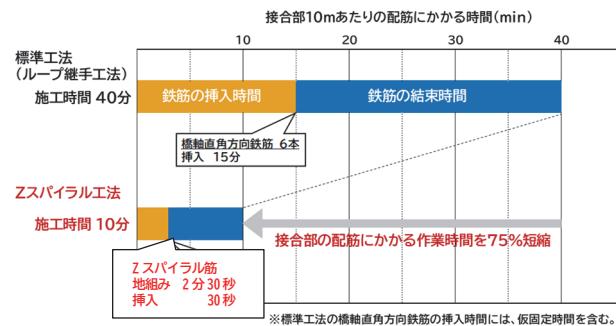


図-13 接合部の配筋にかかる作業時間の比較



写真-4 ループ継手工法の鉄筋挿入状況

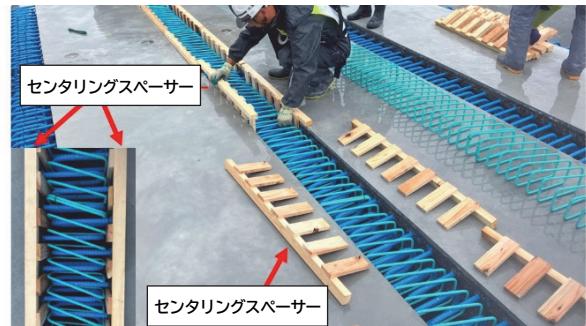


写真-5 矩形スパイラル筋の位置調整方法

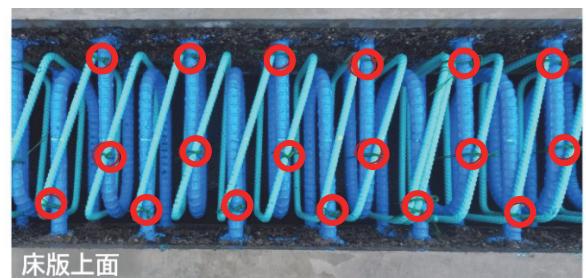


写真-6 矩形スパイラル筋の結束状況

床版の新しい接合工法（Z スパイラル工法）の開発
その 1 〈静的載荷試験〉、土木学会全国大会第 79 回年
次学術講演会、VI-526、2024.9

- 3) 坂井 悟、吉田辰也、岩山健治、国井優嗣、守屋裕兄、三澤孝史、川口昇平、藤井伸介、松井繁之、PC 床版の新しい接合工法（Z スパイラル工法）の開発
その 2 〈輪荷重走行試験〉、土木学会第 79 回年次学術講演会 VI-527、2024.9

チルトローテータを搭載した油圧ショベルによる 自動掘削システムの開発

—自律施工技術基盤 OPERA を利用したシステム概要および実証実験—

Development of Automated Excavation System Based on Tiltrotator-Equipped Hydraulic Excavator

- System Overview and Verification -

藤沼花奈* 三澤孝史** 川澄悠馬*** 松田顕伍****

要旨

近年、建設業において、生産性向上のために建設機械の自動化技術の開発、実用化が意欲的に進められている。筆者らは、効率的な施工が可能なチルトローテータを搭載した油圧ショベルを用いた自動掘削システムを開発した。本システムは、計画掘削形状を基にしてチルトローテータのバケットの回転角度およびチルト角度を変えられる特徴を生かした掘削軌道の掘削計画を作成し、それに従った遠隔操作で効率的に自動掘削を行う。本システムのソフトウェアは、(国研) 土木研究所が整備している自律施工技術基盤 OPERA を利用している。斜面の配置等を変えた計画掘削形状 3 ケースについて実証実験を行い、概ね設計通りに自動掘削できることを確認した。

キーワード：油圧ショベル、チルトローテータ、自動掘削、OPERA、3D-LiDAR

1. まえがき

生産性向上のために、建設機械の自動化技術の開発が各機関で進められている。建設機械の自動化の取り組みを促進すべく、国立研究開発法人土木研究所は自律施工技術基盤 OPERA (Open Platform for Earthwork with Robotics and Autonomy)¹⁾ (以下、OPERA) を整備した。OPERA は、共通制御信号をコアとした OSS (Open Source Software) ベースの開発環境であるオープンプラットフォームである。本開発は、OPERA を活用した機械土工の一環として、バケットの回転角度およびチルト角度を変えられるチルトローテータを搭載した油圧ショベルの自動掘削システムの完成を目指している²⁾。チルトローテータを使用することにより、機体の旋回や移動が難しい狭隘な箇所等においても効率的に施工できる利点がある。また、チルトローテータは北欧では大半の建機に搭載されている。国内においても、国交省の i-Construction2.0 の省人化 3 割を目指す取り組みに資する建設機械の普及促進のため、ICT 建設機械等認定制度において令和 7 年 1 月にチルトローテータ機能を有するバックホウが省人化建設機械に追加された。今後、さらにチルトローテータの普及が進むと思われる。

本報では、開発した自動掘削システムの概要およびシステムを実証するために実施した実証実験結果について述べる。なお、本開発は、土木研究所の「自律施工技術基盤 OPERA を活用した機械土工の生産性向上に関する共同研究」として取り組んだ。

2. 自動掘削システムの概要

2.1 自動化した油圧ショベルのハードウェア構成

自動掘削システムは、日本キャタピラー(株)の電子制御された油圧ショベル (0.45m³ 級、型式 CAT315) をベースマシンとして構築した。チルトローテータは、同社の型式 : TRS10 (チルト角 : ±40°、ローク角 : 0~360°) を使用した。図-1に使用した計測機器の配置を、表-1に計測機器の一覧を示す。

油圧ショベル本体の自己位置、旋回中心の認識にはトータルステーション (TS) を用いた。油圧ショベルの各関節角度および車体姿勢の認識には、ICT 建機で一般的に用いられている IMU (慣性計測装置) を使用し、旋回角度は磁気式のリニアエンコーダーシステムにより把握した。チルトローテータのチルト角度および回転角度の把握には油圧ショベルより出力される信号を使用し

*東日本支社機電部 **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 ****東日本支社土木第一部



図-1 自動化した油圧ショベルおよび計測機器

た。土砂の掘削状況の認識にはキャビン上に設置した3D-LiDARを用いた。

図-2に、システムのハード構成の概略図を示す。遠隔操作用PCから、Wi-Fiにより油圧ショベルのキャビン内に設置した自動制御PCに制御指示を送ることにより遠隔で自動掘削できる。自動制御PCからは、リアルタイムに遠隔操作用PCに、油圧ショベルの関節角度等のセンサ信号が送られ、GUI(Graphical User Interface)上で油圧ショベルの動作状況を把握することができる。

表-1 計測機器一覧

センサ	メーカー	型番	用途
IMU	ACEINNA, Inc.	OpenIMU300RI	各関節角度、車体姿勢の測定
リニアエンコーダーシステム	(株)マコメ研究所	SAE-200 (読み取りヘッド) SAS-200 (磁気スケール)	旋回角度の測定
トータルステーション	(株)トプコン	GT-1001	自己位置の測定
3D-LiDAR	Livox Technology Co., Ltd.	Horizon	土砂の掘削状況の認識

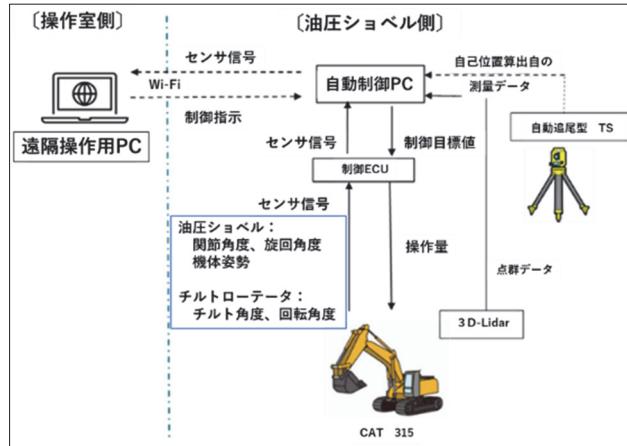


図-2 システムのハード構成の概略図

2.2 システムのソフトウェアの概要

本システムのソフトウェア構成および概略フローを図-3に示す。ソフトウェア構成は、OPERAの共通指令信号に準じた指令信号を、ROS(Robot Operating System)を介してハードウェアに送っている。ROSとは、ロボットのソフトウェア開発を効率化するためのロボット用ソフトウェアプラットフォームである。

本システムでは計画掘削形状データ(LandXML形式)より、油圧ショベルの掘削計画を設定する。

掘削計画は、掘削時間の短縮と精度向上のため、掘削動作を粗掘削と仕上げ掘削の2段階で設定した。粗掘削では、掘削精度よりも掘削時間の短縮を優先し、パケットの貫入量を大きく設定した。仕上げ掘削では、掘削精度を重視した掘削動作とした。

パケットの刃先位置の制御は、角度偏差を目標角速度とした角速度偏差に基づくPID制御(フィードフォワード(F/F)含む)による角速度制御を適用した。図-4に使用した角速度制御ブロック線図を示す。図中の△は入出力関係における伝達関数を、「+」「-」は、各入力がプラスあるいはマイナスとして重ね合わされることを表している。各関節角度をIMUから取得しているが、IMUは加速度から角度を検出しているため、振動の影響を受けやすい。ブーム等を動かした際の振動により制御精度への影響が大きかったため、カルマンフィルタによるフィルタ処理を行い、影響削減を行った。

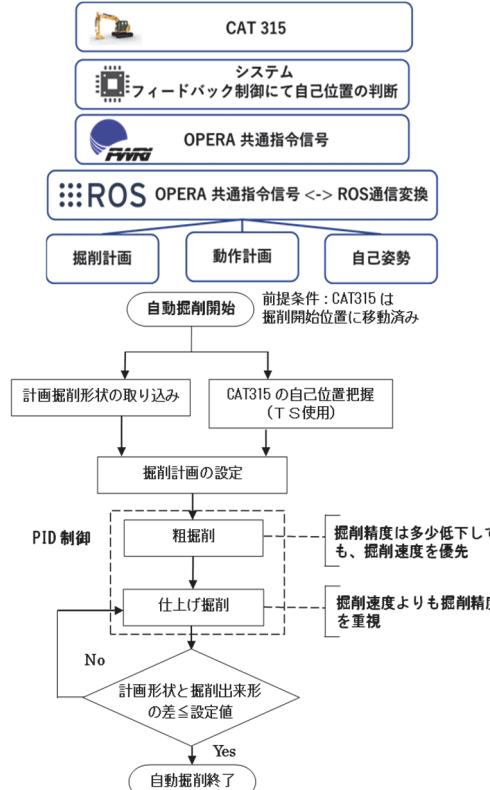


図-3 自動掘削システムのソフトウェア構成および概略フロー

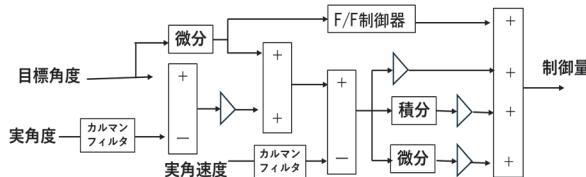


図-4 バケット刃先制御の角速度制御ブロック線図

自動掘削時の軌道アルゴリズムの概略を図-5に示す。これは計画掘削形状として、油圧ショベルから見て右側に斜面がある場合である。平坦部はチルトローテータによりバケットの角度を調整し、左側の鉛直面に対し平行となるように水平に掘削する。斜面の掘削ではまず階段状に大まかに掘削した後、チルトローテータによりバケットを斜面に沿って動かし掘削する。計画した仕上げ掘削が終了したら、最終的に3D-LiDAR計測により出来形と計画掘削形状との差を把握(以下、土砂認識機能)し、設定値よりも差が大きければその箇所の掘削を行う。図-6に土砂認識機能の概念図を示す。3D-LiDARにより得られる施工領域の点群データを辺長100mmのグリッドで分割し、グリッド毎の平均値と計画掘削深さの差を算出する。その結果、その差が設定値よりも大きければ、最も差の大きな箇所から再掘削する。なお、3D-LiDARの死角となり確実な土砂認識が難しい範囲等は再掘削の対象外としている。具体的には、掘削範囲の油圧ショベル手前側の1000mmと掘削範囲境界から200mmの範囲である。また、現時点では斜面も範囲外とした。

3. 実証実験

3.1 実験概要

a. 実験方法

奥村組技術研究所敷地内において、自動掘削システムにより、設定した計画形状を掘削し、出来形を3Dスキャナー(株トプコン、GLS-2000)等で計測した。掘削状況の動画を記録するとともに、掘削時間を把握した。自動掘削を行った実験ヤードの土質性状を表-2に示す。

実験では、自動掘削時に油圧ショベル本体を移動させずに、チルトローテータを活用することで斜面を有する計画掘削形状を掘削した。掘削した土砂は、旋回して油圧ショベルの横に排土させた。

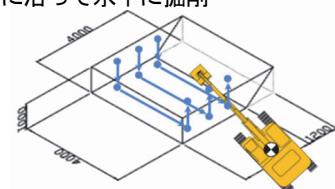
b. 実験ケース

実験は、図-7に示すように、斜面の配置と数をパラメータとした3ケースとした。まず、チルトローテータの特長を活かした自動掘削システムの実証として、油圧ショベル側から見て右側に斜面があるケース1の形状を中心にシステムの開発、検証に取り組んだ。それに加えて、左右に斜面を有するケース2、正面に斜面を有するケース3についても自動掘削を実施した。斜面の勾配は全て1.2:1(約40°)とした。

実験では、実験ヤードに実験用の座標系を設定し、この座標系で作成した計画掘削形状データを読みませ自動掘削した。全ケースにおいて計画掘削深さは、座標系のZ軸(鉛直方向)のGL ±0mmより1000mmとした。掘削地点によっては、設定した座標系のGL0mmより部

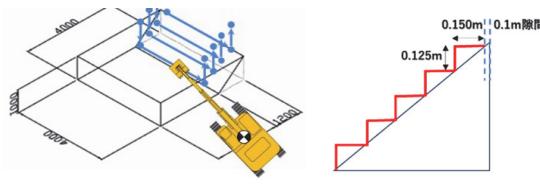
[平坦部の掘削]

- ・壁面に沿って水平に掘削



[斜面の掘削]

- ①斜面を大まかに階段状に掘削



- ②斜面に沿って掘削

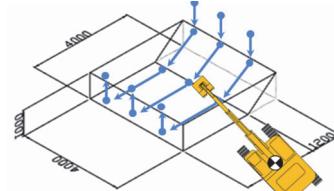
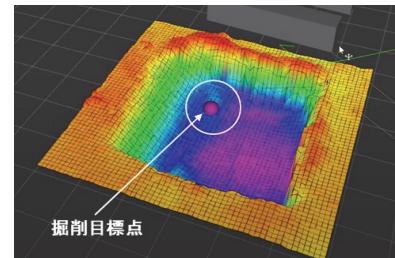


図-5 軌道アルゴリズムの概略



*最も差が大きい箇所が赤色で表示される
図-6 土砂認識機能の概念図

表-2 実験ヤードの土質性状

土粒子密度 g/cm ³	2.628
自然含水比 %	28.6
粒度 磯分 %	35.2
砂分 %	25.5
シルト分 %	17.8
粘土分 %	21.5
最大粒径 mm	37.5
50%粒径 D ₅₀ mm	0.2009
液性限界 %	72.3
塑性限界 %	38.6
塑性指数	33.7
地盤材料の分類名	細粒分質砂質磯(GFS)
コーン貫入抵抗 q _c kN/m ²	約400 (掘削底面において)

分的に地表面が 100mm 程度高くなっている箇所もあった。

3.2 実験結果

a. 動作確認

実験状況を写真-1 に示す。写真-2 は、斜面掘削時にチルトローテータによりバケットを回転させて斜面に沿ってバケットを動かしている状況を示す。

図-8 に掘削中の GUI 画面例を示す。油圧ショベルの動きおよび 3D-LiDAR により、掘削状況をリアルタイムに表示させ現在の状況を確認することができる。

開発した自動掘削システムは設計通りに作動し、掘削を完了することができた。

b. 出来形

(a) ケース 1：右斜面

写真-3 に自動掘削後の出来形を、図-9 に 3D キャナー計測により取得した点群データを示す。これらより、右側に斜面が形成されていることが確認できる。

点群データより、水平 2 軸 (X, Y 軸) に対し、直交する断面のポリラインを 500mm 毎に抽出した。図-10 に Y 軸に直交する断面のポリラインを示す。図中には計画掘削形状を併記した。図-10 より、斜面と平坦部が交差する近傍を除くと、斜面はほぼ計画掘削形状通りに掘削できている。それに対し、平坦部では、斜面と反対側の鉛直面近傍は計画掘削形状に比べ、比較的の差異が大きくなっている。これは、本検証においては、3D-LiDAR による掘り残し判定において、掘削範囲の油圧ショベル手前側の 1000mm と掘削範囲境界から 200mm の範囲は判定範囲に含めていないため、掘削時に崩れた土砂が残置されたためと考える。

表-3 に、抽出したポリラインについて、計画掘削形状に対する出来形の鉛直方向の差の平均値 μ 、標準偏差 σ 、信頼度 95% の精度 ($\mu \pm 2\sigma$) を示す。なお、表-

3 中の平坦部については、3D-LiDAR による掘り残し判定の設定範囲外の区間である、左側の鉛直面から 200mm の範囲と手前の鉛直面から 1000mm の範囲を除いて算出した。鉛直方向の掘削精度の評価指標として、「土木工事施工管理基準及び規格値（案）」（平成 30 年 3 月、国土交通省）では、掘削工において、レーザースキャナー等による面管理の場合での規格値は、平場では平均値 $\pm 50\text{mm}$ かつ個々の計測値 $\pm 150\text{mm}$ 、法面では平均値 $\pm 70\text{mm}$ 、個々の計測値 $\pm 160\text{mm}$ となっている。この規格値に沿って今回の実験結果を評価した。

表-3 より、平坦部、斜面ともそれぞれの規格値である平均値 $\pm 50\text{mm}$ 、 $\pm 70\text{mm}$ 以内であり、高い掘削精度を示している。ただし、平坦部の信頼度 95% の精度 ($\mu \pm 2\sigma$) は -199 ~ 115mm であり、規格値の個々の計測値 $\pm 150\text{mm}$ に対するばらつきが大きいことがわかる。

(b) ケース 2：左右斜面

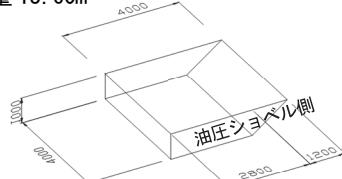
写真-4 に自動掘削後の出来形を示す。手前が油圧ショベル側である。左右に斜面が形成されていることがわかる。

図-11 に、ケース 1 と同じく Y 軸に直交する断面のポリラインを示す。両側の斜面では、平坦部と交差する近傍は計画掘削形状に比べ少し差が大きいが、それより上部は概ね計画掘削形状に合っている。

表-4 に、抽出したポリラインについて、計画掘削形状に対する出来形の鉛直方向の差の平均値等を示す。ケース 1 と同様に、平坦部、斜面ともそれぞれの規格値である平均値 $\pm 50\text{mm}$ 、 $\pm 70\text{mm}$ 以内であり、計画深さとの差は小さく、高い掘削精度を示している。ただし、信頼度 95% の精度 ($\mu \pm 2\sigma$) は、平坦部、斜面とも規格値の個々の計測値 $\pm 150\text{mm}$ 、 $\pm 170\text{mm}$ に対してばらつきが大きいことがわかる。

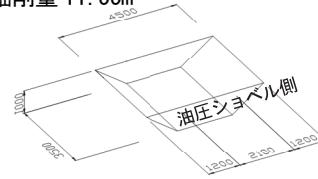
ケース 1：右斜面

掘削量 13.60m³



ケース 2：左右斜面

掘削量 11.55m³



ケース 3：正面斜面

掘削量 13.60m³

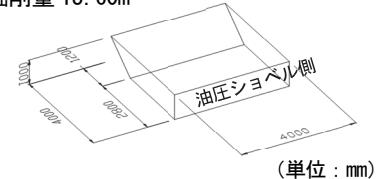


図-7 実験ケース



写真-1 実証実験状況



写真-2 チルトローテータを使用した斜面掘削状況

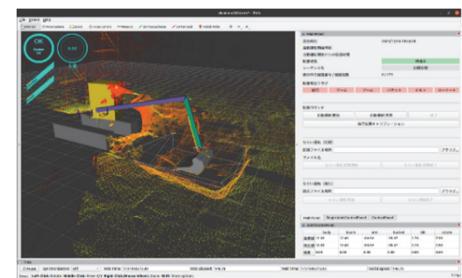


写真-8 GUI 画面例



写真-3 自動掘削による出来形（ケース1）

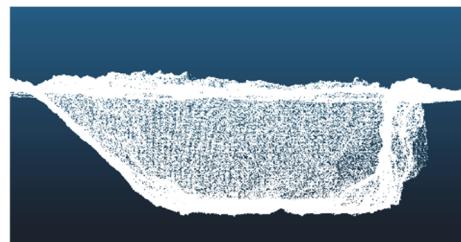


図-9 出来形の点群データ（ケース1）



写真-4 自動掘削による出来形（ケース2）

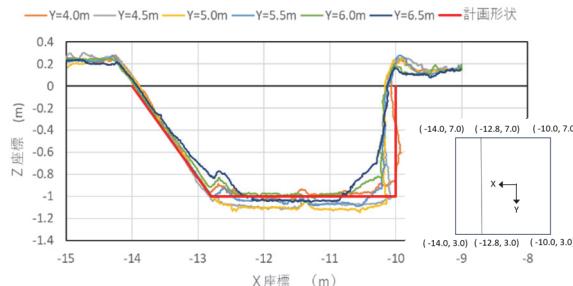


図-10 Y軸直交断面における掘削深さ分布（ケース1）

表-3 計画形状に対する掘削深さの差（ケース1）

	平均値 μ (mm)	標準偏差 σ (mm)	$\mu \pm 2\sigma$ (mm)
平坦部	-42	79	-199～115
斜面	43	39	-35～121

(c) ケース3：正面斜面

写真-5に自動掘削後の出来形を示す。油圧ショベルの正面側に斜面が形成されていることがわかる。

図-12に、X軸に直交する断面のポリラインを示す。計画掘削形状に比べ、斜面部では全体的に深く掘り過ぎていることがわかる。

表-5に、抽出したポリラインについて、計画掘削形状に対する出来形の鉛直方向の差の平均値等を示す。なお、同表では、3D-LiDARによる掘り残し判定の設定範囲外である手前の鉛直面から1000mmの範囲を除いて算出した。平均値は、平坦部および斜面とも規格値を超えており、特に、平坦部に比べ斜面における計画掘削深さに対する差が大きく、深く掘り過ぎている傾向がみられる。また、信頼度95%の精度（ $\mu \pm 2\sigma$ ）においても、平坦部および斜面とも規格値の個々の計測値±150mm、±170mmに対してばらつきが大きいことがわかる。ケース1、2と比べ掘削精度が低いが、この要因の一つとして、油圧ショベル本体の位置ずれが考えられる。バケットの貫入時等に、その反力で油圧ショベル本体の位置がずれる場合があることが観察された。これは全てのケースにおいて生じたが、特に正面斜面のケースでは、油圧ショベルから最も遠い位置に斜面を形成するため、作業半径が長くなり油圧ショベル本体のズレによるバケット先端の位置精度への影響が大きくなつたと推察する。この対策としては、油圧ショベルの自己位置把握を適宜行う等の対応を検討する予定である。

