ISSN 0285-3469

| 奥 |
|------------|
| 村 |
| 組 |
| 技 |
| 術 |
| 研 |
| 究 |
| 年 |
| 報 |
| No.50 2024 |









奥村組技術研究年報

OKUMURA TECHNICAL RESEARCH REPORT

No.50

2024

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 第50号の発行にあたって

奥村組の本格的な技術開発は、1963年のシールド工法研究委員会の設置に始まります。 1965年に大阪市住吉区に技術研究所を開設しました。1968年にはかねて特許出願中であっ た日本初の泥水式シールド工法「OCMS工法」の特許が成立し、シールド技術の開発が本格 化します。1985年に現在のつくば市に大型耐震実験棟を有した筑波研究所を開設しました。 その翌年に日本初の実用免震ビルとなる筑波研究所管理棟を完成させ、免震のパイオニア となりました。1994年には技術研究所を筑波に完全統合しました。技術研究年報は、各年 度に完了した研究開発プロジェクトの成果を対外的に発行するもので1975年より発行して います。

この 50 年間の年報掲載論文を眺めるとかつては地下発電所構築や原子炉解体などの技術 開発も行っていました。奥村組の技術開発への取り組みが時代の求めに応じて変わってき たことが分かります。

現在は、環境に配慮した持続可能で豊かな社会構築、自然災害リスクに対して強靭性のあ る社会実現、ロボットや AI を融合した安心して暮らせる社会創造等へ向けての大きな変革 期にあります。当社規模のゼネコンでは、このような社会課題の解決に自社のみで対応する には限界があるため、オープンイノベーションによる連携が必要になります。

固定観念に縛られることなく常に変革して成長し続け、未来の建設現場・建設システム構築を目指して挑戦し続けます。

2024年9月

常務執行役員 技術本部長 岡田 章



技術研究所長 ごあいさつ

奥村組技術研究年報は、今回の発行で節目となる第50号を迎えました。1975年の発刊以 来、社会のニーズに応えるべく様々な研究開発を行い、その成果を形にして社会に還元して きました。関係各位のご指導・ご鞭撻の賜物であり、ここに厚く御礼を申し上げます。加え て、研究開発に携わってこられた諸先輩、技術を繋いできた研究員の努力に感謝します。

現在、地球規模での政治・経済・環境の様々な問題に直面し、建設業界においても、担い 手不足と働き方改革に伴う生産性向上、カーボンニュートラルへの貢献、激甚化する自然災 害への対応など、待ったなしの課題を突き付けられています。新年早々に発生した能登半島 地震のような大災害は、災害国日本ではいつどこにでも起こり得るもので、一瞬にして日常 の暮らしが失われることを改めて認識し、被害軽減と災害復旧の対策に全力で取り組み続 けなければならないことを技術者として痛感いたしました。

社会に大きな影響を有する建設業において、技術研究所に求められる役割も益々高度化、 多角化してきています。有益な技術を迅速に開発するために、外部との協働によるオープン イノベーションを積極的に進めていくのはもちろんですが、一方で、技術革新の基盤となる のは基礎的な研究開発であり、個々の研究者の専門性の追求・高度化も不可欠であると考え ます。それぞれの尖った部分を噛み合わせることは難しいかもしれませんが、何らかのきっ かけ・推進力による化学反応が生じたとき、社会に大きく貢献できる革新的な技術の創出に 繋がるものと期待しています。

このような希望をエネルギーとして今後も研究開発に邁進してまいりますので、これか らも変わりなくご支援を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

2024年9月

技術研究所長 上 寬樹



奥村組技術研究年報 No.50 2024 年

目 次

| | 梗概 | 本文 |
|--|------------------|----|
| ■土木系■ | | |
| (情報化施工) | | |
| 1. 差分計測システムによるインバート掘削の出来形管理 | 1 | 31 |
| 川澄悠馬・今泉克彦・松田顕吾・松 | 本清志 | |
| (構 造) | | |
| 2. Flexural Strengthening of Corrosion-damaged RC Bridge Piers Using | | |
| Ultra-High-Performance Concrete Layers : An Experimental Study | | 35 |
| Biswas Rajib Kumar • Takashi Misawa | • Takahiro Saito | |
| (安全管理) | | |
| 建設現場でのバイタルデータ取得方法の確立 | | 43 |
| - ヒューマンエラー軽減に向けたバイタルデータの活用- | | |
| 麻生真司・山口 治・大下和彦 | | |
| | | |
| ■建築系■ | | |
| (基 礎) | | |
| 4. 高強度鉄筋を用いた場所打ちコンクリート杭工法の開発 | | 49 |
| 和田湧気・舟木秀尊・岸本 剛・山 | 口敏和 | |
| (構 造) | | |
| 5. 鉄骨を用いた基礎梁とパイルキャップの応力伝達機構に関する研究 | | 55 |
| 一部分架構試験体による性能確認一 | | |
| 山上 聡・和田湧気・岸本 剛・反 | 町 敦・岡 靖弘 | |
| (品質管理) | | |
| 6. スラブ湿潤養生システムの開発 | | 61 |
| - スラブ乾湿自動評価システムと散水設備との連携による省力化- | | |
| 増田貴之・中村裕介 | | |

■環境系■

(土壌環境)

(室内環境)

 8. 自動制御エアカーテンシステムの開発 ________
 8 73
 -エアカーテンの吹出風向が熱遮断性能に与える影響に関する研究 – 神長侑磨・岩下将也

(生物多様性)

| 9. | MIG-seq 法を用いた希少植物(タチ | -スミレ)の地域集団の | | |
|----|----------------------|-------------|---|----|
| | 遺伝的関係による保全策の検討 | | 9 | 79 |
| | | 白石祐彰 | | |

| 英文サマリー | 11 |
|----------|----|
| 社外発表報文一覧 | 17 |
| 表彰 | 25 |
| 学位論文要旨 | 27 |

■表紙の写真■

上段: 辻調理師専門学校 東京(東京都小金井市) 中段: 乙石川上流砂防堰堤群工事(福岡県朝倉市) 下段: GLP ALFALINK 流山 5&6(千葉県流山市)



■土木系■(情報化施工)

差分計測システムによるインバート掘削の出来形管理

Differential Measurement System for Invert Excavation Control

川澄悠馬* 今泉克彦* 松田顕伍** 松本清志** Yuma Kawasumi, Katsuhiko Imaizumi, Kengo Matsuda, Kiyoshi Matsumoto

研究の目的

山岳トンネル工事のインバート掘削における出来形管理では、従来、掘削作業を中断して基準線からの下がりを複数断面 かつ、1断面当たり数点確認していた。そのため、計測箇所が限定的となるほか、作業の中断と計測人員が必要とされてい た。そこで、計測時間の削減、計測人員の負担軽減、面的な出来形管理を目的として、計画断面と現状の出来形の差分を算 出する「差分計測システム」を開発した。

研究の概要

本システムは、事前に入力した計測範囲の3次元設計データ(以下、設計データ)と LiDAR により得られる3次元計測デ ータ(以下、計測データ)の差分を算出し、モニタに図示する。本システムをバックホウに取り付けた場合の機器構成を図 -1に示す。

計測に先立ち、事前準備として、施工断面の形状を入力した設計データを作成する。また、掘削範囲周辺にリフレクタ 4 枚の設置を行う。設置後にリフレクタ中心の座標値をトータルステーションで測量し、その座標値をシステムへ入力する。 掘削作業では、従来のバックホウにより掘削を行う。掘削の進捗に伴い、掘削を一度停止し、本システムによる計測を開

始する。計測ではLiDARによる掘削範囲の点群 データを得る。次に得られた点群データから4 つのリフレクタを認識させる。設定した反射強 度以上、かつ設定した大きさの範囲内の点群を リフレクタとして自動抽出する。自動抽出した 各リフレクタを表す点群の中心の座標値と事 前に測量した座標値を自動で関連付ける。関連 付けた座標値から座標変換し、設計データと計 測データの差分値を算出する。図-2に本シス テムによる出力結果例を示す。オペレータはモ ニタ上にヒートマップで表示される掘削過不 足の箇所を面的に把握することができる。

現場適用においては、トータルステーション による測定結果(6測点×7回)を真値として、 本システムの計測精度を確認した。なお、トー タルステーションの測点近傍における点群の 平均値を本システムの計測結果とした。この結 果、鉛直方向における差の絶対平均は約80mm であり、出来形管理基準を満足した。計測時間 は、事前の準備作業で約15分、掘削を止めて 行う計測に約5分を要した。従来の方法では、 計測点数にもよるが10~15分程度要していた ものが、掘削作業を殆ど止めることなく、効率 的に面的な計測が可能となった。





研究の成果

本システムをインバート掘削の出来形管理に現場適用した結果、以下のことを確認した。

- i. 従来の限定的な計測に比べ、面的に出来形計測ができる
- ii. 従来の計測方法に比べ、計測時間が短縮される
- iii. 余掘り量の適正化のため鉛直方向の計測精度の向上が必要であるが、出来形管理基準を満足している

Unit in mm

- A

D16

-D13

■土木系■ (構 造)

Flexural Strengthening of Corrosion-damaged RC Bridge Piers Using Ultra-High-Performance Concrete Layers: An Experimental Study

Biswas Rajib Kumar* Takashi Misawa** Takahiro Saito*

400

D22

200

D19

135 130 135

Section A-A

OBJECTIVES

Since bridges are important components of social infrastructure, it is necessary to restore the structural performance of RC piers damaged by corrosion without changing their original geometry. As a repair method for deteriorated RC piers, a cross-section repair method was selected in which the cover concrete was removed and reinforced with UHPC layers containing steel fibers. The purpose of this study was to verify the effectiveness of this method through experiments with combined axial and reverse cyclic loading.

OVERVIEW

The experimental investigation included five single-shaft RC bridge piers. The details of the specimen can be seen in Figure 1. Case 1 was a reference or sound specimen. Case 2&3 underwent an average of 10% rebar corrosion, Case 4&5 underwent an average of 15% rebar corrosion. Case 3&5 was strengthened with 50 mm thick UHPC layers. The 28-day compressive and tensile strength of UHPC was 143 MPa and 13.7 MPa, respectively, and the 28-day average compressive and tensile strength of the normal concrete was determined as 25 MPa and 1.7 MPa, respectively. After the fabrication and curing of the test specimens, the accelerated corrosion test was carried out. Corrosion damage was limited to a height of 600 mm from the footing surface. The concrete covers in the corroded area were replaced with UHPC layers. The specimens were subjected to reversed cyclic loading with an axial force of 160 kN. After the application of axial force, the specimens were subjected to reversed cyclic loading with a drift ratio from 0.25% to 8%. Experimental results i.e., envelope curves of applied load vs displacement, ductility, and stiffness degradation are shown in Figure 2.

RESULTS

The experimental outcomes showed that reinforcement corrosion considerably reduced maximum load-carrying capacity (MLC). The MLC of the specimen with 15% rebar corrosion was decreased by 9.2%, compared to the reference specimen as can be seen in Figure 2(a). However, the 15% corroded specimen strengthened with UHPC layers displayed superior structural performance, the MLC was increased by 24% compared to the sound specimen. The ductility of Case 2&4 was reduced by 14% and 17% when the specimens were subjected to 10% and 15% rebar corrosion, respectively. Interestingly, ductility was reduced by only around 7% in the corroded specimens retrofitted with UHPC layers as shown in Figure 2(b). The magnitude of the stiffness decreased with the increase in deflection as can be seen in Figure 2(c). It can be noted that the corroded specimens strengthened with UHPC layers demonstrated remarkably higher stiffness than the sound and corroded specimens. For example, at the deflection level of 3.5 mm, the specimen with 10% rebar corrosion with UHPC layers demonstrated more than 33% higher stiffness than the sound specimen and the specimen with 10% rebar corrosion.

■土木系■(安全管理)

建設現場でのバイタルデータ取得方法の確立 - ヒューマンエラー軽減に向けたバイタルデータの活用-

Method for Acquiring Vital Sign Data at Construction Sites - Utilizing Vital Sign Data to Reduce Human Error -

> 麻生真司* 山口 治** 大下和彦*** Shinji Aso, Osamu Yamaguchi, Kazuhiko Oshita

研究の目的

建設現場での安全管理においては、設備・安全保護具等のハード面、教育・管理手法等のソフト面の対応が行われた結果、 近年では死傷者数が低減したが、建設現場で発生する労働災害の多くはヒューマンエラーが関係しているとされる。しかし、 作業員の疲労や夏の暑熱環境が原因で生じるヒューマンエラーの傾向や対策を示した既往研究は少ない。ヒューマンエラー の防止対策としてバイタルデータ等を用いた傾向の把握と対策が有効と考えられるが、既往技術を建設現場で導入する場合、 作業との関連、アラート発出の仕様や機器の管理、個人情報等の取扱方法、コスト面等の課題が多い。そこで本報では、バ イタルデータ取得方法を確立することを目的とし、法的観点を踏まえたバイタルデータの取得方法と個人情報の取扱、建設 現場で適用できる簡易で継続性のあるバイタルデータ取得方法の考案と現場適用の2点を検証した。

研究の概要

1. バイタルデータの取扱: バイタルデータ取得において考慮すべき法律や 規則として、個人情報保護法、プライバシー/GDPR (EU 一般データ保護規 則)、労働安全衛生法の3点が該当した。また、一部のバイタルデータ取得 機器・方法には、医師の医学的判断を伴う行為が含まれるため、医療・医薬 品医療機器関連の調査を加えて実施した。これらを整理し、運用の際に適切 な対応が取れるよう、バイタルデータ活用における法的観点からのチェック リストを作成した (図-1)。

2. 建設現場で適用できるバイタルデータ取得方法:既往のバイタルデータ 取得技術を建設現場で試行した結果、課題として、デバイスのコンパクト化、 通信環境の整備・確実性、使用者(建設作業員)の理解促進の3点が明らか になった。そこで、簡易で継続性のある方法として、作業の前後に自身の体 調をタブレットからアンケート式で入力する方法を考案した。主にスポーツ 選手のコンディション管理に用いられるアンケート型管理ツールを、建設現 場用に改良して適用した(図-2)。

3. 現場適用:管理ツールが建設現場で適用できるか判断するために、稼働 中の建設現場で試行し、測定の継続性・課題の抽出、測定結果の傾向の把握 と改善案の 2 点の検討を行った。夏期の熱中症の早期発見や予防を行うた め、屋外の廃棄物処分場建設現場を選定し、本研究の趣旨を説明した上で同 意を得た20名を対象として8月後半から2ヶ月半の期間で管理ツールを用 いた体調モニタリングを実施した。取得するデータは、身体的疲労(6段階)、 精神的疲労(6段階)、睡眠の質(4段階)のような主観データ3項目や、睡 眠時間、体重、水分摂取量のような定量的な客観データ3項目とした。 4. 結果と考察:対象期間中の全設問に対するデータ入力率は91.5%であり

ク項目 結果 実施スキー ムの明確化 一次的なデータ取得主体が明確化されているか 具体的な利用目的について、特定/明確化されているカ 既存のブライバシーポリシーに対する抵触事項の有無を確認しているか データの 利用目的 データ提供者となる本人告知/説明機会の設定ができているか 利用目的の範囲を超えた取り組みになっていないことを確認しているか 利用目的を遵守の体制/手順を構築できているか 同意取得方法の検討がなされているか 本人の 同意 同意依頼書が準備できているか (データ取得/第三者提供) 第三者提供範囲の具体的な検討ができているか 個人情報保護に係る規程類と書式の検討/見直しができているか 社内体制 -タ取扱者を対象とした説明会/研修等の実施を検討しているか 苦情処理窓口/個人情報保護管理者の設置ができている# タ管理の委託要否の検討と、必要な委託契約ができているた データ 委託する場合の個人情報保護法の対応ができているか 管理 個人情報保護法に基づく安全管理措置が実施できているカ) 損害賠償 情報漏洩に伴う損害賠償の種類と規模感が特定できているか への対応 損害保険加入の判断と補償内容の評価ができているか 図-1 バイタルデータ活用チェックリスト コンディションの入力 身体的疲労感 40 レンジスライダ-精神的疲労感 45 個人入力選択画面 体調データ入力画面 図-2 管理ツール入力画面

継続性が確認できた。結果の傾向として、体重は全ての期間で減少し、その減少量は水分補給量が多い暑い期間より、気温 が下がった期間でより顕著であった。その他、週末にかけて睡眠の質が降下する傾向や、疲労感が週末にかけて蓄積するが 週の最終日には改善する傾向が見られた。しかし、いずれの結果も母数が 20 名と少なくばらつきが大きいため、今後のデ ータ蓄積と分析が必要な結果であった。

研究の成果

i. バイタルデータの取得方法、個人情報の取扱について法的観点を踏まえたチェックリストを構築した

ii. 現場で適用できる簡易かつ継続性のある方法としてアンケート形式による主観・客観データ取得方法の有用性を示したiii. 測定結果の傾向を検証し、体調の維持や作業行動の改善をするには、更なるデータの収集が必要であることを確認した

■建築系■(基 礎)

高強度鉄筋を用いた場所打ちコンクリート杭工法の開発

Development of Cast-in-place Concrete Pile with High-strength Longitudinal Reinforcement

和田湧気* 舟木秀尊* 岸本 剛** 山口敏和*** Yuki Wada, Hidetaka Funaki, Takeshi Kishimoto, Toshikazu Yamaguchi

研究の目的

近年、場所打ちコンクリート杭は、高支持力化や要求性能の向上により配筋が過密化傾向にあり、コンクリートの充填不 良や杭主筋と基礎梁主筋の干渉など施工性の低下が問題となっている。これに対し、普通強度の鉄筋に代えて規格降伏強度 が 590N/mm²、685N/mm²の鉄筋(以下、高強度鉄筋)を主筋に用いることで、過密配筋の抑制による施工性の向上や、杭 断面を小さくした設計による杭工事のコスト低減が可能になると考えられる。そこで、当社を含むゼネコン9社の共同で各 種実験を行い、高強度鉄筋を用いた場所打ちコンクリート杭工法を開発した。

研究の概要

本開発では、高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭の耐震設計手法の構築のため、規格降伏強度 685N/mm² の鉄筋を使用した実験を行った。本報では3種の実験について示す。

鉄筋の引抜き実験では、高強度鉄筋の安定液浸漬による付着性能への影響は見られないことや、コンクリートへの定着長 さの評価法を確認した。重ね継手実験は、2組の重ね継手をコンクリート中に埋め込み、鉄筋を引張加力する実験であり、 図-1に示す鉄筋のひずみ分布などから高強度鉄筋同士の重ね継手長さの評価法を確認した。

次に、軸力比とコンクリート強度を主なパラメータとした杭体の構造実験を行った。構造実験は全 5 体の試験体で行い、 いずれも杭径 600mm、杭体部分の長さ 2,700mm である。加力装置の概要は図ー2に示す通りであり、逆対称モーメントが 生じるよう正負繰り返し加力を行った。杭体脚部の最終破壊状況の例として、 F_c =60N/mm²で軸力比 0.4(圧縮)とした試験 体 No.4 を写真-1に示す。また、杭体の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係(以下、 $M-\phi$ 関係)について、各試験体の実 験結果と解析結果の比較を図-3に示す。図より、いずれの試験体も高い変形性能を有していることが確認でき、解析によ り $M-\phi$ 関係を概ね評価できることを確認した。

研究の成果

高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭の耐震設計手法を構築するための以下の知見を得た。

- i. 高強度鉄筋が安定液に浸漬されることによる付着性能や重ね継手の力学的性能への影響は見られず、日本建築学会「鉄 筋コンクリート構造計算規準・同解説」をもとに安全側に評価することができる
- ii. 杭体の損傷過程や M- φ関係より、杭体は高い変形性能を有している
- iii. 平面保持を仮定した断面の曲げ解析により、終局限界状態まで杭体の M- φ 関係を概ね評価することができる

*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 ***西日本支社建築設計部

■建築系■(構 造)

鉄骨を用いた基礎梁とパイルキャップの 応力伝達機構に関する研究 -部分架構試験体による性能確認-

Mechanism of Stress Transmission Between Steel Frame Foundation Beams and Pile Caps - Confirming Performance Using Partial Frame Test Specimens -

> 反町 敦*** 山上 聡* 和田湧気* 岸本 剛** 峃 靖弘**** Satoshi Yamagami, Yuki Wada, Takeshi Kishimoto, Atsushi Sorimachi, Yasuhiro Oka

研究の目的

上部構造が鉄骨造の建物では、基礎梁を鉄筋コンクリート造とすることが一般的であるが、基礎梁を鉄骨造として設計で きれば、躯体重量の削減による杭基礎のコストダウンや施工性の向上による工期短縮が期待できる。基礎梁を鉄骨造とする ためには、地震時に杭頭に生じる応力を、パイルキャップを介して鉄骨基礎梁に伝達する必要があり、その応力伝達機構を 実験等により明らかにする必要がある。そこで、杭をパイルキャップに杭径と同じ長さ埋込ませる鉄骨基礎梁工法を考案し、 部分架構試験体の構造実験を行い、耐力を確認した。

研究の概要

鉄骨基礎梁工法の概要を図-1に示す。本工法は、鉄骨造の基礎梁と既製杭およびパイルキャップの下部と上部で構成さ れている。パイルキャップ下部には杭頭が杭径と同じ長さ埋込まれている。杭頭曲げに対しては、杭頭補強筋と埋込みによ るてこ作用で抵抗するが、杭頭補強筋は引張軸力が作用する場合を除いて省略できる。また、曲げ伝達のために、パイルキ

ャプ下部から鉄骨基礎梁を内包するパイルキャップ 上部へ跨って曲げ主筋を配置し、上部へ定着する。パ イルキャップ上部には S 梁を貫通させ、周囲をふさ ぎ板で覆っている。ふさぎ板は、S梁のリブプレート に溶接又はボルト接合とすることができ、鉄骨部材に はメッキ処理が可能である。

この工法の性能を確認するために部分架構試験体 による構造実験を行った。実験結果を図ー2に示す。 試験体は十字形3体、ト字型1体の計4体である。

設計値

 $^{40}_{R(\times 10^{-3} \text{rad})} ^{60}_{\text{rad}}$

 $R_{\text{max}} = 30.1 \times 10^{-3} \text{rad}$

 $Q_{g}(kN)_{200}$

150

100

50

207-504

100

-150

-200 I

20

 $R_{\rm max} = 15.1 \times 10^{-3} rad$

 $Q_{\rm max}$ (= 199kN)

 $R_{\text{max}} = 30.1 \times 10^{-3} \text{rad}$

 $R_{\text{max}} = 30.2 \times 10^{-3} \text{rad}$

-200

(d) K-4(ト字、S梁降伏)

1-200

-300 🗆

研究の成果

Q_g(kN)200_T

150

100

50

20

20,-50

-150

200

(a) K-1 (十字、基準)

部分架構試験体による繰返し載荷実験を実施し、その荷重-変形関係、最大耐力、破壊状況から以下のことを確認した。

- i. 下部パイルキャップせん断破壊型の K-1~K-3 試験体では、杭頭補強筋、せん断補強筋、下部かんざし筋の降伏を伴 い、杭前面に伸びる斜めひび割れが拡大し、杭前面部のせん断破壊によって最大耐力に至った
- ii. 実験終了後に確認した上部パイルキャップは、ふさぎ板内においてひび割れの発生は確認されず、健全であった
- iii. ふさぎ板をボルト接合し、鉄骨部材をメッキ処理した K-2 試験体と基準試験体とを比較し、その影響は小さかった
- Ⅳ. 杭偏心を考慮した K-3 試験体では、杭のパイルキャップへの埋込長さを杭径の 1.5 倍と長くし、主筋量を増すことで、 杭頭補強筋を加えなくとも杭からの応力をパイルキャップへ伝達できた
- v.提案する鉄骨基礎梁工法について想定した破壊形式が得られたが、設計式の精度の向上が今後の課題である

^{*}技術本部技術研究所建築研究グループ **技術本部技術研究所企画・管理グループ ***東日本支社建築設計部 * * * * 建築本部建築設計統括部

■建築系■(品質管理)

スラブ湿潤養生システムの開発 - スラブ乾湿自動評価システムと散水設備との連携による省カ化-

Development of Moist Curing System for Concrete Slab - Integration of an Evaluation System for Wet Conditions on Slab and Watering Facilities for Labor Savings -

> 增田貴之* 中村裕介** Takayuki Masuda, Yusuke Nakamura

研究の目的

建築工事のスラブコンクリートの施工において、スラブ表面の湿潤状態を適切に維持することは品質管理上重要である。 しかし、湿潤養生の評価は管理者の目視に拠るため、定量的かつ適切な判断が為されているとは言い難く、その品質管理に 係る記録を残すことも難しい。加えて、湿潤状態を適切に維持するために、散水養生をはじめとする作業面においても多く の労務が発生している。そこで、ロボットがスラブ上を走行しながら乾湿状態を評価して同状態をカラーマッピングとして 視覚化すると共に、評価結果を散水設備に連携し、自動散水するシステムを開発した(図-1)。その結果、品質管理の高度 化と作業工数の省力化を確認することができた。

研究の概要

スラブ湿潤養生システムは、スラブ表面の乾湿状態を近赤外光で評価する光学センサとそれを搭載した自律走行式ロボット、そして評価結果をカラーマップ上に視覚化するシステムから構成される。光学センサには、水の吸光特性が認められる 波長域である λ=1,450nm の光源を採用しており、乾湿状態の定量的な評価が可能である。また、乾湿状態を3段階で評価 することとし、乾燥状態は赤色、半乾燥状態は黄色、湿潤状態は青色でカラーマッピングとして視覚化した。

次に、得られた評価結果を散水設備に連携することで、散水作業の自動化を試みた。散水設備には建設現場で一般的に用 いられる散水栓とビニールホースを選定し、乾燥状態(赤色)を評価したエリア情報をシステム内で連携し、電磁弁制御に より散水を実施する仕様とした。システムを検証するため、500 m²程度のスラブ面積を有する建設現場にて適用実験を行っ た。なお、評価は4回行い、1回目は人による散水作業が完了したタイミングとした。図ー2に示す通り、対象とするスラ ブ表面全体の乾湿状況を表す「湿潤割合」に着目すると、経時変化に伴い初回を上回る結果となっており、本システムによ り湿潤状態を十分に維持することができた。

研究の成果

光学センサを搭載したロボットによるスラブ表面の乾湿状態を自動評価し、評価結果を散水設備に連携することで自動散 水を可能とするシステムを開発した。また、本システムの適用実験により、以下に示す事項を確認した。

- i. スラブ面積 500 m²のコンクリート表面の乾湿状況を約 30 分で定量的に評価し、視覚化できる
- ii. 同システムにより、人による散水が最初に為されていれば、その湿潤状態を維持することが可能である
- iii. 従来の管理手法に比べ、約65%の省力化を達成できることに加え、養生資材などの省資源化にも寄与できる

■環境系■(土壌環境)

拡散溶出試験における有害物質溶出モデルの考案 - 固相内拡散を考慮したモデルにおけるパラメーターの影響-

Developing a New Toxic Substance Elution Model for Semi-dynamic Leaching Tests - Impact of Parameters in a Model Incorporating Solid-phase Diffusion -

> 鈴木奨士* 小河篤史** 清水祐也** Shoji Suzuki, Atsushi Ogawa, Yuya Shimizu

研究の目的

地盤および地盤材料の安全性評価においては、有害物質溶出挙動の把握が重要である。数値解析による溶出挙動の推測手 法としては、固相と液相間の吸脱着平衡が考慮されているが、この吸脱着平衡のみでは、固相と液相の接触時間による液相 濃度の変化を表現できていない。したがって、従来の数値解析では物質溶出挙動を正確に表現できていない可能性がある。 近年、固相内部からの物質の滲み出し(固相内拡散)と吸脱着平衡を組み合わせた D_F-K_dモデルが考案され、接触時間の違 いによる液相濃度の変化を表現した解析結果が報告されている。D_F-K_dモデルだけでは表現できない、長期間の拡散溶出挙 動をシミュレーションするため、本研究では、D_F-K_dモデルに粒間拡散を組み合わせた二段階拡散拡散による物質溶出モデ ル(DKD モデル)を考案し、固相内拡散係数 D_Fや分配係数 K_d等の各種パラメーターが DKD モデルでの解析結果に及ぼす 影響を検討した。

研究の概要

考案した DKD モデルを図-1に示す。供 試体を層分割し、各層で固相内拡散および 吸脱着平衡により間隙水濃度を計算する。 その後、粒間拡散により間隙水中およびバ ルク水への物質移動を計算する。物質溶出 機構が拡散律速である場合、経過時間と溶 出フラックス(単位時間単位面積あたりの 溶出量)の関係は勾配-0.5の直線を描く。 DKD モデルでの固相内拡散係数 DF 変化時 の結果を図ー2に示す。DFが大きくなると、 すべての経過時間で溶出フラックスは増加 するが、長い経過時間での溶出フラックスの 増加が顕著に現れ、拡散律速の勾配-0.5から 外れる結果となった。また、異なる DF条件 で Kaと溶出濃度の関係を検討すると、Kaが 大きい場合は DFによる影響は受けにくく、 溶出濃度に大きな差がないことが示された (データ省略)。これらのことから、固相内

での物質移動および固液間の物質移動を支配する D_Fおよび Kdにより、固相内の物質が早期に溶出しきるか、あるいは長期 間に渡ってゆっくりと物質が溶出し続けるか推測できると考えられる。

研究の成果

本研究では、固相内拡散と吸脱着平衡と粒間拡散を接続した物質溶出モデル(DKD モデル)を作成し、固相内拡散係数 D_F、 分配係数 K_dのパラメーターを変化させ、拡散溶出試験における溶出挙動を数値解析した。得られた知見は以下のとおりであ る。図-3に各パラメーターによる溶出挙動の影響をまとめた。

- i. Kdが大きくなると溶出濃度は全体的に低くなり、DFが大きくなると溶出濃度は全体的に高くなり、DFは長期的な物 質溶出に寄与することが示唆された
- ii. Kaは固相と吸着セルの濃度差を支配する重要なパラメーターとして考えられ、Kaが大きい場合は DFによる影響を受けにくいことが示された
- iii. DKD モデルは拡散溶出試験におけるあらゆる溶出挙動を表現でき、有害物質の長期溶出挙動の予測が期待される

■環境系■(室内環境)

自動制御エアカーテンシステムの開発 -エアカーテンの吹出風向が熱遮断性能に与える影響に関する研究-

Development of Automated Air Curtain System - Study on the Effect of Airflow Direction on Thermal Shielding Performance of Air Curtain -

> 神長侑磨* 岩下将也* Yuma Jincho, Masaya Iwashita

研究の目的

トラックバースなどの大開口からの外気の侵入による室内の快適性や冷暖房効率の悪化が顕著な問題となっている。室内 外の熱分離手法の一つにエアカーテンがある。その熱遮断性能を高めるには吹出角度の適切な設定が重要だが、その知見は 未だ少ない。そこで本研究では CFD (Computational Fluid Dynamics;数値流体力学)解析と実験室実験を行い、エアカーテ ンの風向を室内外の温度差に応じて自動制御する機構を開発し、空調消費電力量の削減効果を検証した。

研究の概要

解析と実験により、中央に大開口がある空間で室内と屋外の空気の混合による温度変化を180秒間計測し、吹出角度がシ ーリング効率に与える影響を評価した。シーリング効率は熱遮断性能を示す指標である。図-1の解析結果の例を示す。(a) のエアカーテン非稼働時には、室内外の温度差により開口上部で上昇流が生じ室内に暖気が侵入し、冷気は流出している。 (b)のエアカーテンを下方垂直に吹出した場合、側圧によってエアカーテン層が湾曲し熱遮断性能が低下している。(c)の エアカーテンを屋外側に傾けて吹出した場合では、エアカーテン層が室内外の境界に形成され室内が低温に保たれている。 表-1は初期相対外気温度と吹出角度別の180秒後のシーリング効率をまとめたものである。初期相対外気温度によってシ ーリング効率が最大となる角度は異なるが、温度が高い方向に吹出角度を傾けるとシーリング効率が向上する傾向が見られ た。これらの知見を基に、写真-1のような吹出角度自動制御機構を開発し、実験検証によりエアカーテン未使用時との空 調消費電力を比較した。その結果、図-2に示すように30分間で約0.3kWh(約8%)の消費電力量削減効果を確認できた。

写真- 1 自動制御エアカーテンシステム

| 表-1 冷房想定時のシーリング効率 | 率(空気混合開始 180 秒後) |
|-------------------|------------------|
|-------------------|------------------|

解析開始 180 秒後温度分布図(冷房想定時

30.0

32.5

初期相対外気温度(°C)

+7

38.9

48.7

<u>50. 3</u>

58.6

35.6

66.8

+8

41.1

51.4

<u>57. 6</u>

61.9

57.3

65.9

27.5

+6

9.4

54.7

<u>51. 2</u>

64. 9

24.7

71.1

25.0

+4

-56.6

65.1

<u>62. 2</u>

73.5

16.1

72.2

実測

解析

実測

解析

実測

解析

研究の成果

図-1

角度

(°)

0

10

20

エアカーテンに関して、解析と実験により、吹出角度を自動制御する機構を開発し、以下の知見を得た。

35.0 (°C)

+9

24.6

38.9

37 2

52.5

63.2

56.6

外気温 35℃)

+10

6.8

39.1

25 1

44.4

39.5

53.1

i. 吹出角度を空気温度が高い方向に傾けると熱遮断性能が向上し、室内外の温度差が大きいほど最適な角度も大きくなる

ii. 自動制御機構により吹出角度を調整することで、空調消費電力を削減できる

■環境系■(生物多様性)

MIG-seq 法を用いた希少植物(タチスミレ)の地域集団の 遺伝的関係による保全策の検討

Study on Conservation Measures Based on Genetic Relationships Among Local Populations of Endangered *Viola raddeana* Plant Using MIG-seq

> 白石祐彰* Hiroaki Shiraishi

研究の目的

建設工事などの開発行為にあたっては、動植物を保全するために、工事中や工事完了後の生物に対する影響を軽減するた めの保全措置を計画することを求められることがある。同一の希少種であっても、遺伝的にはっきりと分化した集団を区別 しないで保全することは、種が長い期間にわたって経験してきた進化的な履歴を破壊することにつながる。ただし、同一の 希少種を必要以上に細かいグループに分け、それぞれを個別に保全することは、より多くの労力と資金を要し、生物保全に 使用できる限られた資源(予算、労力、専門知識など)を浪費する恐れがある。それを避けるため、DNA 解析(MIG-seq 法) を用いた遺伝的多様性や遺伝構造などの情報から希少植物(タチスミレ)の地域集団の保全策を提案した。

研究の概要

タチスミレ(写真-1)を茨城県の菅生沼(A 地点と C 地点)、小貝川の河川敷 (B 地点と D 地点)および渡良瀬遊水地(W 地点)で採取した(図-1)。A、B、 C、D、W の各地点で採取した試料数は、12, 16, 4、7, 12 で、合計で 51 個体で あった。

地域的な集団遺伝構造を把握するため、ソフトウエア STRUCTURE Version 2.3.4 を用いてクラスター解析を行った。クラスター解析とは、異なる性質のものが混ざ り合った標本の中から、互いに似たものを集めて集落(クラスター)を作り、対象 を分類する方法である。STRUCTURE 解析では共通祖先を持つ遺伝的クラスター (K)を仮定して、各個体がそれぞれのクラスターに割り振られる確率を計算した。

K=2の個体毎のクラスター配分を図-2に示す。このグラ フは、横方向に51 個体の祖先性の推定値が並べてある。1つ のクラスター(cluster I)がA集団とC集団とW集団が優占 し、もう1つのクラスター(cluster II)はB集団が優占し、D 集団は2つのクラスターが混合していた。渡良瀬遊水地(W集 団)と菅生沼(A集団とC集団)は遺伝的に近いことが示され た。渡良瀬遊水地(W地点)は利根川の上流に位置し、菅生沼 (A地点およびC地点)はその下流に位置する。渡良瀬遊水地 から菅生沼にタチスミレの種子が移動し、定着した可能性が考 えられた。

写真-1 タチスミレ

研究の成果

希少植物(タチスミレ)の地域集団の保全策として、生物保全に十分な予算が確保できない場合は、渡良瀬遊水地のタチ スミレ(W集団)と菅生沼のタチスミレ(A集団とC集団)を1つの大きな管理単位として扱うことで、遺伝的多様性が維 持されると評価することができた。

1. Differential Measurement System for Invert Excavation Control

Yuma Kawasumi, Katsuhiko Imaizumi, Kengo Matsuda, Kiyoshi Matsumoto

In conventional management of inverted excavation in mountain tunnel construction, excavation work was frequently interrupted to verify deviations from the reference line at multiple cross-sections and several points within each section. This approach limited measurement locations, necessitated interruptions in work, and required additional measurement personnel. To shorten the measurement time, alleviate workloads among personnel, and enable comprehensive as-built management across the entire area, we developed the Differential Measurement System. This paper presents an overview of the system and discusses the results of its application in inverted excavation in construction management for road tunnels.