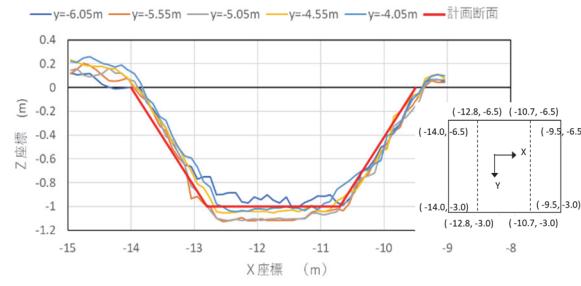


図-11 Y軸直交断面における掘削深さ分布（ケース2）

表-4 計画形状に対する掘削深さの差（ケース2）

	平均値 μ (mm)	標準偏差 σ (mm)	$\mu \pm 2\sigma$ (mm)
平坦部	-26	74	-174～122
斜面	14	95	-176～204



写真-5 自動掘削による出来形（ケース3）

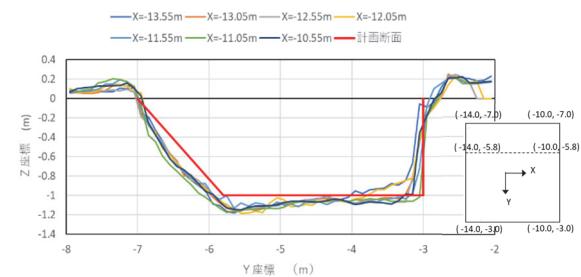


図-12 X軸直交断面における掘削深さ分布（ケース3）

表-5 計画形状に対する掘削深さの差（ケース3）

	平均値 μ (mm)	標準偏差 σ (mm)	$\mu \pm 2\sigma$ (mm)
平坦部	-91	43	-177～-5
斜面	-168	68	-304～-32

c. 掘削時間

図-13に各ケースの掘削時間を示す。同図中には、自動掘削と同じ条件で、ケース1の掘削形状をオペレータにより掘削した場合の掘削時間も併せて示している。

図中の「掘削時間」は、油圧ショベルのバケットが動作を開始し、バケットを引いて土砂をすくい、旋回して排土、という掘削に要する合計時間を示している。「その他」は、自動掘削では油圧ショベルの自己位置把握の動作時間、オペレータによる掘削では地均しやバケットで土砂をかき集める動作に要した時間である。オペレータ掘削の「レベル計測」は、オペレータへ残りの掘削量や掘削位置を指示するために、掘削途中で 1 回行ったレベル測量時間である。

(a) 自動掘削とオペレータによる比較

ケース 1において、自動掘削とオペレータ掘削を比較する。図中に示すように、「掘削時間」は、自動掘削では、オペレータの操作による掘削と比較し、49 分多くの時間がかかった。

バケットを引いて土砂をすくい、旋回排土して次の掘削位置までバケットを移動させる一連の動きを 1 回当たりの掘削動作として、それに要した時間と回数を表-6 に示す。オペレータ掘削の場合が平均 41 秒に対し、自動掘削では平均 52 秒である。特に排土時のバケット操作に、オペレータの操作時よりも時間を要していた。また、掘削回数においては、オペレータ掘削では 33 回に対し、自動掘削では 53 回と約 1.6 倍多くなっている。オペレータ掘削では、特に掘削の終盤において土砂をかき集めてバケットにできるだけ多くの土砂をすくった状態で旋回、排土動作をしている。これに対し、自動掘削では、バケット内に十分な土砂がない状態でも設定した掘削計画に従い、旋回、排土動作をしている場合がある。このように 1 回当たりの掘削動作の時間および回数が増えたことが、自動掘削の全体の掘削時間がオペレータ掘削よりも多くなった要因の一つと考える。しかし、オペレータ掘削では「その他」の時間が長いため、レベル測量分も合わせると、全体としては自動掘削が 73 分間に對し、オペレータ掘削は 67 分と微差であった。オペレータ掘削には事前に丁張（施工を行う上で基準となる位置や高さを示す目印）に要する時間が別途発生するため、この時間も考慮すると、オペレータ掘削に要する時間はさらに増えることになる。

(b) 自動掘削における 3 ケースの比較

ケース別の掘削時間は、ケース 1 が 73 分、ケース 2 が 55 分、ケース 3 が 86 分となった。計画掘削土量が他のケースの約 85% であるケース 2 が、左右に斜面を形成する必要があつても全体の掘削時間は最も短かった。また、掘削土量 1m³当たりの掘削時間で比較しても、ケース 1 が 5.4 分/m³、ケース 2 が 4.8 分/m³、ケース 3 が 6.3 分/m³ とケース 2 が最も短い時間となった。このように、掘削土量が少ないとともに、油圧ショベルからの最遠の掘削距離が短く、ブーム、アームを伸ばす動作にかかる時間が短縮されることが、ケース 2 の全体の掘削時間が最も短い要因として考えられる。

計画掘削土量が同じケースでは、斜面が油圧ショベルの正面にあるケース 3 の方が全体の掘削時間が 13 分多くなっている。斜面が側部にある場合は、平坦部や斜面を階段状に掘削する際に、一度に水平引きできる距離を長くできる。これに対し、正面にある場合ではその距離が短くなり、バケット刃先を移動させるポイントが増え、掘削動作の回数が増えるためと考えられる。

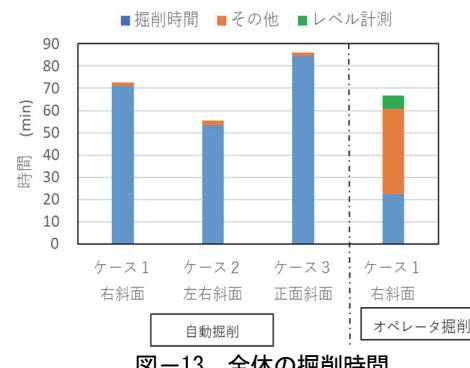


図-13 全体の掘削時間

表-6 掘削動作 1 回当たりの掘削時間と掘削回数

	自動掘削	オペレータ掘削
1 回当たりの平均掘削時間	52 秒	41 秒
掘削回数	53 回	33 回

4. まとめ

チルトローテータを装備した油圧ショベルの自動掘削システムを開発した。斜面の配置および数を変えた 3 ケースの計画掘削形状を設定し、本システムの動作確認を行った。得られた知見を以下に示す。

- i. 出来形の異なる 3 ケースの掘削において概ね計画形状通りに掘削できた
- ii. オペレータ掘削と同等の時間で掘削が可能で、丁張の作業、レベル計測が不要のため省力化が可能

5. おわりに

今後は、本システムのさらなる施工精度向上や施工時間短縮等のプラスアップを図るとともに、油圧ショベル本体の自走についても機能拡張したいと考える。システムの性能向上を図り、現場適用できるように取り組んでいく予定である。

【参考文献】

- 1) 遠藤大輔、山内元貴、鈴木裕敬、橋本 肇、「自律施工の技術開発促進に向けた取組み」、土木技術資料、65 卷 1 号、pp.18-21、2023 年 1 月
- 2) 藤沼花奈、三澤孝史、石井敏之、川澄悠馬、遠藤大輔、「OPERA を活用したチルトローテータ搭載油圧ショベルの自動掘削システムの開発」、第 22 回建設ロボットシンポジウム、2024 年 10 月

既製杭埋込み方式による杭頭接合部の設計合理化 のための実験的研究

Experimental Study on Rationalization of Design for Pile Cap Using Precast Pile Embedment Method

和田湧氣* 山上 聰* 岸本 剛** 反町 敦***

要旨

既製杭埋込み方式による杭頭接合部の合理的な設計を目指し、従来よりも縮小したパイルキャップの試験体による曲げせん断実験を行った。実験結果より、荷重変形関係と、ひび割れや鉄筋降伏などのパイルキャップの損傷過程を把握し、従来よりも縮小したパイルキャップでも、杭からの水平荷重の伝達を十分に行えることを確認した。また、各試験体のパラメータが構造性能に与える影響を整理して示した。さらに、実験結果の検討をもとに、杭頭埋込み部における安全限界状態の設計用限界値の評価式を提案し、同式により各試験体の最大耐力を精度良く評価できることを示した。

キーワード：既製杭、パイルキャップ、杭頭埋込み部、曲げせん断実験、せん断補強筋

1. まえがき

日本建築学会「基礎部材の強度と変形性能¹⁾」(以下、「文献 1」)によると、既製杭の杭頭接合法には、杭頭部に接合した定着筋をパイルキャップに定着する接合方法(定着筋方式)と、杭頭部をパイルキャップに埋め込む接合方法(埋込み方式)がある。文献 1)には、杭頭接合部の設計用限界値の評価式が示されており、その適用範囲は図-1に示す通り、杭表面からパイルキャップ側面までの距離 c が $0.75D$ 以上 (D : 杭外径) となる形状である。すなわち、パイルキャップ辺長 D_p は $2.5D$ 以上となる。それに加え、埋込み方式とする場合は、杭頭部をパイルキャップ内に $1.0D$ 以上埋め込むことも適用範囲として示されている。なお、文献 1)によると、既往の実験データが少なく、杭頭埋込み部の応力伝達や破壊機構は必ずしも明確とはいえない。また、埋込み部の設計用限界値の評価式について、現状ではパイルキャップの配筋のせん断抵抗への寄与は考慮されず、実験データや研究の蓄積による精度の向上が望まれている。

埋込み方式、あるいは埋込み方式と定着筋の併用を対象とした近年の研究においては、埋込み長さを $1.0D$ 未満とした試験体による実験^{2)~5)}や、パイルキャップの配筋による影響を確認する実験⁴⁾の事例はあるものの、 D_p を $2.5D$ 以上とした試験体を基本としており、 $2.5D$ 未満とした試験体による実験⁵⁾の事例は少ない。

以上より、従来の $D_p = 2.5D$ よりも縮小したパイル

キャップの実現、およびせん断補強筋の効果を考慮した評価式の確立により、合理的な杭頭接合部の設計が可能になると考えられる。そこで本研究では、既製杭の杭頭接合法に埋込み方式(定着筋の併用含む)を用いた場合のパイルキャップを対象とし、従来よりも小さい $D_p = 2.0D$ の試験体による曲げせん断実験を行った。なお、本実験では、パイルキャップのせん断補強筋量をパラメータのひとつとして試験体を計画した。

本報では、実験より得られたパイルキャップの損傷過程や、最大耐力に対する各パラメータの影響を整理して示す。また、実験結果の検討をもとに、せん断補強筋の効果を考慮し、高い精度で本実験の埋込み部の最大耐力を評価できる提案式を示す。

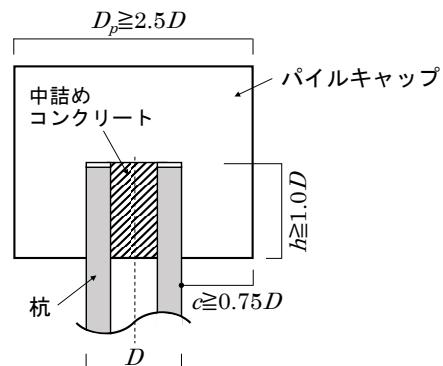


図-1 埋込み方式の場合の杭頭接合部
(文献 1)解説図 5.3 をもとに作成)

*技術本部技術研究所建築研究グループ **技術本部技術戦略部技術戦略課 ***東日本支社建築設計部

2. 曲げせん断実験の概要

2.1 試験体仕様・形状

試験体仕様の一覧を表-1に、代表的な試験体形状・配筋を図-2、図-3に示す。試験体は全8体であり、寸法は縮尺1/2.5を想定した。本実験の試験体は、図-2、図-3に示すように、パイルキャップを模擬した鉄筋コンクリート部に杭を埋め込み、パイルキャップの曲げ主筋によりスタブに固定した形状であり、実際の建物内での状態に対して上下反転させている。なお、以降では、試験体の位置関係を想定して上下の位置について記述する。また、いずれの試験体も杭の破壊を先行させないために、外径400mm、厚さ65mm（鋼管厚14mm）、鋼管の材質SKK490のSC杭を用い、パイルキャップ上端から+200mmまで、パイルキャップのコンクリートと同強度の中詰めコンクリートを打設した。

表-1より、標準とした試験体No.1は、定着筋を設

表-1 試験体仕様の一覧

No.	定着筋 本数-呼び径 材質	杭頭 埋込み長さ <i>h</i>	パイル キャップ 辺長 <i>D_p</i>	コンクリート 設計基準強度 <i>F_c</i>	パイルキャップ配筋					
					せん断補強筋		曲げ主筋 本数-呼び径 材質	かんざし筋		
					本数-呼び径 ピッチ	材質		せん断補強筋比** <i>p_w</i>	本数-呼び径 材質	
1	—	400mm (1.0 <i>D</i>)	800mm (2.0 <i>D</i>)	36N/mm ²			8-D19 SD390			
2	8-D22 SD490	200mm (0.5 <i>D</i>)	1000mm (2.5 <i>D</i>)	SD345	4-D10 @50mm		0.71%	9-D19 SD390	X・Y方向: 4-D16 斜め方向: 4-D10	SD345
3					0.57%					
4					24N/mm ²		0.71%	8-D19 SD390	X・Y方向: 2-D16 斜め方向: なし	
5					48N/mm ²		0.36%		X・Y方向: 4-D16 斜め方向: 4-D10	
6					36N/mm ²		1.06%			
7					4-D10 @100mm					
8					4-D13 @60mm					

※せん断補強筋比 $p_w = (n \cdot a_s) / (D_p \cdot x)$ n: 1段のせん断補強筋本数 a_s : せん断補強筋の1本あたりの断面積 x : せん断補強筋のピッチ

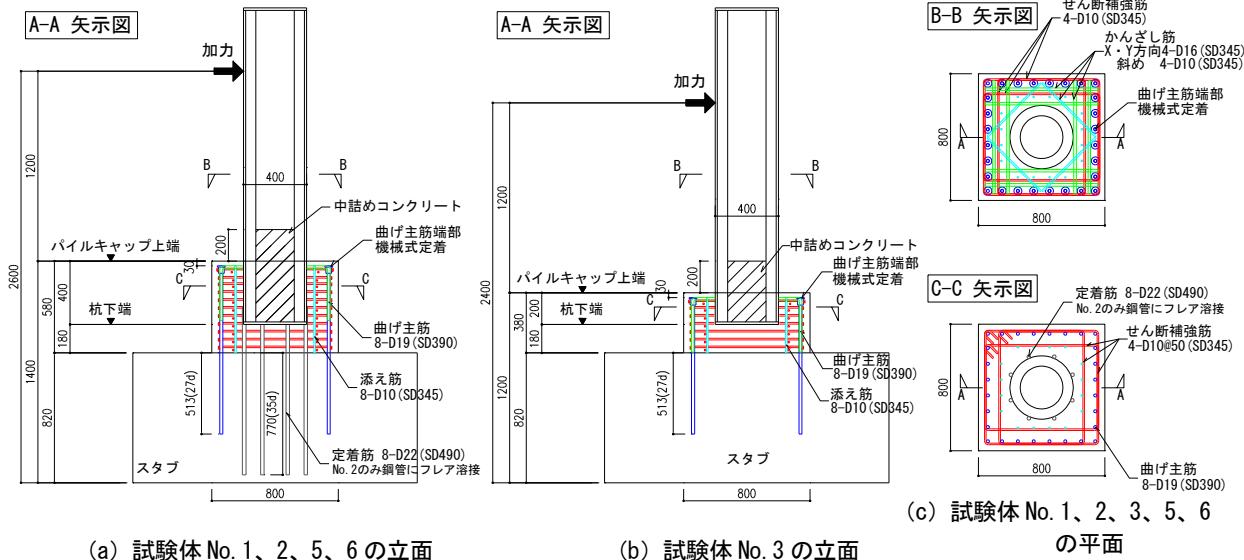


図-2 試験体 No. 1、2、3、5、6 の形状・配筋 (単位: mm)

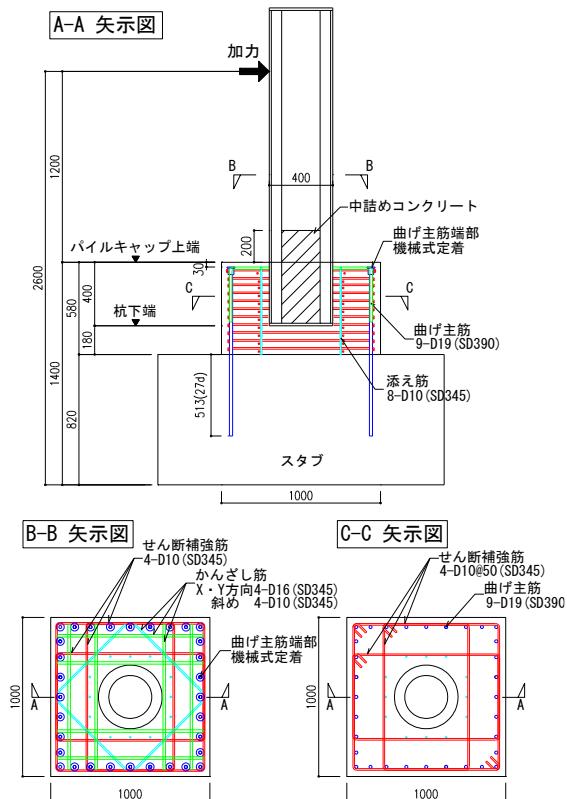


図-3 試験体 No. 4 の形状・配筋（単位 : mm）

表-2 コンクリートの材料試験結果（実験当日）

試験体	設計基準強度 F_c (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
No.1	36	37.53	3.446×10^4
No.2		36.63	3.167×10^4
No.3		34.37	2.864×10^4
No.4		35.03	3.041×10^4
No.5	24	26.40	2.790×10^4
No.6	48	59.63	3.770×10^4
No.7	36	34.63	2.968×10^4
No.8		38.90	3.223×10^4

表-3 鉄筋の材料試験結果

試験体	使用部位	呼び径	材質	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)
No.1~8	せん断補強筋 かんざし筋	D10	SD345	400.3	1.852×10^5	2161
No.8	せん断補強筋	D13	SD345	399.4	1.899×10^5	2103
No.1~8	かんざし筋	D16	SD345	372.6	1.913×10^5	1948
No.1~8	曲げ主筋	D19	SD390	447.5	1.922×10^5	2328
No.2	定着筋	D22	SD490	535.9	1.933×10^5	2772

表-4 SC 杣の材料試験結果（製品出荷前）

コンクリート		鋼管	
設計基準強度 F_c (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	材質	降伏強度 (N/mm ²)
105	116	SKK490	418

2.2 加力方法

加力装置の概要を図-4に示す。地震時の杭の反曲点位置を想定し、いずれの試験体もパイルキャップ上端から+1200mm (3.0D) の位置に取り付けた水平ジャッキにより、正負交番の繰り返し加力を行った。なお、前述の通り、既往の実験事例が少ない $D_p = 2.0D$ の試験体の水平荷重に対する基本的特性の把握、および埋込み部の最大耐力の評価式の検討が主な目的のため、いずれの試

験体も杭に軸力は作用させていない。

加力時には、PC 鋼棒によりスタブを反力床に固定し、試験体の浮き上がりを防止した。また、杭上端には振れ止め装置を取り付け、面外方向の変形を防止した。加力サイクルは部材角 R により制御し、 $R = \pm 0.25\%$ 、 $\pm 0.5\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2.0\%$ 、 $\pm 3.0\%$ 、 $\pm 4.0\%$ を2サイクルずつ繰り返し、その後、 $R = +10\%$ まで一方向単調加力をを行う計画とした。ここで部材角 R は、図-4に示すように、加力点からパイルキャップ下端までの距離 H と、加力点の水平変位 δ から、 $R = \delta/H$ とした。

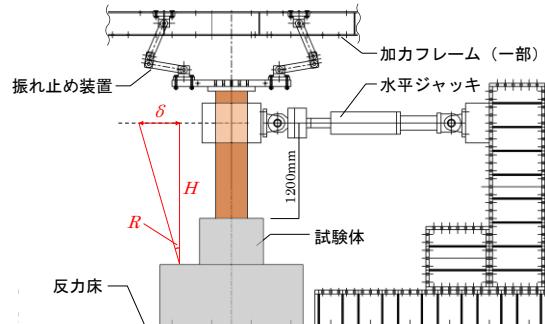


図-4 加力装置の概要

3. 実験結果

3.1 荷重変形関係と損傷過程

試験体 No.1、2 を例として、加力点の荷重 Q と部材角 R の関係（以下、「 $Q-R$ 関係」）を図-5、図-6に示す。図には損傷過程として、加力によるパイルキャップのコンクリート表面へのひび割れ発生時、各鉄筋の降伏時、および最大荷重時の点を示す。その他の試験体 No.3~8 の $Q-R$ 関係については、既報の文献 6)を参照されたい。また、試験体 No.1 を例として、 $R = +10\%$ ピーク時の上面と加力方向前面の破壊状況を写真-1、写真-2に示す。

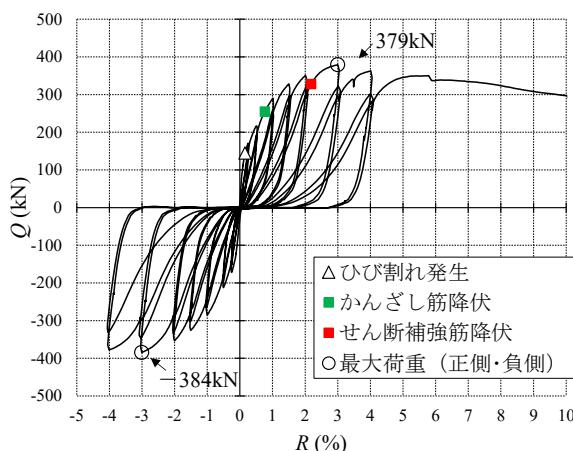
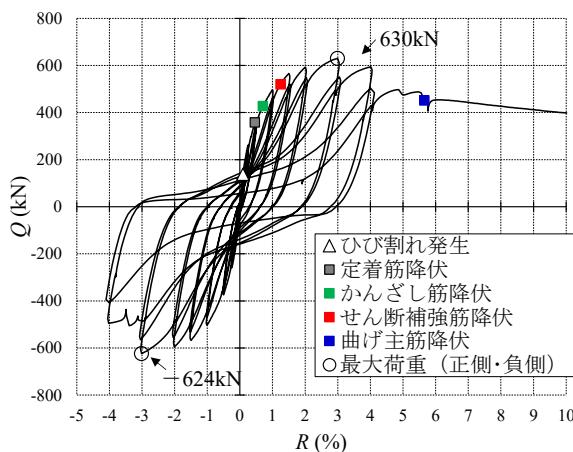
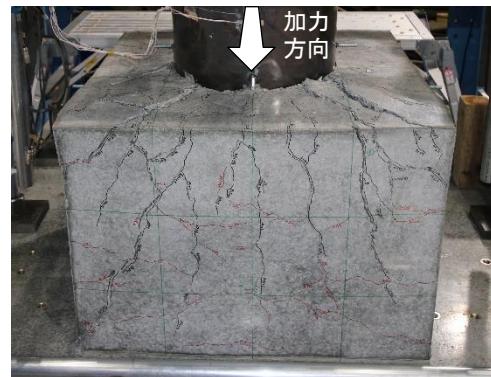
いずれの試験体も、概ね $R = +0.1\%$ を超えた段階でコンクリート表面にひび割れが発生した。最初に発生したのは、いずれの試験体もパイルキャップ上面（写真-1）であり、杭近傍の位置に、加力方向に対して斜め前方向に発生する傾向があった。その後、上面に生じたひび割れが進展していき、加力方向前面（写真-2）に縦ひび割れが発生した。また、後面には水平方向に曲げひび割れが、側面には斜めにせん断ひび割れが発生したが、ひび割れ幅は上面が最も大きくなる傾向があった。