Keywords: LiDAR, as-built management, invert excavation, high efficiency

2. Flexural Strengthening of Corrosion-damaged RC Bridge Piers Using Ultra-High-Performance Concrete Layers: An Experimental Study

Biswas Rajib Kumar, Takashi Misawa, Takahiro Saito

In this study, a cross-sectional repair method was developed for corrosion-damaged RC bridge piers where the corroded concrete cover was removed and reinforced with UHPC layers. The purpose of this study was to verify the effectiveness of this method through experiments with combined axial (1 MPa) and reverse cyclic loading using five specimens. Out of the five test specimens, two specimens underwent an average of 10% rebar corrosion (Group 1), another two specimens underwent an average of 15% rebar corrosion (Group 2), and one specimen acted as the control specimen. One specimen from each group was retrofitted with 50 mm thick ultra-high-performance concrete (UHPC) layers. The experimental outcomes showed that reinforcement corrosion reduced ductility and maximum load-carrying capacity (MLC) significantly. The ductility and MLC of the specimen with 15% rebar corrosion was decreased by 17% and 9.2%, respectively, compared to the reference specimen. However, the 15% corroded specimen strengthened with UHPC layers displayed superior structural performance, for example, the MLC was increased by 24% compared to the sound specimen. Experimental results revealed that the proposed approach can be very effective in strengthening corrosion-damaged RC Bridge piers.

Keywords: UHPC, Corrosion, Strengthening, Cyclic response, RC Bridge piers

3. Method for Acquiring Vital Sign Data at Construction Sites - Utilizing Vital Sign Data to Reduce Human Error -

Shinji Aso, Osamu Yamaguchi, Kazuhiko Oshita

Fatigue and heat contribute to human error at construction sites. The use of vital sign data is thought to be effective in preventing such errors. This paper proposes a method for acquiring vital sign data at construction sites by examining two aspects: a method for acquiring vital sign data and handling of personal information based on legal perspectives, and the devising of a simple and continuous method for acquiring vital sign data that can be applied at construction sites and its application on site.

We began by creating a checklist that would help address various legal requirements, including requirements related to the protection of personal information. We then gathered vital sign data using a questionnaire-style survey in which workers input their physical condition, including subjective data, using a tablet before and after work. This method was simple and ensured continuity, confirming its applicability for construction sites. A data input rate of 91.5% was observed, thus confirming continuity. However, as the data was insufficient and had wide variability, further data accumulation is necessary.

As a result of this research, a checklist for collecting and utilizing vital sign data and a simple and continuous method for managing health at construction sites were established.

Keywords: vital sign data, human error, subjective data, heatstroke

4. Development of Cast-in-place Concrete Pile with High-strength Longitudinal Reinforcement

Yuki Wada, Hidetaka Funaki, Takeshi Kishimoto, Toshikazu Yamaguchi

To prevent overcrowding of rebars in cast-in-place concrete piles, nine companies, including our own company, jointly developed a cast-in-place concrete pile with high-strength (standard yield strength of 590 N/mm² and 685 N/mm²) longitudinal reinforcement. In this development, three main types of experiments were performed to establish a seismic design method for a cast-in-place concrete pile with high-strength longitudinal reinforcement.

The results of elemental experiments confirmed that immersing the rebars in stabilization slurry had no effect on bonding performance, or on the mechanical performance of the lap joints. From this, we gained knowledge on how to set the anchorage length of high-strength rebar into concrete and the lap joint length between high-strength rebars.

Next, structural experiments were performed on five piles, with axial force ratio and concrete strength as the main parameters. This increased our understanding of the damage process and deformation performance of the pile. It was also confirmed that, by conducting bending analysis of the cross section assuming a linear distribution of strains, it is possible to evaluate the relationship between bending moment and curvature up to the ultimate limit state.

Keywords: cast-in-place concrete pile, high-strength longitudinal reinforcement, stabilization slurry

5. Mechanism of Stress Transmission Between Steel Frame Foundation Beams and Pile Caps Confirming Performance Using Partial Frame Test Specimens

Satoshi Yamagami, Yuki Wada, Takeshi Kishimoto, Astushi Sorimachi, Yasuhiro Oka

Buildings with steel frame superstructures typically have foundation beams made of reinforced concrete. However, using steel foundation beams would reduce the cost of the pile foundation by reducing the overall weight of the structure, and would also reduce construction workloads. When using steel foundation beams, stress generated at the pile head during an earthquake must be transmitted to the steel foundation beam through the pile cap, and the mechanism of stress transmission must be confirmed through experiments. We devised a steel foundation beam construction method whereby the pile is embedded in the pile cap to a length equal to the pile diameter. We performed structural studies of the partial frame specimens. These studies confirmed that this approach allows the transmission of stress generated at the pile head to the steel foundation beam through a lever mechanism. The studies also confirmed that strength can be evaluated to a good approximation using existing calculation formulas.

Keywords: Steel structure, foundation beam, pile cap, pile foundation

6. Development of Moist Curing System for Concrete Slab - Integration of an Evaluation System for Wet Conditions on Slab and Watering Facilities for Labor Savings -

Takayuki Masuda, Yusuke Nakamura

Maintaining optimal moisture conditions on the surface of concrete slabs after pouring and finishing helps prevent surface cracking and other problems, a critical factor in construction quality management. However, surface conditions are often judged by visual inspections alone. Accurate quantitative judgments are often difficult to make. Furthermore, the task of watering requires a lot of labor.

In the study reported herein, we developed a moist curing system integrated between the system where an autonomous mobile robot evaluates wet and dry conditions on the slab and watering facilities that can be connected to evaluation results. We confirmed that the values measured by this system correlate with changes on the slab surface. Setting thresholds for these measured values allowed evaluations at three stages: wet, semi-dry, and dry. The watering system consists of the water taps and vinyl hoses typically found on construction sites. When the system evaluates an area as dry, it activates the watering process through the control of solenoid valves.

We deployed this system as part of a construction project involving a floor slab area of $500m^2$ and confirmed that using this system allows us to maintain a sufficiently moist condition. Additionally, we confirmed that this system can contribute to a labor saving of approximately 65% labor and also resource savings for the materials used.

Keywords: slab, autonomous mobile robot, labor savings, automatic watering, resource savings

7. Developing a New Toxic Substance Elution Model for Semi-dynamic Leaching Tests - Impact of Parameters in a Model Incorporating Solid-phase Diffusion -

Shoji Suzuki, Atsushi Ogawa, Yuya Shimizu

Understanding the leaching behavior of toxic substances is key to effectively evaluating the safety of soil or ground and its components. The DF-Kd model, which combines solid-phase diffusion and adsorption/desorption equilibrium to evaluate solute transport, was developed as a method for obtaining quantitative estimates of leaching behavior. Our study involves a new DKD toxic substances elution model, a model that links liquid phase diffusion in pore water to the DF-Kd model. Using the new DKD model, we investigated the impact of various parameters on the concentration of toxic substances in semi-dynamic leaching tests. The results show that the long-term impact of solid-phase diffusion cannot be disregarded. The results also show that solid-phase diffusion affects the gradient of the straight-line approximation used to determine the elution mechanism based on the relationship between elapsed time and elution flux. The DKD model is capable of accurately modeling the varying behaviors of diffusion elution phenomena and should prove useful in understanding the elution behavior of toxic substances attributable to diffusion, as well as in predicting long-term elution behavior from impermeable layers.

Keywords: solid-phase diffusion coefficient, distribution coefficient, semi-dynamic leaching test, poorly permeable material, numerical analysis

8. Development of Automated Air Curtain System - Study on the Effect of Airflow Direction on Thermal Shielding Performance of Air Curtain -

Yuma jincyo, Masaya Iwashita

One method for separating indoor and outdoor thermal environments is the use of air curtains. Appropriate adjustment of the air outlet angle of the air curtain can improve thermal insulation performance; however, knowledge on this subject remains limited. We used Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis and empirical experiments and confirmed that adjusting the air outlet angle towards the warmer area increases thermal insulation performance by roughly 10%. Additionally, we developed a mechanism to automatically control the air outlet angle of the air curtain based on the difference between indoor and outdoor temperatures. By using this automatic control, we were able to reduce air conditioning energy consumption by roughly 8% over a 30-minute period compared to when the air curtain was not in operation.

Keywords: air curtain, sealing efficiency, computational fluid dynamics, thermal insulation performance

9. Study on Conservation Measures Based on Genetic Relationships Among Local Populations of Endangered *Viola raddeana* Plant Using MIG-seq

Hiroaki Shiraishi

In cases where rare plant species are identified in a project area during land development or alteration, a method known as ex situ conservation is often applied, in which the target plants are conserved under human control. In ex situ conservation, it is important to eliminate to the extent possible the negative effects of inbreeding among a limited population, such as reduced genetic diversity. To prevent genetic disturbances in conservation propagation, it is necessary to grasp the genetic structure and establish conservation units in advance. In this study, we evaluated the genetic diversity and genetic structure of *Viola raddeana*, a rare plant inhabiting the Watarase Retarding Basin, Sugao Swamp, and the Kokai riverbed, using single nucleotide polymorphisms (SNPs) (where one DNA base sequence is replaced by another) by MIG-seq. The results indicated that there are populations of *V. raddeana* that can arbitrarily interbreed at each location, and that genetic differentiation can be observed between two geographically close populations. Therefore, as a conservation measure, we proposed that if sufficient budget cannot be secured for *ex situ* conservation, then the *V. raddeana* in Watarase Retarding Basin and the *V. raddeana* in Sugao Swamp could be treated as one large management unit.

Keywords: MIG-seq, single nucleotide polymorphism, genetic diversity, genetic structure, genetic differentiation

■■ 社外発表報文一覧 ■■

【土木系】(2023年4月~2024年3月)

査読付論文

| | 標 題 | 所属 | 氏名 | 掲載論文集 | 主催 | 2023年 |
|-----|--|---------------|--------------|---------------------------|----------|-------|
| | The effect of non-uniform steel bar corrosion on pre- | 奥村組 | ビスワス ラジブウマル | | | |
| 1 | stressed RC members subjected to hysteretic load at | 東京工業大学 | 岩波光保 | Innovative Infrastructure | SPRINGER | 6月 |
| | the mid-span: experimental study and three-dimensional | " | 千々和伸浩 | Solutions | LINK | |
| | FEM modeling | 奥村組 | 齋藤隆弘 | | | |
| | | 奥村組 | 松本隆太郎 | | | |
| 2 | 若材齢に着目した加温養生時における覆エコンクリートの内部 | 11 | 齋藤隆弘 | コンクリート工学年次論文集 Vol.45 | 日本コンク | 78 |
| L _ | 温度推移と強度発現性状 | 中日本高速道路 | 遠藤宏朗 | No.1 pp.394-399 | リート工学会 | ,,,, |
| | | | 稲垣太浩 | | | |
| | STRUCTURAL BEHAVIOUR OF SEVERELY CORRODED BC | 奥村組 | ビスワス ラシブプクマル | | | |
| 3 | BEAM STRENGTHENED WITH ULTRA HIGH-PERFORMANCE | 11 | 齋藤隆弘 | 77th BILEM Week 2023 | RII EM | 9日 |
| ľ | | 11 | 三澤孝史 | | | 071 |
| | | <u>東京工業大学</u> | 岩波光保 | | | |
| | | 奥村組 | 松本隆太郎 | | | |
| | | 11 | 齋藤隆弘 | | | |
| | 覆エコンクリートの若材齢における圧縮強度の推定精度向上に | " | 浜田 元 | | | |
| 4 | 関する検討 | 中日本高速道路 | 遠藤宏朗 | トンネルエ学報告集 第33巻 I-5 | 土木学会 | 11月 |
| | | // | 稲垣太浩 | | | |
| | | 施工総合技術研究所 | 真下英人 | | | |
| | | // | 安井成豊 | | | |
| | | 奥村組 | ピスワス ラシブプクマル | | | |
| 5 | Structural behavior of severely corroded RG beams | " | 齋藤隆弘 | Innovative Infrastructure | SPRINGER | 11月 |
| ľ | retroftted with UHPC layer: an experimental study | <i></i> | 三澤孝史 | Solutions | LINK | , |
| | | 東京工業大学 | 岩波光保 | | | |

| 講演 | 会発表論文 | | | | | |
|-----|---|--|--------------|----------------------------|------------|----|
| 6 | 削孔時に採取したくり粉の画像を用いたトンネル切羽前方地質 | 奥村組 | 塚本耕治 | 第58回地盤工学研究発表会 13- | 地盤工学会 | 7月 |
| | 評価の検討 | " | 山田昂平 | 11-2-02 | ·0m=1 Z | |
| | | 奥村組 | 清水祐也 | | | |
| - | 1、うい 規約ポリナロいた 目期の 天教和 カニノ 叫 書次山 計除 | " | 鈴木奨士 | 土木学会第78回年次学術講演会 | 土土市 | 08 |
| 1 | トノネル掘削すりを用いた支制の不認和力力ム弧系浴面試験 | ハイドロ総合技術研究所 | 森田修二 | Ш-209 | 工个子云 | эд |
| | | 岩手大学 | 大河原正文 | | | |
| | | 地域地盤環境研究所 | 稲垣祐輔 | | | |
| | 教値解析を用いた低強度地山区間における長尺綱管先受工法 | 中日本高速道路 | 稲垣太浩 | | | |
| 8 | の検討(その1 Subloading tij modelを用いた弾塑性FFM解析の | 奥村組 | 外木場康将 | 土木学会第78回年次学術講演会 | 十木学会 | 9月 |
| | 有効性確認) | | 板谷裕次 | Ш-335 | | |
| | | 地域地盤環境研究所 | 初谷樹弥 | | | |
| | | | <u> 甲开照天</u> | | | |
| | | 日本 市田 中日本 市田 田田 | 相坦太浩 | | | |
| | 数値解析を用いた低強度地山区間における長尺鋼管先受工法 | 奥利祖 | 21个场床付 | +大学会第79回年次学術講演会 | | |
| 9 | の検討(その2:弾塑性FEM解析を活用した長尺鋼管先受工法 | """""""""""""""""""""""""""""""""""""" | 石町 九 一 一 一 元 | 工术于云第70回牛次于附两演云 | 土木学会 | 9月 |
| | の地表沈下抑制効果) | 地域地蓝绿境切无历 | 加空和轴 | m 330 | | |
| | | | 山井昭夫 | | | |
| | | | ビスワス ラシンプクマル | | | |
| 10 | 山岳覆エコンクリートの若材齢時の圧縮強度推定に関する解 | // | 齋藤隆弘 | 土木字会第78回年次字術講演会 | 土木学会 | 9月 |
| | 析的検討 | " | 松本隆太郎 | V -209 | | |
| | | 戸田建設 | 吉澤功輝 | | | |
| | | " | 丹沢昭義 | | | |
| 11 | ICT土工管理システムの現場適用 -ICTバックホウの施工履 | " | 重成康裕 | 土木学会第78回年次学術講演会 | 十大学会 | 08 |
| 1 | 歴データの活用ー | " | 本木章平 | VI-76 | エホテム | 37 |
| | | 西松建設 | 黒田卓也 | | | |
| | | | 高尾篤志 | | | |
| 1.0 | データ利活用型ICT土工管理システムの現場実証 -土工事に | 户田建設 | 本不草半 | 土木学会第78回年次学術講演会 | 1 | |
| 12 | おける施工管理の効率化及び高度化に向けた取り組みー | 四松建設 | 黒田早也 | VI-81 | 工木学会 | 9月 |
| | | | <u> </u> | | | |
| | 供田中トンネルにおけるICTを活用 たインバート掘削出来形管 | ————————————————————————————————————— | 松木清志 | + 大学会第78回年次学術講演会 | | |
| 13 | 理システムの構築 | | 山溶攸馬 | 「エホチム第78回中次手柄構成ム 「Ⅵ−117 | 土木学会 | 9月 |
| | | " | 今泉克彦 | | | |
| | | 奥村組 | 今泉克彦 | | | |
| | | | 塩貝 悟 | | | |
| | | " | 尾迫一樹 | | | |
| 14 | AIを活用した切羽評価システムの評価精度向上の取り組み | " | 山田昂平 | | 土木学会 | 9月 |
| | | " | 倉田桂政 | VI-200 | | |
| | | " | 浜田 元 | | | |
| | | sMedio | 園田香織 | | | |
| | | 奥村組 | 尾迫一樹 | | | |
| 1 | | " | 塩貝 悟 | | | |
| 15 | 山岳トンネルにおける岩判定への遠隔臨場および切羽AI評価 | " | | 土木学会第78回年次学術講演会 | 1.1.2.2.2. | |
| 15 | システムの適用 | | | VI-269 | 工不学会 | 9月 |
| | | " | 半开 宗 | | | |
| | | " | 一 ラ 永 兄 彦 | | | |
| | 1 | " | 洪田 兀 | | 1 | 1 |

| | 標題 | 所属 | 氏名 | 掲載論文集 | 主 | 催 | 2023年 |
|----------|--|----------------------|---|--|-----------|-----------|------------|
| | | 奥村組 | 浜田 元 | | | | |
| | | " | │ 萩原 進 ▲ ● 声 章 | +++一个10回左次带作港定会 | | | |
| 16 | 切羽鏡面の吹付りコンクリートのひひ割れ検由により肌落らの 予兆を知らせるシステムの開発 | ッ システム計画研究所 | ラ汞兄彦 清水降司 | 工木字芸弟/8回年次字術講演芸 VI-270 | 土木学会 | 714 | 9月 |
| | | | 久保陽平 | | | | |
| | | 11 | 西岡拳 | | | | |
| | | 奥村組 | 宮田岩往 | | | | |
| | | " | 丸谷専彦 平井 崇 | 土木学会第78回年次学術講演会 | | | |
| 17 | 5次元施土ンミュレーンヨンンステムの開発・検証 | 11 | 高尾篤志 | VI-820 | 土不字会 | ŝ | 9月 |
| | | パスコ | 五十嵐善一 | | | | |
| | トンネル外周装薬孔の削孔差し角が余堀り低減に及ぼす効果 | <u> 奥</u> 村組 | <u>八久休</u> 剛 塚本耕治 | 土木学会第78回年次学術講演会 | | | |
| 18 | の検討 | | 浜田 元 | VI-943 | 土不字会 | ŝ | 9月 |
| | | 奥村組 | 松本隆太郎 | | | | |
| | | " | 一 八田 九 齋藤隆弘 | | | | |
| 10 | 覆エコンクリートの脱型前加温養生と積算温度に基づく脱型管 | 11 | 加藤英一 | 土木学会第78回年次学術講演会 | +★学会 | 2 | <u>а</u> н |
| 15 | 理の現場適用 | 11 | 黒木考洋 | VI-982 | | | 57 |
| | | // 中日本高速道路 | 生田元碑 稲垣大浩 | | | | |
| | | | 遠藤宏朗 | | | | |
| | | 中日本高速道路 | 遠藤宏朗 | | | | |
| | 覆Tコンクリート脱型時の圧縮強度に関する日堂管理毛注の | " | 稲垣太浩 岩崎百 ^一 郎 | 十木学会第78回年次学術講演会 | | | |
| 20 | 凌士→>>>> 1加工約30元mlgд及15度3000円目生于200 | 奥村組 | 松本隆太郎 | | 土木学会 | 714 | 9月 |
| | | 11 | 齋藤隆弘 | | | | |
| | | // 座 村 4月 | <u>板谷裕次</u> | | | | |
| | | 契約祖 | □ 和田貞八 □ 赤﨑修一 | | | | |
| 21 | 供用中連路トンネルを想定したフレキャストフロックによるイン バート補強の実験施工 | 11 | 小林俊彦 | 土木字会第/8回年次字術講演会 VI-996 | 土木学会 | AK | 9月 |
| | | 東日本高速道路 | 小暮英雄 | | | | |
| | | | <u> 金藤和慶</u> 吉村藤子 | | | | |
| 22 | 地般改良の施工影響を可想化するXPい川っ―ションの開発 | 11 | 宮田岩往 | 土木学会第78回年次学術講演会 | +★学会 | 2 | <u>а</u> н |
| ~~~ | | " | 城井光雄 | VI-1008 | | | 57 |
| <u> </u> | | | 山口治 | | | | |
| | | 11 | 川口竜巨 | | | | |
| 23 | あと施工せん断補強工法における削孔作業への自動削孔装置 の実達用 | " | 本村伊章 | 土木学会第78回年次学術講演会 | 土木学会 | 717 | 9月 |
| | の天週川 | " | 二滓李史 澄悠馬 | VI-1077 | | | |
| | | 11 | 石井敏之 | | | | |
| | | 奥村組 | 齋藤隆弘 | | | | |
| | | " | ラ井元川 三字栄一 | 土木学会第78回年次学術講演会 | | | |
| 24 | 各種結合材を用いた焼却飛火固型化に関する検討 | 11 | 酒井一紀 | CS12-11 | 土不字会 | | 9月 |
| | | // | 落合 繁 | | | | |
| <u> </u> | | 新須地区広域11政争務祖告 奥村組 | <u>「「日一一一一」</u> 「「二」 「二」 「二」 「二」 「二」 「二」 「二」 「二」 「二」 「二 | | | | |
| 25 | 公共下水道管路維持管理の包括的民間委託による効果と課題 | // | 山口治 | 土不字会第78回年次字術講演会 CS18-05 | 土木学会 | 714 | 9月 |
| | | // | ▲ 樫木正成 □ Ⅲ 涤 攸 町 | | | | |
| | | 哭竹祖 // | 川豆心馬 三澤孝史 | | | | |
| 26 | アンカー孔の自動削孔装置の現場適用 一既存RC構造物の耐 | " | 石井敏之 | 第21回 建設ロボットシンポジウム | +★堂全 | 4 | 98 |
| | 震補強に伴う削孔作業の自動化- | " | 有川健 | | | • | |
| | | <i>"</i> " | 山口 沼 川口竜巨 | | | | |
| | | | 꼬끼효ㅋ | 第92回(山岳)施工体験発表会 | | | |
| 77 | 古洞近接区間や膨張性を示す泥岩地山でのトンネル施工につ | 哭竹祖 ,, | | 新技術・創意工夫により課題を解 | 日本トン | ネル | |
| 21 | いて - 阪宗坦佐世休世和原称坦始以及工争 長崎板山ト | " | 山呵來典 | 小しに山田にノホル新設・以修工事] 一生産性・安全性向上、働き方改革 | 技術協会 | 41 | |
| | | " | 山島(似 | - | | | |
| | 整照な古鉄地での沢上にと、 リビエけに とて各曲値ムの ついし | | | 第93回(都市)施工体験発表会 | | | |
| 28 | FFには中国地でのルエ庄ンールトエムによる忌囲線かつ1D以 下の小土かぶり施工 - 今和2年度下水道築造工事(新免幹 | 奥村組 | 毛利大介 | 抽験しに地下空间での創息上天に よる地下構造物築造工事 ーデジ | 日本トン | ネル | 10月 |
| | 線・その1) | 11 | 元永浩斗 | タル技術の活用・環境配慮・課題克 | 技術協会 | ŝ | |
| | | | | 服事例- | | | |
| 29 | 都市土木における安全に対する取り組みについて ~ICTを活 | 奧村組 | 谷直結子 | 第60回全国建設業労働災害防止大 | 日本トン | ネル | 10月 |
| | 用した安全管理~ | | | 会研究論文集 pp.18-22 | 技術協会 | <u>ال</u> | |
| 20 | | 南 ++ 40 | 加兹注土 | 第60回全国建設業労働災害防止大 | 日本トン | ネル | 10 - |
| 30 | 101 を活用した火ビ100女王官理于法 | 奥 利 祖 | 加膝肩李 | 会研究論文集 pp.354-357 | 技術協会 | 21 | |
| | | | | | | | |

| | 標題 | 所属 | 氏名 | 掲載論文集 | 主催 | 2023年 |
|---|---|-----|------|--|--------|-------|
| 31 供用中道路トンネルを想定したプレキャストブロックによ バート補強の実験施工 | | 奥村組 | 蜂谷真司 | 2023年度 最新トンネル技術講演会 | | |
| | 供用中道路トンネルを想定したプレキャストブロックによるイン / バート補強の実験施工 | " | 赤﨑修一 | | 臨床トンネル | 2024年 |
| | | " | 板谷裕次 | 2020年度 取制的 的 及 前 两 两 两 两 两 两 两 两 两 两 两 两 两 两 两 两 两 两 | 工学研究所 | 2月 |
| | | 11 | 小林俊彦 | | | |

<u>雑誌掲載報文</u>

| 32 | 岩盤での泥水式推進におけるR=60mと37mのS字曲線施工 | 奥村組 | 安竹 馨 | 月間推進技術 Vol.37 No.4(430) pp.13-17 | 日本推進技術 協会 | 4月 |
|----|--|----------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------|
| 33 | アンカー孔の自動削孔装置の開発と現場適用 | 奥村組 " " | 川澄悠馬 三澤孝史 加藤清孝 | 土木施工 Vol.64 No.4(796) pp.92-94 | オフィス・ス ペース | 4月 |
| 34 | 下水道管路内水位のモニタリング技術の開発 メイン機器と バックアップ機器を併用した効率的な水位モニタリング | 奥村組 " " | 山口 治 南雲裕樹 澤 裕俊 | 建設機械施工 Vol.75 No.6(880) pp.74-77 | 日本建設機械 施工協会 | 6月 |
| 35 | 乙石川砂防堰堤群における災害復旧工事 九州北部豪雨災害 復旧への挑戦 | 奥村組 " | 内藤大資 藤田基記 | 土木施工 Vol.64 No.6(798) pp.75-76 | オフィス・ス ペース | 6月 |
| 36 | 東浜~千鳥橋JCT橋梁補修工事 供用後30年を経過した都市 高速の橋梁補修 | 奥村組 " " " | 石田文宣 若林 将 守屋裕兄 塩入潤一郎 | 土木施工 Vol.64 No.7(799) pp.131-134 | オフィス・ス ペース | 7月 |
| 37 | 国内最長のR&C工法を用いた非開削技術 国道直下、低土被 りをESA工法との併用 | 奥村組 | 林 威 北村貴洋 熊谷静花 | 土木施工 Vol.64 No.7(799) pp.170-173 | オフィス・ス ペース | 7月 |
| 38 | 営業線シールドトンネルの二次覆エによるセグメント補強工事 営業線内において施工上工夫した二次覆工補強工事 | 奥村組 | 森淳 | 建設機械 Vol.59 No.8(702) pp.42-48 | 日本工業出版 | 8月 |
| 39 | 関越自動車道 六日町地区函渠工工事 豪雪地帯における非 開削アンバーパス工事の施工 | 奥村組 " | 竹本光慶 高津沙和 | 土木施工 Vol.64 No.8(800) pp.64-67 | オフィス・ス ペース | 8月 |
| 40 | SENSで掘進中に出現した巨大な岩塊群の撤去 ー北海道新幹 線 羊蹄トンネル(比羅夫)他工区ー | 鉄道·運輸機構 | 生越 亮 上松 苑 友瀧庸治 | トンネルと地下 Vol.54 No.10(638) pp.7-17 | 日本トンネル 技術協会 | 10月 |
| 41 | 環境に配慮した事業活動の推進 ESG/SDGsの取り組み | 奥村組 " " " | 山下 智 大矢好洋 廣中哲也 岩下将也 | 土木施工 Vol.64 No.11(803) pp.120-123 | オフィス・ス ペース | 11月 |
| 42 | コンクリート湿潤養生 自動認識ロボットの開発 | 奥村組 <i>"</i> | 増田貴之 中村裕介 | 建設機械施工 Vol.75 No.12 pp.37-42 | 日本建設機械 施工協会 | 12月 |
| 43 | 地盤改良時影響可視化XRシステムの開発 施工進捗と地下躯 体をリアル可視化 | 奥村組 | 吉村藤子 伊藤千夏 宮田岩往 | 土木施工 Vol.65 No.1(805) pp.55-58 | オフィス・ス ペース | 2024年 1月 |
| 44 | マスコンクリートのパイプクーリング制御システム「ひえたくん」 | 奥村組 アクティオ | 齋藤隆弘 桒原賢司 | 建設機械施工 Vol.75 No.12 pp.37-42 | 日本建設機械 施工協会 | 2024年 1月 |
| 45 | 積算温度に基づく若材齢 圧縮強度の推定精度向上と覆エコン クリート脱型管理への展開 | 奥村組 // 中日本高速道路 // | 松本隆太郎 齋藤隆弘 稲垣太浩 遠藤宏朗 | コンクリート工学 Vol.62 No.2 pp.130-137 | 日本コンク リート工学会 | 2024年 2月 |
| 46 | AIを活用したシールド線形管理 シールド方向予測AIシステム | 奥村組 | 木下茂樹 | 建設機械 Vol.60 No.2(708) pp.21-25 | 日本工業出版 | 2024年 2月 |
| 47 | 震災の復旧・復興と次世代への伝承 | 奥村組 " " | 深津有彦 今井亮介 松本広之 | 土木施工 Vol.65 No.3(807) pp.82-85 | オフィス・スペース | 2024年 3月 |

【建築系】(2023年4月~2024年3月)

| No. | 標題 | 所属 | 氏名 | 掲載論文集 | 主催 | 2023年 |
|--------------|--------------------------------------|------|-------|--------------------|--------|-------|
| | | 奥村組 | 小山慶樹 | | | |
| | 毎季建物に適用する過士亦位抑制用性能可恋ナイルダンパー | " | 山上 聡 | 日本建筑学会技術報生生 1/2120 | | |
| 1 | 兄辰建初に週用する週入変世神利用性能可変オイルタンハーの開発 | " | 舟木秀尊 | 口不连来于云汉间和日来 V01.23 | 日本建築学会 | 6月 |
| | | 東北大学 | 五十子幸樹 | N0.72 pp.701 700 | | |
| | | " | 井上範夫 | | | |
| | | 奥村組 | 和田湧気 | | | |
| | 場所打ちコンクリート拡底杭の実大引抜き載荷実験の報告と解 析的検討 | " | 舟木秀尊 | 日本建築学会技術報告集 Vol.30 | 口大建筑学会 | 2024年 |
| ² | | " | 武田彰文 | No.74 pp.77-82 | 口쑤娃采于云 | 2月 |
| 1 | | " | 小谷俊二 | | | |

| 講》 | 寅会発表論文 | | | | | |
|----|--|---|---|---|--------|----|
| 3 | 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 ーその2 現 場 溶接形式における欠陥高さを因子とした 載荷実験ー | 京都大学 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 田中 町 上田 遼 畔上 進 塚大空哉 | 令和5年度 日本建築学会近畿支 部研究発表会 2035 pp.145-148 | 日本建築学会 | 6月 |
| 4 | 梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 -その3 大 型断面・工場溶接形式における欠陥高さを因子とした載荷実験 - | 神戸大学大学院 " 奥村組 角藤 " | 山本 市 田 市 前 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 | 令和5年度 日本建築学会近畿支 部研究発表会 2036 pp.149-152 | 日本建築学会 | 6月 |
| 5 | 群杭の杭頭応力分布の特性に関する研究(その1:三次元有限 要素法解析の概要) | マインド | 塩見忠彦 藤原良う 和川和田 時田知典 | 第58回地盤工学研究発表会 11- 9-5-01 | 地盤工学会 | 7月 |
| 6 | 群杭の杭頭応力分布の特性に関する研究(その2:解析結果の 評価) | 奥村組 マインド " 鋼管杭・鋼矢板技術協会 " | 和田湧気 塩見忠良博 市川和臣 時田知典 | 第58回地盤工学研究発表会 11- 9-5-02 | 地盤工学会 | 7月 |
| 7 | 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2 室内実験における再生骨材およびフレッシュコンクリー トの試験結果 | 鉄建建設 青木あすなろ建設 奥村組 鴻池組 五洋建設 東京建設 長谷エコーポレーション | 川又 第 4 日 下 総 時 二 本 明 で 総 明 本 明 で 本 明 で 本 明 で 本 の 時 本 の で の の で の の で の の で の の で の の の の の | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 1284 | 日本建築学会 | 9月 |
| 8 | 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3:現場溶接形式;欠陥高さを因子とした載荷実験 | 奥村組 神戸大学 <i>"</i> 角藤 <i>"</i> | 上田 遼 田中 剛 山本 涼 畔上 進 塚大空哉 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 1524 | 日本建築学会 | 9月 |
| 9 | 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4:現場溶接形式:亀裂進展状況および塑性変形能力 | 神戸大学 | 山本 田田 上田 田 上 王 上 武 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 1525 | 日本建築学会 | 9月 |
| 10 | 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5:梁断面寸法を因子とした載荷実験 | 京都大学大学院 京都大学 神戸大学大学院 奥村組 角藤 " | 高 塚 原 御 原 御 二 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 1526 | 日本建築学会 | 9月 |
| 11 | 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6:梁断面寸法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 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 田中 上田 選 天空哉 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 1527 | 日本建築学会 | 9月 |
| 12 | フライアッシュと高炉スラブ微粉末を使用したジオポリマーモル タルに関する基礎的研究 -フライアッシュの品質が及ぼす影響- | 奥村組 " " | 伊藤 淳 河野政典 赤星博仁 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 1711 | 日本建築学会 | 9月 |
| 13 | 建築モデルによる資材製造から建設までのCO ₂ 排出量の試算 その1 検討の概要、CO ₂ 排出量の工事金額等 | 竹中工務店 () 安藤·間 大林組 奥村組 熊谷組 () 東急建設 | 小村 和子 参 榎 秋 村 木 本 た 竹 井 、 竹 村 木 大 府 大 浩 浩 二 和 子 祭 で 秋 十 、 次 内 十 大 子 、 次 内 十 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 1722 | 日本建築学会 | 9月 |

| No. | 標題 | 所属 | 氏名 | 掲載論文集 | 主 催 | 2023年 |
|-----|---|--|---|-------------------------------|--------|-------|
| 14 | 建築モデルによる資材製造から建設までのCO2排出量の試算 その2 建築工事の科目別・資材別影響分析およびカットオフに 関する考察 | 安藤·間 竹中工務店 パ 大林組 奥村組 熊谷組 " 東急建設 | 鈴木林子書 小林千香 津 村本浩之 秋竹壮 新井光 山藤晃 山藤晃 金 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 1723 | 日本建築学会 | 9月 |
| 15 | 建築モデルによる資材製造から建設までのCO ₂ 排出量の試算 その3 壁下地仕様によるCO ₂ 排出量の差異に関する検討 | 奥村組 竹中工務店 安藤·間 大林組 熊谷組 " 竹中工務店 東急建設 | 秋小爺檀新 呉村 北道好浩 勤 正子 知藤晃 金 敏 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 1724 | 日本建築学会 | 9月 |
| 16 | 建築モデルによる資材製造から建設までのCO ₂ 排出量の算定 その4 建設設備部門の資材重量に基づいた算定結果の検証 | 熊谷組 " 竹中工務店 废藤·間 大林組 奥村組 東急建設 | 呉 新小村 本村 新林千 好 浩 七 大 本 大 竹 木 木 大 本 大 大 木 木 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 大 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 1725 | 日本建築学会 | 9月 |
| 17 | 場所打ちコンクリート抵抗杭の実大引抜き載荷実験 その1 実 験概要 | 丸五基礎工業 奥村組 " | 今井康幸 舟木秀尊 武田彰文 林 芳尚 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20204 | 日本建築学会 | 9月 |
| 18 | 場所打ちコンクリート抵抗杭の実大引抜き載荷実験 その2 実 験結果および考察(傾斜角の違い) | 奥村組 " " | 小谷俊二 武田彰文 坂下由佳 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20205 | 日本建築学会 | 9月 |
| 19 | 場所打ちコンクリート拡底杭の実大引抜き載荷実験 その3 実 験結果および考察(支持力係数) | 奥村組 // // | 北川格 小谷俊二 坂下由佳 和田湧気 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20206 | 日本建築学会 | 9月 |
| 20 | 場所打ちコンクリート拡底杭の実大引抜き載荷実験 その4 有 限要素法によるシミュレーション解析 | 奥村組 " " | 和田湧気 舟木秀尊 北川 格 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20207 | 日本建築学会 | 9月 |
| 21 | 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1 付着強度試験) | 長谷エコーポレーション " 安藤ハザマ 奥村組 佐藤工業 広島工業大学 | 田太中森森和川金 遼雄光泰清湧和川子 支介男夫隆気也治 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20256 | 日本建築学会 | 9月 |
| 22 | 様々な杭配置に対する群杭効率評価法の研究(その1:3次元 有限要素法解析の概要) | マインド | 藤塩和 小柳 源見田山 が が 御 瀬勝 一 、 御 御 御 御 御 御 御 御 御 御 御 御 御 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20265 | 日本建築学会 | 9月 |
| 23 | 様々な杭配置に対する群杭効率評価法の研究(その2:指針式 の適用方法に関する検討) | 芝浦工業大学 マインド ッ 奥村組 鋼管杭・鋼矢板技術協会 ッ ッ | 土方勝忠良 原田山 が 御 瀬 御 瀬 御 瀬 智 治 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20266 | 日本建築学会 | 9月 |
| 24 | 既存杭撤去・埋戻しに伴う周辺地盤への影響(緩み)に関する 研究 (その12):ケーシング縁切引抜工法による周辺地盤への 影響評価 | 基礎地盤コンサルタンツ 国土技術政策総合研究所 奥村組 丸五基礎工業 丸門建設 地盤試験所 | 大田 孝 井上波彦 岸本 剛 今井康浩 根岸 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20286 | 日本建築学会 | 9月 |
| 25 | 循環攪拌を用いたケーシング縁切引抜工法の研究(その6) 原位置実験結果 | 東急建設 飛島建設 奥村組 戸田建設 五洋建設 浅沼組 | 川崎健二郎 加藤淳司 門井 田田 田田 山 口 克 彦 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20300 | 日本建築学会 | 9月 |
| 26 | 放射型ケーブル屋根構造の屋根変形を考慮した風応答性状に 関する研究 (その1)数値流体解析で得られた平均風力係数 分布の妥当性の評価 | 日本大学大学院 日本大学 " " " " 奥村組 | 江黒皓介 鴛海 宮田 岡石 天亮 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20433 | 日本建築学会 | 9月 |

| No. | 標題 | 所属 | 氏名 | 掲載論文集 | 主催 | 2023年 |
|-----|--|--|---|--------------------------------------|-----------------|-------|
| 27 | 放射型ケーブル屋根構造の屋根変形を考慮した風応答性状に 関する研究 (その2)数値流体解析と静的数値解析を用いた 収歛研計算 | 奥村組 日本大学 " " | 篠原大亮 鴛海 昴 宮里直 岡田 章 廣石秀造 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 20434 | 日本建築学会 | 9月 |
| 28 | 上部構造が剛体および弾性体の滑り基礎構造建物の浮上り挙 動に関する実験的研究(その1 実験概要および実験結果) | 奥村組(元日本大学) 日本大学大学院 日本大学 " " | 大倉岡大 寺岡田西三 中西達 主嶋 主 二 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 21222 | 日本建築学会 | 9月 |
| 29 | 上部構造が剛体および弾性体の滑り基礎構造建物の浮上り挙 動に関する実験的研究(その2 浮上りおよび滑り挙動につい て) | 日本大学大学院 奥村組(元日本大学) 日本大学大学院 日本大学 " " | 寺大山西 村子 中 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 市 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 21223 | 日本建築学会 | 9月 |
| 30 | 磁気減衰を用いたセミアクティブ制御の時間遅れに対するロバ スト性の検討 | 奥村組(元明治大学大学院) 明治大学 | 大谷哲矢 富澤徹弥 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 21295 | 日本建築学会 | 9月 |
| 31 | ゴム直径が天然ゴム系積層ゴムの熱老化に与える影響の検証 (その2) 加熱時間等の追加検証 | SWCC " 奥村組 " 福岡大学 | 清水美雪 三須基 小本 小山 上 下 山 上 慶 樹 高山 峯 夫 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 21339 | 日本建築学会 | 9月 |
| 32 | 高速道路に近接する建物における安全対策 | 奥村組 | 正木亮次 | 第60回 全国建設業労働災害防止 大会研究論文集 pp.48-51 | 建設業労働災 害防止協会 | 10月 |
| 33 | 鉄骨造大スパン格納庫における安全性の向上と工期短縮の両 立 ~全面吊足場を使用した仮設計画~ | 奥村組 | 岩澤航平 | 第60回 全国建設業労働災害防止 大会研究論文集 pp.16-19 | 建設業労働災 害防止協会 | 10月 |
| 34 | 奥村式ハイブリッド梁構法による大スパン対応梁の合理化施工 | 奥村組 | 甲斐智博 | 令和5年度技術発表討論会 ~発表 事例集~ pp.62-75 | 全国建設業協 会 | 11月 |
| 雑誌 | 5掲載報文 | | | | | |
| 35 | 可変性を有した集合住宅の居住履歴、改修履歴調査を通した 居住環境の経年変化に関する一連の研究 | 奥村組 | 南一誠 | 建築の研究 No.264 pp.16-23 | 建築研究振興 協会 | 4月 |
| | | | | | | |

| 35 | 可愛性を有した集合性もの活性履歴、政修履歴調査を通じた 居住環境の経年変化に関する一連の研究 | 奥村組 | 南一誠 | 建築の研究 No.264 pp.16-23 | 達樂研究振興 協会 | 4月 |
|----|---|--------------------|------------------------------|--|-----------------|-------------|
| 36 | 既存RC造建築物における有孔梁の鋼板補強工法 くせん断 性能に関する技術性能証明を取得> | 奥村組 | 赤星博仁 | 建築設備と配管工事 Vol.61 No.6(824) pp.39-43 | 日本工業出版 | 5月 |
| 37 | 免震建築紹介 日進工具開発センター | 奥村組 " " " | 小山慶樹 山上 聡 舟木秀尊 床 圭司 | MENSHIN No.121 pp.8-11 | 日本免震構造 協会 | 7月 |
| 38 | 超高耐久低収縮コンクリートスラブの施工 一国宝薬師寺東塔 高耐久基盤形成工事ー | 奥村組 | 河野政典 | コンクリート工学 Vol.62 No.2 pp.144-149 | 日本コンク リート工学会 | 2024年 2月 |
| 39 | 既存RC造建築物における有孔梁の鋼板補強工法 せん断性能 に関する技術性能証明を取得 | 奥村組 | 赤星博仁 | 建設機械施工 Vol.76 No.2(888) pp.28-33 | 日本建設機械 施工協会 | 2024年 2月 |

【環境系】(2023年4月~2024年3月)

| No. | 標題 | 所属 | 氏名 | 掲載論文集 | 主催 | 2023年 |
|-----|--|--|--|---|---|-------|
| 1 | Evaluating temperature effects on diffusive releases from clay particles | 奥村組 京都大学大学院 国立環境研究所 京都大学大学院 | 小河篤史 高井敦史 肴倉宏史 勝見 武 | Proceedings of 9th International Congress on Environmental Geotechnics pp.115-124 | International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering | 6月 |
| 2 | Pilot-scale and laboratory tests for efficient separation and recovery of soil-waste mixtures | 京都大学大学院 奥村組 京都大学大学院 " | 高井敦史 清水祐也 加藤智大 勝見 武 | 9th International Congress on Environmental Geotechnics pp.3–10 | International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering | 6月 |
| 3 | Effects of changes in oxidizing and reducing environments on the characteristics of arsenic elution from excavated rocks | 奥村組 " 岩手大学 | 清水祐也 鈴木奨士 大河原正文 | 9th International Congress on Environmental Geotechnics pp.163–170 | International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering | 6月 |
| 4 | 解析と測定に基づいた床振動に及ぼす間仕切壁の影響に関す る考察 | 戸田建設 パ 鴻池組 パ 熊急建設 奥村組 東洋建設 | 丸石原伊植前三柳山本。 「小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小小 | 日本建築学会環境系論文集 Vol.88 No.812 pp.763-770 | 日本建築学会 | 10月 |

<u>講演会発表論文</u>

| No. | 標題 | 所属 | 氏名 | 掲載論文集 | 主催 | 2023年 |
|-----|--|---|---|---|---------------|-------|
| 5 | 木造建築物の床衝撃音遮断性能に関する一考察 | 前田建設工業 日総試 建築研究所 奥村組 東急建設 淡路技研 | 藤橋克 安 井 光 肥 子 光 勝 人 開 本 後 男 一 城 本 大 二 朝 雄 井 子 八 勝 、 一 、 一 、 一 、 一 、 一 、 一 、 一 、 一 、 一 、 | 日本騒音制御工学会研究発表会講 演梗概集 1-1-01 | 日本騒音制御 工学会 | 4月 |
| 6 | 木造建築物における実衝撃源による発生音の測定事例 | 奥村組 鹿島建設 前田建設工業 建築研究所 淡路技研 東洋建設 | 柳沼勝夫 竹林橋克己 平光俊男 山本耕三 | 日本騒音制御工学会研究発表会講 演梗概集 1-1-02 | 日本騒音制御 工学会 | 4月 |
| 7 | 不思議音調査のための計測手法の検討 ~ネットワークを活用 した長期計測システムの開発~ | リオン | 風間亮介 菊地 哲 阪本一生 柳沼勝夫 | 日本騒音制御工学会研究発表会講 演梗概集 1-1-09 | 日本騒音制御 工学会 | 4月 |
| 8 | 業務プロセスから見た特定有害物質の使用について(その3) | 土壌汚染対策コンソージアム(奥村組) 土壌汚染対策コンソージアム パ パ パ パ | 長 大吉 子啓宗 安田竹 哲田川 哲 町 市 哲 で 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 町 | 第28回 地下水・土壌汚染とその防 止対策に関する研究集会(2023年) S4-03 pp.361-366 | 地盤工学会 | 6月 |
| 9 | 塩素化エチレン類による土壌・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 | 土壌環境センター(奥村組) 土壌環境センター パ パ | 羽渕博臣 伊藤雅子 金井良太 西田憲司 | 第28回 地下水・土壌汚染とその防 止対策に関する研究集会(2023年) S4-27 pp.476-480 | 地盤工学会 | 6月 |
| 10 | 可逆的な泥のコンシステンシーを「光る中空泥だんご」で体感化 学(五感とICT(情報通信技術)を泥や粘土のコンシステンシー (泥だんご)で未来に繋ぐ) | 地球地盤環境研究所 大阪大学大学院 長崎大学大学院 大阪大谷大学 奥村組 国立環境研究所 | 水野克己 乾 徹 大嶺 聖 地下まゆみ 長 千佳 遠藤和人 | 第58回地盤工学研究発表会 11- 5-2-07 | 地盤工学会 | 7月 |
| 11 | 改質剤の添加による土砂系混合廃棄物の分別特性の変化 | 京都大学大学院 " " 奥村組 | 三木良実 高井敦史 加藤智大 勝見 武 清水祐也 | 第58回地盤工学研究発表会 13- 5-4-07 | 地盤工学会 | 7月 |
| 12 | 封じ込め処分場内環境下を想定した掘削岩からの砒素溶出特性 性 ーその1:周辺酸素濃度ー | 奥村組 " " 岩手大学 | 鈴木奨士 清水祐也 萩原 進 大河原正文 | 第58回地盤工学研究発表会 13- 11-4-01 | 地盤工学会 | 7月 |
| 13 | 封じ込め処分場環境下を想定した掘削岩からの砒素溶出特性 ーその2:温度および酸化還元電位ー | 奥村組 " " 岩手大学 | 清水祐也 鈴木奨士 萩原 進 大河原正文 | | 地盤工学会 | 7月 |
| 14 | MIG-seg法による絶滅危惧種(タチスミレ)の地域集団の遺伝的 関係解析 | 奥村組 東北大学 大阪公立大学 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 廣田 峻 小幡和男 津村義彦 | 土木学会第78回年次学術講演会 Ⅶ-09 | 土木学会 | 9月 |

| No. | 標題 | 所属 | 氏名 | 掲載論文集 | 主催 | 2023年 |
|-----|---|--|--|--|---------------|-------|
| 15 | ハイパースペクトルカメラを用いた災害廃棄物の種類の分類に 関する検討 | 奥村組 " " " | 羽渕博臣 岩下将也 清水祐也 吉村藤子 | 土木学会第78回年次学術講演会 CS9-59 | 土木学会 | 9月 |
| 16 | インピーダンス特性測定事例 CLTを用いた中規模木造建物の 床衝撃音遮断性能に関する検討(その1) | 奥村組 " " 日本設計 " | 柳沼勝夫 稲留康一 阪本一生 小泉 草野崇文 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 40156 | 日本建築学会 | 9月 |
| 17 | 乾式二重床構造の床衝撃音レベル低減量測定事例 CLTを用 いた中規模木造建物の床衝撃音遮断性能に関する検討(その 2) | 泰成 奥村組 (1) 日本設計 (1) 奥村組 泰成 万協 | 高稲柳小草阪石北洞谷康勝崇一岳武 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 40157 | 日本建築学会 | 9月 |
| 18 | 環境温度変化が乾式二重床防振支持脚の振動特性へ及ぼす 影響について | 奥村組 日本大学 建築研究振興協会 栗本鐵工所 | 版本一生 井上勝夫 彦坂信之 鹿倉潤二 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 40165 | 日本建築学会 | 9月 |
| 19 | 吹出風向がエアカーテンの熱遮断性能に与える影響に関する 研究(その1) - CFD 解析による検討- | 奥村組 " | 神長侑磨 岩下将也 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 40765 | 日本建築学会 | 9月 |
| 20 | 吹出風向がエアカーテンの熱遮断性能に与える影響に関する 研究(その2) -実験室実験による検証- | 奥村組 " | 岩下将也 神長侑磨 | 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿) 40766 | 日本建築学会 | 9月 |
| 21 | イトイヌノヒゲなど湿地性植物保全の取り組みと自生地の環境 の把握について | 奥村組 " " 筑波大学 | 長 千佳 鈴木奨士 富山陽子 上條隆志 | 植生学会 第28回年次学術大会 B07 p.33 | 植生学会 | 10月 |
| 22 | セレンの地中移行特性評価と対策技術に関する事例調査 | 京都大学大学院 GRI財団 奥村組 京都大学大学院 | 加藤智大 伊藤浩子 小河篤史 勝見 武 | Kansai geo-symposium2023 pp.114-117 | 地盤工学会関 西支部 | 11月 |
| 23 | セレンの地球化学的性質と溶出特性に関する研究事例調査 | GRI財団 京都大学大学院 奥村組 京都大学大学院 | 伊藤浩子 加藤智大 小河篤史 勝見 武 | Kansai geo-symposium2023 pp.118-123 | 地盤工学会関 西支部 | 11月 |
| 24 | 自然由来の重金属等を含む要対策土の取り扱い事例 | 奥村組 不動テトラ 大林組 京都大学大学院 GRI財団 京都大学大学院 | 小 河 藤 孝 孝 計 加 藤 浩 子 伊 勝 見 武 | Kansai geo-symposium2023 pp.124–128 | 地盤工学会関 西支部 | 11月 |
| 25 | 難透水性材料からの有害物質溶出モデルにおける固相内拡散 と粒間拡散の影響 | 奥村組 " 国立環境研究所 | 鈴木奨士 小河篤史 肴倉宏史 | 第15回 環境地盤エ学シンポジウ ム 2-1 pp.39-45 | 地盤工学会 | 11月 |
| 26 | 土砂系混合廃棄物のふるい選別処理における改質材の影響 | 京都大学大学院 " " 奥村組 | 三木良実 高井敦史 加藤智大 勝見 武 清水祐也 | 第15回 環境地盤工学シンポジウ ム 11-6 pp.371-377 | 地盤工学会 | 11月 |
| 27 | ーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーーー CO2吸着させた木質バイオマス灰を添加した土壌からの元素溶 出挙動とコマツナの生育応答 | 明治大学 奥村組 " 明治大学 | 西田和樹 大矢好洋 小河篤史 加藤雅彦 | 第15回 環境地盤工学シンポジウ ム 12-1 pp.378-383 | 地盤工学会 | 11月 |

雑誌掲載報文

| 28 | ビオトープを活用した生物多様性保全の取組み | 奥村組 " " | 長 千佳 鈴木奨士 富山陽子 | 建設機械施工 Vol.75 No.5(879) pp.36-41 | 日本建設機械 施工協会 | 5月 |
|----|-----------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------|----|
| 29 | 粘土の物理化学特性に及ぼす温度の効果 | 奥村組 京都大学大学院 国立環境研究所 | 小河篤史 高井敦史 肴倉宏史 | 地盤工学会誌 Vol.71 No.9(788) pp.17-20 | 日本建築学会 | 9月 |

■■ 表彰 ■■

日建連表彰 第4回 土木賞(特別賞)

(一般社団法人日本建設業連合会)

プロジェクト名:芽登第二発電所 導水路改造プロジェクト

当社を幹事会社とする共同企業体が 2017 年から 2022 年にかけて施工した「芽登第二発電所導水 路改造プロジェクト」が、一般社団法人日本建設業連合会の日建連表彰第4回土木賞 特別賞を受賞 した。

日建連表彰土木賞は、社会基盤として国民生活と経済活動を支える土木分野の優れたプロジェク ト・構造物を表彰するため2020年に創設された。施工者団体が設ける賞として、事業企画から維持 管理までの総合評価に加え、施工プロセスの視点(施工プロセスの改善、良質な社会資本の効率的 創出、土木技術の発展・伝承など)に基づいて選考される。このうち、特別賞は、施工プロセスを支 えた活動や技術開発など固有の課題に対する取り組みが優れているプロジェクト・構造物が選考さ れる。

本工事は、北海道十勝川水系にある電源開発株式会社が管理する糠平系 6 発電所の内、芽登第二 発電所の導水路の一部を構成する茂喜登牛水路橋を改造するものである。同水路橋は、プレストレ ストコンクリート (PC) 橋黎明期の 1958 年に築造された全長 274m の PC 造の水路橋で、当時として は日本最大級であった。既設水路橋の解体にあたり、一般的なベント架設によるクレーン解体で施 工すると、約 24 カ月の期間が必要となり、工期内に工事を完了できないことが予想された。そこで、 国内で前例のない PC 桁の発破解体方法を採用し、試験発破と発破計画の見直しを重ねた結果、約 7 カ月で解体を完了した。また、土木学会の 3 種委員会を立ち上げ、様々な調査研究活動のための機 会と場所を委員会に提供し、PC 橋梁の維持保全に関する新たな知見を得ることができた。このよう な取り組みにより特別賞に値するものと評価された。また、2022 年には「土木学会選奨土木遺産」 に登録され、既存水路橋の一部が現地に保存されている。

完成時全景

土木学会選奨土木遺産(P1~P2 径間)

既設水路橋の発破解体 (PC桁)

日建連表彰 第64回 BCS賞

(一般社団法人日本建設業連合会)

プロジェクト名:大阪ツインタワーズ・サウス、及び周辺公共施設整備

当社が周辺公共施設整備として大阪駅前地下道の拡幅・整備工事を担当した「大阪ツインタワーズ・サウス、及び周辺公共施設整備」が一般社団法人日本建設業連合会の日建連表彰第64回 BCS 賞を受賞した(大阪梅田ツインズタワーズ・サウスは、㈱竹中工務店の施工物件)。

日建連表彰 BCS 賞は、「優秀な建築物を作り出すためには、デザインだけでなく施工技術も重要で あり、建築主、設計者、施工者の三者による理解と協力が必要である」という建築業協会初代理事長 竹中藤右衛門氏の発意により昭和 35 年(1960 年)に創設された。以後、良好な建築資産の創出を図 り、文化の進展と地球環境保全に寄与することを目的に、毎年、国内の優秀な建築作品が表彰され ている。

当社が担当した周辺公共施設整備は、幅員が狭くクランク形状になっていた地下道を、広く一直 線にすることで人の流れが滞らないよう増改築する工事である。最大 13,000 人/h と通行量の多い 地下道を通行止めにすることなく、交差する 3 つの動線を適宜切り替えながら工事を進め、6 年の歳 月を経て 2021 年 5 月に竣工した。

写真提供:株式会社竹中工務店

奥村組特定研究報告

No.32

免震建物用変位検知型

性能可変オイルダンパーの開発とそのロバスト性

東北大学博士(工学) 小山 慶樹

YOSHIKI KOYAMA Dr. Eng. TOHOKU UNIVERSITY

2023.9

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

OKUMURA CORPORATION
この「奥村組特定研究報告」は著者が 東北大学へ提出した学位論文を再編、 収録し、発行するものである。

免震建物用変位検知型性能可変オイルダンパーの開発とそのロバスト性

論文の要旨

1995年の兵庫県南部地震以降、地震観測網が充実し、様々な場所で多くの地震が観測されるように なった。2003年9月の十勝沖地震では、震源から約250キロ離れた苫小牧で発生したスロッシングに よる石油タンク火災を契機に長周期地震動が注目された。また、2011 年 3 月の東北地方太平洋沖地震 では、複数の震源領域における連動型地震となり、国内観測史上最大のマグニチュードを記録し、首 都圏や大阪湾岸の超高層建築物でも大きな揺れが観測された。これらを受け、2016 年 6 月に国土交通 省から、「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」が通 知され、それまでの設計基準を超えたエネルギーを有する地震動に対して、構造物の安全性検討が必 要になった。免震建物では、巨大地震時に生じる免震層の水平変位が水平クリアランスを超え、上部 構造の擁壁衝突が危惧されている。その対策として、免震層に水平剛性や減衰を付加する方法が一般 的であるが、上部構造が負担する地震力が小地震時から増加してしまうデメリットがあり、地震応答 低減効果を損ねてしまう。そこで、本研究では免震層の変位を自動検知し、減衰力を変化させること で、中小地震時は一般の免震性能と同等の地震応答低減効果を発揮し、巨大地震時に生じる免震層の 過大な水平変位を抑制することが可能な免震建物用変位検知型性能可変オイルダンパーを開発し、そ の減衰性能を明らかにすることを目的とする。最大減衰力が 500kN 級の実大規模の変位検知型性能可 変オイルダンパーを製作して、加振機による実験から減衰性能を示す。さらに、本ダンパーを用いた 免震建物の時刻歴応答解析を行い、上部構造の応答値に与える影響や変位抑制効果を示し、その優位 性を確認した。

本論の構成は6つの章から構成されており、以下に各章の概要を示す。

第1章では、免震建物の巨大地震対策に関する既往研究について調査し、解析的検討から、免震層 の過大な変位を抑制するためには剛性を付加するのではなく、減衰を付加する方が効果的であること を紹介した。また、既往の免震建物における巨大地震対策事例を紹介し、その課題や問題点を示した。

第2章では、変位検知型性能可変オイルダンパーの構成や品質基準を示し、その作動原理について 説明した。特に、任意に設定可能な閾値以上の変位がダンパーに生じると、変位に応じて自動で無段 階に減衰係数を切り替える機構について説明した。また、切り替わった減衰係数を元の性能に戻す自 己回帰特性の作動原理を示し、本ダンパーの減衰力をダンパー速度や変位、減衰係数などを用いて数 値モデルで示した。

第3章では、最大減衰力が500kN級の変位検知型性能可変オイルダンパーを5基製作し、実験結果 に基づき減衰性能を示した。最大速度100cm/s、最大水平変位±60cmの加振が可能な試験機設備の概 要および測定計画を立案し、正弦波加振などから、ダンパー変位を自動で検知して減衰力が増加する ことを確認した。また、各種依存性や繰り返し耐久性、長周期長時間加振による影響、最大減衰力や 最大速度などの限界性能を確認するために、免震装置の大臣認定時に要求される試験と同等の実験を 実施し、使用上問題ないことを確認した。さらに、三角波加振を行い閾値とした変位を検知してから 減衰係数が切り替わるまでの時間遅れが 0.05 秒以下であることを確認し、ダンパー性能に時間遅れの 影響が殆どなく、上部構造の応答に与える影響がないことを解析的検討から明らかにした。

第4章では、実存する6階建ての免震建物を対象に変位検知型性能可変オイルダンパーを適用した 設計事例を紹介し、その変位抑制効果や最大応答値を評価した。さらに、通常のバイリニア型のオイ ルダンパーによる変位抑制を行った場合との上部構造の最大応答値の比較を行った。オイルダンパー 増設による変位抑制を行った場合、レベル2地震動時に免震層の最大水平変位は概ね25%低減するが、 上部構造の頂部応答加速度など種々の応答値が概ね20%増加する傾向があった。これに対して、開発 した変位検知型性能可変オイルダンパーによる変位抑制を行った場合は、レベル2地震動時に免震層 の最大水平変位を概ね16%低減し、上部構造の応答値は概ね2%増加するのみであることや最大応答値 に自己回帰特性の有無は影響を与えないことなどを示し、開発した変位検知型性能可変オイルダンパ ーの優位性を示した。

第5章では、建物の構造性能を確定、入力地震動を不確定として扱い、入力地震動の不確定性が変 位検知型性能可変オイルダンパーの最大応答値に与える影響について検討した。入力地震動はパワー スペクトルと振幅包絡線でモデル化した。モンテカルロシミュレーションを10,000回実行し、位相特 性の影響を平均化して、構造物の頂部最大応答加速度や免震層の最大水平変位の期待値、標準偏差、 および変動係数を評価し、ロバスト性に与える影響を示した。

第6章では、上記の結果を総括し、得られた成果と今後の展開について述べた。

差分計測システムによるインバート掘削の出来形管理

Differential Measurement System for Invert Excavation Control

川澄悠馬* 今泉克彦* 松田顕伍** 松本清志**

要 旨

山岳トンネル工事のインバート掘削における出来形管理では、従来、掘削作業を中断して基準線 からの下がりを複数断面について、1 断面当たり数点を確認していた。そのため、計測箇所が限定 的となるほか、計測人員が必要とされていた。そこで、面的な計測と計測時間の削減、計測人員の 負担軽減を目的とした「差分計測システム」を適用した。このシステムにより、施工範囲における 3 次元設計データと掘削面の差分寸法を面的に簡易に可視化できる。今回、供用中トンネルの盤ぶ くれ対策工事に適用し、本システムが計測の効率化および出来形の面的な評価に有効であることを 確認した。

キーワード:LiDAR、出来形管理、インバート掘削、効率化

1. はじめに

山岳トンネル工事のインバート掘削における出来形管 理では、従来、掘削作業を中断して基準線からの下がり を複数断面について、1 断面当たり数点を確認していた。 そのため、計測箇所が限定的となるほか、作業の中断と 計測人員が必要とされていた。

そこで筆者らは、計測時間の削減、計測人員の負担軽 減、面的な出来形管理を目的として、計画断面と現状の 出来形の差分を算出する「差分計測システム ¹⁾」(以下、 本システム)を開発した。本稿では、本システムの概要 と道路トンネルの実現場でのインバート掘削出来形管理 への適用結果について報告する。

2. システム概要

2.1 システムの概要と機器構成

本システムは、事前に入力した計測範囲の3次元設計 データ(以下、設計データ)と2D-LiDARをモータに より回転させることで得られる3次元計測データ(以下、 計測データ)の差分を算出し、モニタに図示する。