定着筋（試験体 No.2 のみ）は、他の鉄筋に先行して $R = +0.46\%$ 時に引張降伏した。せん断補強筋は、試験体 No.3 でのみ弾性域に留まり、その他の試験体では最大荷重時より前に降伏した。

いずれの試験体も、杭前方のパイルキャップのコンクリートが、杭により押し出される破壊状況が顕著に見られ、正方向加力時は $R = +3.0\%$ のサイクルピーク時に概

ね最大荷重となった。それ以降では荷重の低下が生じたが、いずれの試験体も急激な水平抵抗の喪失は生じず、一方向単調加力を $R = +10\%$ まで行い、加力を終了した。

試験体 No.2 を除いて、いずれの試験体も図-5に示すように、除荷～逆方向加力に移行する際にスリップするような $Q-R$ 関係となった。これは、加力方向に対して杭の後面とパイルキャップのコンクリートとの間に隙間が生じるためである（写真-1 参照）。試験体 No.2 では、定着筋により曲げ抵抗が生じ、杭は水平荷重を負担するため、図-6 に示すようにやや膨らみのある形状の $Q-R$ 関係となった。

図-5 試験体 No.1 の $Q-R$ 関係と損傷過程図-6 試験体 No.2 の $Q-R$ 関係と損傷過程写真-1 試験体 No.1 上面の破壊状況 ($R = +10\%$ 時)写真-2 試験体 No.1 前面の破壊状況 ($R = +10\%$ 時)

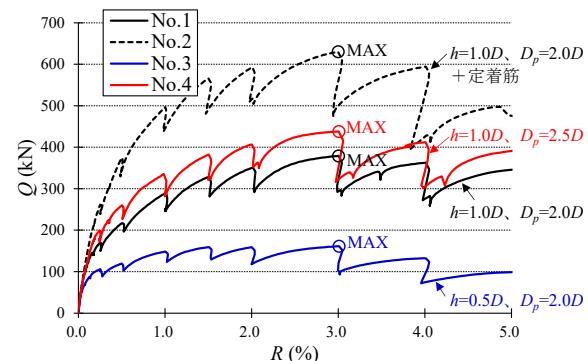
3.2 荷重変形関係の包絡線の比較

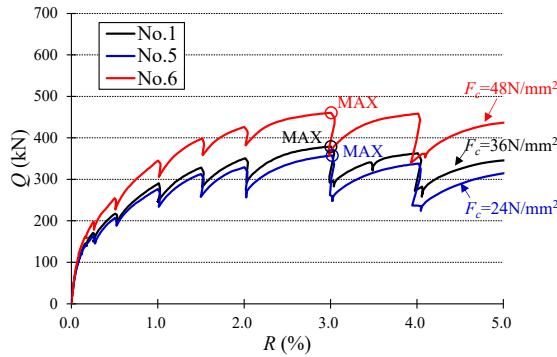
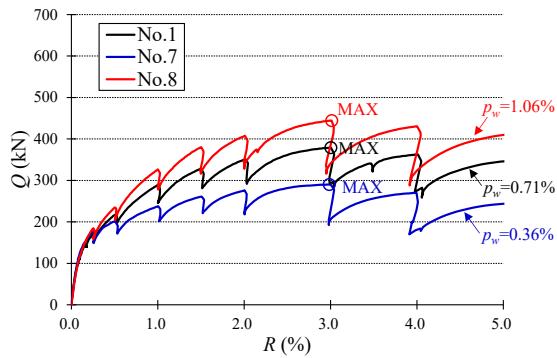
各試験体について、正方向加力時の $Q-R$ 関係の包絡線の比較を図-7～図-9に示す。

図-7 の試験体 No.1 と No.2 の比較より、定着筋の有無で水平抵抗に顕著な差が生じた。 $D_p = 2.0D$ のパイルキャップで埋込み方式と定着筋の併用を想定した場合にも、定着筋は埋込み部と複合して抵抗を発揮していることがわかる。同様に、試験体 No.1 と No.3 の比較より、埋込み長さ h に応じても水平抵抗に顕著な差が生じた。さらに、試験体 No.1 と No.4 の比較より、パイルキャップ辺長 D_p によっても差が生じた。ただし、本実験のように、配筋を変えずにパイルキャップの辺長のみ $D_p = 2.5D$ （試験体 No.4）から $D_p = 2.0D$ （試験体 No.1）に縮小しても、水平抵抗が大幅に損なわれることはなかった。

図-8 より、 F_c の大きさに応じて水平抵抗に差が生じたが、試験体 No.1 ($F_c = 36 \text{ N/mm}^2$) と試験体 No.6 ($F_c = 48 \text{ N/mm}^2$) の差に対して、試験体 No.1 と試験体 No.5 ($F_c = 24 \text{ N/mm}^2$) の差は小さかった。これは、表-2 に示す通り、 $F_c = 48 \text{ N/mm}^2$ のコンクリート実強度が大きく発現したこと、また、 F_c の値と埋込み部のせん断抵抗の間に比例関係が成立しないことが影響していると考えられる。

図-9 より、 p_w の大きさに応じて水平抵抗に差が生じた。これらの試験体では、前述の通りせん断補強筋が降伏しており、パイルキャップのせん断抵抗に対して効果を発揮していることがわかる。

図-7 $Q-R$ 関係の包絡線（試験体 No.1～4）

図-8 Q - R 関係の包絡線（試験体 No. 1、5、6）図-9 Q - R 関係の包絡線（試験体 No. 1、7、8）

4. 設計用限界値の検討

4.1 評価式の提案

本研究では、実験結果の検討をもとに、杭頭埋込み部における安全限界状態の設計用限界値の評価式を提案する。ここでは、埋込み部の安全限界曲げモーメント時の杭頭せん断力を uQ_m 、埋込み部の安全限界せん断力を uQ_s とし、計算値 $Q_{cal} = \min(uQ_m, uQ_s)$ により、各試験体の加力点の正方向最大荷重 Q_{max} を評価する。

埋込み部の安全限界曲げモーメント uM は、式(1)により算定する。これは、日本建築学会「鋼構造接合部設計指針⁷⁾」(以下、「接合部指針」)に示される、埋込み柱脚の最大曲げ耐力式を杭頭埋込み部に適用したものである。接合部指針によると、埋込み柱脚を対象とした既往の実験の最大耐力を安全側に評価できるとされている。また、その時の杭頭せん断力 uQ_m は、式(2)により算定する。

$$uM = F_c \cdot D \cdot L \left\{ \sqrt{(2L+h)^2 + h^2} - (2L+h) \right\} \quad (1)$$

$$uQ_m = \frac{uM}{L} \quad (2)$$

F_c : コンクリートの設計基準強度(N/mm^2)で、

ここで表-2 の実強度を用いる。

D : 杭外径(mm) L : 加力スパン(mm)

h : 杭頭埋込み長さ(mm)

埋込み部の安全限界せん断力 uQ_s は、文献1)に示され

る安全限界せん断力の式に、せん断補強筋による抵抗 $a_w \cdot \sigma_{wy}$ を累加した式(3)により表すことができると仮定する。式(3)の両辺を A_s で除すと、式(4)となる。

$$_uQ_s = 0.335\sqrt{F_c} \cdot A_s + a_w \cdot \sigma_{wy} \quad (3)$$

$$\frac{_uQ_s}{A_s} = 0.335\sqrt{F_c} + \frac{a_w \cdot \sigma_{wy}}{A_s} \quad (4)$$

A_s : せん断破壊面の水平投影面積(mm^2)で、

$$A_s = c \times (c+D)$$

c : 杭表面からパイルキャップ側面までの距離(mm)

a_w : せん断抵抗に有効なせん断補強筋の全断面積 (mm^2)

σ_{wy} : せん断補強筋の降伏強度(N/mm^2)

ここで、せん断補強筋量による最大荷重の差(図-9 参照)が確認された試験体 No.1、7、8 から、せん断補強筋による抵抗について検討する。

そのために、式(4)を式(5)のように置く。なお、式(5)における p'_w は、式(4)においてせん断破壊面の水平投影面積 A_s を用いていることから、このせん断破壊面の平均幅($c+D$)を用いたせん断補強筋比として式(6)のように定義した。

$$\frac{_uQ_s}{A_s} = 0.335\sqrt{F_c} + k \cdot p'_w \cdot \sigma_{wy} \quad (5)$$

$$p'_w = \frac{n \times a_s}{(c+D) \cdot x} \quad (6)$$

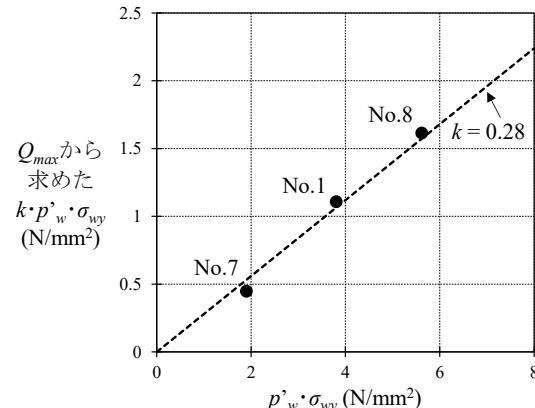
k : 実験値より定めるせん断補強筋の有効係数

n : 1段のせん断補強筋本数

a_s : せん断補強筋の1本あたりの断面積(mm^2)

x : せん断補強筋のピッチ(mm)

続いて、せん断補強筋の有効係数 k を実験値より設定する。試験体 No.1、7、8 について、式(5)の $_uQ_s$ に Q_{max} を代入して得られるせん断補強筋による抵抗 $k \cdot p'_w \cdot \sigma_{wy}$ と、試験体の配筋により決まる $p'_w \cdot \sigma_{wy}$ の関係を図-10 に示す。以降において、 σ_{wy} には表-3 の実強度を用いる。図-10 より、試験体 No.1、7、8 の3点には直線的な関係が見て取れる。そこで、原点を通る回帰直線を求めると、その傾きより $k=0.28$ が得られた。

図-10 せん断補強筋の有効係数 k の設定

以上の検討より、安全限界せん断力 uQ_s は、 $k=0.28$ を用いた式(7)により算定する。

$$uQ_s = \left(0.335\sqrt{F_c} + 0.28 \cdot p'_w \cdot \sigma_{wy} \right) \cdot A_s \quad (7)$$

4.2 提案式と実験値の比較

各試験体の実験値 Q_{max} と式(1)、(2)、(7)を用いた計算値 Q_{cal} の比較を表-5、図-11 に示す。なお、定着筋を設けた試験体 No.2 では、杭下端位置での安全限界曲げモーメントを算定し、加力点の荷重に換算した uQ_0 を $\min(uQ_m, uQ_s)$ に累加した。なお、この安全限界曲げモーメントは、定着筋とコンクリートから成る仮想円形断面を考え、平面保持を仮定した断面の曲げ解析により算定した。詳細は文献 6) を参照されたい。

表-5、図-11 より、 $Q_{cal} = uQ_m$ となる試験体は計算値が安全側の評価となることが確認でき、接合部指針による埋込み柱脚の評価式である式(1)を、杭頭埋込み部にも適用可能であると考えられる。 $Q_{cal} = uQ_s$ となる試験体は Q_{max}/Q_{cal} が 1.0 付近に分布し、高い精度で実験値を評価できることがわかる。ただし、実際の設計での適用にあたっては、十分な余裕度を確保できるよう配慮する必要があると考えられる。また、軸力を作用させていない条件での検証に限られるものの、試験体 No.2 の比較より、杭下端位置での安全限界曲げモーメントを考慮することにより、定着筋を設けることによる最大荷重の増加を評価できることがわかる。

表-5 実験値 Q_{max} と計算値 Q_{cal} の一覧

No.	実験値 Q_{max} (kN)	計算値				Q_{max}/Q_{cal}	
		uQ_0 (kN)	式(1),(2) uQ_m (kN)	式(7) uQ_s (kN)	Q_{cal} (kN)		
			最小値を太字で記す				
1	379	—	427	374	374	1.01	
2	630	170	417	371	541	1.17	
3	161	—	106	364	106	1.53	
4	438	—	398	608	398	1.10	
5	358	—	300	334	300	1.19	
6	461	—	678	438	438	1.05	
7	290	—	394	301	301	0.97	
8	444	—	442	440	440	1.01	

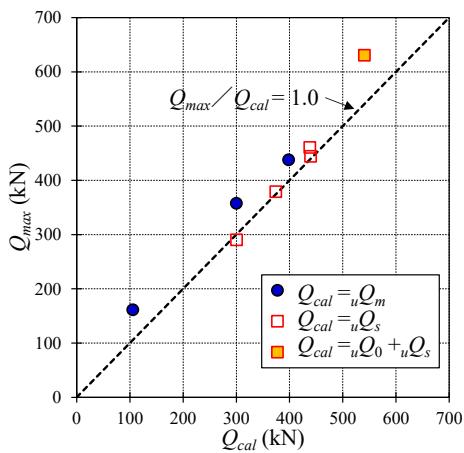


図-11 実験値 Q_{max} と計算値 Q_{cal} の関係

5.まとめ

本研究では、埋込み方式を用いた既製杭のパイルキャップの試験体による曲げせん断実験を行った。本実験より、従来よりも縮小した $D_p=2.0D$ の試験体の $Q-R$ 関係、ひび割れや鉄筋の降伏時点などのパイルキャップの損傷過程を把握した。いずれの試験体においても水平抵抗の急激な低下は見られず、本実験の範囲において、 $D_p = 2.0D$ の場合も、杭からの水平荷重の伝達を十分に行えることを確認した。また、接合部指針に基づく安全限界曲げモーメント（式(1)）、および本実験の最大荷重との関係をもとに、せん断補強筋量をパラメータに加えた安全限界せん断力（式(7)）を用い、高い精度で各試験体の埋込み部の安全限界状態を評価できることを示した。

【謝辞】

本研究において、芝浦工業大学 岸田慎司教授からご指導とご助言を受けた。ここに感謝を記す。

【参考文献】

- 日本建築学会、「基礎部材の強度と変形性能」、2022
- 土佐内優介、中野 凌、成瀬俊佑、河野 進、小林 勝巳、福田 健、郡司康浩、新井寿昭、小原 拓、「杭頭根入れ長さが短い杭を有するパイルキャップのへりあき破壊耐力に関する実験的研究（その 1、2）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV、pp.179-182、2019
- 松田 竜、毛井崇博、加藤洋一、水嶋康介、白石将大、「SC 杭頭埋込部の曲げ抵抗機構」、日本建築学会構造系論文集、第 85 卷、第 776 号、pp.1291-1301、2020
- 菱川善就、川野姫佳、小原 拓、河野 進、土佐内優介、小林勝巳、郡司康浩、新井寿昭、福田 健、大村哲矢、「既成杭の杭頭接合部における曲げ抵抗機構の解明に関する実験的研究（その 1、2）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV、pp.479-482、2022
- 郡司康浩、岩本幸希、熊田健太、竹内章博、新井寿昭、「定着筋と埋込みを併用する既製コンクリート杭用パイルキャップの構造実験（その 1、2）」、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV、pp.185-188、2019
- 和田湧気、岸本 剛、山上 聰、岡 靖弘、岸田慎司、「既製杭埋込み方式による杭頭接合部の設計合理化のための実験的研究」、日本建築学会構造工学論文集、Vol.71B、2025
- 日本建築学会、「鋼構造接合部設計指針」、2021

高炉スラグ微粉末を使用した再生骨材コンクリートの開発

Recycled Concrete Aggregate Incorporating Blast Furnace Slag

伊藤 淳* 河野政典**

要旨

解体コンクリート塊から製造された再生骨材は、構造物解体後の再資源化の過程において CO₂ を吸収し、固定化している。高炉セメント C 種相当の低炭素コンクリートに再生骨材を使用することで、低炭素性と資源循環性を兼ね備えたコンクリートの製造が可能となる。本開発では、セメントの 70%を高炉スラグ微粉末に置き換えた再生骨材コンクリートの実用化に向けた実機実験を実施し、フレッシュ性状や圧縮強度などの品質を確認した。さらに、同再生骨材コンクリートの材料由来の CO₂ 排出量と削減効果を試算した。その結果、フレッシュ性状および所要の品質基準を十分満足した。また、普通コンクリートと比べて 65~71%の CO₂ 削減効果が期待できることを確認した。

キーワード：再生骨材、高炉スラグ微粉末、環境配慮型コンクリート、CO₂ 排出量

1. まえがき

持続可能な社会の実現に向け、全産業において資源の再利用や二酸化炭素(以下、CO₂)の排出量を抑えた活動が求められている。これまで、著者らは、コンクリート工事における資源の有効活用と環境負荷の軽減を図るために、再生骨材を用いたコンクリートを場所打ち杭や基礎スラブ・フーチングに、高炉スラグ微粉末(以下、BF)を高含有したコンクリートを基礎・地中梁に適用¹⁾してきた。

昨今では、カーボンニュートラルの実現に向けて、コンクリートや他の材料にCO₂を吸収・固定化させる技術開発が進められている^{2), 3)}。再生骨材は、コンクリート構造物の解体、破碎、粒度調整などの過程を経て製造される。この過程で新しく大気に接する表面積が増えることから、CO₂の吸収・固定化が進むと考えられている。再生骨材は、コンクリート用骨材としてのリサイクル材料のみならず、CO₂回収材としての利用も期待されている。この再生骨材を、セメントの 70%を BF で置き換えた高炉セメント C 種相当の低炭素コンクリートに使用し、再生骨材における CO₂の吸収・固定量を評価することと、さらに CO₂ 削減効果が高まると期待できる。BF および再生骨材を使用したコンクリートは、2022 年 11 月に改定された日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS 5)に示されている資源循環性と低炭素性⁴⁾を兼ね備えたコンクリートである。一方、再生骨材を用いたコンクリート

を構造物に適用するためには、フレッシュコンクリートの性状や圧縮強度だけでなく、「再生骨材およびコンクリートの塩化物量管理」や「アルカリシリカ反応への対策」等の再生骨材コンクリートとしての品質管理が重要となる。

今回、BF を用いた再生骨材コンクリートの実用化を目指し、基本的な性状について検討するため、BF を使用した再生骨材コンクリートの実機実験を行った。また、実機実験の結果に基づき、呼び強度 24~42 の範囲について CO₂ 排出量を算定した。

本報では、それらの結果について報告する。なお、本開発は表一に示す 13 社で構成された「再生骨材を用いた CELBIC の実用化に関する研究会」において実施したものである。

2. 実機実験

2.1 実験計画

再生骨材の種類と特徴を表一に示す。再生骨材は、製造過程で骨材に付着しているモルタルを取り除く量によってその品質が決まり、再生骨材 H、M、L の 3 クラ

表一 研究会の参加企業

青木あすなろ建設	○浅沼組	○安藤ハザマ
奥村組	熊谷組	鴻池組
○五洋建設	鉄建建設	東急建設
東京テクノ	東洋建設	長谷工コーポレーション
矢作建設工業	(五十音順	○: 主査, ○: 幹事)

*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

スに分類される。本実験では、JIS A 5022 附属書 A に適合するコンクリート用再生骨材 M(以下、再生骨材 M)および JIS A 5023 附属書 A に適合するコンクリート用再生骨材 L(以下、再生骨材 L)を、普通骨材と混合して用いた。

一方、出所が不特定である再生骨材を用いたコンクリートを構造物に使用する場合、アルカリシリカ反応への対策が重要な管理項目の一つとなる。再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応の抑制対策は JIS A 5022 附属書 C に示されており、その一つとしてポルトランドセメントを使用する場合は、JIS A 6206 に適合する BF を質量比で 50%以上用いることに加えて、コンクリート中のアルカリ総量を $4.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以下にすることが示されている。本実験では、結合材として普通ポルトランドセメント(以下、C)に BF を質量比で 70% 使用した高炉セメント C 種相当を用いた。本結合材の使用により、アルカリシリカ反応の抑制対策となると考えられる。

実験の組合せ条件を表-3 に示す。水結合材比(W/B)は、呼び強度 21 から 42 を満足するように 55%、40%、30% の 3 水準とした。再生骨材の組合せを実験要因の一つとし、再生骨材 M の細骨材(以下、RMS)と再生骨材 M の粗骨材(以下、RMG)の組合せ、RMS と再生骨材 L の粗骨材(以下、RLG)に普通粗骨材の碎石 2005(以下、G)を容積比で 50% 混合した組合せの 2 水準とした。打込み時期は、冬期(W)、標準期(S)、夏期(H)の 3 シーズンとした。

2.2 コンクリートの調合および使用材料

コンクリートの調合および使用材料を表-4 に示す。 RMS と RMG の組合せを MM 調合、RMS と RLG に G を混合した組合せを ML 調合と称す。粗骨材かさ容積は、W/B55% で $0.570\text{m}^3/\text{m}^3$ 、W/B40% および W/B30% で $0.560\text{m}^3/\text{m}^3$ として、骨材の組合せに関わらず一定とした。

BF は、JIS A 6206 に適合するせっこう添加タイプとし、再生骨材は 24 時間以上プレウェッティングをした後に使用した。化学混和剤は、W/B55% で AE 減水剤を、W/B40% および W/B30% で高性能 AE 減水剤を使用した。また、化学混和剤の使用量は、実際の運搬時間を考慮し、経時 60 分でスランプの管理値 $18 \pm 2.5\text{cm}$ または $23 \pm 2.0\text{cm}$ 、空気量の管理値 $4.5 \pm 1.5\%$ に収まるよう調整した。

2.3 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-5 に示す。フレッシュコンクリート試験は、スランプ、空気量、コンクリート温度を練上がり直後、経過 30、60、90、120 分に測定した。塩化物量は経時 60 分のみ測定した。フレッシュコンクリートの塩化物量は、JIS A 5022 を参考にして、以下に示す項目の総和とした。

- JASS5T-502 により求めたフレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度と調合設計に用いた単位水量との積

表-2 再生骨材の種類と特徴

種類	特徴	適用部位
再生骨材 H JIS A 5021	加熱擦り揉み処理等により付着モルタルはほとんどない。普通骨材と同様の取扱いができるので適用範囲は広いが、製造時のエネルギー消費が大きく、コストが高い。	普通骨材と同じ (制限なし)
再生骨材 M JIS A 5022 附属書 A	擦り揉み等により付着モルタルはある程度除去される。H と L の中間の品質で、コストは H より安い。	杭、基礎、乾燥収縮・凍結融解の影響を受けにくい部位
再生骨材 L JIS A 5023 附属書 A	破碎・分級するだけで付着モルタルは除去されない。製造時の副産物の発生が少なく製造コストも最も安いが、品質の面から再生骨材 L のみでは RC 造の構造体には使用できない。	捨てコン等の高い強度や耐久性を要求されない部位