本システムをバックホウに取り付けた場合の機器構成 を図-1に示す。計測機器(2D-LiDAR、モータ、カ メラ)はバックホウのキャビン上部に取り付けられる。 また、計測機器を制御する PC(以下、制御 PC)内部に 本システムのソフトウェアや計測記録を保持する外部ス トレージ、計測後の評価画面を可視化するモニタはバッ クホウのキャビン内に取り付けられる。これらの電源は バックホウより給電する。 計測データはローカルな LiDAR 座標系での値である ため、設計データのワールド座標系に変換する必要があ る。そのため、両者の座標を関連付ける基準として、リ フレクタを用いる。リフレクタとは、LiDAR のレー ザーを強く反射する反射板(□200mm)を取り付けた ものである。

なお、本システムは三脚での運用も可能である。

2.2 システムによる計測手順

本システムによる出来形計測の手順を図-2に示す。 最初に、事務所等での事前準備として、ワールド座標系 における施工断面の形状を入力した設計データを作成す る。

現場での事前準備として、掘削範囲の周辺にリフレク タ4枚の設置を行う。設置方法は、現場での取り扱いが 容易で作業中にリフレクタが動かないように、単管と雲 台を組み合わせたものを用いる。設置後にワールド座標 系におけるリフレクタ中心の座標値をトータルステー ションで測量し、その座標値をシステムへ入力する。

掘削作業では、従来通りバックホウにより掘削を行う。 掘削の進捗に伴い、掘削を一度停止し、本システムによ る計測を開始する。計測では LiDAR により掘削範囲の 点群データを得る。次に、得られた点群データから4枚 のリフレクタを認識させる。設定した反射強度以上、か つ設定した大きさの範囲内の点群をリフレクタとして自 動抽出する。自動抽出した各リフレクタを表す点群の中 心のローカル座標値と、事前に測量したワールド座標値 を自動で関連付ける。関連付けた座標値から座標変換し、 設計データと計測データの差分値を算出して、その結果 をモニタ上にヒートマップ(以下、評価画面)として表

*技術本部技術研究所土木研究グループ **東日本支社機電部



図-1 システムの機器構成

示する。この評価画面を基に、オペレータは掘削不足の 箇所を面的に把握することができる。

2.3 ファイル構成

本システムのファイル構成を図-3に示す。本システ ムは外部ストレージ内に格納されており、制御・計測を 行うソフト・データ類をまとめた実行フォルダ(LS)、 計測記録を自動生成・保存する記録フォルダ(DATA) から構成される。実行フォルダは、本システムのソフト ウェア、掘削計画となる設計データ、ワールド座標系に おけるリフレクタの中心座標と掘削範囲の四隅の座標を 入力した入力データ、モータなどを制御するパラメータ を定義するシステム設定データ 1、計測ごとに調整が可 能なパラメータを定義するシステム設定データ 2、およ び操作ログを記録するログファイルを有する。記録フォ ルダには、LiDAR による計測の開始操作を行った時点 で、その日時のファイル名が自動生成され、計測時のパ ラメータ情報、カメラ画像、計測データ、内部で計算し た結果、計測時に読み込んだシステム設計データのコ ピー、および表示した計算後のヒートマップが保存され る。

3. 実現場での試行

3.1 試行現場の概要

本システムを試行した対象現場は、トンネル内の盤ぶ くれの影響により路面の隆起が発生している箇所におい て、インバートを構築する工事である。施工条件として、 片側2車線のうち1車線を規制して工事を行っている。 車両の入替が容易ではないため、掘削においては、1 台 のバックホウのアタッチメントを交換して用いた。また、 週末には道路規制を解除する必要があり、インバートコ



図-2 本システムの計測手順

D(外部ストレージ) LS(実行フォルダ) -ソフトウェア 設計データ(掘削計画、点群データ) -入力データ(リフレクタ中心座標・掘削範囲四隅の座標) −システム設定データ1(変更しない値、モータパラメータ) -システム設定データ2(計測ごとに調整できるパラメータ) -ログファイル(操作ログ) DATA(記録フォルダ) 計測日時1「yyyymmddhhmmss」 -計測時のパラメータ情報 カメラ画像 -計測データ -計算結果 -計測時の設計データのコピー 表示したヒートマップ 計測日時2 図-3 本システムのファイル構成



図-4 現場での機械配置

ンクリート打設から舗装復旧までを考慮すると、イン バート掘削に要する時間は約 20 時間に限定される。こ のため、出来形管理だけでなく、機械配置の変更など、 効率的な施工管理が求められる。1 度の道路規制の期間 内に行う施工範囲は 10.5m を基本としている。

図-4に機械配置を示す。今回はバックホウ(0.45m³ 級、チルトローテータ付)を掘削作業のベース機とし、 アタッチメントはバケットと油圧切削機であるドラム カッターを採用した。また、ドラムカッターの駆動用と して、油圧ブレーカー(0.25m³ 級)を採用した。この 油圧ブレーカーはドラムカッターの動力であるとともに、 バックホウでの施工では計画の施工サイクルに合わない 場合に、油圧ブレーカーで作業を行う可能性も考慮した ものである。

本試行では、本システムの有効性を確認するのに加え、 チルトローテータとドラムカッターによるインバート掘 削の適用性についても検証した。

図-5にチルトローテータ(傾斜角範囲:±40°左/ 右、旋回角範囲:360°)を用いたインバート掘削状況 を示す。狭隘な空間のため、バックホウ本体の旋回はほ とんどできない。通常は、油圧ブレーカーで掘削し、端 部においては、機体を入れ替えて施工するが(図-6)、 チルトローテータを装備したことによって先端の自由度 が高まり、1台で端部の掘削まで可能となることを確認 した。

掘削には、チルトローテータおよびドラムカッターを 使用していたが、事前に実施していた室内岩石試験結果 以上の強度を有する地盤が点在した影響により、ドラム カッターの使用は一部にとどめ、油圧ブレーカーによる 施工を行った。

3.2 本システムによる計測精度

図-7にリフレクタの自動認識状況を示す。現場にお いてもリフレクタを自動で検出できることを確認した。

図-8に評価画面例を示す。オペレータは得られた評価画面を基に掘削の過不足を判断する。暖色系(赤)は設計値未満、緑は設計値(許容範囲内)、寒色系(青)は設計値超過、黒色は点群が取得できていないことを意



図-5 ドラムカッターによるインバート掘削状況



図-6 油圧ブレーカーによるインバート掘削状況

味する。点群が取得できない理由としては、乱反射など によりレーザーの反射光が得られない、もしくは遮蔽物 によりレーザーが届かないことが考えられる。

トータルステーションによる測定結果(6測点×7回)を真値として、本システムの計測精度を確認した。 なお、トータルステーションの測点近傍における点群 データの平均値を本システムの計測値とした。これらを 比較した結果、鉛直方向における差の絶対平均は約



図-7 リフレクタの自動認識状況





80mm であった。理由としては、比較した測点が少なく、 かつブレーカーを使用したために仕上げ面が局所的に凹 凸であることが影響したと考えられる。

計測時間については、事前の準備作業で約15分、掘 削を止めて行う計測で約5分を要したものの、掘削作業 をほとんど止めることなく、効率的に計測ができた。ま た、掘削範囲全体を計測することで、設計に対し、余掘 り量を適切に把握できた。加えて、現場試行における本 システムの計測精度は、出来形管理基準^{2),3}を満足して いる。ただし、掘削管理において、この計測精度を考慮 して管理すると、余掘り量が増えることになり、掘削土 およびコンクリートの数量の増大に繋がるため、さらな る精度向上が課題である。

4. おわりに

今回の実現場での試行により、面的な出来形計測が可 能であること、また、従来の出来形計測と比べ、計測に かかる時間が短縮されることも確認できた。今後は、計 測精度の更なる向上を目指して、システムの完成度を向 上させていきたい。

【参考文献】

- 松田顕伍、松本清志、川澄悠馬、今泉克彦、「供用中 トンネルにおける ICT を活用したインバート掘削出 来形管理システムの構築」、土木学会第 78 回年次学 術講演会、VI-117、2023
- 2) 国土交通省、「地上型レーザースキャナーを用いた出 来形管理の監督・検査要領(土工編)(案)」、2022.3
- 3) 東日本高速道路㈱、中日本高速道路㈱、西日本高速 道路㈱、「トンネル施工管理要領」、2020

Flexural Strengthening of Corrosion-damaged RC Bridge Piers Using Ultra-High-Performance Concrete Layers: An Experimental Study

Biswas Rajib Kumar* Takashi Misawa** Takahiro Saito*

Abstract

We developed a method for strengthening RC bridge piers affected by corrosion damage. We examined five single-shaft RC bridge piers of the same dimensions and rebar configuration under reversed cyclic loading, in which we applied axial stress of 1 MPa to the specimens. Of the five specimens, two specimens underwent an average of 10% rebar corrosion (Group 1); another two specimens underwent an average of 15% rebar corrosion (Group 2); and one specimen served as the control. We retrofitted one specimen from each group with ultra-high-performance concrete (UHPC) layers measuring 50 mm in thickness. The results showed that corroded specimens strengthened with UHPC layers exhibit superior structural performance: for example, the maximum load carrying capacity (MLC) of the 15% corroded specimen increased by 24% compared to the sound specimen. Our results show that the proposed approach is highly effective in strengthening corrosion-damaged RC bridge piers.

Keywords: UHPC, strengthening, cyclic loading, rebar corrosion

1. Introduction

Bridges are essential components of the social infrastructure and significantly affect the national economy. Bridges located in marine environments are often exposed to corrosion damage. Given the cost of demolition and reconstruction and associated traffic congestion, replacing an entire damaged bridge may not be feasible. Strengthening damaged bridges is a possible alternative; developing a reliable method for strengthening damaged bridges would represent a major breakthrough.

UHPC is a new construction material that offers structural properties superior to conventional concrete. UHPC offers modulus of elasticity, compressive strength, and tensile strength exceding 44 GPa, 155 MPa, and 19 MPa, respectively,¹⁾ making it an ideal strengthening material for damaged reinforced concrete structures.

Yuan et al.²⁾ examined the strengthening effects of UHPC jackets on the cyclic response of RC bridge piers. The results showed that a UHPC jacket significantly improves strength and stiffness. Dadvar et al.³⁾ examined a strengthening technique involving UHPC jacketing for circular RC columns. The results showed that UHPC jackets significantly increase load-carrying and energy absorption capacity.

Little is currently known about strengthening corrosiondamaged RC bridge piers using UHPC layers. To address this research gap, we sought, in this study, to develop a strengthening scheme for corrosion-damaged RC bridge piers that would restore structural performance without affecting the original geometry. We used UHPC, an advanced strengthening material, to enhance the structural performance of the corroded RC bridge piers. We examined five single-shaft RC bridge piers, including sound, corroded, and retrofitted specimens, under reversed cyclic loading. Important performance indices for evaluating the performance of the strengthening scheme included MLC, ductility, stiffness degradation, energy absorption, and curvature. The results obtained from this study should prove useful in formulating strategies for maintaining corrosion-damaged RC bridge piers.

2. Experimental study

2.1 Specimens

Our investigation included five single-shaft RC bridge piers, fabricated to the same dimensions and reinforcing configurations. The specimens were cast with a height of 1,650 mm and a square cross-section of 400 mm, along with a footing with dimensions measuring 1,500 mm x 1,500 mm x 850 mm. Each specimen was reinforced with 16 mm deformed reinforcing bars. The reinforcement ratio for the longitudinal rebars was 2%. We used 13 mm deformed reinforcing bars as stirrups. The specimens were designed in accordance with the design code of the Japan Society of Civil Engineers (JSCE, 2007).⁴⁾ The reinforcement details can be seen in Figure 1(a). The RC bridge pier specimens were subjected to combined

^{*}技術本部技術研究所土木研究グループ **技術本部技術研究所



Figure 1. (a) Specimen details (b) Corrosion setup (c) Location of UHPC layer (d) Photo of experimental setup

axial and reverse cyclic loading. During the reversed cyclic loading, an axial force of $160 \text{ kN} (1 \text{ N/mm}^2)$ was applied to each of the five specimens. Of the five specimens, Case 1 was used as the control specimen; Cases 2 and 3 were subjected to 10% rebar corrosion; and Cases 4 and 5 were subjected to 15% rebar corrosion (see Table 1).

2.2 Material properties.

UHPC, deformed rebar, and normal concrete were the materials used in the experimental study. Initially, the specimens were fabricated with concrete with an average compressive strength of 25 MPa. The 28-day average tensile strength of concrete was determined to be 1.7 MPa; the elastic modulus of the normal concrete was determined to be 29.5 GPa; and the yield strength of longitudinal reinforcements (D16) and stirrups (D13) was determined to be 390 and 383 MPa, respectively. UHPC was used to strengthen two corroded specimens. The mix proportion the UHPC used in the of experiment was 185:1108:1129:154:12.2 for water: cement: sand: metal fiber: water reducing admixture. In the UHPC mix, we used only one type of steel fiber. The straight fibers were 20 mm in length and 0.2 mm in diameter. The 28-day compressive and tensile strength of UHPC was 143 MPa and 13.7 MPa, respectively. Based on the results, the elastic modulus and Poisson ratio, respectively, were determined to be 51.8 kN/mm² and 0.22.

Corrosion process

After the fabrication and curing of the test specimens, we performed accelerated corrosion testing. The targeted area for rebar corrosion was enclosed with a plastic tank, as shown in Figure 1(b). This tank was filled with a 5% NaCl solution. Copper plates were placed around the specimen; these steel plates were connected to the negative terminal of the power supply and used as cathodes. Longitudinal rebars were connected to the positive terminal and used as anodes. Since the study goal was the flexural strengthening of corrosion-damaged RC bridge piers, we prevented corrosion of the stirrups using suitable paints, while the longitudinal rebars were connected to the positive terminal of the power supply and used as anodes. The electric current was 0.5 mA/cm² during the corrosion process. Since corrosion damage at the connection point between pier and footing is understood to be more important due to potential plastic hinge formation, we limited corrosion damage to a height of 600 mm above the footing. The time required to achieve the desired rebar corrosion was determined by the following equation:

$$t(sec) = \frac{m_{loss}.n_{specimen}.C_{Faraday}}{Current(amp).M_{specimen}} (1)$$

where $C_F = 96500 \text{ C/mol}$; $m_{\text{loss}} = \text{required mass loss}$; $n_{\text{specimen}} = 2$; and $M_{\text{specimen}} = 55.8 \text{ mol}$

| Group | Cases | Remark | Corrosion ratio (%) | Max. corrosion ratio (%) | Maximum crack width |
|---------|--------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------|
| | Case 1 | Sound | 0 | | 0 |
| | Case 2 | 10% cor. | 10 | 12.9 | 0.2 |
| Group 1 | Case 3 | 10% cor.& retrofitted with UHPC | 10.1 | 13 | 0.15 |
| Group 2 | Case 4 | 15% cor. | 14.7 | 20.4 | 0.5 |
| | Case 5 | 15% cor.& retrofitted with UHPC | 15.6 | 19.5 | 0.2 |

Table 1: Experimental cases, corrosion ratio and crack width

Experimental setup

After the corrosion process, the whole concrete cover in the corroded area of Cases 3 and 5 was removed by water jet. The specimens were retrofitted with UHPC layers measuring 50 mm in thickness. The location of the UHPC layers can be seen in Figure 1(c). The experimental setup used for the reverse cyclic loading can be seen in Figure 1(d). The specimens were connected to the rigid foundations of the experiment room with eight threaded rods. Specimens were connected to vertical and horizontal hydraulic jacks to apply axial and lateral forces. The loading scheme commenced with the application of an axial load: The specimens were subjected to a constant axial stress of 1 MPa, which is equivalent to 160 kN. After the application of axial force, the specimens were subjected to reversed cyclic loading with a drift ratio ranging from 0.25% to 8%, as shown in Figure 2. Load cells were mounted in the hydraulic jacks to measure applied loads. Horizontal and vertical displacements were measured using linear variable displacement transducers (LVDTs). A total of 27 LVDTs were deployed to measure vertical and horizontal displacement. Strain gauges in the steel bars were used only in the sound specimen; they were omitted from the other specimens because the rebars were damaged by electric corrosion.

RESULTS AND DISCUSSION

Corrosion-induced cracking

In the corrosion process, corrosion products appear on the steel bar, with the amount of corrosion products continuing to grow. As the amount of corrosion product increases, it exerts pressure on the surrounding concrete, generating cracks in the concrete cover. The crack widths of the corroded specimens increased considerably with the increase in corrosion ratio. In general, corrosion cracks emerged parallel to the longitudinal rebars. The maximum crack widths recorded for Cases 2, 3, 4, and 5 were 0.2 mm, 0.15 mm, 0.5 mm, and 0.2 mm, respectively.



Figure 2. Quasi-static cyclic loading history



Figure 3. Mass loss of the longitudinal rebars

Corrosion process

Following the loading test, the longitudinal rebars in the corroded area were removed from the concrete to determine the extent of the corrosion. Next, to eliminate the corrosion products, we submerged the rebars in a 10% diammonium hydrogen citrate solution at 60 °C. Figure 3 presents the corrosion distribution for Cases 2 to 5. Each rebar was assigned a unique number. Since the corrosion process in this study was induced by chloride, corrosion occurred in a non-uniform manner. The average mass loss or corrosion ratio was determined to be 10.1%, 10.0%, and 15.6%, and 14.7% for Case 2, Case 3, Case 4 and Case 5, respectively. In Case 2, the maximum and minimum corrosion ratios of a single rebar were determined to be 12.9% and 6.7%; in Case 3, these were determined to be 13.0% and 7.6%. In Case 4, the maximum and minimum corrosion ratios were determined to be 20.4% and 11.7%; in Case 5, the maximum and minimum corrosion ratios were determined to be 19.5% and 11.1%, respectively. The differences between the maximum and minimum corrosion ratios in Cases 2, 3, 4, and 5 were determined to be 48%, 42%, 43%, and 43%, respectively. Table 1 summarizes the various corrosion ratios and crack widths. Note that corrosion pit depth increases with increasing corrosion ratio. The average pit depths obtained for Cases 2, 3, 4, and 5 were 1.0, 0.9, 1.2 and 1.1 mm, respectively.





Hysteretic response

Figure 4-5 compares the hysteretic response of corroded and sound specimens. The maximum load capacity for the sound specimen in the north (negative direction) and south (positive direction) was 155 kN and 165 kN, respectively. Case 2 demonstrated 6% and 3.9% less maximum load capacity (MLC) in the positive and negative loading directions, respectively. However, Case 3 demonstrated remarkable improvements in MLC of 24% and 15.5% in the positive and negative loading directions. Compared to Case 2, the MLC increased by 32.3% and 20.1% in the positive and negative loading direction, respectively. It is noteworthy that the difference in MLC between the positive and negative directions was 12.7%, which can be attributed to cross-sectional non-uniform corrosion. Case 4 was subjected to 15% rebar corrosion, while the maximum load-carrying capacity was



Figure 5. Backbone curve comparison of the sound, corroded, and strengthened specimens

reduced by 9.2% and 6.5%, respectively, compared to the sound specimen in the positive and negative loading directions. However, Case 5 demonstrated 20% and 24% higher maximum load-carrying capacity in the positive and negative loading directions compared to the sound specimen.



Figure 6. Comparison of crack pattern of the test specimens at (a) maximum lateral load and (b) final stage of loading



Figure 7. (a) Photo of failed surface (b) UHPC layer thickness (c) Failure Analysis

Cracking patterns and failure modes

Crack propagation was recorded in every loading cycle. The cracking patterns of the test specimens at maximum lateral load and final stage are shown in Figure 6. As shown in Figure 6, the sound and corroded specimens demonstrate flexure dominant failure. The black and red lines represent cracks in the positive and negative loading cycles, respectively. In the sound specimen, the first flexural crack appears at the bottom at the lateral displacement of 3.5 mm. In the final stage of loading, the flexural cracks are distributed up to 900 mm from the bottom. These flexural cracks are distributed with an approximate spacing of 150 mm. The corroded specimens showed fewer cracks. The reason for this behaviour is the deterioration of the



Figure 8. Comparison of ductility

bond between the steel bar and the surrounding concrete. The increased lateral displacement results in significant spalling of the concrete cover. This behaviour can be attributed to the buckling of the longitudinal rebar and corrosion-induced cracking. Horizontal cracks resulted in flexure dominant failure in the sound and corroded specimens. The corroded specimens reinforced with the UHPC layers demonstrated greater control of crack propagation. Crack widths were notably smaller than with the sound and corroded specimen. Steel fibers in the UHPC matrix resulted in significant crack resistance due to bridge effects. In addition, the UHPC layers provided good confinement and resulted in less rebar buckling and spalling of the concrete cover. This behaviour helps achieve significant lateral resistance in UHPC-strengthened specimens.

Case 5 failed due to insufficient layer thickness, as shown in Figure 7. The desired layer thickness in this study was more than 60 mm. However, in Case 5, the average layer thickness was less than 50 mm. This result indicates that the UFC layers pushed against the surrounding concrete during reversed cyclic loading, resulting in tension and failure in the surrounding concrete. The results suggest that the length along which the tensile force is applied is about three times the thickness of the UFC layer. Based on these observations and depending on UFC layer thickness, the lateral load-resisting capacity of Case 5 can be calculated from the following equation, where X is the thickness of the UFC layer and 3X is the influence length. TSC is the tensile strength of concrete and LCL is the length of the UFC layer.

Lateral load resisting capacity = $TSC \times LCL \times \sqrt{X^2 + (3X)^2}$ (2)

Ductility

Rebar corrosion causes bond loss between rebar and concrete, reduces rebar cross sections, and generates spalling of the cover concrete. These factors reduce ductility. In this study, Case 2 and Case 4 demonstrated significantly less ductility than the sound specimen (see Figure 8). Ductility was reduced by 14% and 17% when Case 2 and Case 4 were subjected to 10% and 15% rebar corrosion, respectively. Interestingly, ductility was reduced by only about 7% in corroded specimens retrofitted with UHPC layers. This performance can be attributed to the steel fibers present in the UHPC and its superior material properties. Here, ductility is defined as the ratio between ultimate and yield displacement. Yield displacement is



Figure 9. Stiffness degradation of sound and corroded specimens

determined by visual inspection (considering the change in stiffness); ultimate displacement corresponded to ultimate load (85% of MLC).

Stiffness degradation

A major goal of strengthening corroded RC bridge piers with UHPC layers is to improve stiffness. We evaluated the effects of UHPC layers on the stiffness of the corrosion-damaged bridge piers. Figure 9 shows the reduction in stiffness of the sound and corroded RC bridge piers during reversed cyclic loading. Here, stiffness is defined as K = load/deflection. The stiffness (K) of each cycle is determined by calculating the slope of the lines connecting the highest points of the loading. The figure shows the average of both the positive and negative loading cycles. As Figure 9 shows, the magnitude of the stiffness declines with greater deflection. Note that the corroded specimens strengthened with UHPC layers demonstrate significantly higher stiffness than the sound and corroded specimens. For example, at a deflection of 3.5 mm, Case 3 and Case 5 demonstrated about 33% and 31% higher stiffness than Case 2 and Case 4, respectively.



Figure 10. Comparison of dissipated energy

Energy dissipation

We calculated the area in the hysteresis curve in a single loading cycle to determine the energy dissipation for sound, corroded, and retrofitted RC bridge piers. The energy dissipation capacity increases with the size of the enclosed area. Figure 10 illustrates the cumulative energy dissipation of the sound, corroded, and retrofitted specimens. As shown in Figure 10, hysteretic energy dissipation increases with greater deflection of the test specimen. Corrosion-damaged specimens retrofitted with UHPC layers demonstrate significantly higher energy dissipation than sound and corroded specimens. For example, Case 5 demonstrates approximately 100% higher cumulative energy dissipation capacity than Case 4, when displacement reaches 20 mm. Overall, Case 5 demonstrated 33% higher cumulative energy dissipation than Case 4. On the other hand, Case 3 displayed 59% higher cumulative energy dissipation capacity than Case 2.

CONCLUSIONS

This study proposes a flexural strengthening method for corrosion-damaged RC bridge piers using UHPC layers. In our study, Case 1 was a sound specimen; Cases 2 and 3 were subjected to 10% rebar corrosion; Cases 4 and 5 were subjected to 15% rebar corrosion. Cases 3 and 5 were retrofitted with UHPC layers measuring 50 mm in thickness. The following conclusions can be drawn from our study:

- Strengthening corrosion-damaged RC bridge piers with UHPC layers is an effective repair option. Strengthened specimens demonstrate significantly higher cracking loads, yielding loads, and MLC. The strengthened specimens restored structural performance without affecting original geometry. In Case 3, MLC increased by 24% over the sound specimen.
- RC bridge piers retrofitted with UHPC layers demonstrated significant crack control and increased durability.
- 3. RC bridge piers strengthened with UHPC layers demonstrated significantly higher initial stiffness than sound and corroded specimens. In the first loading cycle, Case 3 and Case 5 demonstrated about 33% and 31% higher stiffness than Case 2 and Case 4, respectively.
- UHPC jacketing improves the displacement capacity or ductility of corroded specimens. Case 3 displayed 7.3% higher ductility than Case 2.

 Energy dissipation capacity increased significantly when corroded specimens were strengthened with a UHPC jacket. Case 3 displayed 59% higher cumulative energy dissipation capacity than Case 2.

[References]

- Biswas RK, Saito T, Misawa T, Iwanami M. Structural behavior of severely corroded RC beams retrofitted with UHPC layer: an experimental study. Innov Infrastruct Solut 2023;8:322.
- 2) Yuan W, Wang X, Guo A, Li C, Dong Z, Wu X. Cyclic performance of RC bridge piers retrofitted with UHPC jackets: Experimental investigation. Engineering Structures
- Ali Dadvar S, Mostofinejad D, Bahmani H. Strengthening of RC columns by ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) jacketing. Construction and Building Materials 2020;235:117485.
- 4) JSCE, 2007. Standard Specifications for Concrete Structures

建設現場でのバイタルデータ取得方法の確立 - ヒューマンエラー軽減に向けたバイタルデータの活用-

Method for Acquiring Vital Sign Data at Construction Sites

- Utilizing Vital Sign Data to Reduce Human Error -

麻生真司* 山口 治** 大下和彦***

要旨

建設現場においては、ヒューマンエラーに起因する災害の発生割合が高く、その調査・分析にバ イタルデータを用いることが有効と考えられるが、機器の導入やデータ取得に手間がかかり建設作 業での適用には課題が多い。そこで、スポーツ選手のコンディション管理で使われるアンケート型 管理ツールで主観データを取得する手法を建設業向けに最適化して適用した。屋外の処分場建設現 場で夏期2ヶ月半、20名に対して実施した結果、入力の継続性が91.5%と高く、実用性が確認でき た。また、主観データの記録を分析した結果、夏期作業での水分摂取の不足が明らかになったほか、 睡眠の質の傾向、疲労度の曜日別傾向に一定の傾向が見られた。

キーワード:バイタルデータ、ヒューマンエラー、主観データ、熱中症

1. まえがき

建設現場では、施工場所、気候、工事の目的、施工期 間等が全て異なる条件のもと、多くの作業員や建設機械 が現場に混在する状態で工事が進められる。建設現場の 運営者は、関係法令を遵守した上で日々、時間とともに 変化する現場の状況に配慮した管理が求められる。すな わち、運営者は入念な計画と確実な実施、現場の安全管 理、関係者の教育等を行い、様々な災害防止対策を講じ なければならない。

労働災害統計によると、建設業の死傷者数は昭和30年 代に10万人を超える水準であったが、昭和53年を境に 年々減少傾向にあり、近年は1.5万人程度で推移¹⁾してい る(図-1)。昭和50年代中盤以降、死傷者数が減少し た背景には、建設現場の各種設備・機械の改良、安全保 護具の充実などハード面の対策が進んだことが挙げられ る。また、ソフト面の対策としては、関係法令の整備と



罰則の付与、現場での管理手法やルールの厳格化、安全 教育等の充実により、現在の水準に至ったと考えられる。

労働災害による死傷者数が低い水準を維持している現 在では、災害発生事例の多くはヒューマンエラーが要因 とされており、労働災害の8割に、人間の不安全行動が 含まれるとされる²。

一方、建設業の従事者については、高齢化と入職者の 減少により慢性的な人手不足が続いている。この状況を 打開すべく、機械化技術やICT機器等による業務効率化 の取組みが進んでいるが、人手不足の解消には至ってい ない。また、建設業では時間外労働の上限規制の猶予期 間が終了し、2024年4月から本格適用となったことで新 たな懸念が指摘されている。具体的には全体工期の延伸 や人員の増加がないまま、これまでと同等の作業を短時 間で行わなければならない状況や、作業従事者の負担が 増加して作業確認の漏れ・ゆとりの欠如などに起因する ヒューマンエラーの発生等が挙げられる。

高木³は、ヒューマンエラーを発生原因ごとに12に分類している(**表**-1)。そのうち、「1.無知・経験不足」、「2.危険軽視等」、「3.不注意」、「4.連絡不足」、「5.集団欠陥」などが重要であり、それらの対策と課題について述べている。

| 表 1 | ヒューフ | 、 | の百田分粕 | 3 |
|-----|------|------|-------|---|
| 衣一। | | ノエフー | の原因力短 | - |

| | エノの赤西方類 |
|-------------------------|----------------------------------|
| 建設現場での重点度を加味した12分類 | 7. 場面行動本能 |
| 1. 無知、未熟練、不慣れ、経験不足、教育不足 | 8.慌て、驚愕、パニック |
| 2. 危険軽視、安易、慣れ | 9. 錯覚 |
| 3. 不注意 | 10. 中高年の機能低下 |
| 4. 連絡不足 | 11.疾病、疲労、体質、酷暑等 |
| 5.集団欠陥 | |
| 6. 近道、省略行動本能 | 12. 単調反復作業、単調監視による意識低下 |

*土木本部土木設計部 **東日本支社リニューアル工事部 ***西日本支社安全品質環境部

一方で、身体的要因である「10.中高年の機能低下」 や「11.疾病、疲労、体質、酷暑等」を設けているが、 詳細の分析や今後の対策等には触れていない。

近年では夏の気温が非常に高く、長期にわたり暑熱環 境が続くことから熱中症の発症リスクが高まり、発症時 の重篤度が大きい。建設現場、特に屋外での作業では個 人の体調の可視化が難しく、本人の申告に依存するとこ ろが大きい。そのため、ヒューマンエラーの12分類³⁾で 示す「11.疾病、疲労、体調、酷暑等(以降、「11疲労 等」)」については、実態の把握および対策の立案と実施 が望まれる。

建設現場における「11疲労等」の実態を知る上で、作 業員の作業中の体力の消費、脱水、疲労の蓄積等のバイ タルデータを取得し可視化することが有効であると考え る。しかし、バイタルデータを計測・取得する機器は医 療分野で活用されているが、設備の大きさや価格、計測 精度の面で建設現場に適していない。また、建設現場で は所属会社が異なる多くの作業員が従事することを考慮 すると、現場で直接計測できる簡易な方法が求められる。

2. 既往の研究サービスと課題

2.1 計測・取得に関する既往の研究とサービス

近年では、ヒューマンエラー防止を目的としたバイタ ルセンシングに関する学術的研究が行われている。

厚生労働省は、熱中症対策としてウェアラブルセンサ ーを活用した効果的な予防法の検証を2021年に行った⁴⁾。 論文では、生体データをリアルタイムに分析し、リスク 評価とアラートを発出することで熱中症予防に一定の効 果があることが示された。

経済産業省は、幅広い産業分野の企業(プラント、建 設、石油元売、損害保険、食品加工等)を対象にして、 ウェアラブルデバイスに関する技術動向調査を2023年に 行った⁵。この中で、建設分野では現場特有の短期間従 事による継続性の困難さ、多層請負構造による機器装着 の強制の困難さなどの問題点が抽出された。

さらに、国土交通省では、バイタルデータを含むビッ グデータを活用した事故防止対策の推進事業について、 2017年に調査を行った⁶。この調査では、物流分野を対 象として、運送ドライバーと車両から得られるビッグデ ータをもとに、事故防止運行モデルを構築・評価してい る。例えば、ドライバーの「疲れ度合い」を予測する手 法として、自身の運行データと過去の疲れ具合の相関を 重回帰分析により算出している方法等がある。

2.2 既往のサービスと課題

バイタルデータを継続的に取得して傾向や変化を把握 することと、改善の取組を並行して進めることで、災害 防止の効果が得られる。前項の文献をはじめ種々の研究 成果を経て、現在ではバイタルセンシングによりヒュー マンエラーを防止する製品やサービスが多数実用化され ている。

しかし、実際の建設現場での運用に際しては、バイタ ルデータが個人に帰属する情報であることを考慮した運 用方法や基準が必要と考える。また、継続的なバイタル データの取得には、機器の導入やデータ取得の手間と費 用が適切であるか、所属会社や作業内容が異なる不特定 多数の従事者が同時に作業する建設現場に適したサービ スであるか等を調査する必要がある。

そこで、本報告では以下の2点について調査し、建設 現場におけるバイタルデータの取得方法を検証した。

- i. 法的観点を踏まえたバイタルデータの取得方法、 個人情報の取扱い
- ii. 現場で適用できる簡易で継続性のあるバイタルデ ータ取得方法の確立と現場適用

3. バイタルデータの取扱い

3.1 法規制調査

建設現場の作業員から取得するバイタルデータについ て、個人情報保護法等の法的規制の有無とその範囲、取 扱い時の本人の同意や承諾等の厳守事項、および現場で の運用について、本件に精通する弁護士の協力のもと整 理した。

バイタルデータ取得において考慮すべき法律や規則と して、①個人情報保護法、②プライバシー/GDPR(EU 一般データ保護規則)、および③労働安全衛生法が該当 した。また、一部のバイタルデータ取得機器・方法には、 医師の医学的判断を伴う行為(医行為)が含まれる可能 性がある。そのため「医行為」を明確化すべく、④医 療・医薬品医療機器関連の調査を実施した。

①個人情報保護法

バイタルデータは、現在の運用においてデータ単体で は個人識別性を持たないため、現行法の「個人情報」の 定義に該当しないものも含まれる。一方で、それが特定 の個人と関連づけて管理される場合には、個人情報に該 当する。

②プライバシー/GDPR (EU 一般データ保護規則)

 EU が 2018 年に施行した一般データ保護規則 GDPR (General Data Protection Regulation) に則り、プライバ シー保護の観点から、バイタルデータを取得・活用する 取り組みは、本人の承諾を得ることが前提と考える。
 ③労働安全衛生法

労働安全衛生法では、バイタルデータの適切な取得・ 活用は、事業者による健康管理および作業管理を果たす ための有益な手段に位置づけられる。

④医療·医薬品医療機器関連

時計型やメガネ型などの身に着けるタイプのバイタル センサーにおいては、「医行為」に該当しないと考える。 しかし、直接的な身体接触(コンタクトレンズのような 眼球接触等)や、手術を伴うデバイスタイプ(埋め込み 型等)は「医行為」に該当する可能性が高く、適用には 十分な検討が必要となる。

3.2 法的観点における課題と対応策

前述の法規制調査で明らかになった遵守事項・配慮事 項を明確にするため、「A.実施スキームの明確化」、

「B. データの利用目的」、「C. 本人の同意」、「D. 社内体制」、「E. データ管理」、「F. 損害賠償への 対応」の6項目に区分した。それぞれの主な課題と対応 策について、バイタルデータを活用するためのチェック 項目とチェックリストを作成した(図-2)。

A. 実施スキームの明確化

1 取得主体と活用フローの共有:建設業では、請負形 態が多層構造であるため、現場作業員のバイタルデータ の取得主体や活用の内容を元請企業と協力業者(直接雇 用)の双方で明確化する。

B. データの利用目的

2
利用目的の特定:個人情報保護法に基づき、具体的 に利用目的を特定する。「所属企業(または従事する現 場)における従業員の業務配分および健康を適正に管理 するため」「建設現場作業で事故や災害を起こさないた めの健康状態であるか把握するため」などの具体的な利 用目的を決定する。

3利用目的の明示方法の検討:特定した利用目的を、 本人に明示する方法を検討する。すでにプライバシーポ リシーがある場合は、改訂を含めて検討する。利用目的 の認識相違によるクレーム防止の観点から、理解を促す ために個別に本人に告知して説明する機会を設ける等の 対応が必要である。

4 利用目的の遵守:データ分析の際に利用目的を逸脱 しないよう留意する。また、組織的に利用目的を遵守す る体制を構築する。

<u>C.</u> 本人の同意

5 同意取得方法の検討:法令上、同意取得の方法につ

いて制限はないが、バイタルデータは重要性の高い情報 であるため、認識相違に基づくトラブルを防止する必要 がある。そのため、ロ頭ではなく書面または電子メール 等の記録可能な媒体を用いて取得することが望ましい。 6同意文言と第三者提供の検討:第三者にデータを提 供する場合、データ取得についての同意と第三者提供に 係る同意の双方を同一の機会に取得することが合理的で あるため、汎用的な同意依頼書の策定を検討する。また、 上記書式制定のため、第三者提供を行う先の範囲を具体 的に検討する。

D. 社内体制

7社内規程・必要書式の整備:制定すべき規程類と書式を検討する。制定済みであっても新規にバイタルデータを対象に含める場合には、改めて個人情報保護法に準拠した内容かチェックする必要がある。その際、調査等対象者の人権への配慮、調査対象者に生じうる危険と不快に対する説明の場を設けているか確認する。

8 従業者研修の検討:データ取扱者を対象とした研修 実施を検討する。

9 組織体制:苦情処理窓口の設置(個人情報保護法第 35条)、個人情報保護管理者の設置を検討する。

<u>E. データ管理</u>

10委託の要否:データ管理のためクラウドサービスや、 情報システムの保守等を第三者に委託する必要性を検討 する。委託する場合には、個人情報保護法対応(委託先 の監督義務、委任契約の内容等)が必要となる。

11 データの安全管理措置:個人情報保護法に基づく安 全管理措置を講じる必要がある。具体的には、組織的安 全管理措置、人的安全管理措置(従業者に対する教育・ 訓練等)、物理的安全管理措置(入退館管理、データ盗 難等防止措置)、技術的安全管理措置(システム制御、 不正アクセス対策等)のそれぞれについて、高い水準の 安全管理措置が求められる。

<u>F. 損害賠償への対応</u>

12損害賠償への対応:一般にバイタルデータは、普遍

| 区分 | | 主な課題 | | 対応策(アクションタイトル) | _ | _ 区分 | チェック項目 | 結果 | 留意。 |
|--|----|-------------------|----|---------------------------|---|----------------|--------------------------------------|----|-----|
| 実施スキーム の明確化 | H | 取得主体と活用フローの共有 | Η | 一次的なデータ取得主体の明確化 |] | 実施スキー ムの明確化 | 一次的なデータ取得主体が明確化されているか | | |
| 6 | ĥſ | 2 利用目的の特定 | Н | 具体的な利用目的の特定 |] | B | 具体的な利用目的について、特定/明確化されているか | | |
| _ | | 3 | Ы | 既存のプライバシーポリシーの改善検討 |] | | 既存のプライバシーポリシーに対する抵触事項の有無を 確認しているか | | |
| データの 利田日的 | Ю | 利用日的の明示力法の便割 | ГЧ | 本人告知/説明機会の設定検討 |] | データの 利用目的 | データ提供者となる本人告知/説明機会の設定が できているか | | |
| 15/0445 | II | 「利用日的の満立」 | | 利用目的の範囲を超えた取組みでないことの確認 |] | | 利用目的の範囲を超えた取り組みになっていないことを 確認しているか | | |
| | 11 | 4 利用日的の遵守 | Ц | 利用目的遵守の体制を構築 |] | | 利用目的の遵守体制/手順を構築できているか | | |
| • | Ы | 5 同意取得方法の検討 | Н | 同意取得方法の検討(書面または電子メール等) |] | O | 同意取得方法の検討がなされているか | | |
| 本人の同意 | Ηſ | 同意文言と | Ы | 汎用的な同意依頼書の策定(データ取得/第三者提供) |] | 本人の 同意 | 同意依頼書が準備できているか (データ取得/第三者提供) | | |
| |]] | ┃ ● 第三者提供の検討 7 | | 第三者提供範囲の具体的な検討 |] | | 第三者提供範囲の具体的な検討ができているか | | |
| • | Г | 社内規程、必要書式の整備 | Н | 個人情報保護に係る規程類と書式の検討/見直し |] | O | 個人情報保護に係る規程類と書式の検討/見直しが できているか | | |
| 社内体制 | H | 8 従業員研修の検討 | Н | データ取扱者を対象とした研修の検討(計画/実施) |] | 社内体制 | データ取扱者を対象とした説明会/研修等の実施を 検討しているか | | |
| | 4 | 9 組織体制 | Н | 苦情処理窓口/個人情報保護管理者の設置の検討 |] | | 苦情処理窓口/個人情報保護管理者の設置が できているか | | |
| 9 | Ì | | Ы | データ管理の委託要否の検討 |] | e | データ管理の委託要否の検討と、必要な委託契約が できているか | | |
| データ管理 | Ю | | ГЧ | 委託する場合の個人情報保護法対応の実施 |] | データ 管理 | 委託する場合の個人情報保護法の対応ができているか | | |
| | 4 | ①データの安全管理措置 | Н | 個人情報保護法に基づく安全管理措置の実施 |] | | 個人情報保護法に基づく安全管理措置が 実施できているか | | |
| し損害賠償へ | | 12 指定時間への対応 | Ы | 過去事例の確認と賠償額(可能性)の確認 |] | の損害賠償 | 情報漏洩に伴う損害賠償の種類と規模感が 特定できているか | | |
| の対応 | Π | | [4 | 損害保険加入判断/補償内容の評価 |] | への対応 | 損害保険加入の判断と補償内容の評価ができているか | | |

図-2 バイタルデータ活用における法的観点からのチェック項目とチェックリスト

性や特定性、永続性の観点から高い情報価値を有してお り、悪用された場合の損害も甚大になるおそれがあるこ とから、賠償額が多額になる可能性に留意が必要である。

4. 既往技術の整理と現場試行

既往のバイタルセンシングデバイスを調査し、それぞ れの特徴、デバイスの大きさ、計測精度、価格の比較を 示した(図-3)。専用設置型、据え置き型は、計測精 度が高いが持ち運べないため建設作業中の常時計測は不 可能である。

建設現場での作業中の着用を想定した場合、現在では 携帯型や時計、メガネ、シャツなどのウェアラブルタイ プが適しており、既往のサービスで適用されている。ま た、将来的には計測精度の向上、低価格化が進むことで 貼付型(パッチタイプ)の適用可能性があると考える。 なお、埋め込み型(インプランタブル)は研究段階であ るものが多いことや、「医行為」となる可能性が高い点、 倫理的な観点から普及の実現性は低いと考える。

5. 既往技術の試行と課題の抽出

既往のバイタルデータ取得技術の効果検証および改善 点の抽出のため、実際に建設現場で働く作業員を対象に シャツ型およびウォッチ型のセンシング技術を試行した。

5.1 シャツ型デバイスの試行

安全管理を目的とした既往技術のうち、暑熱環境リス クをリアルタイムで把握できるシステムとして、シャツ 型デバイスを試行した。本デバイスは、着用した作業員 の心拍、温度、加速度を取得し、作業環境と合わせてク ラウドで暑熱リスクを算出して、作業者および管理者に リアルタイムで通知するシステムである。

暑熱リスクが高い屋外現場において、本デバイスを作 業員 10 名に対して 1 ヶ月間試行した。その結果、着用 した作業員の熱中症リスクを数値化することができ、休 憩時間等の作業管理が可能となった。これにより、試行 現場での熱中症対策が適切に行われ、暑熱リスクの通知 (アラートの発出)が 0.06 回/日と少ない結果となった。

しかし、発汗状態でのシャツ着脱の困難さ、代替ウェア の管理の煩雑さなどから継続性に課題が残った。

5.2 ウォッチ型デバイスの試行

シャツ型デバイスと比較して着用の心理的ハードルが 低いとされるウォッチ型デバイスについても検証した。 ウォッチ型デバイスには、全作業員の業務環境や体調に ついてリアルタイムで把握し一元管理できるシステムを 選定した。

ウォッチ型の通信は、現場に配置したローカルネット ワークで収集されるため、山間部などの LTE 通信が困 難な場所でも適用できるメリットがある。本デバイスに ついては、暑熱リスクが高くなる5月~6月の1ヶ月間、 屋外現場において元請職員と作業員の計10名に対して 試行した。

その結果、熱中症アラートの誤作動・誤検知が多く、 実適用には改善が必要な内容であった。使用感について はシャツ型デバイスと比較し着用の心理的ハードルが低 いと考えていたが、毎日の充電や腕への装着による作業 への抵抗感等があり、継続的な使用の支障となった。

2 つの試行を経て得られた共通の課題として、①デバ イスのコンパクト化(単体通信、作業を阻害しないも の)、②通信環境の整備・確実性、③使用者(建設作業 員)の理解促進が挙げられる。また、センシングデバイ ス(シャツ、ウォッチ等)が作業に支障することや、汗 やかぶれでデバイスを長時間付けられない等の理由で継 続使用が困難な例が見られた。

6. 新たな手法の検討

6.1 アンケート型管理ツールの概要

既往技術で課題となった点を解決でき、簡易で継続性 のある方法として、常時計測・リアルタイムアラートを 行う方法ではなく、まずは作業の前後に自身の体調をア ンケート式で入力する方法を考案した。類似のサービス



図-3 バイタルセンシングデバイスの比較

を調査した結果、スポーツ選手のコンディション管理で 使われているアンケート型管理ツールである ONE TAP SPORTS(以下、管理ツール)を建設業向けに改良して 適用することとした⁷。

管理ツールは、入力者自身の疲労度、睡眠の質といっ た主観データや、睡眠時間、体重、水分摂取量などの定 量的な客観データを、現場の環境に応じて組み変えて設 定し蓄積することができる。これにより、それぞれの現 場での日々のデータを蓄積・解析することで、作業員の コンディションを把握し、運動・作業の量や種類の調整、 改善プログラムの実施などを行うことができる。また、 常に持ち歩くことが多いスマートフォンを使うことで、 容易に入力ができるために継続性が高い。

建設現場では、計測の継続性を向上させるため、1回 の入力時間を短くし、当日の始業前に実施する作業内容 の確認や危険予知と同じタイミングで入力することとし た。また、個人端末では入力や管理が不慣れな作業員も おり、時間がかかることに配慮し、作業班単位でタブレ ット端末に入力することとした。加えて、あらかじめ登 録した自身の顔写真をタップして入力を開始するインタ ーフェースの採用、数値入力項目のレンジスライダーへ の変更、少ない質問数(6問)等の工夫により、入力ミ スの軽減、時間の短縮が実現した。

6.2 現場試行

【検証項目】管理ツールが建設現場で適用できるか判断 するために稼働中の建設現場で試行し、①測定の継続 性・課題の抽出、②測定結果の傾向の把握と改善案の検 討を行った⁸。

【適用現場】夏期の熱中症の早期発見や予防を行うため、 屋外の廃棄物処分場建設現場を選定し、8月後半から10 月末迄の2ヶ月半の期間で実施した。

【対象者】屋外作業に従事する職種の作業員を対象として、本研究の趣旨を説明した上で同意を得た方 20 名に 測定を依頼した。年代構成は、30 代4名、40 代5名、 50 代7名、60 代4名であり、試行した建設現場の人員 構成に近い配分であった。対象者は事前に生活習慣アン ケートに回答してもらい、個人特性を把握した。

【測定方法】始業時に行う作業内容の確認および危険予知活動の一環として、測定項目(後述)をタブレットからデータ入力した(図-4)。入力場所は作業員休憩所(屋内)とし、タブレット入力に不慣れな作業員は他の人に聞くことで確実に入力できるようにした(写真-1)。



【測定項目】身体的疲労(6 段階)、精神的疲労(6 段 階)、睡眠時間(数値)、睡眠の質(4 段階)、水分補給 量(5 段階)、体重(数値)の6項目とした。1回の入力 で一人あたり概ね30秒程度であった。



写真-1 実施状況

6.3 測定結果

①測定の継続性・課題の抽出

測定を行った20名のうち、作業の関係で途中1名が 離脱したが、残り19名は適用期間全てで入力を実施 し、データ入力率は91.5%であった。実施後のヒアリン グでは、継続できた要因として入力時間の短かさ、アン ケート項目の少なさ、作業の一環として組み込まれてい た点などが挙げられる。これにより、多人数が長期間継 続して使用できることを確認した。なお、改善の要望と して体重や睡眠時間などの数値の自動入力化の要望があ り、今後の課題とした。

②測定結果の傾向

今回の測定は1つの現場で20名、2ヶ月半の限定的 な計測ではあったが、測定結果を多角的に分析した結 果、(1)体重増減率と水分補給量、(2)睡眠の時間と質、 (3)疲労感と測定日(曜日)に一定の傾向が見られた。 (1)体重増減率と水分補給量

夏期熱中症の予防を目的に、作業前後の体重増減率と 作業中の水分補給量を計測した。水分補給量は、就業中 の水分補給量に応じて 500ml 単位で 5 段階の評価(0ml から 2,000ml)とした。日ごとの体重増減率(全員の平 均値)の推移を図-5に、水分補給量(全員の平均値) の推移を図-6に、当日の平均気温とともに示す。日ご とのばらつきはあるが、気温 28 度以上の 8 月末までは 熱中症対策の水分補給量が多く、体重増減率が-1.4%程 度であった。その後、気温が下がると水分摂取量が少な くなり、体重増減率が-1.0%程度であった。





(2)睡眠の時間と質

睡眠時間と睡眠の質(全員の平均値)の推移を曜日別 に示す(図-7)。週末にかけて睡眠時間が上昇する一 方で、睡眠の質は週末にかけて降下する結果であった。 (3)疲労感と測定日(曜日)

主観データとして入力した身体的疲労および精神的疲 労(全員の平均値)の推移を曜日別に示す(図-8)。 身体的疲労と精神的疲労に有意な差は見られなかった。 どちらも週末にかけて蓄積するが、週の最終日には改善 する結果であった。



6.4 結果の考察

体重の変化と水分補給量の結果では、気温の差による 水分摂取量および体重変化の傾向を示した。しかし、個 人差によるばらつきが大きいことや実際の作業との関連 を示していないことなどから、今回の傾向を一般化する ことは困難であると考える。同様に、睡眠時間と睡眠の 質、疲労に関する傾向も個人差や入力者の主観に依存す ることを考慮し、今後のデータの蓄積が必要であると考 える。

睡眠の質については、睡眠時に計測できるセンサーが 身近になったことから客観データが容易に取得できる。 今後は睡眠の質に関して主観データと客観データの相関 から、疲労度の改善方法の検討が必要と考える。

7. まとめ

本報告では、以下の結果が得られた。

i. バイタルデータの取得方法、個人情報の取扱について、法的観点を踏まえたチェックリストを構築

した

- ii. 現場で適用できる簡易で継続性のあるバイタルデ ータ取得方法として、アンケート形式による主観 データ記録を考案し、現場適用により有用性を示 した
- ・ 測定結果の傾向を検証し、体調の維持や作業行動の改善を図るためには、更なるデータの収集が必要である

8. あとがき

本研究では、従来のバイタルセンシングだけでなく、 心理面を主観データとして数値化し、継続的にデータを 収集できる方法を構築できた。今後は、多人数での長期 的な運用に向けた検討と、疲労の回復(睡眠)の検証を 行うことで、より精緻で高度なコンディション管理手法 の確立を目指す。本研究の結果や得られるデータがヒュ ーマンエラーの低減に資する対策立案の一助になること を望む。

東京大学八田秀雄先生には、本件の計画、調査方法お よび結果の考察等について助言をいただいた。この場を 借りて感謝する。

【参考文献】

- 建設業労働災害防止協会、https://www.kensaibou.or.jp/ safe_tech/statistics/occupational_accidents.html、2024.5
- 2) 職場のあんぜんサイト、厚生労働省 https://anzeninfo. mhlw.go.jp/yougo/yougo62 1.html、2024.5
- 3) 高木元也、建設現場におけるヒューマンエラーの現 状と今後の対策のあり方、公益社団法人 土木学会、 建設マネジメント研究論文集 8、pp.141-148、2000
- 4) 丸山 崇、熱中症予防対策におけるウェアラブルセンサーの活用と効果的な熱中症予防法の検証、厚生労働省委託事業 労災疾病臨床研究補助金事業、2021.
 3
- 5) 三菱総合研究所、ウェアラブルデバイスに資する動 向調査報告書、経済産業省委託事業 令和4年度産業 保安等技術基準作成調査研究等事業、2023.3
- 6) (公財)大原記念労働科学研究所、ビッグデータ活用による事故防止対策推進事業についての調査、国土交通省委託事業、2017.3
- (株) ユーフォリア、ONE TAP SPORTS により体調 モニタリング、建設作業員の健康管理・熱中症予防 を支援 https://eu-phoria.jp/news/pressrelease/20230601-o kumuragumi-wellness、2023.6
- (4) 麻生真司、山口治、森井貴弘、一原克裕、八田秀夫、 建設作業員を対象とした主観データの取得方法の検 討、土木学会全国大会第79回年次学術講演会、VI-713、2024.9

高強度鉄筋を用いた

場所打ちコンクリート杭工法の開発

Development of Cast-in-place Concrete Pile

with High-strength Longitudinal Reinforcement

和田湧気* 舟木秀尊* 岸本 剛** 山口敏和***

要旨

場所打ちコンクリート杭の過密配筋抑制のため、規格降伏強度が 590N/mm²、685N/mm²の高強度 鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭工法を、当社を含む 9 社で共同開発した。本開発では、 高強度鉄筋を主筋に用いた場所打ちコンクリート杭の耐震設計手法の構築のため、各種実験を行っ た。それらの実験結果より、鉄筋が安定液に浸漬されることによるコンクリートとの付着性能や、 重ね継手の力学的性能への影響は見られないことを確認し、高強度鉄筋のコンクリートへの定着長 さ、高強度鉄筋同士の重ね継手長さの設定方法について知見を得た。また、杭体の損傷過程や変形 性能を把握し、平面保持を仮定した断面の曲げ解析により、曲げモーメントと曲率の関係は終局限 界状態まで概ね評価可能であることを確認した。

キーワード:場所打ちコンクリート杭、高強度鉄筋、安定液

1. まえがき

近年、場所打ちコンクリート杭は、高支持力化や要求 性能の向上により配筋が過密化傾向にあり、コンクリー トの充填不良や杭主筋と基礎梁主筋の干渉など施工性の 低下が問題となっている。これに対し、普通強度の鉄筋 に代えて規格降伏強度が 590N/mm²、685N/mm²の鉄筋 (以下、高強度鉄筋)を主筋に用いることで、過密配筋 の抑制による施工性の向上や、杭断面を小さくした設計 による杭工事のコスト低減が可能になると考えられる。

高強度鉄筋は、建築研究所による「鉄筋コンクリート 造構造物の超軽量・超高層化技術の開発¹⁾」において、 主に上部構造を想定した適用について検討されたが、場 所打ちコンクリート杭の主筋に高強度鉄筋を用いるため の知見は少ない。また、日本建築学会から刊行された 「基礎部材の強度と変形性能²⁾」(以下、基礎部材解説 書)にも、適用範囲は SD490 までであることが示され ている。そこで、当社を含む9社の共同で、設計手法の 構築を目的とした各種実験^{3)~6)}を行い、高強度鉄筋を 用いた場所打ちコンクリート杭工法を開発した。

本報では、各実験の概要と、それらの実験結果をもと にした高強度鉄筋とコンクリートの付着性能、高強度鉄 筋同士の重ね継手の力学的性能、および杭体の構造性能 の検証について報告する。

2. 鉄筋の引抜き実験

2.1 実験の目的

場所打ちコンクリート杭の施工では、鉄筋が安定液に 浸漬された状態でコンクリートが打設されるが、その場 合の鉄筋とコンクリートの付着性能については既往の知 見が少ない。そこで、安定液に浸漬された高強度鉄筋の 降伏後におけるコンクリートとの付着性能を把握するこ とを目的に、鉄筋の引抜き実験を行った。

2.2 試験体概要

引抜き実験の試験体パラメータを表-1に示す。加力 するのは規格降伏強度 685N/mm² (D32 ねじ節)の鉄筋 であり、コンクリートへの定着長さは、日本建築学会 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ⁷」(以下、 RC 規準)に示される必要定着長さの算定式をもとに、 コンクリートの設計基準強度(以下、F_c)と鉄筋の規格 降伏強度から設定した。加力する鉄筋には、2 体の試験 体にひずみゲージを貼付してひずみ分布を確認する計画 とした。安定液浸漬ありの試験体については、表-2に 配合と試験結果を示す安定液に鉄筋を 24 時間浸漬後、 付着した安定液が落ちないよう留意して試験体コンク リートを打設した。ここで、鉄筋の安定液浸漬状況と、 24 時間浸漬後の鉄筋への安定液付着状況を写真-1に 示す。安定液の配合については、事前に行った要素実験

*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

^{***}西日本支社建築設計部

³⁾の結果から、実際に想定される範囲で付着性能に不利 となるような配合を設定しており、模擬土は安定液の転 用泥水を模擬的に作成するために加えている。表-2の 試験結果より、一般的な悪条件下での安定液と同等であ ることを確認した。また、材料試験結果を表-3に、試 験体形状の一例を図-1(a)に示す。コンクリート中央 に鉄筋を埋め込んでおり、コンクリート端部の付着劣化 の影響を避けるため、上端からおよそ 10d(d:鉄筋の 呼び径)の範囲に、ブチルゴムとビニールテープを巻い た付着除去区間を設けた。

2.3 実験方法

加力・変位計測状況を図-1(b)に示す。試験体は、反 力床に固定した下部治具に載せ、コンクリート部分を固 定している。鉄筋はジャッキの先端に取り付けた上部治 具に固定して引張加力する。加力は荷重制御とし、長期 許容応力度の1.5倍相当を2回、規格降伏強度の95%相 当を2回繰り返し後、引張強度の95%相当まで単調引 張加力する計画とした。

鉄筋に作用させる引張荷重は、ジャッキの荷重計によ り計測した。鉄筋の変位は、試験体コンクリート側面を 不動点とし、計測治具を介して設置した変位計によりコ ンクリートと鉄筋の相対変位(以下、抜け出し量)を計 測した。抜け出し量は、コンクリート上端から 150mm の位置において2箇所で計測している。

| 試験体名 | 安定液浸漬 | $F_c(N/mm^2)$ | 定着長さ | ひずみ ゲージ |
|------------|-------|---------------|---------------|------------|
| 30-52d-G | なし | 30 | 52d (1,664mm) | + 10 |
| B-30-52d-G | あり | 30 | 52d (1,664mm) | めり |
| 60-36d | なし | 60 | 36d (1,152mm) | 721 |
| B-60-36d | あり | 60 | 36d (1,152mm) | 120 |

表-1 引抜き実験のパラメータ

| - | 00.004 | 677 | 00 | 5 ou (1,10211111) | |
|---|--------|-------|--------|-------------------|-----|
| | 表-2 | 安定液·樽 | 莫擬土の配合 | と安定液試 | 験結果 |

砂分

模擬土配合

| ナイト | CMC | 粘性土 | 砂質土 | 率 | 比重 | (s) | pН |
|------|------|---------|-------|------|-----------|-------|-----|
| 5.0% | 0.2% | 16.0% | 5.0% | 5.0% | 1.15 | 32.78 | 9.0 |
| ※試験 | 方法 」 | 北重:マッ | ッドバラン | (ス) | 粘性 : ファンネ | ネル粘度計 | |
| | F | oH:pH メ | ータ | | | | |



安定液配合

Ŀ



安定液試験結果*

半上州

(a) 安定液浸漬状況(塩ビ管内で浸漬)
 (b) 安定液付
 写真一1 鉄筋の安定液浸漬

表-3 材料試験結果(引抜き実験)

| コン | レクリート | | 鉄筋 | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|---------|--|--|--|--|--|
| F_c (N/mm ²) | 30 | 60 | 降伏強度 (N/mm ²) | 712.2 | | | | | |
| 圧縮強度 (N/mm ²) | 29.5 | 67.6^{*1} 68.7^{*2} | ヤング係数 (N/mm ²) | 181,100 | | | | | |
| ヤング係数 (N/mm ²) | 28,700 | $37,600^{*1}$ $38,200^{*2}$ | 引張強度 (N/mm²) | 930.5 | | | | | |
| %1 : 60-36d %2 : B-60-3 | l で使用 6d で使用 | | 降伏ひずみ (µ) | 3,933 | | | | | |



2.4 実験結果および考察

鉄筋応力度-抜け出し量関係の比較を図-2に示す。 鉄筋応力度はジャッキ荷重を鉄筋の公称断面積で除した 値、抜け出し量は2箇所の計測値の相加平均値とした。 図より、安定液浸漬の有無に関わらず、いずれの試験体 も引張強度の95%相当まで荷重を保持している。

安定液浸漬有無によるサイクルピーク時の鉄筋のひず み分布の比較を図-3に示す。図より、ひずみ分布につ いても安定液浸漬の有無で有意な差は確認できない。な お、規格降伏強度の 95%相当以降の荷重においても、 微小なひずみの部分が存在することから、応力伝達のた めに十分な定着長さを設定できているといえる。

以上より、安定液浸漬による付着性能への影響は見ら れず、RC 規準をもとに高強度鉄筋のコンクリートへの 定着長さを安全側に評価することができる。





3. 重ね継手を有する鉄筋の引抜き実験

3.1 実験の目的

場所打ちコンクリート杭の主筋に高強度鉄筋を用いる 場合においても、従来と同様に主筋には重ね継手を設け る場合があり、高強度鉄筋同士の重ね継手となることも 想定される。しかし、高強度鉄筋同士の重ね継手長さは、 既往の規準^つには明確に示されていない。そこで、安定 液に浸漬された高強度鉄筋同士の重ね継手の力学的性能 を把握するため、重ね継手を有する鉄筋の引抜き実験 (以下、重ね継手実験)を行った。

3.2 試験体概要

重ね継手実験の試験体パラメータを表-4に示す。加 力するのは規格降伏強度 685N/mm² (D19 ねじ節)の鉄 筋であり、重ね継手長さは、RC 規準に示される重ね継 手の大地震動に対する安全性確保のための検討式をもと に、F_cと鉄筋の規格降伏強度から設定した。鉄筋の重 ね継手部分には、1 体の試験体のみひずみゲージを貼付 してひずみ分布を確認する計画とした。安定液浸漬あり の試験体については、表-2に配合と試験結果を示す安 定液に鉄筋を 24 時間浸漬後、付着した安定液が落ちな いよう留意して試験体コンクリートを打設した。また、 材料試験結果を表-5に、試験体形状の一例を図-4 (a)に示す。2 組の重ね継手を、互いに影響が生じない よう十分に離してコンクリート中(奥行き方向中央)に 埋め込んでおり、上下端からおよそ 10d の範囲に、2章 に示した引抜き実験と同様に付着除去区間を設けた。

3.3 実験方法

加力・変位計測状況を図-4(b)に示す。試験体は、反 力床に固定した下部治具に載せ、反力床側に突出させて いる鉄筋を下部治具に設けた穴に通して固定している。 ジャッキ側に突出させている鉄筋(以下、ジャッキ側鉄 筋)は、ジャッキの先端に取り付けた上部治具に固定し て引張加力する。なお、重ねた鉄筋同士の加力時の偏心 による影響を抑えるために、2本の鉄筋を同時に引張加 力する方法とした。また、加力スケジュールは、2章に 示した引抜き実験と同様に計画した。

鉄筋に作用させる引張荷重は、ジャッキの荷重計によ り計測した。鉄筋の変位は、試験体コンクリート側面を 不動点とし、計測治具を介して設置した変位計により ジャッキ側鉄筋の抜け出し量を計測した。抜け出し量は、 コンクリート上端から 50mm の位置において、ジャッ キ側鉄筋1本あたり2箇所で計測している。

表-4 重ね継手実験のパラメータ

| 試験体名 | 安定液浸漬 | $F_c(N/mm^2)$ | 重ね継手長さ | ひずみ ゲージ |
|--------------|-------|---------------|---------------|------------|
| J-30-55d | なし | 30 | 55d (1,045mm) | |
| J-B-30-55d | | 30 | 55d (1,045mm) | なし |
| J-B-60-38d | あり | 60 | 38d (722mm) | |
| J-B-30-55d-G | | 30 | 55d (1,045mm) | あり |

表-5 材料試験結果(重ね継手実験)

| コン | ノクリート | | 鉄筋 | | | |
|-------------------------------|--------|--------|-------------------------------|---------|--|--|
| F_c (N/mm ²) | 30 | 60 | 降伏強度 (N/mm ²) | 696.0 | | |
| 圧縮強度 (N/mm ²) | 32.6 | 69.6 | ヤング係数 (N/mm ²) | 189,800 | | |
| ヤング係数 (N/mm ²) | 31,400 | 39,800 | 引張強度 (N/mm ²) | 890.7 | | |
| | | | 降伏ひずみ | 3,667 | | |



図-4 重ね継手実験の試験体と加力·変位計測状況

3.4 実験結果および考察

鉄筋応力度-抜け出し量関係の比較を図-5に示す。 鉄筋応力度はジャッキ荷重を鉄筋の公称断面積の合計で 除した値、抜け出し量は2箇所の計測値の相加平均値と した。図より、安定液浸漬の有無、コンクリート強度の 違いに関わらず、いずれの試験体も引張強度の 95%相 当まで荷重を保持している。

J-B-30-55d-G について、サイクルピーク時の鉄筋のひ ずみ分布を図-6に示す。図より、荷重が大きくなるに つれて、ひずみの生じる範囲がジャッキ側鉄筋では上端 から、反対側の鉄筋では下端から進展していくことが確認できる。なお、規格降伏強度の 95%相当以降の荷重においても、微小なひずみの部分が両側の鉄筋に存在していることから、応力伝達のために十分な重ね継手長さを設定できているといえる。

以上より、重ね継手の力学的性能についても安定液浸 漬による影響は見られず、RC 規準をもとに高強度鉄筋 同士の重ね継手長さを安全側に評価することができる。



4. 杭体の構造性能確認実験

4.1 実験の目的

場所打ちコンクリート杭の構造性能を確認するための 既往の実験としては、最大杭径 800mm の規模での杉山 らの事例⁸⁾、主筋に高強度鉄筋を適用した篠原らの事 例⁹⁾などがある。ただし、極めて稀に発生する地震動 に対する安全性を検証した事例は少なく、知見の蓄積が 望まれている。そこで、主筋に高強度鉄筋を用いた杭体 の構造性能を把握するために、杭体の曲げせん断実験 (以下、構造実験)を行った。