表-3 実験の組合せ条件

結合材	W/B (%)	再生骨材		打込み時期
		細骨材	粗骨材	
普通セメント+BF (質量比 30:70)	55 40 30	再生骨材 M 再生骨材 M+普通骨材 (容積比 50:50)	再生骨材 M 再生骨材 L+普通骨材 (容積比 50:50)	冬期(W) 標準期(S) 夏期(H)

表-4 コンクリートの調合および使用材料

打込み 時期	調合 ¹ 記号	W/B (%)	単位量(kg/m ³)						Ad(SP ² (B×%))	AE ³
			W	C	BF	RMS	G	RMG		
標準期 (S)	55MM-S	55	180	98	229	755	—	908	—	1.2 3.0A
	40MM-S	40	170	128	298	714	—	893	—	0.9 2.5A
	30MM-S	30	170	170	397	597	—	893	—	0.95 4.5A
	55ML-S	55	180	98	229	790	455	—	413	1.15 3.0A
	40ML-S	40	170	128	298	749	447	—	405	0.85 2.5A
	30ML-S	30	170	170	397	632	447	—	405	0.95 4.0A
夏期 (H)	55MM-H	55	180	98	229	795	—	923	—	1.2 1.5A
	40MM-H	40	170	128	298	752	—	907	—	0.95 2.5A
	30MM-H	30	170	170	397	629	—	907	—	1 4.0A
	55ML-H	55	180	98	229	832	455	—	416	1 1.25A
	40ML-H	40	170	128	298	788	447	—	408	0.85 3.5A
	30ML-H	30	170	170	397	665	447	—	408	0.9 3.5A
冬期 (W)	55MM-W	55	180	98	229	786	—	919	—	0.95 1.5A
	40MM-W	40	170	128	298	744	—	903	—	0.65 2.5A
	30MM-W	30	170	170	397	622	—	903	—	0.675 4.0A
	55ML-W	55	180	98	229	823	455	—	422	0.85 2.0A
	40ML-W	40	170	128	298	779	447	—	415	0.6 2.0A
	30ML-W	30	170	170	397	657	447	—	415	0.8 4.0A

C : 普通ポルトランドセメント(密度 3.15 g/cm^3)BF : 高炉スラグ微粉末 4000(密度 2.89 g/cm^3 せっこう添加品)RMS : 再生骨材 M の細骨材(絶乾密度 $2.47\sim 2.52\text{ g/cm}^3$ 、吸水率 $2.65\sim 3.22\%$ 、微粒分量 $0.1\sim 0.4\%$)G : 碎石 2005(絶乾密度 $2.64\sim 2.65\text{ g/cm}^3$ 、吸水率 $0.68\sim 0.72\%$)RMG : 再生骨材 M の粗骨材(絶乾密度 $2.47\sim 2.52\text{ g/cm}^3$ 、吸水率 $2.65\sim 3.22\%$ 、微粒分量 $0.1\sim 0.4\%$)RLG : 再生骨材 L の粗骨材(絶乾密度 $2.26\sim 2.35\text{ g/cm}^3$ 、吸水率 $5.09\sim 6.72\%$ 、微粒分量 $0.2\sim 0.6\%$)

Ad : AE 減水剤(高機能タイプ) ポリカルボン酸系化合物

SP : 高性能 AE 減水剤(高炉スラグ高含有用) ポリカルボン酸系化合物

¹*1 調合記号 : 水結合材比・骨材組合せ・打込み時期²*2 W/B=55% : Ad, W/B=40% および 30% : SP

夏期は遅延形、標準期および冬期は標準形を使用

³*3 空気量調整剤 1.0A=B×0.002%

ii. 再生骨材 M の塩化物量(ここでは塩化物イオン量)と調合設計に用いた再生骨材 M の単位量との積

iii. 再生骨材 L の塩化物量(ここでは塩化物イオン量)

と調合設計に用いた再生骨材 L の単位量との積

なお、再生骨材の塩化物イオン量は JIS A 1154 により求めた。

圧縮強度試験は、標準養生および簡易断熱養生の供試体とコア供試体で実施した。簡易断熱養生は、発泡スチロール製の簡易断熱養生槽に材齢 7 日まで存置し、試験材齢まで封かん養生とした。また、コア供試体は、模擬柱試験体 $1000 \times 1000 \times 1000\text{mm}$ のブロックから採取し、中央部および端部から 2 本ずつ、上下端を除いて約 200mm 間隔で切断した 8 本とした。なお、管理用供試体の採取と模擬柱試験体の打込みは、練上がりから 60 分後に実施した。

BF の使用率を 70% とし、アルカリシリカ反応の抑制対策とする際、再生骨材の付着ペーストやアルカリシリカゲルの存在により、コンクリートのアルカリ量が増加すると予想されるため、JIS A 5022 附属書 E のアルカリシリカ反応性迅速試験を実施した。また、再生骨材には、セメントの水和により固定された塩化物イオンと可溶性の塩化物イオンが混在しており、固定および可溶性の塩化物イオンを合わせた全塩化物イオン量(全塩分量)を把握するため、硬化コンクリート中の塩化物イオン量は、JIS A 1154 の試験方法に従って測定した。測定対象は、各打込み時期において水結合材比が最も小さい 30MM と 30ML の 2 調合および 3 シーズンの計 6 調合とした。なお、アルカリシリカ反応性迅速試験は、実適用の際の品質管理の一つとして実施するものである。

2.4 実験結果

a. 再生骨材

再生骨材の塩化物量の試験結果を図-1 に、ペースト付着率の測定結果を図-2 に示す。NaCl 換算の塩化物量は、自主管理基準である 0.010% 以下を十分に満足した。なお、自主管理基準は、JIS A 5022 附属書 A の規定値 0.04% よりも厳しい値を設定している。ペースト付着率は RMS、RLG、RMG の順に小さくなつた。RMG と RLG を比較すると、付着ペースト率では RLG が大きくなっているものの、塩化物量の値には差は殆ど見られなかつた。

b. フレッシュコンクリート

フレッシュ性状の経時変化の一例として、40MM および 40ML の試験結果を図-3 に示す。スランプおよび空気量とともに、現場での荷卸しを想定した経過 60 分において管理値を満足した。スランプは、時間の経過とともに低下する傾向にあったものの、コンクリート温度が高い夏期においても、経過 120 分まで管理値を満足した。空気量は、40MM-S および 40MM-H において攪拌による巻込みと思われる空気量の増加傾向が見られたが、経過 120 分まで管理値内となつた。なお、結果を示してはいないが、W/B55% は経過 90 分まで、W/B30% と W/B40% は経時 120 分まで、スランプおよび空気量ともに管理値を満足した。

フレッシュコンクリートの塩化物量の試験結果を図-4 に示す。MM 調合および ML 調合とともに、夏期の値が

表-5 試験項目および試験方法

対象	試験項目	試験方法
再生骨材	塩化物量	JIS A 1154 管理値：NaCl 換算で 0.010% 以下
	ペースト付着率	塗酸溶解 ・塗酸濃度 5%，約 1kg×2 回平均
フレッシュコンクリート	スランプ	JIS A 1101：運搬時間を考慮し、練り混ぜから 60 分後を管理値とし、W/B55% で $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、W/B40% および W/B30% で $23 \pm 2.0\text{cm}$ とした
	空気量	JIS A 1128 管理値： $4.5 \pm 1.5\%$
	コンクリート温度	JIS A 1156
	塩化物量	JASS5T-502 管理値：塩化物イオン量で $0.30\text{kg}/\text{m}^3$ 以下
硬化コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108、1107 ・標準養生(材齢 7、28、56、91 日) ・簡易断熱養生(材齢 28、56、91 日) ・コア供試体(材齢 28、56、91 日)
	アルカリシリカ反応性	JIS A 5022 附属書 E アルカリシリカ反応性迅速試験 管理値：80%以上
	塩化物量	JIS A 1154 水結合材比が最も小さい 30MM および 30ML の 2 調合を対象 管理値：塩化物イオン量で $0.30\text{kg}/\text{m}^3$ 以下

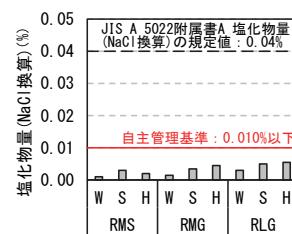


図-1 再生骨材の塩化物量の試験結果

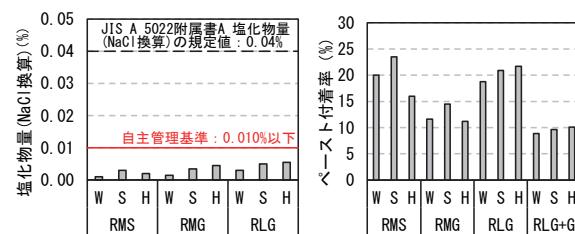


図-2 ペースト付着率の測定結果

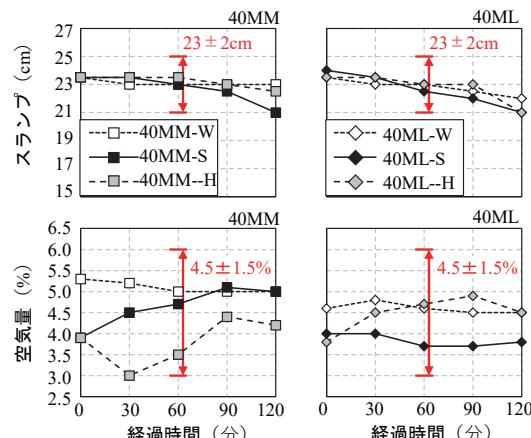


図-3 フレッシュコンクリートの経時変化の一例(40MM、40ML)

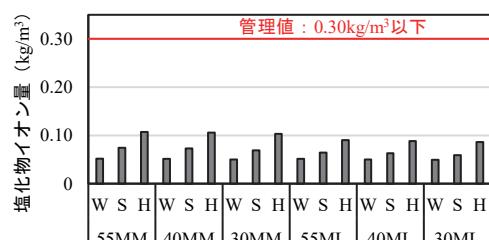


図-4 フレッシュコンクリートの塩化物量の試験結果

大きくなる傾向が見られた。これは、再生粗骨材の塩化物量が標準期や冬期と比較して、やや大きいことが影響したと考えられる。しかし、いずれの調合も管理値である $0.30\text{kg}/\text{m}^3$ 以下を十分に満足した。MM 調合と ML 調合を比較すると、再生骨材の使用量が少ない ML 調合の値がやや小さくなる傾向が見られた。

c. 硬化コンクリート

MM 調合と ML 調合の圧縮強度の比較を図-5 に示す。各養生において、ML 調合の圧縮強度よりも MM 調合の方が大きくなる傾向にあった。しかし、夏期を除いた冬期と標準期でみると、ほぼ同等の結果であった。材齢 91 日のコア供試体の圧縮強度と構造体強度補正値 ${}_{28}\text{S}_{91}$ の関係を図-6 に示す。構造体強度補正値は、材齢 28 日の標準養生の圧縮強度と材齢 91 日のコア供試体の圧縮強度の差から算出した。なお、図中には JASS 5⁴⁾ および高炉指針⁵⁾ に示されている S 値を表記した。本検討における構造体強度補正値は、冬期 < 標準期 = 夏期となる結果であった。骨材の組合せによる影響に着目すると、標準期において MM 調合の方が大きくなっているものの、冬期や夏期では概ね同程度の値であった。この結果から、本実験における BF を使用した再生骨材コンクリートの ${}_{28}\text{S}_{91}$ は、設計基準強度 $36\text{N}/\text{mm}^2$ 以下の場合、JASS 5 に示される高炉セメント C 種相当と同様に構造体強度補正値を $3\text{N}/\text{mm}^2$ または $6\text{N}/\text{mm}^2$ として設定できることを確認した。また、設計基準強度 $36\text{N}/\text{mm}^2$ を超え $48\text{N}/\text{mm}^2$ 以下の場合は高炉指針に示される $9\text{N}/\text{mm}^2$ 以下となり、 $48\text{N}/\text{mm}^2$ を超える場合においても $9\text{N}/\text{mm}^2$ に設定できる可能性が示唆された。

アルカリシリカ反応性迅速試験結果を図-7 に示す。相対動弾性係数は、対象としたすべての調合において 80%以上となり、「反応性なし(A)」の結果であった。

各打込み時期において、W/B30%の調合を対象に実施した硬化コンクリートの塩化物量の試験結果を図-8 に示す。塩化物イオン量は、すべての調合で管理値である $0.30\text{kg}/\text{m}^3$ を大きく下回り、骨材の組合せによる影響は小さいと考えられる。

各調合のアルカリ総量を確認するため、JIS A 5022 附属書Cに倣って各使用材料の全アルカリ量の総和で算出した。アルカリ総量算定結果を図-9 に示す。アルカリ総量の大部分が再生骨材由来となっている。再生骨材の全アルカリ量は、セメントペーストに含まれる水量をゼロとし、原コンクリートに用いたセメントのアルカリ量を過去の最大値と仮定しており、抑制対策の評価として安全側の数値を採用した。本実験における各調合のアルカリ総量は、JIS A 5022 の管理値である $4.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以下を満足した。また、再生骨材の使用量が多い MM 調合の方が ML 調合よりもアルカリ総量が大きく、水結合材比が小さくなるにつれてアルカリ総量が大きくなる傾向にあるが、その差は小さいことを確認した。

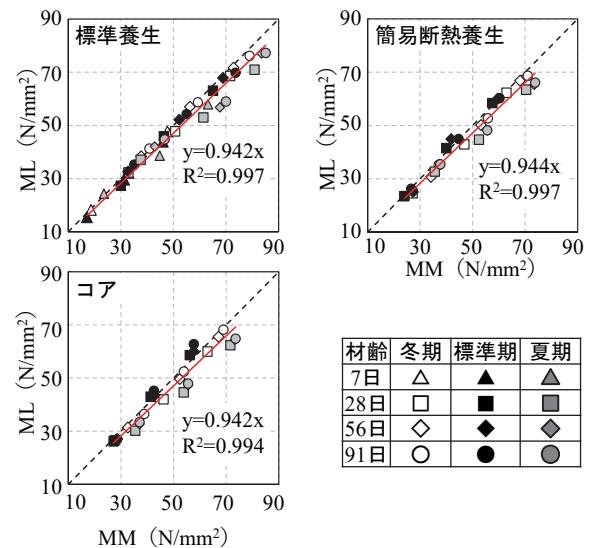


図-5 MM 調合と ML 調合の圧縮強度の比較

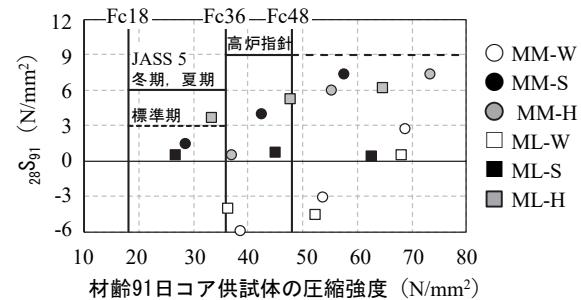


図-6 材齢 91 日のコア供試体の圧縮強度と構造体強度補正値 ${}_{28}\text{S}_{91}$ の関係

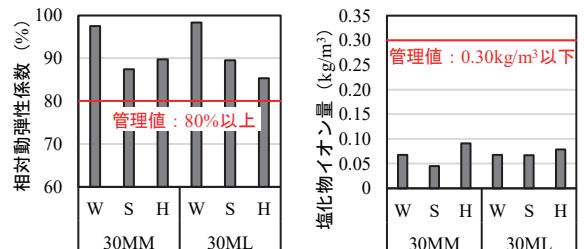


図-7 アルカリシリカ反応性迅速試験の結果

図-8 硬化コンクリートの塩化物量の試験結果

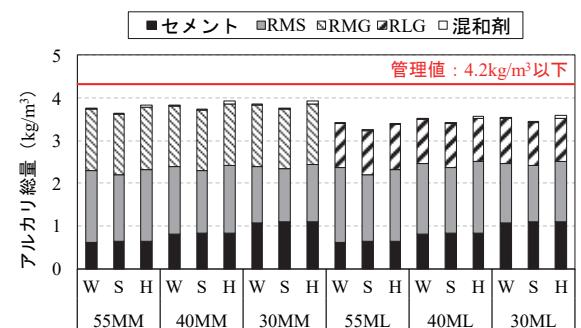


図-9 アルカリ総量算定の結果

3. CO₂排出量および削減効果の検討

3.1 呼び強度に対応する水結合材比の算定

BF を用いた再生骨材コンクリートの材料由来の CO₂ 排出量および削減効果を検討するにあたり、材齢 28 日の圧縮強度の実験結果に基づき、呼び強度 24 から 42 に対応する結合材水比(B/W)を算出した。B/W と圧縮強度の一例を図-10 に示す。B/W の算定式には、実験データの回帰式とともに、データ全体を包括できるように負側に平行移動した式を用いた。標準偏差は呼び強度の 10% とし、調合強度は式(1)および式(2)を満足するよう定めた。

$$F = SL + 2\sigma \quad (1)$$

$$F = 0.85SL + 3\sigma \quad (2)$$

F : 調合強度(N/mm²)、SL : 呼び強度(N/mm²)

σ : 標準偏差(N/mm²)

3.2 CO₂ 排出量の算定と削減効果の試算

CO₂ 排出量の算定に用いた調合条件を表-6 に示す。また、各材料の CO₂ 排出量原単位を表-7 に、再生骨材の CO₂ 固定量を表-8 に示す。

材料由来の CO₂ 排出量、再生骨材による CO₂ 削減量、および BF を使用した再生骨材コンクリートにおける CO₂ 削減効果を呼び強度ごとに表-9 および図-11 に示す。普通コンクリートと比較して BF を使用した再生骨材コンクリートの CO₂ 削減効果は、再生骨材の組合せや呼び強度にも拠るが、65~71% 程度期待できることが示された。CO₂ 排出量の削減には、BF を使用したことによる効果が大きく、169~217kg-CO₂/m³ 程度の CO₂ 排出量が削減された。さらに再生骨材を使用することにより、18~24kg-CO₂/m³ 程度の CO₂ 排出量が削減された。

4. まとめ

本開発では、セメントの 70%を BF に置き換えた再生骨材コンクリートの実用化に向けて実機実験を実施し、フレッシュ性状や圧縮強度等を確認した。また、再生骨

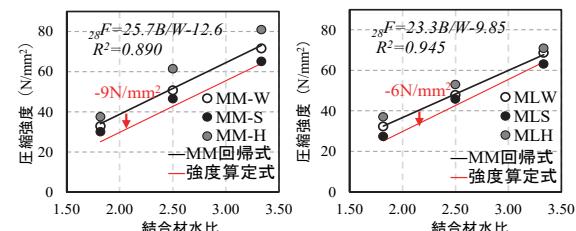


図-10 結合材水比(B/W)と圧縮強度の一例
(標準養生、材齢 28 日)

表-6 調合条件

項目	条件
単位粗骨材かさ容積	0.570m ³ /m ³ (スランプ 18cm)
化学混和剤	W/B ≤ 50% : 高性能 AE 減水剤 W/B > 50% : AE 減水剤
単位水量	W/B ≤ 50% : 170kg/m ³ W/B > 50% : 180kg/m ³

表-7 各材料の CO₂ 排出量原単位⁵⁾

材料	CO ₂ 排出量原単位(kg-CO ₂ /t)
C	772
BF	35.6
碎石	3.90
碎砂	3.90
砂	4.90

C : 普通ポルトランドセメント
C : 普通ポルトランドセメント

表-8 再生骨材の CO₂ 固定量⁶⁾

種類	CO ₂ 固定量(kg-CO ₂ /t)
RLS	41.8
RLG	11.7
RMS	19.9
RMG	10.2

再生骨材の製造時と保管 4 週間(屋外に存置、1 日 1 回散水)

表-9 CO₂ 排出量および削減効果の試算結果

呼び強度	W/B (%)			CO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /m ³) [再生骨材による削減量](kg-CO ₂ /m ³)			CO ₂ 削減効果(%)	
	普通	MM	ML	普通	MM	ML	MM	ML
24	58.4	50.7	51.9	245.0	74.1[24.6]	75.4[20.8]	69.8	69.2
27	54.7	47.5	48.2	261.2	73.9[24.9]	76.8[21.0]	71.7	70.6
30	51.3	44.6	44.9	278.1	80.1[24.5]	83.9[20.6]	71.2	69.8
33	48.7	41.9	42.0	276.6	87.2[24.3]	91.1[20.4]	68.5	67.1
36	45.9	39.6	39.4	292.8	93.5[23.9]	97.5[20.0]	68.1	66.7
40	43.6	36.9	37.1	308.1	101.7[23.4]	107.3[19.5]	67.0	65.2
42	41.5	35.6	35.1	323.5	106.1[23.2]	111.8[19.2]	66.8	65.4

※普通コンクリートの W/B は、生コン工場の調合表を参考にした

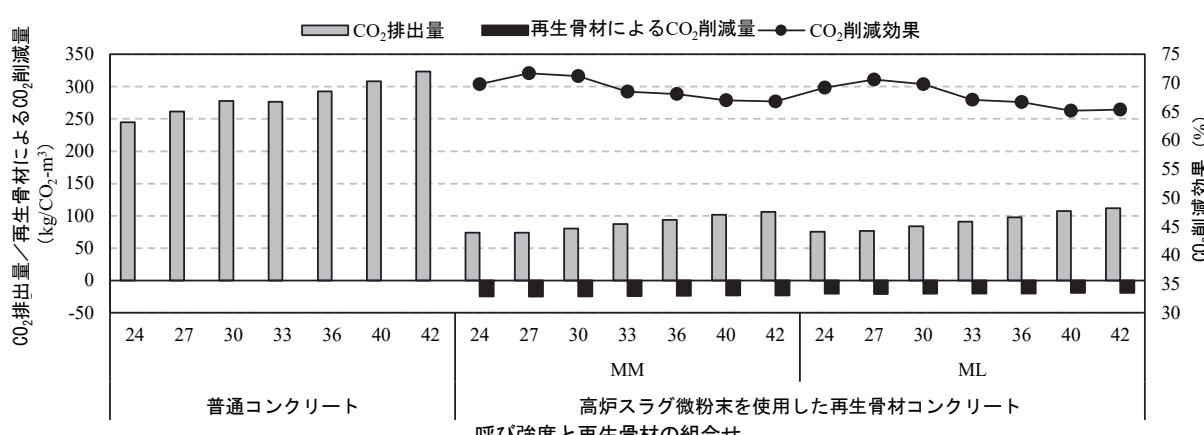


図-11 CO₂ 排出量と再生骨材の CO₂ 固定量および再生骨材コンクリートの CO₂ 削減効果

材コンクリートにおける材料由来の CO₂排出量および削減効果を試算した。その結果から得られた知見を以下に示す。

- i. フレッシュ性状は、再生骨材の組合せにかかわらず、運搬時のスランプの低下などを適切に見込むことで、良好なフレッシュ性状を確保できる
- ii. アルカリシリカ反応性迅速試験の結果は「反応性なし」であり、また、JIS A 5022 附属書 C に従つて算出したアルカリ総量は W/B30%までの範囲であれば管理値である 4.2kg/m³ 以下を満足する
- iii. フレッシュコンクリートと硬化コンクリートでの塩化物イオン量は、ともに管理値である 0.30kg/m³ 以下を十分に満足する
- iv. 設計基準強度 36N/mm² 以下の場合、JASS 5 に示される高炉セメント C 種相当と同様に 3N/mm² または 6N/mm² として設定でき、また、設計基準強度 36N/mm² を超え 48N/mm² 以下の場合は高炉指針に示される 9N/mm² 以下となり、48N/mm² を超える場合においても 9N/mm² に設定できる可能性が示唆された
- v. セメントの 70%を高炉スラグ微粉末に置き換えた再生骨材コンクリートは、65~71%の CO₂ 削減効果が期待できる

5. あとがき

再生骨材を用いたコンクリートは、JIS A 5022 の規格があるものの、建築基準法上、構造躯体に使用する材料規格に認められていない。また、再生骨材 M を用いたコンクリートは、塩化物量やアルカリシリカ反応などの慎重な管理が必要である。開発したコンクリートは、再生骨材コンクリートの規格を十分に満足する結果であり、実験結果に基づき定めた再生骨材コンクリートの製造・品質管理基準により、生コン工場と共同で第三者機関の建築材料の性能評価を受け、国土交通大臣認定(MCON-4754・4755)を取得した。

大臣認定を取得した再生骨材コンクリートの適用範囲を表-10 に示す。設計基準強度は、普通コンクリートの強度範囲である 18~42N/mm² とし、BF 使用率は 60~70%の高炉セメント C 種相当である。また、適用例として、場所打ち杭や基礎および居室に接しない地下躯体、CFT 造の鋼管充填コンクリート等に適用することが可能である。

今後は、コンクリート塊のリサイクルの一層の推進を図るとともに、持続可能な社会の実現を目指し、CO₂ 削減に寄与するコンクリートの研究を進めていきたい。

表-10 高炉スラグ微粉末を使用した再生骨材コンクリートの適用範囲

項目	適用範囲
BF の種類	高炉スラグ微粉末 4000 (JIS A 6206)
BF の使用率	70%(高炉セメント C 種相当)
再生骨材の品質と組合せ	・再生細骨材 M、・再生粗骨材 M 2005 ・再生細骨材 M、 ・再生粗骨材 L 2005 + 碎石 2005
設計基準強度	管理材齢 28 日 : 18~42N/mm ² 管理材齢 56 日 : 18~45N/mm ²
スランプ	15cm・18cm・21cm・23cm (呼び強度に応じて設定)
スランプフロー	45cm・50cm・55cm・60cm (呼び強度に応じて設定)

【参考文献】

- 1) 河野政典、伊藤 淳、「カーボンニュートラルの実現に向けた取り組み、環境に配慮したコンクリートの実適用」、土木施工、pp101-104、2024.11
- 2) 松田信広、伊代田岳史、「再生骨材コンクリートによるCO₂削減効果の可能性に関する検討」、コンクリート工学年次論文集、Vol.46、No.1、pp.1093-1098、2024.6
- 3) 黒田泰弘、菊地俊文、「コンクリート塊による二酸化炭素の固定化に関する研究」、清水建設研究報告、第 86号、pp.29-36、2007
- 4) 日本建築学会、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」、2022.11
- 5) 日本建築学会、「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説」、2017.9
- 6) 吉野 玲、鈴木好幸、伊藤 淳、野中 英、「再生骨材の製造工程におけるCO₂固定量に関する研究」、コンクリート工学年次論文集、Vol.47、No.1、pp.810-815、2025.7

中高層木造建築の設計と施工

—CLT耐震壁の構造実験と実大モックアップを用いた施工性の検証—

Design and Construction of Large Timber Structure

- Experiments of CLT seismic walls and Verification of Constructability -

富田直樹* 佐藤太輝** 小妻靖知** 山際 創** 秋竹壯哉* 伊藤 淳*

要旨

地上8階建の中高層木造建築の設計と施工に取り組み、木造と鉄筋コンクリート造の混合構造となる建物を計画した。木造の構造体にはCLT耐震壁を採用し、躯体への接合は一般的に用いられる鋼板挿入型ドリフトピン接合と、新たに考案したせん断コッター接合を併用して、高い初期剛性を実現した。採用にあたっては、各種構造実験を行い、CLT耐震壁の設計方法を確立した。施工面では、工期短縮のために鉄筋コンクリート造躯体と木造躯体を各階同時に構築する計画とした。実大のモックアップを用いて、木造躯体構築時の施工性を検証し、実施工に取り組んだ。建物に木材を使用したことによるCO₂の固定量および環境配慮型BFコンクリートを使用したことによるCO₂排出量の削減を確認した。

キーワード：中高層木造建築、混合構造、CLT耐震壁、実大モックアップ、環境配慮型BFコンクリート

1. まえがき

近年、脱炭素社会の実現に向け、CO₂を固定化する木材の利用が着目され、建築においては低層建物だけでなく、中高層建物の木造建築事例も報告¹⁾されている。当社においても、ESG・SDGsの取り組みの一環として、建築物の木造化・木質化を推進するため、自社寮を対象として、木造と鉄筋コンクリート造との混合構造からなる中高層木造建築の実現に取り組んだ。

木造の耐震壁にCLTを採用するためにCLTの接合方法に関する要素実験と壁構面実験を行い、その構造性能を確認した。実施工にあたり、実大のモックアップを用いて木造部分の雨養生方法や躯体工事の施工手順を確認

した。また、実施工では、CO₂排出量削減の観点から、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末に置き換えた環境配慮型BFコンクリート²⁾を基礎躯体に適用し、CO₂排出量の削減を確認した。本報では、これらの取り組みについて報告する。

2. 建物概要

建物は、埼玉県川口市に計画された地上8階建の自社寮である。写真-1に外観および内観写真、図-1に構造構成ダイヤグラムを示す。計画地が荒川の浸水域に位置していることから、地震や水害時に高い安全性を確保するために中間階免震構造を採用了。架構形式は、



写真-1 外観および内観写真

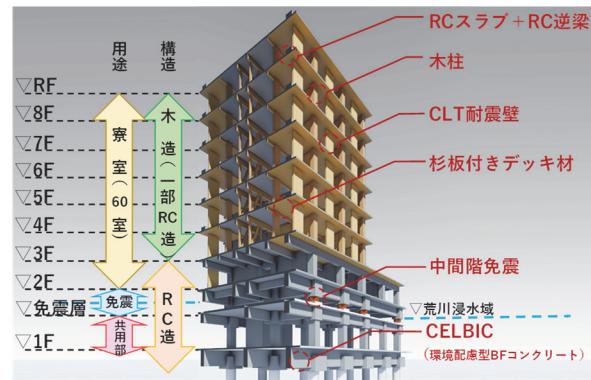


図-1 構造構成ダイヤグラム

*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

両方向とも耐震壁付きラーメン架構である。耐震要素として CLT 耐震壁を用いると共に、木造と鉄筋コンクリート造の混合構造を計画した。

構造種別は、図-1 に示すように免震層上下階となる 1~2 階を RC 造とし、免震効果を十分に発揮させるために高い剛性と耐力を確保した。基準階は、図-2 に示すように、寮としての居住性および耐震性能を確保するため、木造と RC 造（コア部）の混合構造とした。そのため、床は面内剛性を確保して水平力をコア部の RC 架構まで伝達する必要がある。また木質系床構造では、遮音性能を確保するためスラブが厚くなり、階高が高くなる。そこで、RC スラブを採用することで、必要な面内剛性と遮音性を確保しつつ階高を抑えている。

3~8 階の混合構造階には、耐震要素として RC 造の耐震壁と木造の CLT 耐震壁および筋交いを設けた。木造架構は軸組み工法とし、柱および梁、筋交いは、集成材 E105-F300 を用い、接合部は鋼板挿入型ドリフトピン接合とした。CLT 耐震壁の仕様については、3 章に記す。

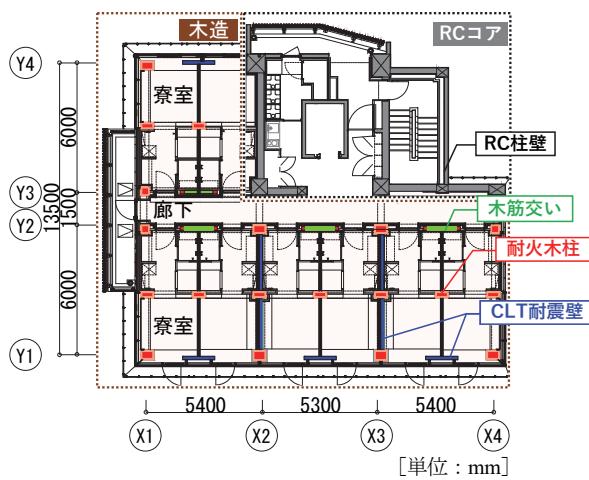


図-2 基準階伏図

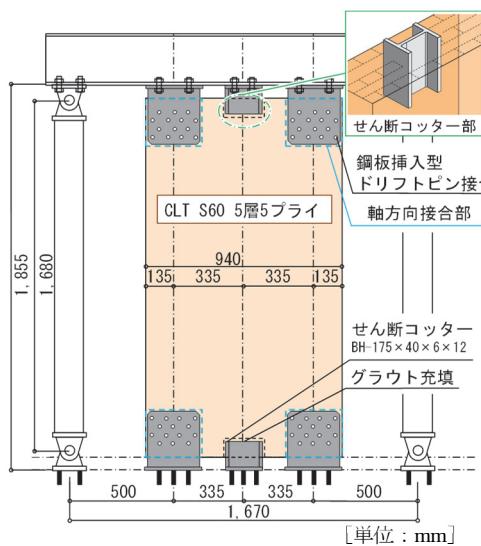


図-3 CLT 壁構面試験体 (1/3縮小モデル)

3. CLT 耐震壁の構造実験

3.1 実験概要

CLT 耐震壁全体の構造性能を確認するための壁構面実験と、各接合部の構造性能を確認するための要素実験を行った。図-3 に CLT 壁構面の試験体を、図-4 にせん断コッター接合部の試験体を示す。表-1 に試験体一覧を示す。壁構面試験体は、加力装置の性能の関係上、2/3 縮小試験体とした。接合部の要素試験は、壁構面試験が縮小試験体となるため、実大と 2/3 縮小試験体の 2 パターンで実施した。CLT 耐震壁は、上部を木梁、下部を RC スラブと接合する。その接合には、鋼板挿入型ドリフトピンと新たに考案したせん断コッターを用いる。CLT は、国産スギ S60 同一等級構成、5 層 5 プライの厚み 150mm を用いた。四隅の軸方向接合部は、鋼板挿入型ドリフトピン接合とし、中央のせん断接合部には H 形鋼を挿入し、コッターの支圧によりせん断力を負担する仕様とした。ドリフトピンには、鋼板の施工クリアランスがあるのに対し、せん断コッターではグラウトを充填することにより隙間をなくしている。これは、軸方向力とせん断力を明確に分けて CLT 耐震壁に負担させ、荷重変形関係においてスリップ挙動の生じない高い初期剛性を得ることを意図している。なお、図-4 に示す試験体は、鉛直一方方向の単調載荷実験としたため、せん断コッターには CT 形鋼を用いた。

表-1 試験体一覧

対象部位	接合形式	スケール	載荷方法	試験体数
要素	鋼板挿入ドリフトピン	実大	単調	1
	せん断コッター		漸増	6
要素	鋼板挿入ドリフトピン	2/3縮小	単調	1
	せん断コッター		漸増	6
	鋼板挿入ドリフトピン	2/3縮小	単調	1
	せん断コッター		漸増	6
構面	壁全体	2/3縮小	単調	1
			漸増	3

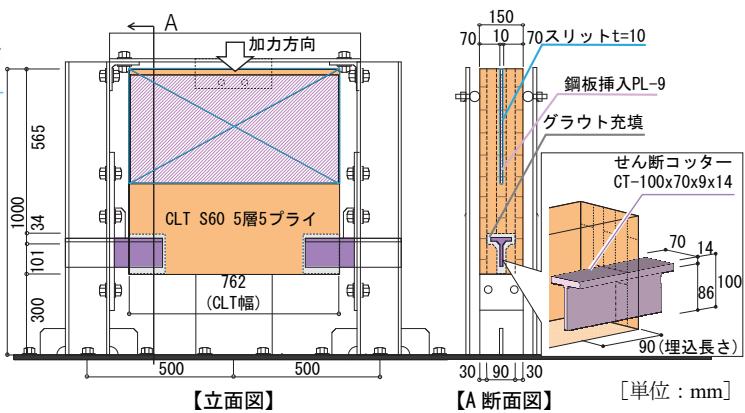


図-4 せん断コッター接合部試験体(実大モデル)

3.2 加力計画

せん断コッター接合部の要素実験では、圧縮方向の繰り返し加力を 6 体実施した。加力は、最大荷重に達した後、最大荷重の 80%に荷重が低下するか、接合部の機能が失われるまで行った。壁構面試験は、既往文献³⁾に基づき正負交番繰り返し載荷を 3 体実施した。加力は、最大荷重の 80%に荷重が低下するか、見かけのせん断変形角³⁾が $1/15\text{rad}$ を超えるまで行った。

3.3 実験結果

図-5 にせん断コッター試験体の荷重変形関係の一例と破壊状況（解体後）を示す。せん断コッターにグラウトを充填した効果により、最大耐力以前の荷重変形関係において初期のスリップ性状は見られず、高い剛性の発現を確認した。終局状態では、グラウト部の圧壊は生じず、木部で接合部境界部分の圧縮変形が進み、CLT パネルが中央付近から縦に割れるように破壊した。なお、割裂破壊は、接着面でなく中央の直交層の界面（図-5 の紫矢印部ラミナの両側面）において発生した。

図-6 に、壁構面試験体の荷重変形関係と破壊状況（終局状態の試験体の全景および接合部近傍）の一例を示す。終局状態において、せん断コッター接合部に損傷はなく、ドリフトピン接合部の引張側に割裂が集中し、破壊に至った。

3.4 CLT 耐震壁の短期許容せん断耐力評価

実験結果より得られた短期基準耐力の評価値を表-2 に示す。せん断コッター試験体を含む要素試験では、全ての降伏耐力 P_y により短期基準接合耐力が決定した。壁構面試験では、せん断変形角が $1/120 \text{ rad}$ 時点での耐力により短期基準せん断耐力が決定した。

実大スケールの CLT 耐震壁の短期許容せん断耐力は、実験で得られた短期基準耐力を基に設定した。2/3 スケール壁構面の短期せん断耐力の実験値は 42.1kN で、終局状態はドリフトピン接合部の破壊となった。この結果から、ドリフトピン接合部の実大スケールの耐力と 2/3 スケールの耐力比 2.54 倍を乗じた 106.9kN を実大スケールの短期せん断耐力と推定した。しかし、せん断コッター接合部における実大スケール要素試験の短期基準耐力 92.2kN の方が推定値 106.9kN よりも小さく、また実大スケールの壁構面実験を実施していないことなどを踏まえ、実施設計では、せん断コッター接合部の短期基準耐力を CLT 耐震壁の短期許容せん断耐力とした。

3.5 CLT 耐震壁の剛性評価

接合部を含む CLT 耐震壁全体のせん断剛性を把握するため、弾塑性解析ソフト SNAP（構造システム）を用いて静的増分解析を行った。実大スケールの CLT 耐震壁の水平剛性は、解析により求めた。モデル化にあたり、せん断コッター接合部の剛性は、前述した要素実験の結果を用いた。CLT 側接合部は要素実験結果を、梁側接合

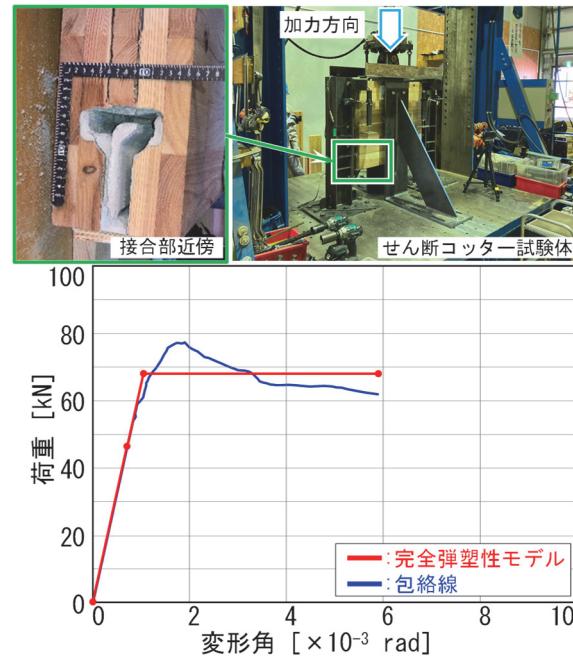


図-5 せん断コッター試験体の荷重変形関係と破壊状況

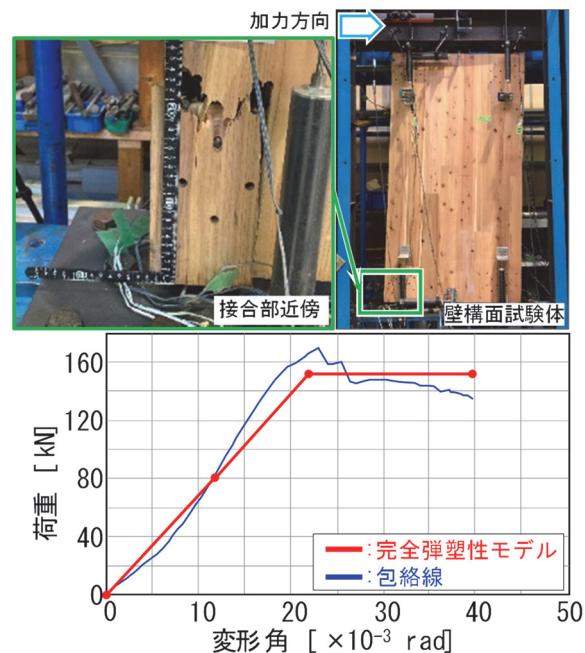


図-6 壁構面試験体の荷重変形関係と破壊状況

表-2 各試験体の短期許容せん断耐力一覧

接合形式	スケール	P_y [kN]	$2/3P_{max}$ [kN]	P_u [kN]	$P_u(0.2D_0)$ [kN]	$1/120\text{rad}$ P [kN]	P_a [kN]
鋼板挿入 ドリフトピン	実大	156.3	167.3	207.5			156.3
		92.2	97.3	138.1			92.2
せん断コッター	2/3縮小	61.4	77.6	81.5			61.4
		36.0	43.7	56.6			36.0
壁全体		79.4	103.0	45.0	42.1	42.1	

P_y ：降伏耐力 P_{max} ：最大耐力

P_u ：終局耐力 P_a ：短期許容せん断耐力

部は鋼材の物性データや既往のデータを用いた。接合部剛性は、CLT 側接合部と梁側接合部の直列ばねとした。

図-7 に、CLT 耐震壁の解析モデルを示す。解析モデルにおいて、梁は線材剛体要素とし、CLT 耐震壁要素は線材弾性要素とした。また、CLT 頂部はローラー支持、脚部はピン支持とした。CLT 耐震壁の接合部は、CLT 側接合部と梁側接合部の剛性を鉛直バネおよびせん断バネに置き換えて考慮した。なお、壁構面実験では、CLT と梁部材を接続する梁側接合部（アンカーボルトや構造金物留め用ビス）についても考慮した。CLT 耐震壁の壁長は、壁構面実験において対象とした壁長 1400mm の他に、2445mm および 2625mm が存在する。壁長 2445mm と 2625mm の解析によるせん断剛性の算定にあたり、接合部は壁長 1400mm と同一とし、CLT 耐震壁の壁長とドリフトピン接合部の位置を変えた解析モデルを用いた。

図-8 に、壁長を変えた実大スケールの解析モデルの荷重変形関係を示す。せん断コッター接合部は弾性としているため、最大耐力が壁長により異なる結果となっているが、せん断コッター部のディテールを同一とし、短期許容せん断耐力は壁長によらず、壁構面実験において対象とした壁長 1400mm の耐力により評価した。

短期許容せん断耐力となる時点において、ドリフトピン接合部に生じる力が実大スケール要素試験の耐力値 156.3kN 以下であることを各モデルにて確認している。建物全体の架構検討において、CLT 耐震壁は上記より得られたせん断剛性と等価となるように鉄骨ブレースとして評価した。

4. 木造工事の事前検証と実施工

4.1 木質材料の養生

中高層木造建築の施工では、屋根や外壁が完成するまでに数ヶ月程度の期間を要することが多い。そのため、木材への雨水の影響が懸念される。特に、木材表面を仕上げ材とする場合、雨水等による汚れの付着が美観性に大きく影響する。そこで、木質材料の養生方法の検討を目的に、茨城県つくば市にて屋外の曝露試験を実施した。写真-2 に実大スケールの CLT 壁の曝露試験体を、表-3 に曝露試験の仕様一覧を示す。内装材となる木質部材の輸送・組立時における汚れを防止する塗布剤の仕様を検討するにあたり、木材の質感を維持することを重視し、試験体 A・C には含浸系の塗料をそれぞれ選定した。なお比較のため試験体 B については無塗装としている。屋外での曝露期間は、建物の雨仕舞が完了するまでを想定し、約 6 カ月とした。

曝露試験の結果、木材に大きな変色がないことから、撥水性の高い汚れ防止専用の仕様（No. C）を採用することとした。実施工では、加工工場にて木質材料に保護

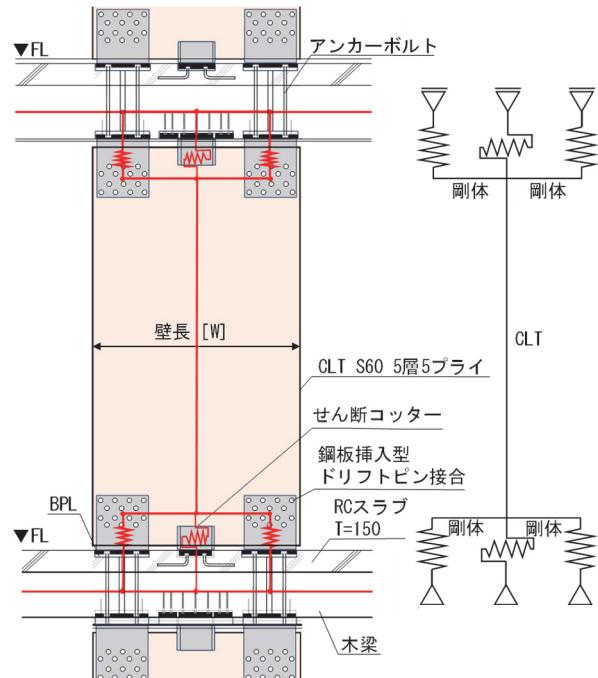


図-7 CLT 耐震壁の解析モデル

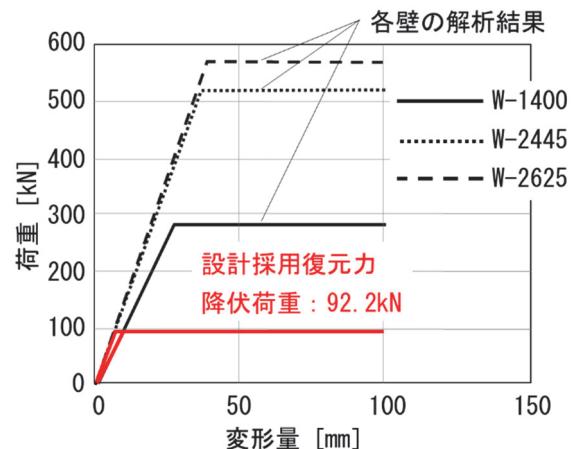


図-8 解析モデルの荷重変形関係

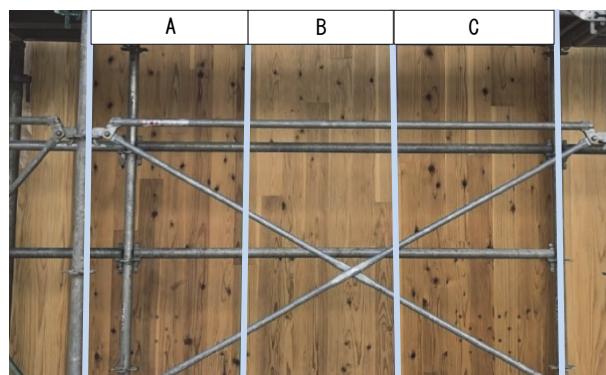


写真-2 CLT 壁の曝露試験体（撮影時期：塗布直後）

表-3 曝露試験の仕様一覧

試験体No.	A	B	C
塗布材の仕様	外装用/水性/含浸	無塗装	内装用/油性/含浸

塗料を塗布し、それを現場に運搬して、木造建て方を行った。その結果、建物の雨仕舞が完了するまでに木質材料が大きく変色することなく、美観性を確保できた。

4.2 木造躯体の建て方

図-9に平面混合構造（木造+鉄筋コンクリート造）の施工手順を示す。一般的な施工手順は、図-9の上段に示すように、RC 柱のコンクリートを打設し、次に木造躯体の建て方、床スラブの打設となる。この場合、同一階のコンクリート躯体を 2 回に分けて打設する必要があるため、施工手順の増加と十分な工期の確保が課題となる。