4.2 試験体概要

試験体パラメータを表-6に示す。杭径はいずれも 600mm であり、主筋には規格降伏強度 685N/mm²の竹 節鉄筋を使用した。基礎部材解説書の適用範囲は、軸力 比(圧縮側:正)が-0.05~+0.4、 F_c が 21~40N/mm² であるが、本実験では、高強度鉄筋のメリットが期待で きる引張軸力下の構造性能を検証するため軸力比を-0.2~+0.4 に、 F_c の上限値を 60N/mm² にパラメータを 設定した。また、材料試験結果を表-7に、試験体形状 の一例を図-7に示す。杭体部分は内法高さ 2,700mm (せん断スパン比 1.35)であり、上下対称にスタブ(奥 行き 1,600mm)を有している。2章、3章に示した実 験で、安定液浸漬による影響が見られなかったことから、 構造実験では安定液を用いずに試験体を製作した。なお、 杭体にはスパイラル状の高強度せん断補強筋を使用して おり、せん断破壊が先行しないよう計画した。

4.3 実験方法

加力装置の概要を図-8に示す。上下スタブを平行に 保つよう2台の軸力ジャッキを制御して、一定軸力を与 えた。また、杭体中央を反曲点とした逆対称モーメント が生じるようせん断力を与えた。その加力サイクルは、 部材変形角 R (杭体端部間の水平変位/試験区間長 2,700mm)で制御し、 $\pm 0.125\%$ を1サイクル、以降は \pm 0.25%、 $\pm 0.50\%$ 、 $\pm 0.75\%$ 、 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 2.0\%$ 、 $\pm 3.0\%$ 、 $\pm 4.0\%$ を2サイクルずつ、No.3を除き+5.0% (正側)で片押しした後、除荷して実験を終了した。

表-6 構造実験のパラメータ

| 試験体名 | $F_c(N/mm^2)$ | 主筋*1 | せん断補強筋※2 | 軸力**3 |
|------|---------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| No.1 | 30 | | U9@150 pw=0.14% | N=-944kN $\eta=-0.1$ |
| No.2 | 30 | 10-D19 | U9@150 pw=0.14% | N=1,702kN η=0.2 |
| No.3 | 30 | pg=1.01% | U9@100 p _w =0.21% | N=3,551kN η=0.4 |
| No.4 | 60 | | U9@50 pw=0.42% | N=6,379kN η=0.4 |
| No.5 | 30 | 18-D19 pg=1.82% | U12.6@50 pw=0.83% | N = -1,880kN $\eta = -0.2$ |

※1 主筋比 pg=ag/Ac ag: 主筋全断面積 Ac: 杭の断面積

※2 せん断補強筋比 p_w=a_w/(D·x) a_w:1 組のせん断補強筋の断面積 D: 杭径 x: せん断補強筋のピッチ

※3 軸力比 η=N/(σ_B×A_c) σ_B: コンクリートの圧縮強度 N: 作用軸力(圧縮: 正、引張: 負)



4.4 実験結果(No.4、5)

No.4、5 を例に、杭体脚部の曲げモーメント M と部 材変形角 R の関係(以下、M-R 関係)、および損傷過 程を図-9、図-10 に、最終破壊状況を写真-2 に示 す。その他の試験体については既報論文 δ を参照された い。なお、曲げモーメントには軸力による付加曲げ(P $-\delta$ 効果)を考慮している。

No.4 は、R=0.5%で杭体脚部に曲げひび割れが発生し、 剛性低下が生じた。その後、R=0.7%付近で脚部のコン クリートが圧壊するが耐力は低下せず、ほぼ横ばいに推 移した。また、R=4.0%で引張側最外端の主筋が破断し 曲げモーメントが低下したが、高圧縮軸力下においても 高い靭性能を有することを確認した。No.5 は、引張軸 力導入時、円周方向に連続的なひび割れが発生した。 R=0.7%で主筋が引張降伏し、その後、R=1.5%で主筋の 圧縮降伏、およびせん断ひび割れが発生した。以降は、 曲げモーメントは緩やかに増加し、R=5.0%においても 曲げモーメントは緩やかに増加し、R=5.0%においても 曲げモーメントは緩やかに増加し、R=5.0%においても 曲げモーメントの低下は確認されなかった。なお、No.1 ~5 いずれの試験体も曲げ降伏先行型の破壊形式であり、 部材変形角の増大に伴い軸方向変位は大きくなったが、 軸力保持性能を有することを確認した^{5,6}。

写真-2より、杭端部 1.0D (D: 杭径) 区間に損傷が 集中していることが確認できる。No.4 では、杭外端部 のコンクリートが圧壊したうえ、引張側最外端の主筋が 破断していることを確認した。No.5 では、主筋の降伏 に伴う曲げひび割れ、および杭・スタブ接合面の抜け出 しが卓越していることを確認した。



子吴^一 Z 取於吸塔(八)、(1)(本

4.5 実験結果と解析結果の比較

杭体の耐震設計時に用いられることの多い、曲げモー メントMと曲率 ϕ の関係(以下、 $M-\phi$ 関係)について、 各試験体の実験結果と解析結果の比較を図-11、図-12 に示す。実験結果の曲率は杭体脚部 1.0D 区間の変位計 の計測値より算定し、図には正加力サイクルピーク時の M-φ関係を示す。解析は、平面保持を仮定した断面の 曲げ解析²⁾(以下、断面解析)とし、矩形の要素を組み 合わせ近似的に杭の円形断面をモデル化した。解析に用 いた主筋とコンクリートの応力-ひずみ関係は、バイリ ニア(ただし、コンクリートの引張抵抗はゼロ)とし、 材料定数は材料試験結果を用いた。また、終局限界とし て設定²⁾ したコンクリートの限界圧縮ひずみ 3,000µ、 または主筋の限界ひずみ 10,000µ のいずれかに到達した 時点で解析を終了した。図より、限界ひずみを超える領 域においても、杭体は高い変形性能を有していることが 確認できる。また、実験結果と解析結果の傾向はある程

度の対応を示しており、いずれの試験体でも断面解析に よる限界ひずみ時の曲げモーメントは、実験結果に対し 小さい結果となった。



図-12 実験結果と解析結果の比較(圧縮軸力)

5. まとめ

各実験の結果から、高強度鉄筋を主筋に用いた場所打 ちコンクリート杭の耐震設計手法を構築するための以下 の知見を得た。

- i. 安定液浸漬による付着性能への影響は見られず、 RC 規準をもとに高強度鉄筋のコンクリートへの 定着長さを安全側に評価することができる
- ii. 重ね継手の力学的性能についても安定液浸漬による影響は見られず、RC 規準をもとに高強度鉄筋 同士の重ね継手長さを安全側に評価することがで きる

- Ⅲ. 杭体の損傷過程や M- Ø関係などの構造性能を把 握し、杭体が高い変形性能を有していることを確 認した
- iv. 断面解析により、杭体の *M*−*φ*関係は終局限界状態まで概ね評価することができる

6. あとがき

本報は、安藤ハザマ、佐藤工業、鉄建建設、東急建設、 戸田建設、西松建設、長谷エコーポレーション、三井住 友建設との共同研究の成果の一部をまとめたものである。 また、本研究において広島工業大学 金子治教授からご 指導とご助言を受けた。ここに感謝を記す。

【参考文献】

- 国土交通省建築研究所、「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」、建築研究報告、 No.139、2001
- 2) 日本建築学会、「基礎部材の強度と変形性能」、2022
- 3)田附遼太、太田雄介、中村光男、森 泰夫、森 清 隆、和田湧気、浦川和也、金子 治、「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1 付着強度試験)」、日本建築学会大会学術 講演梗概集、20256、pp.511-512、2023
- 4)森 清隆、田附遼太、和田湧気ほか、「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 2~4)」日本建築学会大会学術講演梗概集、 2024、20219-20221、pp.437-442
- 5) 福田 健、佐野大作、田口智也、金子 治、新上 浩、郡司康浩、Van Quang Phan、葛西勇紀、「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1 実験概要)」、日本建築学会大会学術講演 梗概集、20255、pp.509-510、2023
- 6)福田健、田口智也ほか、「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2、3)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、2024、20222~20223、pp.443-446
- 7) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同 解説」、2018
- 8) 杉山智昭、脇田拓弥、今井和正、成原弘之、「場所打ちコンクリート杭の構造性能(その1)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、23287、pp.573-574、2018
- 9) 篠原保二、鈴木翔太、日比野陽、林 靜雄、「高強度 鉄筋を主筋に用いた場所打ち杭の軸力の違いが曲げ 性状に及ぼす影響(その1 実験概要および実験結 果、その2 検討と考察)」、日本建築学会大会学術 講演梗概集、23377、23378、pp.779-782、2011

鉄骨を用いた基礎梁とパイルキャップの

応力伝達機構に関する研究

- 部分架構試験体による性能確認-

Mechanism of Stress Transmission Between Steel Frame Foundation Beams and Pile Caps

- Confirming Performance Using Partial Frame Test Specimens -

山上 聡* 和田湧気* 岸本 剛** 反町 敦*** 岡 靖弘****

要旨

上部構造が鉄骨造の建物では、基礎梁を鉄筋コンクリート造とすることが一般的であるが、基礎 梁を鉄骨造として設計できれば、躯体重量の削減による杭基礎のコストダウンや施工性の向上によ る工期短縮が期待できる。基礎梁を鉄骨造とするためには、地震時に杭頭に生じる応力を、パイル キャップを介して鉄骨基礎梁に伝達する必要があり、その応力伝達機構を実験等により明らかにす る必要がある。そこで今回、杭をパイルキャップに杭径と同じ長さだけ埋込む鉄骨基礎梁工法を考 案し、部分架構試験体の構造実験を行った。その結果、本工法においては「てこ機構」により杭頭 に生じる応力を鉄骨造の基礎梁に伝達することができ、その耐力は既往の計算式で概ね評価できる ことを確認した。

キーワード:鉄骨構造、基礎梁、パイルキャップ、杭基礎

1. まえがき

近年、電子商取引の拡大などによって、物流施設の需 要が増加している。これらの建物は一般的に広い空間を 要するため、上部構造を鉄骨造(以下、S造)として大 スパン構造とすることが多く、より合理的で耐震性のあ る様々な構法が研究されている。その中で、上部構造が S 造の建物においても、基礎梁は鉄筋コンクリート造 (以下、RC 造)とすることが一般的であり、上部構造 のスパンに合わせて基礎梁を設計すると、RC 造では梁 断面が大きくなる傾向があった。一方、基礎梁をS造と する工法では、RC 造の基礎梁よりも軽量化することが でき、杭のコストダウンや、配筋・型枠・コンクリート 工事の削減による大幅な工期短縮と施工性の改善、省人 化が期待できる。しかし、基礎梁をS造とすると、フラ ンジ幅が広い場合、杭頭に生じるモーメントを負担する ための杭頭補強筋を配筋しづらいという問題が生じる。 また、地震時に杭頭に生じる応力を、パイルキャップを 介して S 梁へ伝達する機構が不明であり、これを実験等 により明らかにする必要がある。

これらの問題を解決するために、杭をパイルキャップ

に杭径と同じ長さだけ埋込み、「てこ機構」を利用し、 杭頭に生じる応力を鉄骨造の基礎梁まで伝達させる工法 を提案した。本報では、その工法概要と構造実験の結果 について報告する。

2. 工法概要

鉄骨基礎梁工法の概要を図-1に示す。本工法は、鉄 骨造の基礎梁と既製杭およびパイルキャップの下部と上 部で構成されている。パイルキャップ下部には、杭頭が 杭径と同じ長さだけ埋込まれている。杭頭曲げに対して は、杭頭補強筋と埋込みによるてこ作用で抵抗するが、 杭頭補強筋は引張軸力が作用する場合を除いて省略でき る。また、曲げ伝達のために、パイルキャップ下部から 鉄骨基礎梁を内包するパイルキャップ上部へ跨って曲げ 主筋を配置し、上部へ定着させる。パイルキャップ上部 にはS梁を貫通させ、周囲をふさぎ板で覆っている。ふ さぎ板は、S梁のリブプレートに溶接又はボルト接合と することができ、鉄骨部材にはメッキ処理が可能である。

*技術本部技術研究所建築研究グループ **技術本部技術研究所企画・管理グループ

^{****}東日本支社建築設計部 ****建築本部建築設計統括部



3.構造性能の確認

3.1 実験概要

本研究では、鉄骨基礎梁工法における、パイルキャッ プの応力伝達機構や設計法の妥当性(パイルキャップの 耐力や架構の破壊形式)を確認するために、部分架構試 験体の繰返し載荷実験を実施した。

試験体一覧を表-1に、代表的な試験体形状を図-2 に示す。試験体は、縮尺率を 1/3 とし、S 造の柱、鉄骨 造の基礎梁(以下、鉄骨基礎梁)、外殻鋼管付コンク リート杭(以下、SC 杭)およびパイルキャップからな る十字形試験体3体と、ト字形試験体1体である。パイ ルキャップ下部の補強には、せん断補強筋と併せ、杭埋 込み始端に溶接閉鎖型の集中補強筋を施している。パイ

637

3500

(a) K-1, K-2

杭:φ318.5×T69×t12.7 (STK490)

1750

集中補強筋(溶接閉鎖)

1750

ルキャップ上部には、せん断補強筋の代わりにふさぎ板 形式を採用し、S 梁のフランジ上部を押さえるようにか んざし筋を施した。各試験体の特徴を以下に示す。

- K-1: 杭が埋込まれるパイルキャップ下部の破壊を想 定した十字形の試験体である。ふさぎ板は溶接 接合とし、下部パイルキャップの耐力等を確認 する標準試験体である。
- K-2:K-1 に対して、ふさぎ板をボルト接合に、鉄骨 部を溶融亜鉛メッキ処理としており、ふさぎ板 の接合方法と鉄骨部の表面処理の違いによる影 響を確認する試験体である。
- K-3:K-1 に対して、杭芯を柱芯から面内に 100mm 偏 心させた試験体である。杭偏心に伴って杭頭補強 筋が設けられないこと、および柱軸力によって付

| | 梁 | 柱 | | SC 杭 | | | | パイルキ | ヤップ | | 柱輔 | 岫力 | | |
|-------------|---|-------------------------------|----------------------------|--|-------------------------------|-----------------------|--------------|--|---|--------------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| 試験 | 断面 (材質) | 断面 (材質) | 断面 (材質) | 杭頭埋 込み長 | 杭頭 補強筋 | F_{c} | 杭偏 | ふさ | ぎ板 | S 梁幅/ フーチ | 軸力 | 軸力 | 想定 破壊形式 | 特徴 |
| 体 | (内質) mm | (内質) mm | (内質) mm | mm | (材質) | N/mm ² | 心 | (材質) mm | 接合 | ング幅 | kN | 比〃 | | |
| K-1 | | | | 318.5 (1.0D) | 8-D16 | | | | 溶接 | | | | | 標準試験体 |
| K-2 | BH-400× 125×9×19 | B∐-200 ×200×19 | ϕ 318.5× T69×t12.7 | (D: 杭径) | (SD390) | | 無 | DI 2.2 | ボルト | 0.20 | 200 | 0.04 | ハ イルキャップ 下部の | ふさぎ板ボルト接合 溶融亜鉛メッキ処理 |
| K-3 | (SIN490D) | (3114906) | (SIK490) (T.今回 | 478 (1.5D) | | 36 | 有 | PL-5.2 (SS400) | | | 800 | 0.18 | でん的収壊 | 杭偏心 |
| K-4 | BH-325× 100×6×9 (SN490B) | □-200 ×200×12 (BCR295) | (1. <i>王厚</i> t:鋼管厚) | 1:主厚 :鋼管厚) 318.5 8-D16 (1.0D) (SD390) 無 (1.0D) (SD390) (3.16) | | 0.16 | - 350 - 0.14 | | 梁曲げ降伏 破壊 | 設計標準 ト字形+引張軸力 | | | | |
| 注) | <i>F</i> _c :目標: | コンクリー | ト強度、輔 | 訪 比 7 | =N/(A) | • σ_y) | 、 <i>N</i> | :軸力、 | A:鉄骨 | 柱断面積 | ξ, σ_y | :鉄骨 | 柱規格降伏號 | 角度 |
| •-• - | | | | | | ⊼ ≩] + | ひび - 8-D4 | 割れ防止筋 (<u>SD29</u> 5)、定 ⁵ | 皆長20d | - | 1750 | | <u>° 1750</u> | |
| 800 | 柱:BC かん; | □-200×200×19 ざし筋へ (SN490B) | 杭頭祥 | i 強筋 (SD390) | 加力) 8 | 532 532 | | がん 16-D 定着 かつ | a U朋 6 (SD295) 長25d 下7ランジまで | | L | 100 | 532 C | 292 |
| | A/ | | | | | | -A 矢 | 示図 1-D | 間5里肋 6 (SD295) 自筋 | | | | | |
| 61b2 加力点 | B// 東梁:BH-400×125 (SN490B) C// | 5×9×19 曲げ主筋- | | _ <u>B_</u> _杭 新補強筋(13 _\- | 1 15°779) 6 6 6 6 | - - - - - | C | 8-D16 (S 一曲げ 28-D せん (口+ | D390) ¹ 主筋 D13(SD345) 断補強筋(13 ⊢#)-D6@40(| 5°フック) SD295)へり | あき | | 杭頭 1006 | |
| E | SC杭内: | コンクリート充填 | 1 ! | | | - I I | | | ר <u>י</u> ר ר | 0. | 5D - 🔛 | a designed as a second | | |

表-1 試験体一覧

試験体形状

H

C-

図-2

950

B-B 矢示図

下部かんざし筋 4-D10(SD345)(各方向) 補強筋 (溶接閉鎖) + + +) - D6 (SD 205)

<u>1650</u> 加力点まで

(b) K-3

1850

単位(mm)

(c) K-4

加曲げモーメントが生じることに対して、パイル キャップに対策(杭頭埋込み長さ、パイルキャッ プ断面のせいと曲げ主筋の増大)を施した。杭の 水平方向の施工誤差により想定される最大杭偏心 時の補強方法を採用した下部パイルキャップの耐 力等を確認する。

K-4:想定破壊形式を鉄骨基礎梁の曲げ降伏型とした ト字形の試験体である。鉄骨基礎梁の曲げ降伏が パイルキャップの降伏より先行する場合の変形性 能やパイルキャップの損傷状況を確認する。

3.2 使用材料

コンクリートの材料試験結果を表-2に、鉄筋の材料 試験結果を表-3に、鋼板の材料試験結果を表-4に示 す。パイルキャップについては、各試験体に共通して、 コンクリートの目標圧縮強度 F_cを 36N/mm²とし、パイ ルキャップの上部と下部で打ち継いだ。鉄筋は、杭頭補 強筋に D16(SD390)を、曲げ主筋に D13 (SD345)を、せん 断補強筋と集中補強筋に D6(SD295)を用いた。

鉄骨部については、K-1~K-3 の柱に B□-200×200× 19 (SN490B)を、梁には BH-400×125×9×19 (SN490B) を用いた。K-4 は、柱に□-200×200×12 (BCR295)を、 梁には BH-325×100×6×9 (SN490B)を用いた。また、 ふさぎ板に PL-3.2 (SS400)を用いた。

杭については、SC 杭を採用し、鋼管に φ318.5×T69 ×t12.7 (STK490)を用いた。また、コンクリートの設計 基準強度を 105N/mm²とした。

3.3 載荷方法

載荷装置を図-3に示す。載荷については、上下柱の 端部をピン・ローラーで支持し、上柱に一定軸力 N を加 えた状態で、両梁加力部の鉛直変位を逆対称に制御しな がら、梁せん断力 Qg を与えた。なお、梁の横座屈の防 止と上柱端支持部の面外変位を抑制するために、梁のス パン中央部近傍と加力部近傍および柱上部支持治具に振 れ止め装置を設けた。

柱への一定軸力Nについては、K-1、K-2 では曲げ耐力 への影響が小さくなるように、S 柱の降伏軸力に対して 軸力比 η =0.04 (圧縮 200kN)とした。また、K-3 では 実建物における中柱の長期軸力を想定して η =0.18 (圧 縮 800kN)、K-4 では短期における隅柱での引張を想定 して η =-0.14 (引張 350kN)とした。なお、試験体 K-3 では、杭芯が柱芯に対して偏心しているため、軸力導入 時において、柱と杭には杭偏心に伴う付加曲げモーメン トが作用する。

梁への載荷については、層間変形角Rによって制御し、 加力方向は、 $\mathbf{20-3}$ 中において右側の梁を上向きに、左 側の梁を下向きに加力する方向を正加力とした。載荷履 歴は、層間変形角 $R=2.5,5,10,15,20,30,40\times10^3$ rad ま で2サイクルずつの正負交番繰返し載荷を行い、その後、 正加力方向へ $R=60\times10^3$ rad まで単調載荷を行った。

表-2 コンクリートの材料試験結果

| F_c (N/mm ²) | 使用試験体 | | σ_B (N/mm ²) | ε _{co} (×10 ⁻³) | E_c (kN/mm ²) | σ_t (N/mm ²) |
|----------------------------|-------|-----------|---------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------------|
| 36 | K-1 | 下部パイルキャップ | 37.7 | 2.07 | 30.1 | 3.03 |
| | | 上部パイルキャップ | 32.4 | 1.90 | 28.3 | 2.74 |
| | K-2 | 下部パイルキャップ | 39.2 | 1.99 | 31.0 | 2.97 |
| | | 上部パイルキャップ | 32.5 | 1.96 | 27.7 | 2.58 |
| | K-3 | 下部パイルキャップ | 38.1 | 2.13 | 29.7 | 2.38 |
| | | 上部パイルキャップ | 33.0 | 1.93 | 29.2 | 2.46 |
| | K-4 | 下部パイルキャップ | 38.8 | 2.09 | 30.6 | 3.03 |
| | | 上部パイルキャップ | 33.0 | 1.88 | 29.5 | 2.74 |

 $F_c:目標圧縮強度、<math>\sigma_B: 圧縮強度、 \varepsilon_{co}: \sigma_B 時ひずみ、$

Ee:ヤング係数、σi:引張強度、各3本の平均値を示す。

表-3 鉄筋の材料試験結果

| 呼び名 | 材質 | 使用部位 | 使用試驗休 | E_s | σ_{sy} | \mathcal{E}_{sy} |
|--------|-------|----------------------------|---------------|-----------------------|---------------|----------------------|
| 11 O H | TI SK | | 1X/11# W0(1+- | (kN/mm ²) | (N/mm^2) | (×10 ⁻³) |
| D16 | SD390 | 杭頭補強筋 | K-1, 2, 4 | 192 | 460 | 2.40 |
| D13 | SD345 | 曲げ主筋 | 全試験体 | 187 | 393 | 2.10 |
| D10 | SD345 | 下部かんざし筋 | 全試験体 | 185 | 400 | 2.16 |
| D6 | SD295 | せん断補強筋 集中補強筋 梁際かんざし筋 | 全試験体 | 180 | 342 | 1.90 |
| D4 | SD295 | ひび割れ防止筋 | 全試験体 | 183 | 328 | 1.79 |

E,: ヤング係数、σ,y: 降伏点、ε,y: 降伏ひずみ (=σ,y/E,y)、各3本の平均値を示す。 ※降伏点は、D4、D6(SD295)では0.2%オフセット耐力、他は上降伏点とした。

| 公称厚さ | 材質 | 使用部位 | 使用試験体 | Es (kN/mm ²) | σ_{sy} (N/mm ²) | ε _{sy} (×10 ⁻³) |
|---------------------------------|--------|-------------|-----------|-----------------------------|---------------------------------------|---|
| PL-19① | SN490B | 鉄骨梁 フランジ | K-1, K-3 | 210 | 360 | 1.71 |
| PL-19① (めっき) | SN490B | 鉄骨梁 フランジ | K-2 | 195 | 370 | 1.90 |
| PL-192 | SN490B | 鉄骨柱 | K-1, K-3 | 210 | 362 | 1.72 |
| PL-19② (めっき) | SN490B | 鉄骨柱 | K-2 | 206 | 359 | 1.74 |
| PL-12 | BCR295 | 鉄骨柱 | K-4 | 216 | 400 | 1.85 |
| PL-9 | SN490B | 鉄骨梁 フランジ | K-4 | 212 | 363 | 1.71 |
| | | 鉄骨梁 ウェブ | K-1, K-3 | | | |
| PL-9 (めっき) | SN490B | 鉄骨梁 ウェブ | K-2 | 218 | 369 | 1.69 |
| PL-6 | SN490B | 鉄骨梁 ウェブ | K-4 | 212 | 395 | 1.86 |
| PL-3.2 | SS400 | ふさぎ板 | K-1, 3, 4 | 211 | 319 | 1.51 |
| PL-3.2 (めっき) | SS400 | ふさぎ板 | K-2 | 210 | 392 | 1.87 |
| E. ヤング係数, G.: 隆伏点(0.2%オフセット耐力). | | | | | | |

表-4 鋼板の材料試験結果

 $E_s: ヤンク係数、<math>\sigma_{sy}:$ 降伏点(0.2%オノセット耐力)、 $\varepsilon_{sy}:$ 降伏ひずみ(= σ_{sy}/E_s)、各3本の平均値を示す。

※溶融亜鉛めっき試験片の応力度は、めっき処理前の断面寸法を用いて算定。



3.4 計測方法

荷重については、ロードセルを用いて各梁せん断力 $Q_{g1}, Q_{g2} を、また油圧ジャッキに設けた油圧計を用いて$ $柱軸力 N を測定した。梁せん断力 <math>Q_g$ については、式(1)、 (2)によって算出した。

| $Q_g = (Q_{g1} - Q_{g2})/2$ | (十字形) | (1) |
|-----------------------------|-------|-----|
| $Q_{g} = -Q_{g2}$ | (ト字形) | (2) |

変位については、柱支持点において、上部がピン支持、 下部がピンローラー支持された計測フレームに設置した 変位計を用いて測定した。層間変形角*R*は、梁加力点の 鉛直変位を柱芯から加力点の距離で除した値とした。

破壊性状については、載荷時にひび割れの発生状況を 観察した。また、各目標変形角の1サイクル目の到達時 において、クラックスケールにてひび割れ幅を測定した。 3.5 実験結果 a. 荷重-変形関係およびひび割れ状況

梁せん断力 Q_g 一層間変形角 R 関係を図ー4に、パイ ルキャップの典型的なひび割れ発生状況を写真-1に示 す。ひび割れは、下部パイルキャップの下面では、杭前 面方向、杭側面方向、杭前面斜め方向に発生した。また、 下部パイルキャップ側面には、斜めひび割れと曲げひび 割れが、上部パイルキャップ上面には曲げひび割れがそ れぞれ発生した。

これらのひび割れは、下部パイルキャップ破壊型の K-1~K-3 では *R*=+5.1×10⁻³ rad 時までに発生し、梁曲げ 降伏型の K-4 では下部パイルキャップ側面の斜めひび割 れを除いて *R*=+20.1×10⁻³ rad 時までに発生した。

ふさぎ板内コンクリートの状況を**写真-2**に示す。上 部パイルキャップふさぎ板内のひび割れ発生状況を確認 するため、実験終了後にK-2のふさぎ板の一部を切断し



図-4 梁せん断力 Qg-層間変形角 R 関係

(3)

(7)

(8)

たが、ひび割れの発生は確認されなかった。

b. 各試験体の破壊状況

K-1 と K-2 における鉄筋の引張降伏は、 $R=7.5 \times 10^{-3}$ rad 時に杭頭補強筋、 $R=8.5 \times 10^{-3}$ rad 時に七ん断補強筋、 $R=9.0 \times 10^{-3}$ rad 時に下部かんざし筋で発生した。なお、 K-1 では $R=6.6 \times 10^{-3}$ rad 時に鉄骨梁フランジの引張降伏 も発生した。さらに、 $R=15 \times 10^{-3}$ rad 時以降は、下部パ イルキャップ下面の杭前面に伸びる斜めひび割れの顕著 な拡大を伴い、K-1 では $R=30.1 \times 10^{-3}$ rad 時に最大耐力 $Q_{max}=199$ kN に、K-2 では $R=15.1 \times 10^{-3}$ rad 時に Qmax=193kN に達した。その後、同ひび割れの拡大に伴 い、耐力が低下した。したがって、両試験体ともに、こ れらの鉄筋の降伏状況とひび割れ拡大状況から、下部パ イルキャップ杭前面部のせん断破壊によって最大耐力に 至ったと考えられる。

K-1 と K-2 における $Q_g - R$ 関係の包絡線の比較を図ー 5 に示す。K-1 と K-2 の $Q_g - R$ 関係は、最大耐力時の $R=20 \times 10^3$ rad までは概ね同様であったが、それ以降で は、ふさぎ板をボルト接合して溶融亜鉛めっき処理を施 した K-2 の方がやや下回って推移した。

K-3 では、鉄骨梁フランジの引張降伏は、 $R=8.0 \times 10^{-3}$ rad 時に発生した。また、鉄筋の引張降伏は、 $R=9.0 \times 10^{-3}$ rad 時にせん断補強筋、 $R=10.5 \times 10^{-3}$ rad 時にせん断補強筋、 $R=10.5 \times 10^{-3}$ rad 時にで発生した。さらに、S 柱の圧縮降伏が、 $R=14.0 \times 10^{-3}$ rad 時に発生した。 $R=20 \times 10^{-3}$ rad 以降は、下部パイルキャップ杭前面の斜めひび割れが進展し、 $R=29.0 \times 10^{-3}$ rad 時にパイルキャップ主筋で引張降伏が発生し、 $R=30.1 \times 10^{-3}$ rad で最大耐力 $Q_{max}=255$ kN に達した。その後、同ひび割れの拡大に伴い、耐力が低下した。したがって、鉄筋の降伏状況とひび割れの進展状況から、試験体の破壊性状は下部パイルキャップ杭前面部のせん断破壊であると推察される。

K-4 では、 $R = 4.8 \times 10^3$ rad 時に鉄骨梁フランジの引張 降伏が発生し、 $R = 30.2 \times 10^3$ rad 時に最大耐力 $Q_{max} =$ 151kN に至るまで、鉄骨梁フランジの塑性ひずみが増加 するとともに、 $Q_g - R$ 関係は安定した紡錘形の履歴性状 を示した。その後、鉄骨梁フランジとウェブの局部座屈 が顕著となり耐力が低下した。なお、最終変形時まで、 パイルキャップ内では鉄筋の降伏は生じず、パイル キャップに生じたひび割れ幅は 0.2mm 以下で明瞭に拡 大しなかった。したがって、鉄骨梁の降伏状況から、鉄 骨梁の曲げ降伏によって最大耐力に至ったと考えられる。



4. 設計式の検証

下部パイルキャップの耐力(*uQup*)の算定には、学会指 針³⁾に示される既製コンクリート杭のパイルキャップの うち、杭頭部をパイルキャップに埋込む接合法における 限界耐力に杭頭補強筋の耐力を考慮した式(3)を用いる こととした。その際、パイルキャップの耐力は、式(4) による杭埋込み部前後のコンクリートの支圧による安全 限界曲げ強度(*uQph*)から、式(5)により求まるせん断強度 (*uQph*1)と、式(6)による杭埋込み部前面の安全限界せん断 強度(*uQph*2)のうち小さい値を使用した。また、杭頭補強 筋の耐力は、式(7)による曲げ耐力(*uMrb*)から式(8)により 求まるせん断強度(*uQrb*)とした。その際、杭頭補強筋の 曲げ耐力は、杭径+周囲 100mm の円形断面柱を等断面 積の正方形に置換し略算した RC 柱³⁾として検討した。

 $_{u}Q_{up}=\min(_{u}Q_{ph1}, _{u}Q_{ph2})+_{u}Q_{rb}$

$${}_{u}M_{ph} = \sigma_{B} \cdot \left(\frac{D \cdot h^{2} \cdot L}{6L + 4h}\right)$$
(4)

$${}_{u}Q_{ph1} = {}_{u}M_{ph}/L \tag{5}$$

$${}_{u}Q_{ph2} = {}_{c}\sigma_{s} \cdot A_{s} \tag{6}$$

ここで、

σ_B:コンクリートの圧縮強度(N/mm²) D :杭外径(mm)

h : 杭のパイルキャップへの埋込み長さ(mm)

L : 杭頭曲げモーメント M とせん断力 Q の比(M/Q)

*c*σ_s :パイルキャップのコンクリートの直接せん断強度 (N/mm²)で右式による *c*σ_s=0.335√*F*_c

- A_s :水平力作用方向の杭前面のパイルキャップのせん断破 壊面の水平投影面積(mm²)で次式による $A_s = c \cdot (c+D)$ ただし、 $c/D \leq 1.0$
- c : 杭表面とパイルキャップ側面までの距離(mm)

$$\begin{pmatrix} N_{min} \leq N < 0 \quad \bigcirc \mathbb{B} \end{pmatrix} \\ {}_{u}M_{rb} = 0.8a_{t}\sigma_{y}D' + 0.4ND' \\ (0 \leq N \leq 0.4bD'F_{c} \quad \bigcirc \mathbb{B} \end{pmatrix} \\ {}_{u}M_{rb} = 0.8a_{t}\sigma_{y}D' + 0.5ND' \left(1 - \frac{N}{bD'F_{c}}\right)$$

 ${}_{u}Q_{rb} = {}_{u}M_{rb} / L'$

$$N_{min}$$
:中心引張時終局強度(=- $a_g \cdot \sigma_y$)(N)

- N : 軸方向力(N)
- a_t : 引張杭頭補強筋断面積(mm²)
- a_g : 杭頭補強筋全断面積(mm²)
- *b* : 杭の等価断面幅(mm)
- D':
 : 杭の等価断面せい(mm)
- σ_y : 杭頭補強筋降伏強度(N/mm²)
- F_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)
- L' : 反曲点から杭頭までの距離 (L+h) (mm)