実施工では、躯体工事の工期短縮を目的に RC 躯体と木造躯体を各階同時に施工する計画とした。図-10 に実大モックアップの検討部位を示す。モックアップ施工により、躯体工事全体の施工手順や木造躯体の建て方時の精度管理方法を確認すると共に、コンクリート打設時のノロ漏れ対策が必要な部位を把握した。

図-11 にパネルゾーンでの木質梁接合部（鋼板とアンカーボルトを事前に一体化させた状態）の施工精度を確保するために考案した施工手順の模式図と試験施工状況を示す。木質梁接合部の施工では、その誤差が木質梁の建て方精度に大きく影響を及ぼすため、高い精度が要求される。そこで、RC 柱の型枠建込みまでに木質梁接合部の設置が完了する以下の施工手順を考案した。

- 手順 1：ベースプレート部に桟木を固定する。
- 手順 2：ベースプレートの設置位置に開孔を設けた柱型枠を建込む。
- 手順 3：柱型枠にベースプレートを設置する。

実施工では、手順 3 でのベースプレートの設置精度を確保することで、木質梁の落とし込みがスムーズに行えることを確認した。この施工手順とすることで、柱・床スラブのコンクリートを同時に打設できることを確認した。また、当初想定していた一般的な施工手順と比較して、今回採用した施工方法（図-9 の下段）を用いることで、4 日／階、木造躯体 6 階分の合計 24 日の工期短縮を確認した。

写真-3 に実施工での鋼板挿入部のノロ漏れ対策状況を示す。木質梁接合部の鋼板挿入部に生じる隙間には、止水処理等を施すことによってノロ漏れに対応した。その結果、現場での柱・床スラブのコンクリート躯体打設時には、大きなノロ漏れが生じていないことを確認した。

5. CO₂の固定化と排出量削減効果

5.1 木材使用による CO₂の固定化

本計画では、建物に約 208m³の木材を使用した。林野庁の「建築物に利用した木材に係る炭素貯蔵量の表示に関するガイドライン」にて換算した結果、炭素貯蔵量（CO₂固定量）は、約 148t になることを確認した。

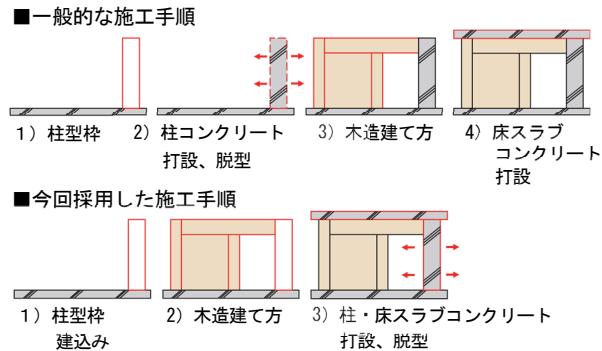


図-9 平面混合構造
(木造+鉄筋コンクリート造) の施工手順

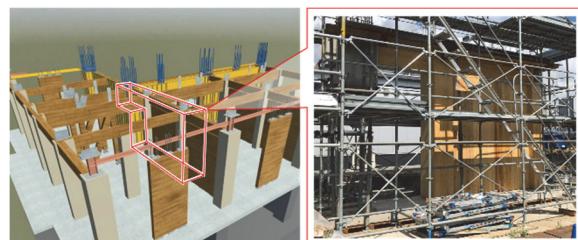


図-10 実大モックアップの検討部位

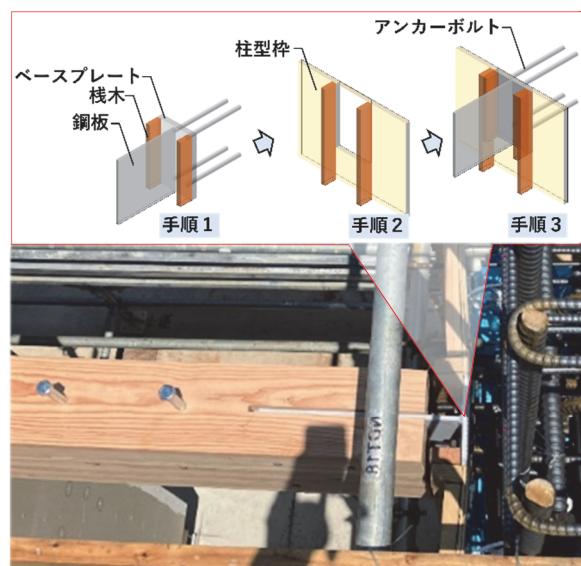


図-11 パネルゾーン施工手順の
模式図と試験施工状況



写真-3 鋼板挿入部でのノロ漏れ対策状況

5.2 環境配慮型BFコンクリートによるCO₂排出量の削減効果

本計画において基礎地中梁に使用した環境配慮型BFコンクリートは、コンクリート材料の普通ポルトランドセメントの一部を「高炉スラグ微粉末」で代替することで、セメントの製造過程におけるCO₂の排出を削減する低炭素型コンクリートである。本コンクリートの概要を表-4に示す。建物の部位によって高炉スラグ微粉末の使用率を10~70%の範囲で使い分けることができる。高炉スラグ微粉末の使用率を最大の70%とした場合、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べて、約63%のCO₂排出量の削減効果が得られる。

表-5に今回適用したコンクリートの仕様を示す。基礎地中梁へのコンクリート打設は、約100m³ずつ2回に分けた。打設方法は、ポンプ圧送により行った。呼び強度42の一般的なコンクリートの水セメント比は40%程度であるが、今回採用したコンクリートは35.5%と36.0%であり一般的な水結合材比よりも小さい。そのため、ポンプの圧送負荷がやや大きかったものの、スランプ21cmとすることで、打設は十分可能なことを確認した。受け入れ試験は打設ごとに3回、圧縮強度試験についても3回実施した。受け入れ試験におけるスランプと材齢28日の圧縮強度試験結果を図-12に示す。受け入れ試験は、練り上がりから40~60分程度で行い、スランプはいずれも管理値を満足した。また、圧縮強度についても、調合管理強度42N/mm²を全て満足した。

今回の基礎地中梁における環境配慮型BFコンクリート打込み総数量は214m³であり、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較して、CO₂排出量を約45t削減することができた。

6.まとめ

今回、木造と鉄筋コンクリート造の混合構造となる地上8階建て建物の設計および施工を実現するため、CLT耐震壁の構造実験、実大モックアップによる施工性の検証実験を実施した。これらの実験から得られた知見を以下に示す。

- せん断コッター接合部の構造性能を確認するための要素実験と、CLT耐震壁全体の構造性能を確認するための壁構面実験を行った結果、せん断接合部にグラウトを充填した新たなコッター形式を有するCLT耐震壁は、構造要素として高い初期剛性を有することを確認した
- 実験結果を踏まえて、せん断コッターを用いたCLT耐震壁の許容耐力および剛性の評価方法を提案し、免震建物における耐震要素として必要な性能を満足するCLT耐震壁の設計方法を確立した

表-4 環境配慮型BFコンクリートの概要

高炉スラグ微粉末の使用率とクラス分け	A種クラス：10%以上、30%以下 B種クラス：30%超、60%以下 C種クラス：60%超、70%以下
適用部位・部材	A・B種クラス：地下および地上構造物 C種クラス：地下構造物または直接外気と接しない部位・部材、かつ、厚さが200mm以上
使用する高炉スラグ微粉末の種類	高炉スラグ微粉末4000(JIS A 6206適合品、せっこう添加あり)
設計基準強度	18~36 N/mm ²
計画共用期間の級*	短期、標準、長期
CO ₂ の排出削減量	普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べ9~63%

*JASS5の計画供用期間の級に対する期間

:短期はおよそ30年、標準はおよそ65年、長期はおよそ100年

表-5 適用したコンクリートの仕様

適用部位	設計基準強度 [調合管理強度]	高炉スラグ 微粉末の使用率	水結合材比 A・Bプラント	スランプ	空気量
基礎地中梁	36N/mm ² [42N/mm ²]	70%	A:36.0% B:35.5%	21cm	4.5%

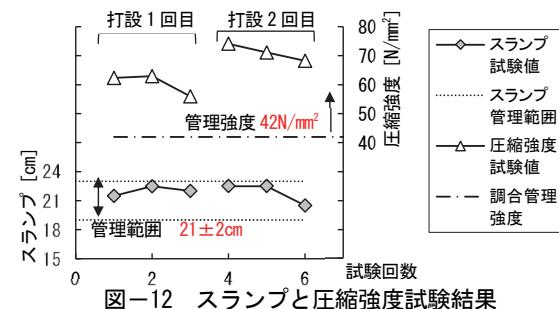


図-12 スランプと圧縮強度試験結果

- 実大モックアップの曝露試験に基づき木質部材の保護塗料を選定し実施工で用いた結果、現場施工中における木質部材の美観性を確保した
- RC柱の型枠に木質梁を設置する施工法を実大モックアップで検証し、混合構造の躯体工事の工期短縮が可能であることを確認した
- 建物に木材を約208m³使用することで、約148tのCO₂固定量になることを確認した。基礎地中梁に環境配慮型BFコンクリートを214m³採用したことで、CO₂排出量を約45t削減した

7.あとがき

今回の取り組みを反映し、木造と鉄筋コンクリート造の混合構造となる自社寮を構築することが出来た。今後、得られた知見を活かし、木造ハイブリッド構造をはじめとする木造建築を積極的に推進していきたい。

【参考文献】

- 林野庁林政部木材利用課建築物木材利用促進グループ発行、「進めよう！都市（まち）の木造化中大規模木造公共建築物事例集」
- 河野政典、赤星博仁、伊藤 淳、「高炉微粉末を用いた環境配慮型コンクリートの開発」、奥村組技術研究年報、No.47、pp.85-90、2021.9
- 公益財団法人日本住宅木材技術センター発行、「2017年度版木造軸組住宅の許容応力度設計」

災害廃棄物処理機械の選定・配置システムの開発

—遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化—

System for Selecting and Positioning Disaster Waste Treatment Machinery

- Multi-objective Optimization Based on Genetic Algorithms -

羽渕博臣* 今井亮介* 鈴木獎士* 大角藤子**

要旨

近い将来、南海トラフ巨大地震、根室半島沖地震、富士山噴火等の大規模な自然災害の発生が予想されている。一方で、突如として発生する自然災害に対して、発災後、その最前線で災害廃棄物処理を行う当該地域の地方公共団体職員や建設会社職員等の多くは、未経験の事象に対処しなければならなくなる。そのため、これまでには災害の渦中、不慣れな処理計画策定に労力を費やすことになり、着手の遅れ、処理費用・期間の増加等の問題が生じていた。そのことから平時のうちに、次の災害時に効果を発揮できる仕組み、対応策の検討を行い備えることが、初動対応の迅速化および適正化にもつながると考える。

そこで今回、災害廃棄物処理において最適な処理機械の選定と配置計画を迅速に行うためのシステムを開発し、本システムが処理期間、処理費用、CO₂排出量の 3 つの目的に対して最適化ができることを確認した。

キーワード：仮置場、選別、処理期間、処理費用、CO₂排出量

1. はじめに

我が国は、その位置、地形、地質、気象等の自然的条件から、台風、豪雨、豪雪、洪水、土砂災害、地震、津波等による災害が発生しやすい国土であり、從来から多くの自然災害を経験してきた。そのため、平常時から対策を講じ、災害発生への備え¹⁾、災害時に防災関係機関が連携して対応するタイムライン²⁾、富士山等の噴火に伴う降灰対策³⁾といった各種指針、地方公共団体向けの手引き等が整備されている。

一方、災害発生時は、短時間で膨大な災害廃棄物が発生する。この災害廃棄物を適正かつ円滑・迅速に処理するためには、既存の廃棄物処理施設の有効活用や災害廃棄物の広域処理に加え、仮設処理施設による破碎・選別・焼却等の処理が不可欠である。例えば、平成 23 年 3 月の東日本大震災をはじめ、平成 26 年 8 月の広島県土砂災害、平成 30 年 7 月の岡山県豪雨、令和 6 年 1 月の能登半島地震においても、被災地に仮設処理施設を設置して、リサイクルのための破碎・選別等を行っている⁴⁾。これら仮設処理施設の計画、発注、建設、運営等に係る事例、留意点等については、環境省の災害廃棄物対

策指針⁵⁾（以下、指針）、地方公共団体向け仮設処理施設の検討手引き⁶⁾等でも示されているものの、具体的ではない事項も多く存在する。通常、仮設処理施設での災害廃棄物処理は、次の工程で実施される。まず発災後、仮置場と称する被災地付近の用地に災害廃棄物が一時的に集積・保管される。その後、仮置場において、重機、選別機械等を用いて災害廃棄物が種類ごとに分けられる。具体的には、バックホウでの粗選別、破碎機でのサイズ調整、磁選機での金属除去、回転篩機での土砂除去、風力選別機での可燃物分離、人力での手選別等が行われ、これらの分類処理を経て、再資源化施設や最終処分場に運ばれる。しかしながら、これら仮置場での処理機械の選定および配置については、実務担当者の経験に基づく知見や裁量、機械設備会社の見解等に委ねられている。事前に災害や被害の規模等が想定できれば、準備時間が確保できるが、多くの自然災害は予測や準備が困難であるため、発災後、迅速で適正な災害廃棄物処理が求められる。

このような背景の下、発災後、その最前線で災害廃棄物処理を行う地方公共団体職員や建設会社職員等の多くは、未経験の事象に対処しなければならなくなる。その

*技術本部環境ソリューション部 ** I C T 統括センターイノベーション部

ため、不慣れな処理計画の策定に時間と労力を費やすことになり、災害廃棄物処理が遅れ、復旧の遅延につながり、ひいては当該地域の経済活動に対して支障をきたすことが懸念される。そこで、本稿では、災害廃棄物の種類、数量、仮置場等の情報を入力することで、3つの目的（処理期間、処理費用、CO₂排出量）の最適解を探す多目的最適化の手法を用いて、災害廃棄物の処理機械の選定および配置計画を行う「災害廃棄物処理機械の選定・配置システム」を開発したので、報告する。

2. 災害廃棄物処理機械の選定・配置システムの概要

2.1 先行事例

災害廃棄物処理の分野では、発生量予測の研究^{7)、8)}、リモートセンシング、ICTを活用した技術開発⁹⁾、災害廃棄物処理の全プロセスを最適化するための研究¹⁰⁾等の先行事例が数多くある。また、国立環境研究所の仮置場配置図自動作成ツール（Kari-hai）¹¹⁾では、仮置場の敷地の形状や災害の種類、配置する品目等を入力すると、発災後に持ち込まれる廃棄物の配置計画図が自動的に作成される。指針の技術資料¹²⁾においては、仮置場に設置する仮設処理施設の代表的なレイアウト図（基本ユニット）が示されている。一方、選別・処理機械や重機等についての選定、配置計画立案の事例（指針、手引き、研究・開発、システム）はない。

2.2 適用範囲

表-1に仮置場の定義¹³⁾、図-1に災害廃棄物の流れ¹³⁾、図-2に本システムの適用範囲¹⁴⁾を示す。本システムは、災害廃棄物処理における仮置場での仮設処理機械の選定および配置計画の立案を支援する。特に、二次仮置場においての破碎、選別処理等の中間処理（仮設焼却施設の設置は含まず）に係る業務での利用を主な適用範囲としている。仮置場は、災害廃棄物を分別、保管、処理するために一時的に集積する場所であり、被災した家財を含む災害廃棄物の速やかな撤去、処理・処分を行うために設置される。また、仮置場は機能に応じて、「一次仮置場」および「二次仮置場」に区分されている。

2.3 本システムの操作手順

操作手順を図-3に示す。「フローの新規作成」では、まず当該仮置場で処理する災害廃棄物の種類、数量等の

表-1 仮置場の定義

一次仮置場
◆ 道路啓開や住居等の片付け等により発生した災害廃棄物を被災現場から集積するために一時的に設置する場所
◆ 別の仮置場から災害廃棄物を一時的に横持ちした場所
◆ 粗選別を効率的に行うために設けた複数の仮置場を集約した場所
◆ 重機や展開選別により、後の再資源化等を念頭に粗選別する場所
二次仮置場
◆ 一次仮置場において完結しない場合に、さらに破碎、細選別、焼却等の中間処理を行う場所
◆ 処理後物を一時的に集積、保管するために設置する場所

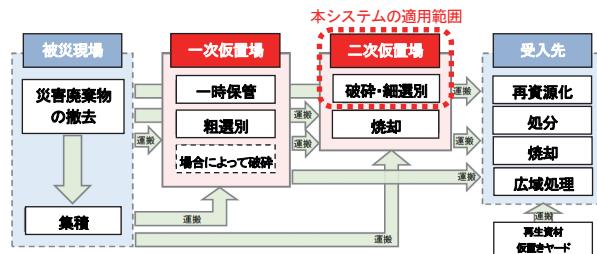


図-1 災害廃棄物の流れ



図-2 本システムの適用範囲

情報を入力する（図-4）。次に、「ノード配置と接続」では、工程ごとのノード（図-5）、選別後の廃棄物（図-6）および保管場所に至るまでの各ノードを工程順に作成・接続することで、一連の災害廃棄物処理フロー（以下、処理フロー）を作成する。各ノードは、必要に応じて「ノードのパラメータ編集」を行い、処理フローの「最適化実施」を行う。本システムの最適化は、災害廃棄物の仮置場における、①機械の選定（機種と数量）と②機械の配置を対象とし、計画立案を支援する。なお、本システムでいうノードとは、一連の災害廃棄物処理における各要素（選別前の廃棄物の保管場所、場内運搬、機械選別、選別後の廃棄物の保管場所等）を指す。各ノードと主な機械の一覧表を表-2に、作成した処理フローの例を図-7に示す。

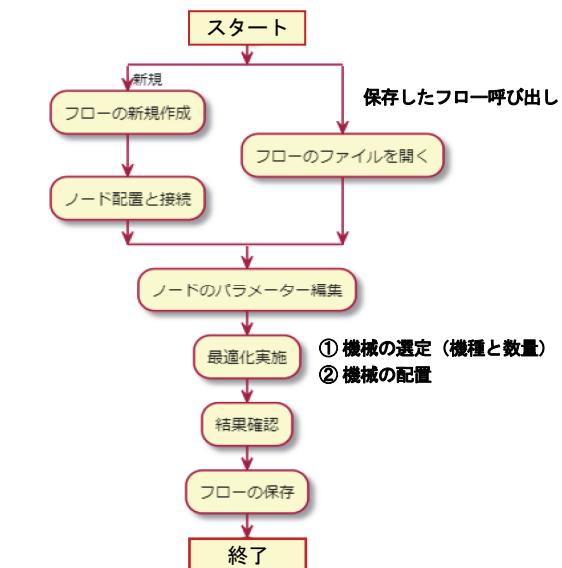


図-3 本システムの操作手順

仮置場(0)		標準				組成Gr適用	
ノード名	発生量(t)	In(0)	Out(0)	標準	単位換算適用	In(1)	Out(1)
木くず	木質系	24.40	- +	12785.60	0.55	▼	23246.54
可燃物	可燃不燃系	4.40	- +	2305.60	1.00	▼	2305.60
不燃物	可燃不燃系	15.00	- +	7860.00	1.00	▼	7860.00
金属くず	可燃不燃系	0.60	- +	314.40	1.13	▼	278.23
コンクリートがら	コンクリート	43.00	- +	22532.00	1.48	▼	15224.32
分別土	可燃不燃系	12.00	- +	6288.00	1.10	▼	5716.36
その他	可燃不燃系	0.60	- +	314.40	1.00	▼	314.40
		100.00		52400.00			54945.46
						Out(1)	

図-4 災害廃棄物の処理数量の入力

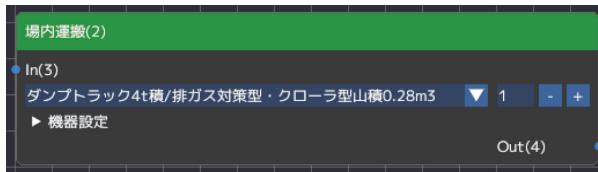


図-5 工程ごとのノード

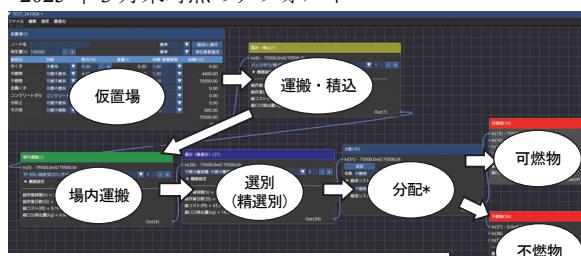


図-6 選別後の廃棄物のノード

表-2 ノードと主な機械一覧表

No.	ノード	主な機械等	機種データ数 [*]
1	仮置場	全体の廃棄物の情報	—
2	保管場所	選別前保管、選別後保管	—
3	木質粗破碎	自走式二軸破碎機	10
4	木質細破碎	自走式木材破碎機	16
5	コンガラ破碎	自走式破碎機	13
6	選別（ふるい）	振動式選別機 回転式選別機	12 3
7	選別（精選別）	風力・比重差選別機 可燃分離装置 風力選別機	2 1 1
8	磁力選別	磁選機	1
9	手選別	ベルトコンベア	1
10	掘削・積込	バックホウ	9
11	粗選別	バックホウ 振動式選別機	3 10
12	運搬	ダンプトラック パッカー車	9 2
13	場内運搬	ダンプトラック ベルトコンベア	4 3
14	廃棄物	個別の廃棄物の情報	—

*2025年3月末時点のデフォルト



*分配ノードは廃棄物を複数の出力先へ分岐させるために使用

図-7 処理フローの一例

2.4 機械情報データベース

機械情報データベース例を図-8に示す。このデータベースにおける各ノードの機械の処理能力や処理費用、CO₂排出量が後述する最適化計算の基礎データになる。デフォルト版は、土木工事標準積算基準¹⁵⁾や建設機械レンタル会社による積算等をもとに作成され、100個の機種データを収録している。なお、本システムの処理費用は、直接工事費（機械損料、燃料、労務費）と共に仮設費（機械運搬費、組立解体費）の積上げであるため、現場管理費や一般管理費等の経費や現場状況、価格変動等に応じて、適宜更新する必要がある。



図-8 機械情報データベース例

2.5 多目的最適化

次に、災害廃棄物処理の総合的・多角的な評価やシステム利用者に応じた“最適”を求めるため、多目的最適化を行う。2.3節で示した処理フローを作成後、計算を実行すると、複数個の結果が表示される。また、任意の行を選択すると、処理フローの機器等、その行の結果の詳細が確認できる（図-9）。これらの結果により、「処理期間」「処理費用」「CO₂排出量」の評価軸から定量的に優劣が判断される。例えば、「費用は高いが、期間は短い」「費用は安いが、期間は長い」「費用と期間のバランスをとる」といった選択肢を見つけることができる。

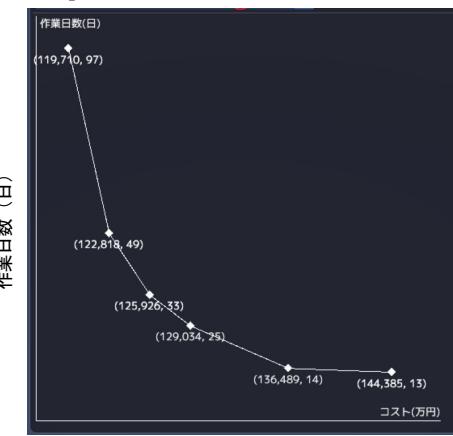


図-9 処理期間と処理費用の最適化結果例

2.6 遺伝的アルゴリズム

多目的最適化の手法として、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms、GA) の一種である多目的遺伝的アルゴリズム (NSGA-II : Non-dominated Sorting Genetic Algorithms II) を採用した。GA とは、生物の進化の仕組みに着想を得て作られた最適化のためのアルゴリズムのことと、計算を経て、より優秀な個体 (パラメータ)を見つけていくという仕組みである¹⁶⁾。本システムでは、災害廃棄物処理工程における一連の選別・処理機械の構成 (処理フロー) を最適化の対象にしている点が類似事例のない試みである。最適化を実行すると、図-10 のように①～⑤のループを経て世代が進み、より優秀な処理フローが選抜される。また、遺伝的アルゴリズムには、選抜の過程で二つの親フローが次の世代の子フローに引き継がれる際、一定確率での突然変異、クロスオーバー (交叉) の設計がシステムに組み込まれている。なお、本システムの適用場面は、仮置場内の災害廃棄物処理を想定しているため、最適化計算には処理機械の選定における機械の性能や台数、配分、配置計画における仮置場の形状や一時保管場所の数、出入口の位置など離散的なデータを多く扱う。このような離散的なデータや制約条件の多い問題に対し、GA の研究は古くから多くの実績がある¹⁷⁾ため採用した。

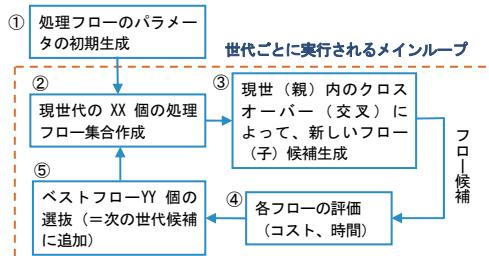


図-10 遺伝的アルゴリズムの全体図

2.7 多目的最適化の解

複数の目的関数を同時に最適化すると、最適化の解が唯一ではなくなり、複数の解集合 (パレート解) が存在する (図-11)。パレート解とは、複数の目的関数の最適化の結果、「他のどの解候補にも優越されていない」解候補を指す。そして、パレートフロントと呼ばれる解集合を見つけることが最適化の目的であり、本システムでは遺伝的アルゴリズムによってパレートフロントを近似し、世代ごとにその近似を改善し、最終的に理論上のパレートフロント (=パレート境界) に近い近似を導出できる (図-12)。最終的に見つけたパレートフロントの近似が多目的最適化の結果となる (図-13)。

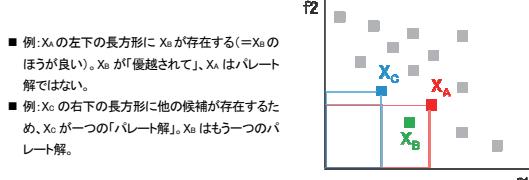


図-11 パレート解の概念

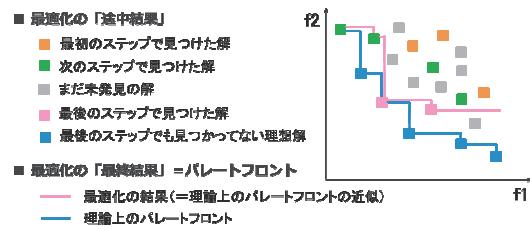


図-12 パレートフロントの導出

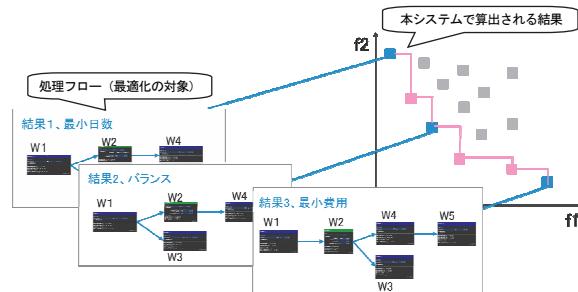


図-13 多目的最適化の解

2.8 機械配置の最適化

処理フローの最適化結果が得られた後、必要に応じて、機械配置の最適化を行う。遺伝的アルゴリズムは、図-14 に示す①～⑩が実行され、前節までの操作により選定された機械が仮置場に収まり、できるだけスペースを使わないことが配置最適化の評価項目となる。処理フローの 10 個の結果に対して、配置最適化を実行するとベストな配置を選択する。機械間が接続される時の入出力位置は、図-15 のように機械毎に設定し、配置方法は、図-16 のように処理フローをもとに候補を生成する。配置の最適化においてもクロスオーバーの設計は組み込まれており、二つの配置 (親) をもとに、新しい配置候補 (子) が作られる (図-17)。なお、機械配置に際しては、国土地理院の地図データ (図-18) とオンラインで接続しているため、地図上から任意の仮置場の位置を選定し、敷地範囲と出入口の位置を入力 (図-19) することで、タイルマップの地図上に機械が自動的に配置される (図-20)。

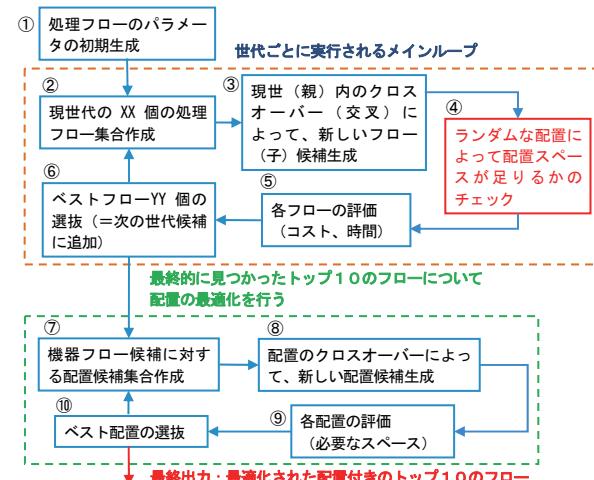


図-14 遺伝的アルゴリズムの全体図 (配置の最適化)

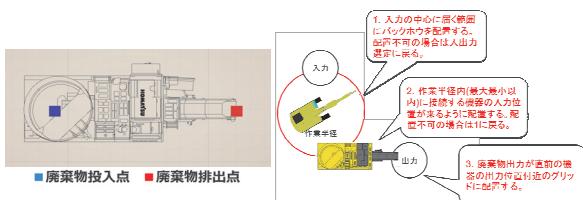


図-15 機械入出力位置の例¹⁸⁾

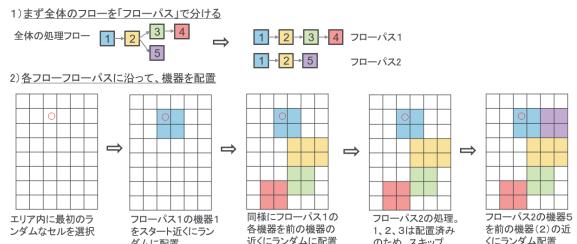


図-16 配置候補の生成の例

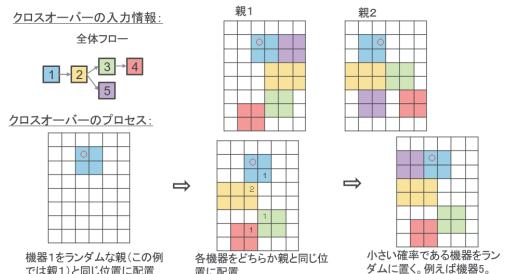


図-17 配置のクロスオーバー



図-18 国土地理院地図との連携

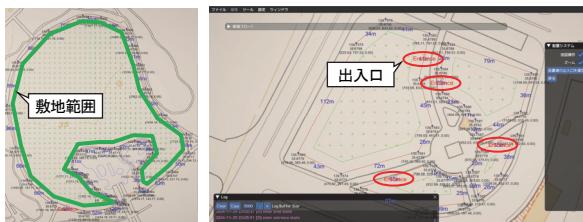


図-19 仮置場の敷地範囲と出入口の設定

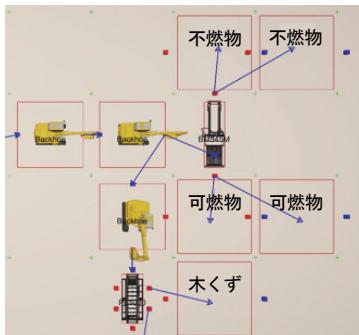


図-20 機械の配置例（拡大図）

3. 過去の事例との比較検証

当社が実施した東日本大震災の岩手県久慈地区災害廃棄物処理業務¹⁹⁾における米田地区の仮置場（以下、米田仮置場）での実績（表-3、図-21～図-23）を本システムに適用した。その結果、処理費用、処理期間の2つの評価軸において10個の最適化結果が得られた（表-4）。そのうち、No.2の結果では、実績の処理期間33日から計算では29日、処理費用が3,397万円から最安の2,757万円（約11%低減）となった。このときの機械配置が図-24である。なお、実績は、実績報告書¹⁹⁾および土木工事工事費積算要領・基準に準じた当時の積算資料（当初設計）であるのに対し、本システムは、機械会社の標準的な処理能力および標準価格がもとになっているため目安の試算ではある。

表-3 处理数量（実績）

No	災害廃棄物の組成名		処理量(t)	備考
	本システム	実績		
1	木くず	柱材・角材	79.64	
2	可燃物	可燃・不燃混合物	1,409.60	
3	不燃物	不燃系混合物 不燃物	1,649.94	
4	金属くず	金属くず	136.73	
5	コンクリートがら	コンクリートがら	70.13	
6	分別土	津波堆積土	31.72	
7	その他	その他	146.25	

※2012年5月21日～2013年12月24日（実作業日数：310日間、約19ヶ月）



図-21 処理数量の入力（本システム）

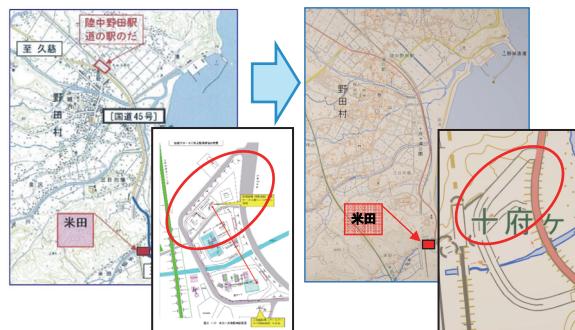


図-22 米田仮置場（左：実績、右：本システム）

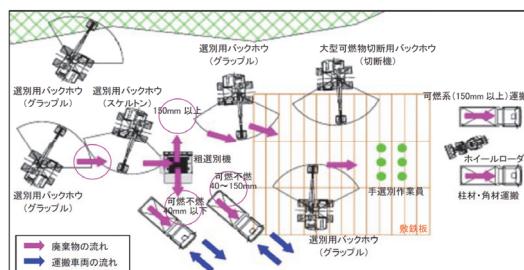


図-23 米田仮置場の配置計画（実績）

表-4 実績と最適化結果の比較

No	費用(万円)	期間(日)	CO ₂ (g/h)	機械総数	備考
—	3,397	33	—	9	実績
1	3,030	15	17,014	12	日数最短
2	2,757	29	17,164	6	費用最安
3	3,054	15	15,764	12	
4	2,863	29	12,922	6	
5	3,094	15	15,062	12	
6	2,919	29	11,293	6	
7	3,212	15	11,738	12	
8	2,952	29	11,502	6	
9	3,217	15	14,668	12	費用最高
10	2,968	29	13,880	6	

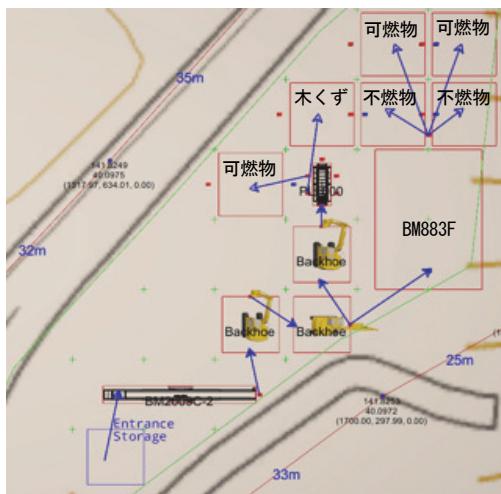


図-24 生成された機械の配置例

4. まとめ

- 本開発において、以下の実装をすることができた。
- 災害廃棄物処理機械の選定および配置システムにおける遺伝的アルゴリズムの使用
 - 災害廃棄物処理に要する期間、費用、CO₂排出量の3つの目的に対する多目的最適化

5. あとがき

災害廃棄物処理業務は、仮置場での中間処理だけでなく、運搬や運営管理までを含むため、本システムの機械を配置するだけでは十分ではない。例えば、電気が通っていない場所に仮置場を設置する場合の電灯、発電機、災害廃棄物の受入・搬出時のトラックスケール、重機等が走行できるようにするための敷鉄板などが必要となる。その他にも、土砂の付着や性状によって分別効率が異なるといった知見を蓄積・承継することが重要であり、これらをシステム化することで、被災地以外からの支援および対応力強化につなげていきたい。

【参考文献】

- 内閣府、「令和6年版 防災白書」、p.70

- 国土交通省 水災害に関する防災・減災対策本部 防災行動計画ワーキング・グループ、「タイムライン(防災行動計画)策定・活用指針(初版)」、平成28年8月
- 中央防災会議・防災対策実行会議 大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ、「大規模噴火時の広域降灰対策について」、令和2年4月、p.3
- 一般社団法人日本建設業連合、「東日本大震災 災害廃棄物処理の報告」、p.14、平成26年6月
- 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)」、平成30年3月
- 環境省 環境再生・資源循環局、「地方公共団体向け仮設処理施設の検討手引き」、令和3年5月
- 高月 純ほか、「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
- 多島 良ほか、「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
- 羽渕博臣ら、「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」、奥村組技術研究年報、No.49、2023
- 中野正樹ら、「災害廃棄物処理プロセスの最適化を導入した災害廃棄物処理実行計画作成支援システムの開発」、第14回環境地盤工学シンポジウム発表論文集、pp.189-194、2021。
- 国立研究開発法人国立環境研究所 災害廃棄物情報プラットフォーム、「仮置場配置図自動作成ツール Kari-hai」、<https://www.nies.go.jp/kari-hai/entry>
- 環境省 災害廃棄物対策情報サイト、「災害廃棄物対策指針 技術資料」、「【技18-2】仮置場の必要面積の算定方法」、p.7
- 環境省 災害廃棄物対策情報サイト、「災害廃棄物対策指針 技術資料」、「【技18-1】仮置場の分類」
- 開発法人国立環境研究所：災害廃棄物情報プラットフォーム、仮置場に加筆
- 国土交通省、「土木工事標準積算基準」、令和6年度
- スタビニアカデミー、「遺伝的アルゴリズムについてわかりやすく解説！Pythonで実装していこう！」、<https://toukei-lab.com/genetic-algorithm>
- 中野正樹ら、「1-2004 AI等の活用による災害廃棄物処理プロセスの最適化と処理計画・処理実行計画の作成支援システムの構築」、環境研究総合推進費 終了研究成果報告書、pp.29-32
- 株式会社イマギイレ、「製品カタログ 環境リサイクル機械」、自走式破碎機リフオレ/BR200T-3
- 奥村組・宮城建設・中塚工務店・晴山石材建設特定業務共同企業体、「久慈地区災害廃棄物破碎・選別等業務委託実績報告書」、平成26年8月

オフィスの知的生産性・環境満足度に関する研究

—オフィス等におけるウェルネス設計提案手法の研究—

Research on Intellectual Productivity and Environmental Satisfaction in Innovation Hubs

- Methods for Wellness Design in Offices -

矢野香里* 稲留康一* 作野祐子** 小川洋行*** 神長侑磨****

要旨

ウェルビーイングや健康経営、働き方改革を背景に、知的生産性や環境満足度の高いオフィスへの転換ニーズが高まっている。交流や技術連携、知識の融合によるイノベーションを生み出す新しいオフィスとして奥村組が開設した「クロスイノベーションセンター」では、執務者のウェルビーイング実現に寄与する空間づくりを試行した。本オフィスの室内環境が執務者のウェルネスや満足度、知的生産性に与える影響を把握するためにアンケート調査を実施した結果、高い満足度が得られるオフィス空間環境が構築できていることを確認した。

キーワード：ウェルネス、CASBEE ウェルネスオフィス、知的生産性、オフィス環境満足度

1. まえがき

近年、SDGs や働き方改革への取り組みが進められ、またコロナ禍を経て、オフィスの在り方や役割が再定義されるなど新しいオフィスマodelへの転換ニーズが高まっている。その中でも、オフィス執務者の快適性や心理的健康を考えたウェルネスオフィスは、オフィス環境への満足度を高めるだけではなく、知的生産性や従業員のエンゲージメントを向上させる¹⁾と考えられており注目されている。

奥村組でも、技術の優位性向上、新規事業の拡大、働き方改革の推進といった 2030 年に向けたビジョンの実現に向け、大学や企業との技術交流や連携、知識の融合によるイノベーションを推進する拠点として、東京丸の内に、2023 年 10 月にクロスイノベーションセンター（以下、クロスアイ）を開設し、新たな技術や事業の創出を目指す部門を移転した。この拠点整備では、イノベーションの創出だけではなく、執務者のウェルビー

ングの実現に寄与する空間づくりを目指した。

本報では、クロスアイの設計概要を示すとともに、室内環境がウェルネスや満足度、知的生産性に与える影響についてのアンケート調査を行ったので、その分析、考察について報告する。

2. オフィスの概要、設計コンセプト

クロスアイのオフィス概要を表-1、全体概要を図-1、平面図を図-2 に示す。クロスアイは、東京駅の景色が広がる北側から「イノベート」「クリエイト」「ワーク」の 3 つのエリアにゾーニングしている。これらのエリアをシームレスにつなぐことで、一体感のある開放的な空間を実現している。

執務者の座席は、一部を除いてフリーアドレスとしており、業務内容に応じて自由に選択でき、多様なワーク

表-1 オフィス概要	
名称	クロスイノベーションセンター (略称：クロスアイ)
所在地	東京都千代田区丸の内 2 丁目 7-2 JPタワー 22 階
開設日	2023 年 10 月 12 日
床面積	1,150 m ² (348 坪)



図-1 全体概要

*技術本部技術戦略部 **西日本支社建築設計部 ***建築本部 ****技術本部技術研究所新領域研究グループ

プレイスで効率的に業務を行えるよう計画した。各エリアおよび設計上のポイントは以下の通りである。

a. イノベートエリア

イノベートエリアの状況を写真-1に示す。クロスアイの開設目的であるイノベーションの創出の中心的な役割を果たすエリアである。多様な活動が行える場として用途に応じて什器を容易に組み換えられ、フレキシブルな対応が可能な空間としており、明るく開放的な空間を実現するため、内装は白を基調としている。床材はロボットの走行ができるように一般的に採用されるタイルカーペットよりも摩擦の少ないフロアタイルを採用するとともに、床コンセントを埋め込み型とし、段差が生じないように配慮した。

また、様々なイベントに対応できるように、2面スクリーンや162インチ大型LEDモニターを設置するなどICT機器を充実させた。さらに、拡声装置はイベントの際に他のエリアへの音の拡散を軽減するため、指向性スピーカーとした。

b. クリエイトエリア

クリエイトエリアの状況を写真-2に示す。グループでのクリエイティブな活動を誘発・創出する場として設けている。やぐら状のフレームに簡易な仕切りやスクリーンを設置することで、グループの人数に応じた境界を設けることができ、複数のグループ活動を可能にした。

c. ワークエリア

ワークエリアの状況を写真-3に示す。個々の執務者が効率的かつ快適に作業できる場として設けた。業務内容に応じて、2人で共同作業ができるテーブルや、簡易な衝立で机が仕切られているハイテーブル、カフェのようなソファ席、大人数で利用可能なビッグテーブル(12人用)など多種多様な什器を配置している。

壁面にはコミュニケーションの促進やストレスの減少、モチベーションの向上などの効果が期待できると言われているウォールアート²⁾として、障がい者自立推進機構のパラリンアート³⁾を設置した。

d. 3つのエリアをつなぐ動線

人の交流を促すことを目的に動線計画を行った。主動線を図-2中に示す。主動線は3つのエリアをシームレスにつなぐ通路とし、写真-4に示す天井ルーバーで視覚的に表現した。シームレスにつなぐことにより、どのエリアからも全体の雰囲気を感じることができる。たとえば、イノベートエリアでイベントを開催したときに、他のエリアの人が目視できるためイベントへの参加や人との交流などの意欲向上が期待される。また、主動線上には偶発的なコミュニケーションの創出を狙い、後述する木材活用コーナーやオープンな打合せスペース、事務用品や郵便物等を集約するマグネットエリアを設けた。

e. 天然木を活用した「ならもくコーナー」

脱炭素社会実現に向け、炭素固定できる木材の利活用

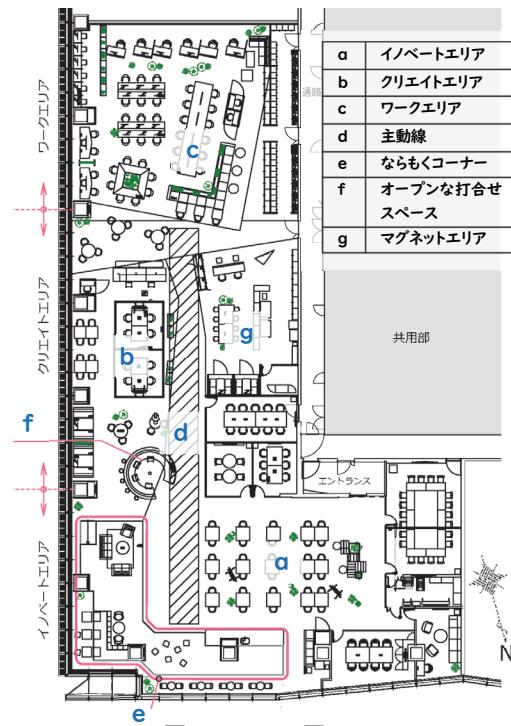


図-2 平面図

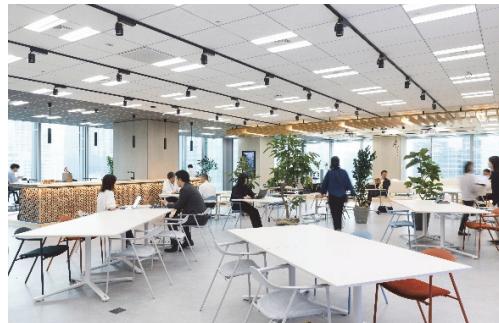


写真-1 イノベートエリア



写真-2 クリエイトエリア



写真-3 ワークエリア

が盛んに行われている。当オフィスでも木材活用として、カウンターや小上がり（H=150mm）を天然木で製作したコーナーを設けた。このコーナーは、執務者のコミュニケーション促進の場とするとともに、イノベートエリアで実施する講演会では舞台としても利用可能な配置としている。