次に各試験体の下部パイルキャップの耐力の計算値を 梁端荷重に換算し、実験時の最大荷重(*Qmax*)と比較した ものを表-5に示す。全ての試験体において *uQph1*に比

べて_uQph2の方が小さい結果となった。また、K-3は、他 の試験体に比べて埋込み長さが 1.5 倍と大きいため余裕 度が大きくなった。K-4 は、梁の曲げ降伏を想定した試 験体であり、梁の降伏荷重(80kN)以上の耐力を確保して いる。K-1 のひずみ分布の推移を図-6に示す。上部パ イルキャップはパイルキャップ面で逆対称の荷重を受け ており、杭頭補強筋が降伏域に達している。そのため、 パイルキャップが伝達できる荷重に着目し、「てこ機構」 と杭頭補強筋による伝達を累加したものを設計値と仮定 して実験値(最大耐力 Qmax)と比較した。杭頭補強筋を 施して下部パイルキャップの破壊を想定した K-1 と K-2 では、Qmax となる前に杭頭補強筋が降伏し、実験値は uQph1 以上であることを確認したが、設計値に対する余 裕度は小さくなった。一方、杭頭補強筋を施していない K-3 は、_uQ_{ph2} 以上の耐力が得られたものの、_uQ_{ph1} には 至っていない。以上の結果から、杭頭の曲げモーメント を、パイルキャップを通じて鉄骨基礎梁に伝達するにあ たり、「てこ機構」の効果に杭頭補強筋の効果を累加で きると考えられるが、式の精度を向上させることが今後 の課題である。

5. まとめ

本実験では、鉄骨基礎梁工法について、パイルキャッ プの応力伝達機構や設計法の妥当性(パイルキャップの 耐力や架構の破壊形式)を確認するために、十字形およ びト字形部分架構試験体の繰返し載荷実験を実施し、そ の荷重-変形関係、最大耐力、破壊状況から以下のこと を確認した。

- i. 下部パイルキャップせん断破壊型十字形試験体 K-1~K-3 では、杭頭補強筋、せん断補強筋、下 部かんざし筋で引張降伏が発生し、パイルキャッ プ下面の杭前面に伸びる斜めひび割れの拡大に伴 い、杭前面部のせん断破壊によって最大耐力に 至った
- ii. K-2 の上部パイルキャップふさぎ板内において、
 ひび割れの発生は確認されず健全であった
- iii. ふさぎ板を溶接接合した試験体 K-1 と、ふさぎ板 をボルト接合し、鉄骨部を溶融亜鉛めっき処理し た試験体 K-2 の梁せん断力 Qg-層間変形角 R 関 係は、最大耐力程度までは概ね同様であり、ボル ト接合やメッキ処理による影響は小さかった
- iv. 杭偏心を考慮した試験体 K-3 では、杭のパイル キャップへの埋込み長さを杭径の 1.5 倍と長くし、 主筋量を増すことで、杭頭補強筋を加えなくとも 杭からの応力をパイルキャップへ伝達できた
- v. S 梁曲げ降伏型のト字形試験体 K-4 では、S 梁の 曲げ降伏により、Qg-R 関係は安定した紡錘形の 履歴性状を示し、S 梁フランジとウェブの局部座

表-5 下部パイルキャップの計算値 (kN)





図-6 ひずみ分布の推移(K-1 正加力目標変形角時)

屈によって耐力が低下した。なお、パイルキャッ プ内では鉄筋の降伏は生じず、パイルキャップに 生じたひび割れ幅は 0.2mm 以下であった

vi. 提案する鉄骨基礎梁工法について、部分架構試験 体の構造実験を実施した結果、想定した破壊形式 が得られたが、設計式の精度の向上が今後の課題 である

6. あとがき

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】

- 1) 「鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構造設計指針」、 日本建築学会、2021
- (鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針 (案)・同解説」、日本建築学会、2017
- 「2020 年版 建築物の構造関係技術基準解説書」、国 土交通省国土技術政策総合研究所、他

スラブ湿潤養生システムの開発

- スラブ乾湿自動評価システムと散水設備との連携による省カ化-

Development of Moist Curing System for Concrete Slab

- Integration of an Evaluation System for Wet Conditions on Slab and Watering Facilities for Labor Savings -

增田貴之* 中村裕介**

要旨

スラブコンクリートの施工において、コンクリート打設後にスラブ表面の湿潤状態を適切に維持 することは品質管理上大変重要である。しかしながら、湿潤状態の評価は管理者の目視による定性 的な管理が通例となっており、定量的な管理手法が確立されていない課題があった。加えて、同状 態を適切に維持するために、散水養生をはじめとする作業面においても多くの労務が発生している。 そこで、光学センサとそれを搭載する自律走行式ロボットを用い、スラブ表面の乾湿状態を定量的 に評価し、その結果を散水設備へ連携できるシステム一式の構築を行った。また、システムの有効 性を確認するために現場適用を試み、現場実装への可能性を確認した。

キーワード:スラブ、自律走行式ロボット、自動散水、省力化、省資源化

1. まえがき

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

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

このような負担を軽減するために、スラブ表面の湿潤 状態を自動的に管理できる技術の開発が強く望まれてい る。そこで、筆者らはスラブ表面の湿潤状態を定量的に 評価できる光学センサと、それを搭載した自律走行式ロ ボット(**写真-1**)により、ロボットがスラブ上を走行 しながら乾湿状態を評価し、同状態をカラーマップ上に 視覚化できるシステム一式(以下、「スラブ乾湿自動評価システム」)を開発した。その結果、スラブ表面の高品質化に寄与できること、労務を一定数省力化できることを確認した¹⁾。

一方で、湿潤状態を適切に維持するためには、人によ る散水養生作業がやはり必要であることから、同作業へ の省力化がさらに求められた。そこで、散水設備をスラ ブ周囲に設置し、スラブ乾湿自動評価システムから得ら れた結果と連携することで、散水養生を自動化すること を試みた。本報では、同システムと散水設備を実現場に おいて連携し、散水養生を自動化した現場適用実験につ いて報告する。



写真-1 センサ搭載型自律走行式ロボット

*土木本部土木工務部 ** ICT統括センターイノベーション部

2. スラブ乾湿自動評価システム

スラブ乾湿自動評価システムは、スラブ表面の乾湿状 態を近赤外光で評価する光学センサとそれを搭載した自 律走行式ロボット、そして評価結果をカラーマップ上に 視覚化表示するシステムから構成される。

光学センサには、水の吸光特性が認められる波長域で ある λ=1,450nm の光源を採用した。この光源から円偏光 をスラブ表面に照射することで、スラブの乾湿状態を定 量的に評価することが可能と考え、湿潤状態では反射光 がほぼすべて帰還し、乾燥状態では帰還する光量が大き く減少すると仮定した(図-1)。これを実証し、セン サとしての有効性を確認するため、コンクリート供試体 に散水し、湿潤から乾燥における反射光量の測定実験を 行った。測定結果を図-2に示す。

この図から、反射光量の計測値(電圧値)がコンク リート表面の水位、すなわち表面の湿潤状態の変化に伴 い変動すること、そして計測値は測定環境の気温に影響 を受けるものの、一定の範囲に収まることを確認した。 次に、スラブ表面の乾湿状態と計測値の関係について考 察した。スラブ表面に存在する凹凸が水面に露出してい ない状態を「湿潤状態」、スラブ表面の一部の凹凸が水 面より露出した状態を「半乾燥状態」、スラブ表面の多 くの凹凸が水面より露出した状態を「乾燥状態」と分類 した。さらに、複数の実験結果により「湿潤状態」は計 測値が 1,200mV 以上、「半乾燥状態」は 100mV~ 1,200mV、「乾燥状態」は 100mV 以下の範囲に収まるこ とが確認できたので、スラブ表面の乾湿状態の定量的把 握において、計測値による基準を設定することが工学的 に可能であると分かった。



図-1 スラブ表面模式図



図-2 表面水位と反射光量(電圧値)の関係

次に、上記の光学センサを搭載した自律走行式ロボットが移動しながらスラブ表面の乾湿状態を評価し、結果 をカラーマッピング表示する、スラブ乾湿自動評価シス テムの開発を行った。ロボットには光学センサの他に、 ロボ駆動をはじめとした各種操作を制御するパソコンな どの制御部、ロボットの周囲環境を計測する 2D LiDAR を実装した。また、ロボットの自律走行方式には、2 次 元 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 方式を 採用した。ロボットの諸元として、サイズは全長 1,400mm、全幅 750mm、全高 780mm、質量は 85kg、最 高走行速度は時速2.0km、最小回転半径は2.0m である。

開発したスラブ乾湿自動評価システムの実用性を確認 するために、約860m²のスラブ面積を有する建設現場で の適用実験を行った。対象とするスラブに対して一様に 散水し、その後の湿潤養生の経時変化を1時間ごと、計 3回にわたって評価した。1回あたりの評価に要した時 間は約20分であった。評価結果を図-3に示す。なお、 システム上では評価結果と目視結果を比較しやすいよう に、「湿潤状態」を青色、「半乾燥状態」を黄色、「乾燥 状態」を赤色で表現した。

その結果により、時間経過とともに、「乾燥状態」は 増加し、「湿潤状態」は低下していることから、評価結 果に矛盾が生じていないことを確認できた。また、湿潤 状態を定量的に評価するために、「湿潤割合」という指 標を設けた。「湿潤割合」とは、評価可能点全てに対し、 「湿潤状態」として評価する点の割合と定義した。「湿 潤割合」が時間経過とともに一律的に低下していくこと が確認できたため、徐々に乾燥していく過程を定量的に 評価することが可能となった。

以上のように、開発したスラブ乾湿自動評価システム の有効性を実証し、さらに実現場への適用性を確認でき た。これにより、湿潤養生作業における湿潤状態の監視 作業について、品質管理の高度化と省力化に寄与する技 術を提案するに至った。また、実現場への適用性を高め るために、ロボットをはじめとする、スラブ乾湿自動評 価システムの量産化体制を整えた。



図-3 湿潤評価結果と目視結果の比較

3. 散水養生作業における自動化への検討

3.1 開発前の有意性調査

スラブ乾湿自動評価システムは、2023 年 4 月 24 日に 開発した旨を公表し、同年 5 月 24 日から 26 日に開催さ れた「第 5 回 建設・測量生産性向上展(CSPI-EXPO 2023、写真-2)」へ出展した。同展示会は建設業界に 携わる有識者が全国から参加する国内有数の大規模展示 会であり、スラブ乾湿自動評価システムへの出展に対し ては3日間で90社、140名の来客より問合せがあった。 問合せ業者は、ゼネコンをはじめとした元請会社のみな らず、専門工事会社や建機建材リース会社など多岐にわ たり、また問合せの多くは、「散水養生作業も自動化さ れるのであれば利用したい」という要望であったため、 同システムの一定数のニーズと散水養生作業の自動化が 強く求められていることを確認できた。

上記の背景により、散水養生作業の自動化について検 討を開始した。まずは、開発したスラブ乾湿自動評価シ ステムと散水設備を連携することで省力化できる作業工 数を試算し、従来の管理手法の工数と比較して、省力化 の可能性を検討した。試算する前提条件として、対象と するスラブを 800 m² 規模、湿潤養生に掛かる所定日数 を5日間と仮定した。また、各作業の歩掛は、2章で実 験を行った建設現場の実績値を採用した。

比較結果を表-1に示す。スラブ乾湿自動評価システ ムによる状態監視に掛かる工数は一切不要となることに 加え、散水養生を自動化した場合には養生シートの設置 も不要となる。一方で、システムの準備や保守が発生す るものの、工数は全体で4.25人日から1.5人日まで低減 し、約65%の省力化が達成できると見込まれる。また、 養生シートを削減できることや必要十分量の散水になる ことから、省資源化へ寄与することも考えられる。以上 のように、開発したスラブ乾湿自動評価システムを散水 設備に連携することは有意であると判断した。



写真-2 CSPI-EXPO 2023 での出展状況

表-1 湿潤養生に掛かる作業工数 (上)従来の湿潤養生管理の場合 (下)散水設備をシステムと連携した場合

| 各作業 | 人員数 | 時間 | 頻度 | 合計 (人日) |
|---------|-----|-----|----|---------|
| 散水実施 | 2 | 1 | 5 | 1.25 |
| 養生シート設置 | 4 | 4 | 1 | 2 |
| 状態監視 | 1 | 0.5 | 15 | 1 |
| 全体工数 | - | - | - | 4.25 |
| | | | | |

| 各作業 | 人員数 | 時間 | 頻度 | 合計(人日) | |
|---------|-----|----|----|--------|--|
| 散水実施 | 2 | 1 | 1 | 0.25 | |
| 養生シート設置 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 状態監視 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| システム準備 | 1 | 4 | 1 | 0.5 | |
| システム保守 | 1 | 1 | 6 | 0.75 | |
| 全体工数 | - | - | - | 1.5 | |
| | | | | | |

3.2 散水設備との連携

散水養生作業を自動化するために、スラブ乾湿自動評 価システムで用いる自律走行式ロボットに一定量注水し たポリタンクを積載し、システム評価による乾湿状態に 応じてロボットから自動散水する運用方法について検討 した。しかし、注水した状態のロボット重量は200kgを 超えることとなり、金鏝仕上げ後のスラブ表面を走行す ることは大変不利な状況となることが予想された。その ため、金鏝仕上げ後から数時間程度経ったスラブに、実 際にロボットを走行させることで、タイヤ走行痕などス ラブ表面の美観に影響を与える損傷が発生しないか確認 した。金鏝仕上げ後から2時間後と4時間後での走行痕 を写真-3に示す。目視できる程度の走行痕が確認され たため、本運用方法は困難であると判断した。



写真-3 金鏝仕上げ後の走行痕確認状況
したがって、上記の結果により、運用方法の見直しを 行った。見直しにあたり、コンクリート打設後一定時間 はスラブ上に乗らないようにした。そこで、金鏝仕上げ 翌日の朝に人による散水作業を実施し、その湿潤状態を スラブ乾湿自動評価システムにより適切に維持できるよ うな運用方法を検討した。金鏝仕上げ翌日であれば、従 来の管理手法でも人がスラブ上に乗って散水作業をする ことができ、スラブ表面に歩行痕などが確認される事例 も少ない。ロボットの接地圧は約 0.2kg/ cm² である一方、 体重 70kg、靴のサイズ 27.0cm といった一般的な成人男 性による接地圧も約 0.2kg/ cm² であるため、スラブ表面 へ走行痕が残る可能性は低いと考えた。

そこで、対象とするスラブの周囲に散水設備を設置し、 スラブ乾湿自動評価システムでの評価結果をそれに連携 させることで散水養生作業を自動化する運用方法を考え た。特殊な設備などを用いると、現場への適用性が下が ると判断したため、建設現場で一般に用いられている散 水栓とビニールホースを用いるような簡易な設備を選定 した。

次に、散水設備の設置数量を試算するために、実現場 での散水栓とビニールホースを用いて散水可能な範囲を 検証した。散水可能範囲の検証概況を図-4に示す。約 200 m²のスラブに対して効率的に散水を行うために、ビ ニールホースに 1m ごとにドリッパーノズルを取り付け て、それらから水が出るようにした。そして、写真-4 に示す通り、散水を開始して 30 分程度で、200 m²のス ラブ表面がまんべんなく湿潤状態となったことを確認で きた。





写真-4 スラブ面積 200 m²に対する散水状況 (上)散水開始時 (下)開始から 30 分後

4. 現場適用実験

4.1 実験概要

スラブ乾湿自動評価システムと散水設備を連携させ、 実現場での適用性を確認するために、500m²程度のスラ ブ面積を有する建設現場での現場適用実験を行った。選 定した建設現場の概要を図-5に示す。3.2 節で示した ように、まずは人による散水を実施することでスラブ表 面を適切な湿潤状態として、その後同システムと散水設 備によりその状態を維持することを目的とした。そこで、 対象とするスラブ面積 500 m² を四分割し、3.2 節で検証 した散水可能範囲である 200 m² を下回るように計画し た。また、それぞれに散水設備を設置する必要があるが、 散水栓は1つであるため、電磁弁を経由することで、そ れぞれ別系統で散水を実施できる仕様とした。この際、 電磁弁による制御のため、4 つのエリアそれぞれの乾湿 状況に応じて、散水を異なるタイミングで実施できる。 なお、実験時期は 2024 年 3 月中旬で、天候は晴れ、気 温は 16℃、湿度は 62%の環境であり、検証時間は散水 開始から3時間後までとした。3時間と設定したのは、 散水作業は繰り返し作業であり、一定時間でそれが検証 できれば、工学的に充分であると判断したためである。





図-5 現場適用実験の概況
 (上)対象スラブの全景写真
 (下)対象スラブを四分割した時の模式図

次に、実験手順を説明する。まず、自律走行式ロボッ トを人による操作で対象スラブ上をなるべく隈なく走行 させる。この時、自律走行式ロボットに搭載している 2D LiDAR により周辺環境を点群として計測し、ロボッ トが走行する地図を作成する。次に、作成した地図を図 -5と同様にシステム上で分割する。なお、当該現場条 件に応じて今回は四分割としたが、十分割まで可能なシ ステム仕様としている。並行して、生成した地図情報と ロボット情報を照合して、走行経路を算出する。そして、 ロボットが走行を開始し、スラブ表面の乾湿状況を評価 する。

評価にあたって、作成した地図は任意の範囲でグリッ ド化でき、今回は 1m 四方をグリッド化した。また、目 視化しやすいように各グリッドを色付けできるようにし、 「湿潤状態」を青色、「半乾燥状態」を黄色、「乾燥状態」 を赤色で表現した。なお、ロボットの走行経路が同じグ リッド上で重複する場合など、一つのグリッドに対して 複数回の計測が連続して発生する場合がある。その場合、 計測値のうち小さいものを評価結果として採用した。こ れは、計測値が小さいほど「乾燥状態」に近いことを表 し、湿潤養生の管理上、安全側の判定とするためである。 そして、「乾燥状態」が各エリア内で 1 グリッド以上検 知されたら、そのエリアに応じた電磁弁が開き、散水が 開始される。なお、散水が開始されて 10 分間は電磁弁 が開き、散水が継続する仕様とした。

4.2 実験結果と考察

ロボットによる評価は3時間のうち4回実施し、1回 目は人による散水作業が完了したタイミングで評価した。 また、1回の評価に要した時間は約30分であった。時間 経過に伴う表面状態変化の評価結果を図-6に示す。

「湿潤割合」に注目すると、経時変化に伴い一度減少傾 向が確認されたものの、その後は一律的に増加すること が確認できた。また、全ての評価を通して、乾燥状態が 相対的に多かったエリア4番は、スラブ表面に不陸もし くは勾配が発生し、排水を促した可能性がある。そのた め、評価1回目で湿潤割合が71%程度に留まったと考察 した。

| 評価回数 | 評価1回目 (散水完了時) | 評価2回目 (散水完了1時間後) |
|--|-------------------------------|------------------------|
| 評価結果 | | |
| ■乾燥 | 55 | 65 |
| ─ 半乾燥 | 42 | 47 |
| □湿潤 | 244 | 232 |
| 湿潤割合(%) | 71 | 67 |
| 初回比(%) | - | 94 |
| 評価回数 | 評価3回目 (散水完了2時間後) | 評価4回目 (散水完了3時間後) |
| 評価結果 | | |
| ■乾燥 | 37 | 27 |
| | | |
| □ 半乾燥 | 49 | 41 |
| 半乾燥 湿潤 | 49 257 | 41 273 |
| 半乾燥 湿潤 湿潤 湿潤(%) | 49 257 75 | 41 273 80 |
| 半乾燥 湿潤 湿潤(%) 初回比(%) | 49 257 75 105 | 41 273 80 113 |

図-6 金鏝仕上げ後の走行痕確認状況

次に、1回目の「湿潤割合」は71%であったため、こ れを基準とした各回における初回比も算出した。評価2 回目時点では、初回を下回ったものの、3回目以降は初 回を上回り続けた。また、4エリアごとの評価結果も、 図-6に示すスラブ面積全体に対しての結果と同様であ り、結果に矛盾がないことが確認できた。

以上の結果から、スラブ乾湿自動評価システムとそれ に連携した散水設備により、人の手による初回の散水完 了時以降は連続的に湿潤状態を維持できたため、建設現 場への適用性を十分に確認できた。

5. まとめ

コンクリート表面を対象にした乾湿状態を定量的に評 価できるスラブ乾湿自動評価システムとそれに連携する 散水設備を提案した。そして、当該技術の有効性の確認 を目的とした現場適用実験により、以下に示す事項を確 認した。

- i. 近赤外光センサと自律走行式ロボットを含むシス テム一式(スラブ乾湿自動評価システム)を用い て、スラブ面積500m²のコンクリート表面の乾湿 状況を約30分で定量的に評価できる
- ii. 同システムにより、スラブ面積 500m²に対して人による散水が最初に為されていれば、その湿潤状態を維持することが可能である
- iii. 従来の管理手法に比べ、約65%の省力化に寄与することに加え、散水量や養生シートの削減にもつながることから省資源化も見込むことができる

6. あとがき

建設現場への適用性が確認できたため、実装適用を本 格化させる。そのためには、システム利用に係る留意点 などをまとめる必要がある。今回の検証で得られた結果 をはじめとし、更なる検証を重ねて運用方法をまとめて いくこととしたい。

また、本開発はユアサ商事株式会社と共同で実施して いるものであり、2024 年度中にシステム利用開始がで きるよう、体制を整備していく。

【参考文献】

 増田貴之、赤星博仁、「スラブ湿潤状態評価技術の開発(光学センサと自律走行式ロボットによる自動評価システムの構築)」、奥村組技術年報、No.49、 pp.65-70、2023.9

拡散溶出試験における有害物質溶出モデルの考案 - 固相内拡散を考慮したモデルにおけるパラメーターの影響-

Developing a New Toxic Substance Elution Model

for Semi-dynamic Leaching Tests

- Impact of Parameters in a Model Incorporating Solid-phase Diffusion -

鈴木奨士* 小河篤史** 清水祐也**

要旨

地盤および地盤材料の安全性評価においては、有害物質溶出挙動の把握が重要である。数値解析 による溶出挙動の推測手法としては、固相内拡散と吸脱着平衡を組み合わせた D_F-K_dモデルが考案 されている。本研究では、D_F-K_dモデルに粒間拡散を接続した物質溶出モデル(DKDモデル)を作 成し、各種パラメーターが拡散溶出試験のバルク水濃度に与える影響を数値解析により検討した。 その結果、固相内拡散係数は長期的な物質溶出に寄与し、経過時間と溶出フラックスの関係から得 られる溶出機構を判断するための近似直線の勾配に影響を与えることが明らかになった。DKD モデ ルは拡散溶出現象の様々な挙動を再現できることから、拡散現象による有害物質溶出挙動の把握や 難透水層からの長期溶出挙動の予測への利用が期待される。

キーワード:固相内拡散係数、分配係数、拡散溶出試験、難透水性材料、数値解析

1. まえがき

我が国では自然由来の重金属含有土壌を含む地層が存 在するサイトで開発行為が行われるケースが珍しくない。 このような潜在的にリスクを含む地盤や地盤材料に対し て、人への健康被害等を防止するために、有害物質溶出 に関する安全性評価を適切に行う必要がある。なかでも、 溶出特性や地盤および地下水中での移動性を把握し、長 期的な予測をすることが重要とされている¹⁾。

有害物質の長期溶出挙動の把握方法として、雨水曝露 試験²⁾やカラム試験³⁾、シリアルバッチ試験⁴⁾等がある。 これらの試験はそれぞれ適した対象試料や長所短所があ る。シリアルバッチ試験の一種である拡散溶出試験は、 固体試料と溶媒を接触させ所定の日数に溶媒を入れ替え ることで、有害物質の濃度の変化を捉える試験である⁵⁾。 標準試験として、オランダの NEN7345 や米国の ANS16.1、Method1315等が代表的である。これらの試験 は、コンクリート固化体や建設ブロック等の成形体を試 験対象とする。また、容器に試料を充填してその上部に 水を入れ、その水を入れ替えることにより、カラム試験 では実施が困難な難透水性材料に対しても試験が可能で ある(図-1)。難透水性材料での拡散溶出試験は、汚 染された難透水層から直上の帯水層(砂礫層)への有害 物質溶出を模擬した試験法である(図-2)。 有害物質の長期的な溶出挙動は、実現場での実験的把 握が理想的だが、結果が得られるまでに長期間を要する。 一方で、対策設計・施工においては短期間での評価が求 められている。そのため、規模を小さくした簡易実験で パラメーターを取得し、数値解析により推測される。例 えば、盛土や埋め立て後の降水による有害物質の地下水 浸出については、移流分散解析によりシミュレーション され、有害物質が井戸水等人間の生活圏に到達するまで の時間やその時の濃度が推測される。一般的に、数値解 析によるシミュレーションは、固体粒子表面の吸脱着平 衡のみが考慮されている ⁹。しかし、吸脱着平衡には経 過時間による反応の変化が考慮されていないため、固液 接触が数分間と数年間で液相濃度は変わらないことにな る。また、固体表面から有害物質が溶出すると、固体内 部と固体表層で濃度差が生じ、有害物質は固体内部から



図-1 拡散溶出試験による物質溶出の内訳

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



図-2 拡散溶出試験と二段階拡散モデル(DKD モデル)の概要

固体表面に拡散移動し、新たに溶出する可能性がある。 このような現象を固相内拡散と呼ぶ⁷。

固相内における拡散現象は、金属等に関して多く報告 されており⁸、物質溶出に関する研究も報告されている ^{7),9}。肴倉ら⁷は、固相内拡散と吸脱着平衡を接続した 物質移動モデル ($D_{\rm F}-K_{\rm d}$ モデル)を提案し、 $D_{\rm F}-K_{\rm d}$ モ デルで一次元移流分散解析を行った。その結果、既存の モデルでは表現することができなかった濃度ピークや低 濃度での溶出が長期間にわたって続くテーリングを表現 できることを示した。固相内拡散は、液相での拡散と比 較して非常に遅いと考えるが、実現場での時間規模を考 慮すると、物質溶出に影響を与える可能性はある。特に、 固液接触時間が長い条件下では固相内拡散の影響を受け ると考えられる。そのため、前述の汚染された難透水層 直上の帯水層への物質溶出に関して、長期間に渡る固液 接触が想定され、固相内拡散を受けやすいと言える。し かしながら、そのような状態に近い拡散溶出試験におい て、固相内拡散を考慮した解析的検討は行われていない。 拡散溶出試験は水の流れによって物質が運ばれる移流が ないため、物質溶出には、固相内拡散、吸脱着平衡、粒 間拡散(粒子間の拡散)が関わっていると考えられる $(\boxtimes -1)_{\circ}$

そこで本研究では、拡散溶出試験のシミュレーション を想定した固相内拡散と吸脱着平衡および粒間拡散を接 続した二段階拡散による有害物質溶出モデル(以下、

「DKD モデル」)を作成し、難透水性材料を充填した試料からの有害物質溶出挙動を数値解析し、バルク水濃度や間隙水濃度への各種パラメーター(固相内拡散係数 DFや分配係数 Kd)の影響を検討した。

2. 計算方法

2.1 DKD モデル

a. モデル構築のイメージ

本報では、固相内拡散、吸脱着平衡、粒間拡散による DKD モデルを提示する。DKD モデルは拡散溶出試験の シミュレーションとなる。図-2に DKD モデルの概要 を示す。円筒容器の下部に供試体(難透水性材料)、そ の上に水(バルク水)があり、供試体の間隙は水で満た され飽和状態である。この構図は供試体を難透水層、水 を帯水層と想定している。数値計算のため、供試体を水 平方向に任意の厚さに層分割する。各層は固相と液相で 構成され、固相は任意の厚さにセル分割し液相に接する セルを吸着セルと呼ぶ。本モデルでは、固相内拡散係数 が十分に小さく粒子径の影響が生じないことを仮定して、 板状として計算を簡略化した。

b. 吸脱着平衡

 $q = K_d C_I$

吸着セルと液相では吸脱着平衡が成立している。固液 間では、吸着セルからの物質溶出と液相中から吸着セル への物質吸着が起こっているが、吸脱着量が同じになる と、見かけ上、液相の濃度に変化がなくなる。この状態 を吸脱着平衡という。この平衡時における固体への吸着 量に関する係数を分配係数という。分配係数は吸着等温 式から得られ、ラングミュラ型やヘンリー型などの式が 知られている。固体への吸着量は液相の濃度に比例する ヘンリー型の場合、式(1)の関係が成立している。

ここで、q は吸着量 (mg/kg)、 K_d は分配係数 (L/kg)、 C_Lは間隙水濃度 (mg/L) を表す。1つの層について、水 と接触する前後の物質収支は式(2)で表現でき、式(1)お よび(2)から、式(3)が得られ、水に触れた直後の液相濃 度が求められる。

$$M_{\rm T}m_s = M_{\rm AL}m_{\rm AL} + C_{\rm L}V_{\rm L} \tag{2}$$

$$C_{\rm L} = \frac{M_{\rm T}}{K_{\rm d} + R_{\rm LS}} \tag{3}$$

 M_Tは1層あたりの吸脱着に関わる物質の総量(mg/kg)、 m_sは1層あたりの固相重量(kg)、M_{AL}は吸着セル濃度 (mg/kg)、m_{AL}は吸着層重量(kg)、V_Lは1層あたりの 間隙水体積(L)、R_Lsは一層あたりの液固比である。図
 -3に吸脱着平衡および二段階拡散のモデル詳細を示す。
 M_Tは吸着層および間隙水中の物質総量を表すことから (図-3(a))、式(4)が求められる。また、間隙水濃度

 C_{pre} は式(5)によって求められる。 ($M_{\text{AL}}^{(n)}$ m_{AL} + $C^{(n-1)}V_{\text{L}}$)

$$M_T^{(n)} = \frac{\left(\begin{array}{c} AL \text{ pre} & AL & P \\ \end{array}\right)}{m_s} \tag{4}$$

$$C_{\rm pre}^{(n)} = \frac{M_{\rm T}}{K_{\rm d} + R_{\rm LS}}$$
(5)

ここで、MAL pre は吸脱着平衡反応前の吸着セル濃度

(mg/kg)、C は後述する吸脱着反応前の間隙水濃度 (mg/L) である。上付きの(n)は計算回数を表す。その ため、式(4)のC⁽ⁿ⁻¹⁾は後述する前計算時の粒間拡散後の 間隙水となる。吸脱着反応後、吸着セルから間隙水へ物 質が溶出するため吸着セル濃度は変化する。式(6)より、 吸脱着直後の間隙水濃度から吸脱着反応直後の吸着セル 濃度 M_{AL}(mg/kg)が算出される。

$$M_{\rm AL}^{(n)} = \frac{K_{\rm d} C_{\rm pre}^{(n)} m_{\rm s}}{m_{\rm AL}}$$
(6)

c. 固相内拡散

吸脱着平衡後、吸着セル濃度が変化し、吸着セルとそれに隣接するセルとの間に濃度差が生じる。そのため、 固相内は固相内拡散が起こり、単位時間単位面積あたり の移動量(溶出フラックス)(mg/m²/s)は濃度勾配

(mg/m³/m) に比例するという、フィックの第一法則が 成り立つ(式(7))。したがって、固相内拡散係数の単位 は m²/s となる。

$$J = -\theta D_e \frac{dC}{dx} \tag{7}$$

ここで、Jはフラックス、 θ は間隙率、 D_e は有効拡散係数、Cは濃度、xは表層までの距離である。物質移動に伴い液相濃度は徐々に変化するため、式(8)が成立する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{8}$$

式(8)の拡散方程式を差分法により離散化し計算した。 式(9)~(12)に固相および吸着セル濃度の計算式を示す。

$$M_{\rm AL_pre}^{(n)} = M_{\rm AL}^{(n-1)} + \frac{D_{\rm F}\Delta t}{\Delta z^2} \Big(F_{\rm k}^{(n-1)} - M_{\rm AL}^{(n-1)}\Big)$$
(9)

$$F_{i}^{(n)} = F_{i}^{(n-1)} + \frac{D_{F}\Delta t}{\Delta z^{2}} \left(F_{i+1}^{(n-1)} - 2F_{i}^{(n-1)} + F_{i-1}^{(n-1)} \right) (10)$$

$$F_{k}^{(n)} = F_{k}^{(n-1)} + \frac{D_{F}\Delta t}{\Delta z^{2}} \left(M_{AL}^{(n-1)} - 2F_{k}^{(n-1)} + F_{k-1}^{(n-1)} \right) (11)$$

$$F_0^{(n)} = F_0^{(n-1)} + \frac{D_F \Delta t}{\Delta z^2} \left(F_1^{(n-1)} - F_0^{(n-1)} \right)$$
(12)

ここで、Fは固相内拡散に関与する物質濃度(mg/kg)、 D_F は固相内拡散係数(m²/s)、 Δt は刻み時間(s)、 Δz はセル間距離(m)である。Fの下付きの数字やアルフ ァベットはセルの位置を示す番号である。 F_0 は間隙水 から最も離れたセルであり、 F_k は吸着層に隣接するセ ルである(図-3 (b))。なお、 F_0 および F_k はセルに挟 まれていないため、計算式が異なる(式(11)、(12))。 d. 粒間拡散