「ならもくコーナー」に設置したカウンターを写真-5に示す。天板には、当社創業の地である奈良県産の吉野杉無垢材（厚さ60mm）を用いた。腰壁には、写真-5右上に示す当社のモチーフである「人」型の装飾を施した。これは「多くの人が大きいものを共に支える」ことを表現している。小上がりには吉野檜無垢材（厚さ15mm）を使用している。これらの木材は自然由来のミツロウでコーティングし、木材そのものの質感を体感できるようにしている。

f. オープンな打合せスペース

イノベートエリアとクリエイトエリアの境界には、写真-6に示す円形のオープンな打合せスペースを設けた。イノベートエリアから入りやすい位置に入口を設け、円形の内側だけでなく、外周にも座席を設けて議論に飛び入り参加しやすい雰囲気としている。また、中央に360度カメラを設置することで、どこに座ってもWeb会議に参加が可能である。

g. マグネットエリア

フリーアドレスを採用しているため、事務用品や郵便物などを集約する場所が必要である。そこで、共用備品を集約したエリア（マグネットエリア）を設けた。コピー機も、このエリアに配置した。クロスアイの中央に配置することで、業務を効率化するとともにコピー機などの設置台数を削減した。

h. バイオフィリックデザイン

ウェルビーイングに効果的な方法を検証するため、リラックスやストレス軽減、集中力向上に良い効果を与えると言われるバイオフィリックデザインを導入した。バイオフィリックデザインとは「人間は本能的に自然とのつながりを求める」という概念であるバイオフィリア⁴⁾の要素を取り入れたデザインである。主要素の一つである植栽配置の概要を図-3に示す。全ての座席からグリーンが見えるように植栽を配置し、リアルグリーン（生木）とフェイクグリーンを併用している。植栽を囲んだテーブルやカフェのようなソファテーブルなど人に近い植栽については、フェイクグリーンを採用している。

3. 満足度調査

3.1 満足度調査の概要

幸福度が高い従業員は、企業の生産性向上に貢献する傾向が強いとされている⁵⁾。しかし、幸福度に影響を与える快適性や満足度は感覚や体験など主観に基づくもの

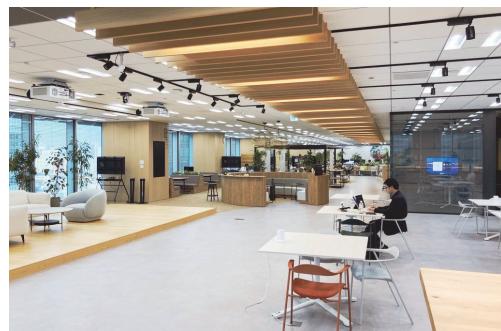


写真-4 3つのエリアを繋ぐ天井ルーバー



写真-5 ならもくコーナー



写真-6 オープンな打合せスペース

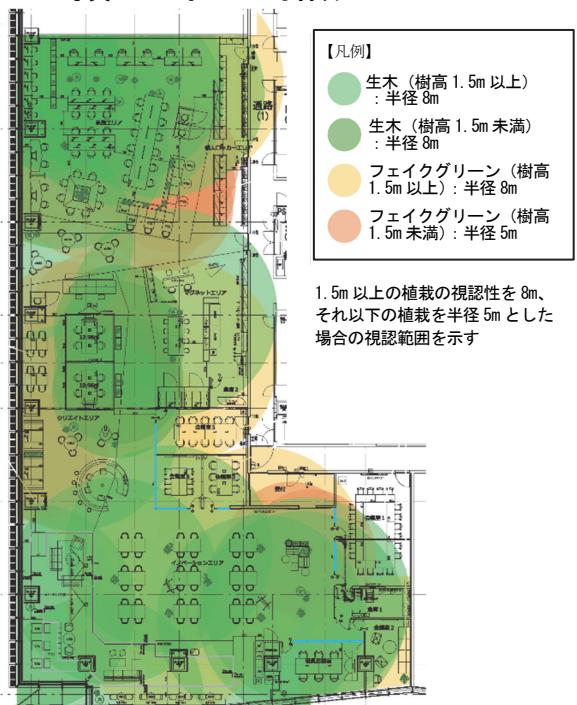


図-3 植栽配置計画の概要

であり、人により感じ方やニーズが異なる。そこで、クロスアイにおいて満足度や知的生産性に関するアンケート調査を実施した。アンケートの調査項目を表-2に示す。

a. ウェルネス

ウェルネスの評価方法としては、オフィスの環境性能を客観的に評価する CASBEE-ウェルネスオフィス認証（以下、CASBEE-WO）と、オフィス執務者が主観的に環境を評価する CASBEE オフィス健康チェックリスト（以下、CASBEE-OHC）が開発されている⁹⁾。これらの評価では、点数が高いほど、執務者の健康、快適性が高いオフィスであるとされている。クロスアイは CASBEE-WO で S ランクを取得している。

今回は、環境の質や快適性について、CASBEE-OHC 簡易版⁷⁾に CASBEE-OHC の全項目の中から筆者らが重要と考える 10 項目を加えたアンケート調査を実施した。

b. 満足度および知的生産性

空間や執務環境に対する総合満足度に加え、知的生産性への主観的影響を確認するため、（一社）日本サステイナブル建築協会が開発した SAP⁸⁾（知的生産性測定システム）から「オフィススペース（執務室）」を抜粋したアンケート調査を行った。

3.2 調査対象者および調査時期

調査対象者は、表-3 に示す時期（移転直後および 1 年後）の在籍者とした。なお、両時期に在籍していた調査対象者は全体の約 75% であった。

アンケートは匿名のオンライン方式で行った。アンケートの回答率を表-3 中に示す。年齢構成は図-4 に示した通りで、両アンケートとも大差はないといえる。

3.3 調査結果

a. ウェルネス

クロスアイにおける CASBEE-OHC のスコア（153 点換算）の分布を図-5 に示す。移転直後の平均スコアは 100 点、1 年後は 98 点であり、ほぼ同値（有意差なし）という結果が得られた。いずれのスコアも、クロスアイの執務者評価が図-5 に示した既往研究の平均値である 71.4 点⁹⁾を大きく上回っており、クロスアイの執務環境がウェルネスに効果的であったといえる。

次に既往研究¹⁰⁾による CASBEE-WO と CASBEE-OHC との相関を図-6 に示す。この図に、クロスアイでの結果と、参考に 2020 年に ZEB 改修した当社技術研究所管理棟¹¹⁾（CASBEE-WO 65.1 ポイント、A ランク）におけるスコアもプロットした。どちらも既往調査におけるサンプルの近似式に近い値となり、CASBEE-WO と CASBEE-OHC スコアに相関がみられた。この結果は、既往研究と同様に、CASBEE-WO のスコアが高い場合、健康、快適性、知的生産性を促進するオフィスであることを示唆している。

アンケート項目別の平均スコア比較を図-7 に示す。

表-2 アンケート実施概要

調査方法、選択項目	
ウェルネス	CASBEE-OHC 簡易版+10 項目
満足度	SAP アンケート（オフィススペースを抜粋）
知的生産性	SAP アンケート（オフィススペースを抜粋）

表-3 アンケート実施時期

実施時期	移転直後	移転 1 年後
	開所後 3 ヶ月	開所後 1 年
実施期間	2024/1/15-19	2024/10/15-21
対象者数	81 名	87 名
回答者数	75 名	72 名
回答率	92.5%	82.7%

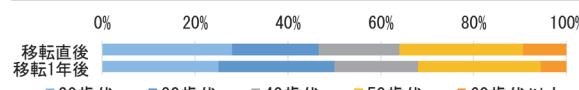


図-4 アンケート回答者の年齢構成

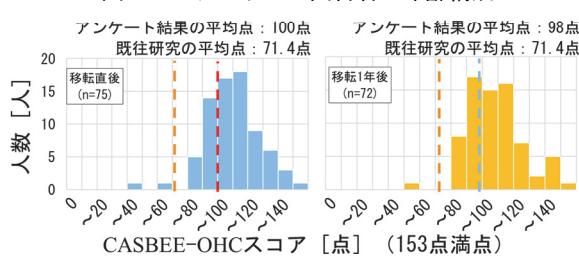


図-5 CASBEE-OHC スコア分布 (クロスアイ)

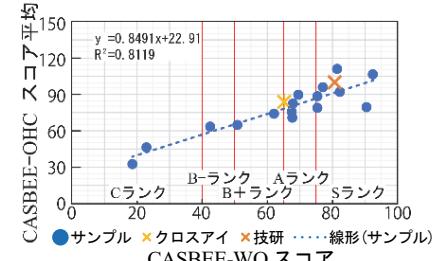


図-6 CASBEE-WO、OHC 相関図¹⁰⁾

大半の項目で満足度の中央値である 1.5 を上回るが、Q1-10 「作業、収納場所の量」、Q1-19 「他の人の会話や設備機械音」、Q2-19 「打合せスペースの量」、Q3-4 「充実した健康増進プログラムの実施」、Q3-9 「非常時対応マニュアルの周知」の 5 項目は中央値を下回る不満側の結果となった。下回った理由として、Q1-10 は、以前のオフィス環境（引き出し付きデスクの固定席）では比較的収納量が確保されていたが、移転後はフリーアドレスに変化し、与えられた収納スペースが激減したためと考えられる。Q1-19 は、集中して作業を行う者がいる一方で、イノベーティブな活動を行う者もいるなど、相反する活動を行う執務者が同居するイノベーション拠点の課題とも捉えることができる。Q2-19 は、グループアドレスを導入しオープンスペースでも打合せが可能であるという設定と、会議室で打合せを行いたいという要求に乖離がみられるため、設計上の留意点であるといえる。なお、Q3-4 は、移転 1 年後にほぼ中央値に改善されている。こちらは健康経営宣言に基づく当社の活動強化の効果が現れているものと考えられるため、クロスアイ固有のものではないと思われる。また Q3-9 が移転 1 年後の

調査で改善されたのは、調査までに行われた避難訓練などにより、マニュアルの認知度が高まったことによるものと考える。

b. 満足度、知的生産性

執務環境への総合満足度の回答結果を図-8に示す。

「満足」に「やや満足」を加えた「満足側」の回答は、移転直後、移転1年後ともに約75%と高く、大きな変化はみられない。在籍期間別の分析では、在籍1年以上の執務者の約80%が高い満足度を示しており、同時に「不満側」の申告も減少している。この結果は、固定席からフリーアドレスに座席選択方法を変更した場合、その環境への適応には一定の時間を要することを示唆している。

次に知的生産活動のしやすさの観点からの満足度を図-9に示す。こちらも移転直後、移転1年後ともに約80%と高い満足度を示している。在籍期間別では、1年以上の執務者は移転直後と同程度の満足度を示すが、在籍1年未満では20%程度の不満評価が見られる。クロスアイ開設直後は執務者に対してオフィス機能や利用方法を丁寧に周知していたが、初期に在籍していなかった人とその理解を得る機会に差が生じ、これが適応度に影響した可能性がある。項目別の回答割合を図-10に示す。移転直後と比較し、移転1年後ではリラックスや作業への集中における満足度が高くなっている。これは、移転直後のアンケート結果から、後述するグループアドレスやその他コミュニケーション創出のための取り組みを行っており、それら改善策の効果であると考えられる。この結果は、フリーアドレスを導入したオフィスで一般的に課題とされやすいリラックスや作業への集中において、導入後の継続的な運用改善の取り組みが満足度向上させたことを示唆している。

3.4 改善提案と試行

a. グループアドレス

移転直後に実施したアンケートの自由記述から、「会議スペースの不足」や「グループ作業のしづらさ」を指摘する意見が複数挙げられた。そこでクリエイトエリアの一部において、4人席のテーブル席5台を任意のグループで利用できるグループアドレスとして運用し、これらの指摘が解消できるか検証した。クロスアイ移転で新しく同居することになった3つの部門間のコミュニケーション創出などを目的として、表-4に示す4つのフェーズで試行した。フェーズ2および4は、あらかじめ出社日のアンケートを実施し組み合わせを決定した。

b. グループアドレスに関するアンケート

各フェーズ終了後に運用方法についてのアンケートを実施した。図-11に主な結果を示す。部署単位で指定したフェーズ1および2では、部署内でのコミュニケーションの取りやすさ、席を探すストレスの低減が評価され高いポイントとなった。一方、フリーアドレスのフェーズ3は自由に席を選べることへのポイントが高く

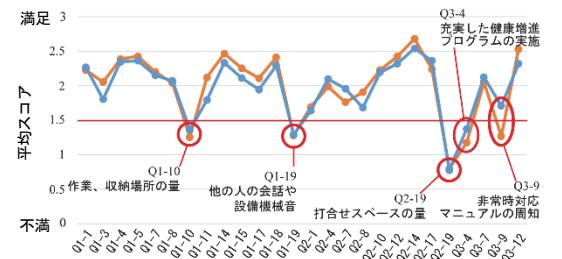


図-7 アンケート項目別の平均スコア

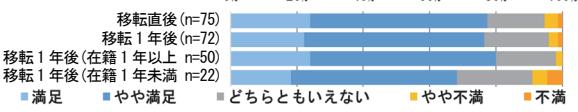


図-8 執務環境の総合満足度

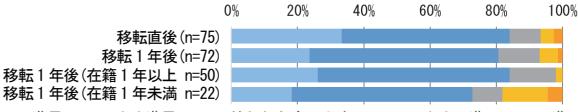


図-9 知的生産活動のしやすさの観点からの満足度

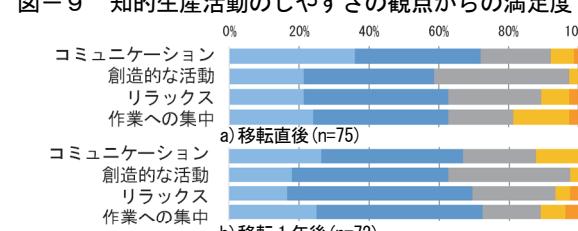


図-10 知的生産活動の作業のしやすさ

表-4 グループアドレス試行 フェーズ概要

フェーズ	実施期間	予約単位	条件
1	2024/4/15- 30	部署	—
2	2024/5/1 - 20	部署	3部門混合
3	2024/5/21- 6/4	フリーアドレス	
4	2024/6/5- 6/12	個人	3部門混合

なっている。部署をまたぎ個人単位でミックスしたフェーズ4では、他部門との交流がしやすい一方で、「業務に集中しにくい」「他者が気になる」といった項目で他のフェーズより回答数が多くなった。

c. グループアドレスの運営方法に関する評価

フェーズ1から4までの運用について、総合的にどのフェーズが良かったかをアンケートで評価した。図-12に結果を示す。フェーズ1では、20代から40代までの評価が高かった。50代については、フェーズ1から3までほぼ同数の評価となっている。50代は管理職もしくは部下を持たない者が同数であり、課員の様子を把握したいと考える者や、フリーアドレスでも支障がない者が混在しているためであると考えられる。

また、グループアドレスを利用した執務者を対象に知的生産活動のしやすさについてのアンケート調査も行った。図-13に結果を示す。業務内容にもよるが、グループ活動が一定のコミュニケーションや創造的な活動、集中した作業を生み出すことを示唆する結果となった。一方、集中と相反するリラックスは低い評価であった。

さらに、グループアドレスでの作業のしやすさについて、年代別評価のアンケート調査を行った。図-14 に結果を示す。グループアドレス採用の目的である「コミュニケーション」や「創造的な活動」について、20代で高い評価が得られた。これは入社間もないサポートを必要とする年代において、チームで働くグループアドレスがうまく機能していることを示唆している。

4.まとめ

イノベーションを推進する拠点として開設したクロスアイで、執務者のウェルビーイングの実現に寄与する空間づくりを実践した。この施設の室内環境がウェルネスや満足度、知的生産性に与える影響について確認するため執務者にアンケート調査を行った。その調査結果を以下に示す。

- 客観的評価である CASBEE-WO のスコアと、主観的評価である CASBEE-OHC のスコアの相関関係が既往研究と同等の傾向であり、CASBEE-WO のスコアが高い場合、健康、快適性、知的生産性を促進するオフィスであることを示唆している
- 執務者の室内環境に対する満足度は 75% を超えており、良好なオフィス環境を構築できた
- 「グループアドレス」の導入により、フリーアドレス導入時の課題とされるコミュニケーションにおいて満足側の評価が得られ、特に、周囲のサポートを必要とする若年層にとっては効果的であることが示唆された

5.あとがき

アンケート結果から、狙い通りの良好なオフィス環境が構築できたことを確認できた。今後もクロスアイにおいてウェルネスやウェルビーイングに繋がることを試行し、効果を検証していく予定である。なお、本研究においては、明治大学理工学部建築学科樋山恭介教授、松原明日香様、福岡実月様、樋山研究室の皆様には多大なご助言、ご協力をいただいた。ここに心からの感謝を記す。

【参考文献】

- DIAMOND、ハーバード・ビジネス・レビュー、2012 年 5 月号
- 経済産業省、令和 3 年度商取引・サービス環境の適正化に係る事業に関する報告書（ヴィジュアルアートによる組織活性化調査実証事業）、
<https://www.meti.go.jp/metlib/report/2021FY/000557.pdf>
- 一般社団法人障がい者自立推進機構パラリンシアート運営事務局、<https://paralymart.or.jp/association/>
- Edward O Wilson、Biophilia、Harvard University Press、1984.
- 岩崎敬子、「幸福度が高まると労働者の生産性は上がるのか？」、ニッセイ基礎研レポート、2020.01
- 一般社団法人日本サスティナブル建築協会、ウェルネスオフィス評価ツール
<https://www.jsbc.or.jp/research-study/hyouka-tool.html>
- 一般社団法人日本サスティナブル建築協会、CASBEE-オフィス健康チェックリスト簡易版（2019）（16 項目）、https://jsbc.or.jp/research-study/files/tool2-OHC-Q51&Q16_190329.pdf
- 一般社団法人日本サスティナブル協会、SAP 知的生産性測定システム <https://www.jsbc.or.jp/sap/notes.html>
- 森重優子他、CASBEE-オフィス健康チェックリストを用いた WEB アンケートの追跡調査結果、空気調和・衛生工学会大会、2022/09
- Kyosuke Hiyama 他、Trend analysis of CASBEE Wellness Office certified properties、Japan Architectural Review、2023.3
- 中西史子他、技術研究所管理棟の ZEB 化改修効果－エネルギー削減実績と快適性評価－、奥村組技術研究所年報、No47、pp.103-108、2021.09
- 松原明日香、樋山恭助、岩下将也、神長侑磨、特性の異なる二つのイノベーション拠点の知的生産性・環境満足度の比較調査、日本建築学会大会（関東）、2024.8

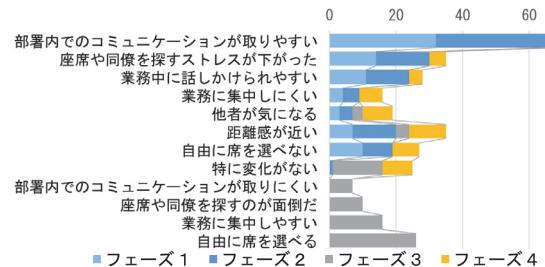
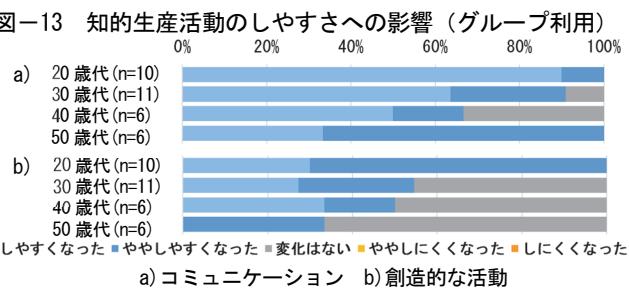
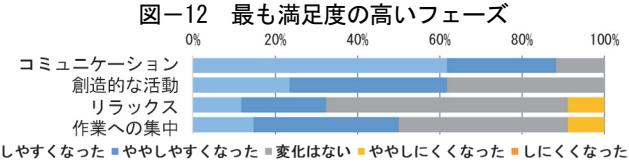
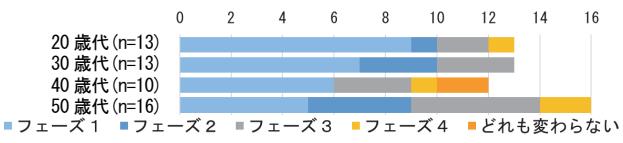


図-11 グループアドレス満足理由



a) コミュニケーション b) 創造的な活動

4) Edward O Wilson、Biophilia、Harvard University Press、1984.

5) 岩崎敬子、「幸福度が高まると労働者の生産性は上がるのか？」、ニッセイ基礎研レポート、2020.01

6) 一般社団法人日本サスティナブル建築協会、ウェルネスオフィス評価ツール
<https://www.jsbc.or.jp/research-study/hyouka-tool.html>

7) 一般社団法人日本サスティナブル建築協会、CASBEE-オフィス健康チェックリスト簡易版（2019）（16 項目）、https://jsbc.or.jp/research-study/files/tool2-OHC-Q51&Q16_190329.pdf

8) 一般社団法人日本サスティナブル協会、SAP 知的生産性測定システム <https://www.jsbc.or.jp/sap/notes.html>

9) 森重優子他、CASBEE-オフィス健康チェックリストを用いた WEB アンケートの追跡調査結果、空気調和・衛生工学会大会、2022/09

10) Kyosuke Hiyama 他、Trend analysis of CASBEE Wellness Office certified properties、Japan Architectural Review、2023.3

11) 中西史子他、技術研究所管理棟の ZEB 化改修効果－エネルギー削減実績と快適性評価－、奥村組技術研究所年報、No47、pp.103-108、2021.09

12) 松原明日香、樋山恭助、岩下将也、神長侑磨、特性の異なる二つのイノベーション拠点の知的生産性・環境満足度の比較調査、日本建築学会大会（関東）、2024.8

奥村組技術研究年報 No.51 2025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 2025

 検索

奥村組技術研究年報 No.51

2025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。

株式会社奥村組 技術本部技術研究所
TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE OKUMURA CORPORATION