本報における粒間拡散とは、拡散現象により供試体中 の粒子間を物質が移動することを指す(図-1)。吸脱 着平衡反応後の間隙水濃度を算出後、式(13)~(16)によ り層間の液相での物質移動(粒間拡散)を計算した。計 算方法は固相内拡散と同様である。

$$C_{\rm p}^{\rm (n)} = C_{\rm pre,p}^{\rm (n)} + \frac{D_{\rm E}\Delta t}{\Delta x^2} \left(C_{\rm BL}^{\rm (n-1)} - 2C_{\rm pre,p}^{\rm (n)} + C_{\rm pre,p-1}^{\rm (n)} \right)$$
(13)



図-3 吸脱着平衡および二段階拡散のモデル詳細

$$C_{j}^{(n)} = C_{\text{pre},j}^{(n)} + \frac{D_{\text{E}}\Delta t}{\Delta x^{2}} \left(C_{\text{pre},j+1}^{(n-1)} - 2C_{\text{pre},j}^{(n)} + C_{\text{pre},j-1}^{(n)} \right)$$
(14)

$$C_0^{(n)} = C_{\text{pre},0}^{(n)} + \frac{D_E \Delta t}{\Delta x^2} \Big(C_{\text{pre},1}^{(n)} - C_{\text{pre},0}^{(n)} \Big)$$
(15)

$$C_{\rm BL_pre}^{(n)} = C_{\rm BL}^{(n-1)} + \frac{D_{\rm E}\Delta t}{\Delta x^2} \Big(C_{\rm pre,p}^{(n)} - C_{\rm BL}^{(n-1)} \Big)$$
(16)

ここで、 D_E は粒間拡散係数(m²/s)、 Δx は層間距離 (m) である。 $C_{BL_{pre}}$ は V_L と同体積の直上バルク水濃度 (mg/L)、 C_{BL} は直上バルク水が希釈され濃度が均一に なったバルク水濃度(mg/L)、 $C \Leftrightarrow C_{pre}$ の下付き数字や アルファベットは層の位置を表す番号である。 $C_0 \Leftrightarrow$ $C_{pre,0}$ はバルク水から最も離れた層であり、 C_p はバルク 水直下の層である。なお、直上バルク水および最下層は、 層に挟まれていないため計算式が異なる(式(13)、 (15))。バルク水濃度 C_{BL} はバルク水体積 V_{BL} を用いて 式(17)より計算した。

$$C_{\rm BL}^{(n)} = \frac{\left(C_{\rm BL_{pre}}^{(n-1)}V_{\rm L} + C_{\rm BL}^{(n-1)}\left(V_{\rm BL} - V_{\rm BL_{pre}}\right)\right)}{V_{B\rm L}}$$
(17)

 V_{BL_pre} は直上バルク水体積(L)であり、 $V_{BL_pre}=V_L$ である。以上の設計のもと、常に吸脱着平衡を成立させつつ、固相内および粒間拡散により C_{BL} を繰り返し計算した。

2.2 拡散溶出試験の再現計算

拡散溶出試験において、固相内拡散係数(D_F)等の パラメーターが有害物質溶出に与える影響を数値解析に より検討した。表-1に数値解析における各パラメータ ーの設定条件を示す。解析条件は、小河ら⁵⁾が実施し た実験条件に近づけ、直径0.1mの円筒状カラムの下部 に含水比55%の湿潤試料を1kg、高さ0.08mに設置し、 3日間養生した。なお、この含水比の設定は、試料の液 性限界値の1.1倍であり、3日間の養生は、試料と水を 馴染ませるためである。この間、吸脱着平衡および固相 内拡散による土粒子から間隙水への物質の溶出も考慮し た。湿潤試料は鉛直方向から加圧する圧密試験を行い、 その際に間隙水が排水されるため供試試料の含水比およ び厚さが変化する。したがって、本報では、圧密試験後 の供試体の含水比および厚さの変化も考慮し、含水比は 30%、厚さは0.06mとした。供試体の上部にはカラムの 断面積の9倍量のバルク水706.5 mLを設け、一層の厚 さを 5.0×10⁴ m とし、0.06 m の供試体を 120 層に分割 した。また、分割した各層における固相内拡散について は、土粒子を、図-2に示すように1次元の板状として モデル化し、土粒子の大きさに相当する固相厚さ(吸着 層含む)Hsは、土粒子の平均半径から2.2×10-5mとし た。吸着セル HAL の厚さは 5.0×107m、板状に設定した 固相の1セルの厚さを 5.0×10-7 m とし、44 セルに分割 した(吸着層含む)。固相内の物質濃度 F は、各パラメ ーターの影響を見るため枯渇しない十分な濃度である 50.0 mg/kgとした。刻み時間を200 sとし、1、2、4、8、 16 日目にバルク水の水入替えを再現するため、上記日 数のバルク水濃度を 0 mg/L となるよう設定した。拡散 溶出試験は 32 日目で終了させ、1、2、4、8、16、32 日 目の水入替え直前の CBL を算出し、それぞれの CBL を第 1~6 画分とし、F1~F6 と表記する。

DKD モデルにおける各パラメーターの影響を検討す るため、 $K_d \ge 0.01 \sim 100.0 \text{ L/kg}$ 、 $D_F \ge 1.0 \times 10^{-25} \sim 10^{-18} \text{ m}^{2}/\text{s}$ の範囲でそれぞれ計算した。 $\Delta x \tan 5.0 \times 10^4 \text{ m}$ とし供試 体を120層に分割した。 $K_d \ge \infty$ えて解析を行う際は、 D_F の影響が小さくなるように $D_F \tan 1.0 \times 10^{-25} \text{ m}^{2}/\text{s}$ とし、 D_F を変えて解析を行う際は、 $K_d \tan 0.01 \text{ L/kg}$ とした。また、 $D_E \tan 1.0 \times 10^{-10} \text{ m}^{2}/\text{s}$ とした。

2.3 拡散律速の判定

DKD モデルの数値解析により算出された CBL から、 単位面積あたりの溶出量 qiを式(18)によって算出した。 また、時間あたりの溶出量(溶出フラックス) Ji は式 (19)から算出できる。

| $q_{\rm i} = \frac{C_{\rm i} V_{\rm BL}}{A}$ | (18) |
|--|------|
| $J_{i} = \frac{q_{i}}{t_{i} - t_{i-1}}$ | (19) |

ここで、Ciは各画分の CBL、A はカラム断面積、ti-ti-1 は 各画分の水入替えまでの時間である。水入替えまでにお

| 記号 | 名称 | 値 | 単位 |
|--------------|---------|--|-------------------|
| $H_{\rm s}$ | 固相厚さ | 2.2×10 ⁻⁵ | m |
| $H_{\rm AL}$ | 吸着セル厚さ | 5.0×10 ⁻⁷ | m |
| $m_{\rm AL}$ | 吸着層重量 | 1.2×10^{-5} | kg |
| Δz | セル間距離 | 5.0×10 ⁻⁷ | m |
| Δx | 層間距離 | 5.0×10 ⁻⁴ | m |
| Δt | 刻み時間 | 200 | s |
| F | 固相濃度 | 50.0 | mg/kg |
| $D_{\rm E}$ | 粒間拡散係数 | 1.0×10^{-10} | m ² /s |
| Kd | 分配係数 | 0.01~100.0 | L/kg |
| $D_{\rm F}$ | 固相内拡散係数 | 1.0×10 ⁻²⁵ ~10 ⁻¹⁸ | m ² /s |

表-1 各パラメーター設定条件



図-4 溶出機構と勾配との関係

けるフラックスに対応する時刻は式(20)で求めた。

$$\overline{t}_{1} = \left(\frac{\sqrt{t_{1}} + \sqrt{t_{1-1}}}{2}\right)^{2} \tag{20}$$

以上より、logtおよび logJを求め、両者の関係から溶 出機構を判定した。各画分の Ji とti との関係を両対数グ ラフにプロットした。図-4に溶出機構と勾配との関係 を示す。溶出機構が拡散律速の場合、 $\log t_i$ および $\log J_i$ の近似直線の勾配は-0.5 を示す。本解析では 1、2、4、 8、16、32 日目の CBL を求めたので、いずれの画分にお いても、CBL がほぼ一定となる場合、CBL は経過時間の みに依存し、近似直線の勾配は-1.0となる。また、溶解 が律速となる場合は、フラックスは時間に比例するため、 一定となり勾配0のグラフが描かれる。いずれの溶出機 構においても、拡散溶出試験の期間内に供試体の底部ま で間隙水中の物質移動が及ぶと、勾配は下方向に曲がる。 さらに、本研究の数値解析で得られた CBL から溶出フラ ックスを求め、Kd、DF のパラメーターが変化した時、 経過時間と溶出フラックスの関係から得られる近似直線 の勾配がどのように変化するのか検討した。

3. 結果および考察

図-5に C_{BL}から得られた溶出フラックスに及ぼす各 パラメーター (D_F 、K_d)の影響を示す。経過時間と溶 出フラックスの関係から得られた近似直線は表-2、3 にまとめた。 D_F が大きくなると、いずれの時間でも溶 出フラックスは大きくなったが、その増加程度は経過時 間により異なった (図-5 (a))。 D_F が 1.0×10⁻²⁵ m²/s から 1.0×10⁻¹⁷ m²/s に大きくなると、 $\bar{t} = 0.3$ では約 6.8 倍増加したのに対して、 $\bar{t} = 23.3$ では約 22.6 倍増加した。 そのため、 D_F が大きくなるにつれて、経過時間と溶出 フラックスから得られる近似直線の勾配は-0.488 から-0.220 と緩やかになった (表-2)。固相内拡散を考慮し ないと、吸着セル由来の物質のみが間隙水およびバルク 水へと移動する。一方、固相内拡散を考慮すると、固相



図-5 C_{BL} から得られた経過時間と溶出フラックスの関係((a): D_F の影響、(b): K_d の影響)

| 表-2 近似直線の勾配と決定係数(D _F 変化時) | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|-----------------------|--|--|--|--|--|--|
| $D_{\rm F}~({\rm m^{2/s}})$ | 勾配 | 決定係数(R ²) | | | | | | |
| 1.0×10 ⁻²⁵ | -0.488 | 0.999 | | | | | | |
| 1.0×10 ⁻²³ | -0.488 | 0.999 | | | | | | |
| 1.0×10 ⁻²¹ | -0.483 | 0.999 | | | | | | |
| 1.0×10 ⁻¹⁹ | -0.313 | 0.960 | | | | | | |
| 1.0×10 ⁻¹⁷ | -0.220 | 0.915 | | | | | | |

内に含まれる物質も溶出する可能性があるため、溶出ポ テンシャルは多くなる。したがって、実現象の時間スケ ールで考えた場合、 D_F が非常に大きいと早期に固相内 の物質は溶出しきり、枯渇すると考えられる。また、 $D_F = 1.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2 \text{s}$ のような固相内からの物質供給がほ とんど効いていない非常に小さい D_F でも、固相内から 時間をかけて吸着層へ移動し、長期間に渡って物質が溶 出し続ける可能性がある。

 K_{d} が大きくなると、いずれの経過時間でも溶出フラ ックスは小さくなったが、その減少程度は経過時間によ り異なった(図-5 (b))。 K_{d} が 0.01 L/kg から 100.0 L/kg に大きくなると、 $\bar{t} = 0.3$ 、1.5 では、約 1/35 に減少 したのに対して、 $\bar{t} = 2.9-23.3$ では約 1/19 減少した。そ のため、 K_{d} が大きくなるにつれて、経過時間と溶出フ ラックスから得られる直線勾配が-0.488 から-0.278 と緩 やかになった(**表**-**3**)。よって、式(8)の拡散係数Dの 内訳は式(21)のように示され、拡散係数D は粒間拡散 DE、遅延係数R で表現される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_{\rm E}}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{21}$$

また、式(22)より遅延係数 Rには Kd が含まれている。

$$R = 1 + \frac{\rho_{\rm d}}{\rho} K_{\rm d} \tag{22}$$

そのため、理論上、 K_d は溶出フラックスの増減には影響するが、溶出機構には影響を及ぼさないと考えられる。 しかしながら、 K_d が大きい条件下では勾配への影響が 見られた(図-5 (b))。そこで、図-5 (b)の $K_d =$ 10.0 L/kg において、総分割数を変化させ経過時間と溶出 フラックスの関係を確認した(図-6)。総分割数を 120 から 480 に細かくすると、t = 0.25、1.46 の溶出フ

| 表ー3 近似直線の勾配と決定係数(K _d 変化時) | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|-----------------------|--|--|--|--|--|
| K _d (L/kg) | 勾配 | 決定係数(R ²) | | | | | |
| 0.01 | -0.488 | 0.999 | | | | | |
| 0.1 | -0.486 | 0.999 | | | | | |
| 1.0 | -0.475 | 0.996 | | | | | |
| 10.0 | -0.424 | 0.972 | | | | | |
| | | | | | | | |



ラックスが増加し、勾配は-0.424 から-0.494 となり、拡 散律速の勾配 -0.5 に近づいた。したがって、 $D_{\rm E}$ や $K_{\rm d}$ には、その値によって必要な Δx が存在することが示唆 された。

 K_d の変化範囲によって、 C_{BL} の変化量も異なり、例え ば $K_d = 1.0 - 5.0$ L/kg と 1.0 ~ 5.0 L/kg は、 C_{BL} の変化量に 大きな差が生じた。 K_d が関わる計算式(式(5))を、 $C_{pre} \ge K_d$ の分数関数と考えると、曲線のグラフが描ける。 C_{pre} は C_{BL} を算出する式と関係があることから、実際に $K_d \ge C_{BL}$ の関係を見ると、 $\mathbf{図} - \mathbf{7}$ のような曲線を描いた。 この曲線は、 K_d が小さい範囲(例えば $K_d < 2.0$)での変 化ほど、 C_{BL} の変化量は大きくなり、その変化量は D_F の 影響を大きく受けた。一方、 K_d が大きい場合、吸脱着 平衡で物質は吸着セルに留まり M_{AL} が変化しにくい。そ のため、固相内と吸着セルの間の濃度勾配が大きくなら ず、 D_F が大きくても C_{BL} に大きな変化がなかったと推察 する。 K_d は取得方法、試料や対象物質によっても大き く異なる。例えば、既往の研究報告では、まさ土や珪砂、 砂質土では 0.01~21 L/kg^{9,10}、粘性土でも 1.5~81.0 L/kg と数値に大きな幅がある^{11),12}。本研究の解析では、 K_d が小さいほど C_{BL} に影響を与え、特に $K_d < 2.0$ L/kg で C_{BL} の変化が顕著であった。難透水性である粘性土の K_d が C_{BL} に大きく影響を与える範囲($K_d < 2.0$) にある可能 性もあり、 K_d は溶出機構には影響しないが、 C_{BL} 全体の 濃度に関しては重要なパラメーターと考える。

4. まとめ

本研究では、固相内拡散と吸脱着平衡および粒間拡散 を接続した物質溶出モデル(DKD モデル)を作成し、 固相内拡散係数 DF、分配係数 Kd のパラメーターを変化 させ、拡散溶出試験における溶出挙動を数値解析した。 数値解析の結果、Kd および DF は拡散溶出試験の挙動に 影響を与えることが明らかになった。図-8に本研究で 得られた各パラメーターによる溶出挙動の影響をまとめ た。得られた知見は下記のとおりである。

- i. Ka が大きくなると溶出濃度は全体的に低くなり、 DF が大きくなると溶出濃度は全体的に高くなり、 長期的な物質溶出に寄与することが示唆された
- ii. K_d は固相と吸着セルの濃度差を支配する重要な パラメーターとして考えられ、K_d が大きい場合 は、D_Fによる影響を受けにくいことが示された
- iii. DKD モデルは、拡散溶出試験におけるあらゆる 溶出挙動を表現でき、有害物質の長期溶出挙動の 予測が期待される

今後の課題として、拡散溶出試験の実験的検討による 解析値およびモデルの妥当性の検証がある。その他に、 本研究のモデルの有効性を高めるために、各パラメータ ーを迅速かつ簡易的に取得する手法の開発が求められる。

【参考文献】

- 駒井 武、「地盤環境における有害化学物質の移流分 散シミュレーション」、安全工学、Vol.36、No.6、 pp.422-426、1997
- 乾 徹、片山真理子、勝見 武、高井敦史、嘉門雅 史、「屋外曝露試験による自然由来重金属を含有する 岩石の長期溶出挙動評価」、材料、Vol.63、No.1、 pp.73-78、2014
- 3) 片山潤一、乾 徹、勝見 武、高井敦史、「カラム浸 透試験による長期通水を行った海成堆積岩中の地質



図-8 DKD モデルで得られる拡散溶出試験の物質溶出挙動のまとめ

由来砒素の挙動評価」、地盤工学ジャーナル、Vol.15、 No.4、pp.675-682、2020

- 中村謙吾、保高徹生、三浦俊彦、井出一貴、西田憲 司、「自然由来のヒ素含有土からの長期溶出特性の検 討」、第24回廃棄物資源循環学会講演集、pp.559-560、 2013
- 5) 小河篤史、高井敦史、肴倉宏史、目黒 緑、勝見 武、「自然由来の重金属等を含有する粘土の拡散溶出 特性に及ぼす温度の影響」、地盤工学ジャーナル、 Vol.17、No.2、pp.181-194、2022
- 6) 江種伸之、「移流分散方程式で用いられる遅延係数に ついて」、地下水学会誌、Vol.64、No.3、pp.215-223、 2022
- 7) 肴倉宏史、細野賢一、河原裕徳、横山裕之、「固相内 拡散と吸脱着平衡を接続した物質移動モデルの作成 と各パラメーターが有害物質挙動に及ぼす影響」、地 盤工学ジャーナル、Vol.17、No.3、pp.267-275、2022
- P・嶋英雄、「固体における拡散」、まてりあ、Vol.36、 No.9、pp.851-853、1997
- 奈佐原寅太郎、肴倉宏史、加藤智大、高井敦史、勝 見 武、「固相内拡散を考慮した固液間物質移動モデ ルに関する実験的検討」、地盤工学ジャーナル、 Vol.18、No.4、pp.381-393、1987
- Sakanakura, H., Ito, K., Tang, J., Nakagawa, M., Ishimori, H.: Determining adsorption parameters of potentially contaminant-releasing materials using batch tests with differing liquid-solid ratios, materials, Vol.14, No.10, pp. 2534, 2021.
- 11) 三浦拓也、遠藤和人、山田正人、「失敗しない土壌 の吸着試験方法の提案と適用性評価」、地盤工学ジャ ーナル、Vol.17、No.3、pp.331-339、2022
- 12) 森下智貴、大坪政美、Li, L.、東 孝寛、「海成粘土 の鉛吸着・移動特性に及ぼす塩類の影響」、農業農村 工学会論文集、No.276、pp.7-13、2011

自動制御エアカーテンシステムの開発

- エアカーテンの吹出風向が熱遮断性能に与える影響に関する研究-

Development of Automated Air Curtain System

- Study on the Effect of Airflow Direction on Thermal Shielding

Performance of Air Curtain -

神長侑磨* 岩下将也*

要旨

室内外の熱分離手法の一つにエアカーテンがある。その熱遮断性能を高めるには吹出角度の適切 な設定が重要だが、その知見は少ない。本研究では CFD (数値流体力学)解析と実験を行い、空間 温度が高い方へ吹出角度を調整することにより約 10%程度の熱遮断性能が向上することを確認した。 さらに、エアカーテンの風向を室内外の温度差に応じて自動制御する機構を開発し、実験検証を 行った結果、エアカーテンを稼働しない場合と比べ 30 分間で約 8%の空調消費電力量を削減できた。

キーワード:エアカーテン シーリング効率 CFD 解析 実験室実験 熱遮断性能 温度差

1. まえがき

商業施設、物流倉庫、工場などの入口開口部は来客や 車両の通行のために開放状態で運用されることが多い。 この状態では、外気侵入により室内の快適性や冷暖房効 率が低下する問題が生じる。特に、物流倉庫や工場のト ラックバースは開口面積が大きく、外気侵入の影響が大 きい。この対策として、開口部に送風し、室内外の境界 面に気流の壁を形成して空気の流入出を抑えるエアカー テンがある。エアカーテンの熱遮断性能を高めるために は、風量や設置位置に加え、吹出角度を適切に設定する 必要がある。例えば、図-1 (a) に示すように、冷房 時には、温かい外気は冷房空気よりも軽いため上方に移 動し、開口部上部では屋外側の圧力が高く、下部では低 くなる。この圧力差により、図-1 (b) のようにエア カーテン気流の壁が湾曲し、外気侵入が容易になるり。 このため、エアカーテンの吹出角度を圧力の対抗方向に 傾けることで気流の湾曲を軽減し、熱遮断性能を向上さ せることが考えられるが、室内外の温度差と最適な吹出 角度の関係に関する知見はまだ不足している。また、開 口部上の高所に設置したエアカーテンの吹出角度を室内 外の温度差に応じて変更することは実用的に困難である。

本報では、大開口を持つ空間を対象に、室内外の温度 差と吹出角度を様々に変化させ、CFD 解析を行い、実 験を通じて熱遮断性能を定量的に評価し、これらの関係

*技術本部技術研究所環境研究グループ

性を明らかにした。さらにエアカーテンの風向を室内外 の温度差に応じて自動的に調整するシステム(写真-1) を開発し、このシステムの使用が空調の消費電力量を削 減する効果も検証した。





(a)開口周辺の温度差に
 (b) 圧力により湾曲するよる圧力分布
 エアカーテン気流
 図-1 温度差による空気の流れの模式図



写真-1 自動制御エアカーテンシステム (GK2509S 対応)

2. 熱遮断性能の評価手法

本研究では、熱遮断性能を CFD 解析、実験ともに式 (1)で表されるシーリング効率 $^{2}\eta$ (t) により評価する。

$$\eta(t) = \left(1 - \frac{T(t) - T_{\text{ini}}}{T_0(t) - T_{\text{ini}}}\right) \times 100 \,(\%) \tag{1}$$

ここで、T(t):エアカーテン稼働時の室内平均温度 (\mathbb{C})、 $T_0(t)$:エアカーテン非稼働時の室内平均温度 (\mathbb{C})、 T_{ini} :室内空間の平均初期温度(\mathbb{C})、t:空気混 合開始後の時間(s)である。

3. 解析による評価

3.1 解析条件

図-2に示す 8m×8m×8m の密閉空間を対象として CFD 解析を行う。この空間は厚さ 0.1m の間仕切壁によ り模擬室内空間と模擬屋外空間に二分されている。間仕 切壁の中央部には開口があり、上部にはエアカーテンを 室内側に設置する。エアカーテンの形状は図-3のよう に上面を吸込口、下面を吹出口とし、風量は 1060m³h で一定とする。空間平均温度の算出点は図-4に示す 18点である。室内外の初期温度に差を与え180秒間の非 定常解析を行い、室内外の空気の混合による空間平均温 度の変化を算出する。解析条件は表-1に示す通りであ る。なお、本解析モデルは次章で述べる実験空間を模擬 したものである。

3.2 解析ケース

解析パラメータを表-2に示す。暖房を想定した場合 と冷房を想定した場合のそれぞれで解析する。暖房想定 時では、室温の初期値を20℃とし、外気温度を10~ 16℃の間を1℃刻みで変化させる。冷房想定時では室温 の初期値を25℃とし、外気温を29℃~35℃の間を1℃刻 みで変化させる。吹出角度は屋外側への傾きを正とし、 暖房時は-20°~0°、冷房想定時は0°~20°の間の 10°刻みで変化させる。今回と同様の条件で事前に 行った解析では、30°以上でシーリング効率が低下し たため、この範囲に設定した。エアカーテン非稼働での 解析も各外気温で行う。解析ケース数はこれらのパラ メータを元にして合計56 ケースとなる。

3.3 解析結果

冷房想定時で外気温35℃時の解析開始180秒後の温度 分布図(X=4m)を図-5に示す。(a)のエアカーテン 非稼働時では室内外の温度差により開口上部で上昇流が 生じ室内に外気が侵入している。また、本解析空間は断 熱・密閉されているために、解析180秒後では室内側下 部の居住域の室温が低く見えるが、時間が経過するにつ れて温熱環境が悪化すると予測される。(b)の下方垂直 に吹出した場合は、遮断効果は得られているものの温度 差による側圧によってエアカーテン層が湾曲している。

(c)、(d)のように屋外側に吹出角度を傾けると、エア カーテン層が室内外の境界部に形成される。図-6は初 期室温からの解析開始 180 秒間の温度変化、図-7は



図-4 空間平均温度の算出点

表一1 解析条件

| 解析領域 | 8.0m (X) \times 8.0m (Y) \times 8.0m (Z) |
|--------------|---|
| 解析格子数 | 1,481,544 114 (X) ×114 (Y) ×114 (Z) |
| 乱流モデル | 標準 k- ε モデル |
| 計算条件 | 非定常 (180 秒間、⊿t:クーラン数<1) |
| 境界条件 | フリースリップ壁、断熱条件 |
| エアカーテン 形状 | 1.0m (X) ×0.1m (Y) ×0.2m (Z) 吹出・吸込口: 1.0m (X) ×0.1m (Y) |
| 吹出風量 | 1060m ³ /h |

| | 表-2 解析パラメ | ータ |
|-------------|-------------------|-------------------|
| パラメータ種 | 冷房想定時 | 暖房想定時 |
| 初期室温 (℃) | 25 | 20 |
| 初期外気温 | 29、30、31、32、 | 10、11、12、 |
| (°C) | 33、34、35 | 13、14、15、16 |
| 吹出角度 | 0、10、20、 | -20, -10, |
| (°) | 非稼働 | 0、非稼働 |
| 解析ケース数 | $7 \times 4 = 28$ | $7 \times 4 = 28$ |

シーリング効率の時間変化である。エアカーテン稼働時 は非稼働時よりも室温変化が小さくなり、180 秒後の シーリング効率は、吹出角度が 20°の時に最も高く

(53.1%)、0°の場合(39.1%)に比べ、14.0%向上して いる。エアカーテンの吹出角度を傾けることで、エア カーテン層を室内外の境界部に形成することができ、熱 遮断性能が高まることが示された。

各ケースの解析開始180秒後シーリング効率を表-3 にまとめる。各ケースの初期外気温から初期室温を引い た相対値を「初期相対外気温度」とし、初期相対外気温 度ごとにシーリング効率を示す。また各初期相対外気温 度で最もシーリング効率の高い値を黄色背景で示す。相 対外気温度が低いほど室内側に、相対外気温度が高いほ ど屋外側に吹出角度を傾けるとシーリング効率が向上す る傾向が確認できる。





図-7 シーリング効率の時間変化 (冷房想定時 外気温 35℃)

表一3 初期相対外気温度·吹出角度別 シーリング効率(解析開始180秒後)

(a) 暖房想定時(室温 20°C)

| 吹出 免産 | | 初 | 期相対 | 外気温 | 度(℃ |) | |
|-----------|-------|------|------|------|------|------|------|
| β度 (°) | -10 | -9 | -8 | -7 | -6 | -5 | -4 |
| -20 | 12.2 | 19.6 | 27.1 | 32.4 | 36.0 | 40.9 | 48.5 |
| -10 | -1.4 | 4.2 | 14.4 | 26.3 | 40.8 | 50.1 | 55.7 |
| 0 | -12.9 | -9.1 | -4.1 | 4.0 | 16.9 | 39.1 | 52.7 |

(b) 冷房想定時(室温 25℃)

| 吹出 免産 | | 初期 | 朝相対タ | 小気温厚 | 훛(℃) | | |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
|) 用度 (°) | +4 | +5 | +6 | +7 | +8 | +9 | +10 |
| 0 | 65.1 | 67.8 | 54.7 | 48.7 | 51.4 | 38.9 | 39.1 |
| 10 | 73.5 | 75.9 | 64.9 | 58.6 | 61.9 | 52.5 | 44.4 |
| 20 | 72.2 | 78.5 | 71.1 | 66.8 | 65.9 | 56.6 | 53.1 |

4. 実験による評価

4.1 実験条件

ここまで解析により室内外の温度差と吹出角度がシー リング効率に与える影響を確認してきたが、次に実験に より評価し、実空間で運用可能かを検証する。

実験空間を図-8に示す。8m× 8m×8m の空間を室 中央で間仕切り、模擬屋外空間、模擬室内空間に分けた。 間仕切りの平面中央には、開口高さ4mの開閉扉を設置 した。なお、躯体蓄熱の影響を小さくするため、実験室 内の梁柱部を除く壁部、床、天井、間仕切り、開口扉に は断熱材を設置した。各空間には熱電対を 16 点設置し、 空間温度を計測した。



模擬屋外空間 * 吹出角度



写真-2 実験写真(左)と風向調整板(右)

エアカーテンの風向調整方法を写真-2に示す。既製 品(三菱電機、GK2509S 定格風量 1060m³/h)のエア カーテンの下部に、風向調整板を備え付け、板の角度を 変更することにより風向を調整した。実験で得られた室 内平均温度から、解析と同様にシーリング効率を算出し、 エアカーテンの熱遮断性能を評価した。

実験パラメータを表-4に示す。初期相対外気温度を 冷房想定時として+4~+10℃、暖房想定時として-7~ -4℃の間で調整する。

4.2 実験結果

初期相対外気温度+7℃、-7℃の場合における吹出角 度別の扉解放後の温度変化を図-9に示す。エアカーテ ンなしの場合に比べて、エアカーテンがある場合の方が、 温度の時間変化が小さくなっており、エアカーテンによ



表-4 実験パラメータ

(a) 初期相対外気温度 -7℃

時間 (s)



(a)初期相対外気温度 -7℃

る熱遮断性能の効果が確認できた。また、垂直に吹き出 すより、温度が高い側の空間に角度をつけて吹出したほ うが向上する傾向が見られた。これは解析で示した結果 と同様である。初期相対外気温度を変えた他の実験ケー スにおいても同様の結果となった。

これらの温度推移を元に、シーリング効率の時間推移 を示したものを図-10に示す。シーリング効率は、扉 解放後は温度変化に応じて大きく上下するものの、概ね 3分で安定している。また、下方垂直で吹き出すよりも、 温度が高い側に向かって吹き出す方が、シーリング効率 が向上している。

すべての実験ケースにおける 180 秒後のシーリング効 率を表-5、表-6に示す。参考として、解析で得られ たシーリング効率を下段に付す。また、各初期相対外気 温度で最大のシーリング効率を、実測値は赤字下線で、 解析値は青字下線で示す。

実測と解析値を比較すると、暖房想定時では最大で約 48point 差があり、全体として乖離が見られる。一方冷 房想定時は全体として 10point ほどの差であり、比較的 良好な対応がみられた。この差の原因としては、躯体蓄



(b) 初期相対外気温度 +7℃



30

0

0

(b) 初期相対外気温度 +7℃

60

90

時間 (s)

120

150

180



| 表一 | 表-5 暖房想定時のシーリング効率 | | | | | _ | 表一6 冷房想定時のシーリンク効率 | | | | | | | |
|------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|-------------------|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 角度 | | 初期 | 相対外夠 | 気温度 | (°C) | | 角度 | | | 初期 | 相対外夠 | 気温度 | (°C) | |
| (°) | | -7 | -6 | -5 | -4 | | (°) | | +4 | +6 | +7 | +8 | +9 | +10 |
| -20 | 実測 | 54.5 | 74.3 | 70.5 | <u>70.1</u> | | 0 | 実測 | -56.6 | 9.4 | 38.9 | 41.1 | 24.6 | 6.8 |
| -20 | 解析 | <u>32.4</u> | 36 | 40.9 | 48.5 | | 0 | 解析 | 65.1 | 54.7 | 48.7 | 51.4 | 38.9 | 39.1 |
| _ 10 | 実測 | <u>56.5</u> | <u>76.6</u> | <u>73.4</u> | 56.4 | | 10 | 実測 | <u>62.2</u> | <u>51.2</u> | <u>50.3</u> | <u>57.6</u> | 37.2 | 25.1 |
| -10 | 解析 | 26.3 | <u>40.8</u> | <u>50.1</u> | <u>55.7</u> | | 10 | 解析 | <u>73.5</u> | 64.9 | 58.6 | 61.9 | 52.5 | 44.4 |
| 0 | 実測 | 44.3 | 65.1 | 61.3 | 51.3 | | 20 | 実測 | 16.1 | 24.7 | 35.6 | 57.3 | 63.2 | 39.5 |
| 0 | 解析 | 4 | 16.9 | 39.1 | 52.7 | | | 解析 | 72.2 | <u>71.1</u> | <u>66.8</u> | <u>65.9</u> | <u>56.6</u> | <u>53.1</u> |

熱の影響が考えられる。暖房想定時は実測値が解析値よ りもシーリング効率が高く、冷房想定時は反対の傾向が あった。これは断熱されていない柱梁が外部からの熱に より温められ、室内の加熱源となった可能性がある。本 実験は外気温が 20℃以上の暖かい時期に行われたため、 暖房想定時に蓄熱の影響をより強く受け、暖房を保持さ せるように働いたと考えられる。

実測結果全体の傾向では、0°垂直吹出と比較して、 温度が高い側に吹出角度をつけたケースのほうが、シー リング効率は向上する結果となり、解析で得られた傾向 と一致している。

5. 自動制御エアカーテンシステム

5.1 自動制御エアカーテンシステムの構成

これまでの評価結果を基に、自動制御エアカーテンシ ステムを開発した。システムの構成図を図-11 に示す。 このシステムは、既成のエアカーテンに風向調整ブレー ドとその角度を変更するモーターを追加し、制御盤に接 続された温度センサで室内外の温度を計測するものであ る。制御盤に設置された温度センサが室内外の温度をリ アルタイムで測定し、そのデータを基に吹出角度が自動 的に調整される構造となっている。これにより、外気温 度の変動に対応して最適な角度で風を吹き出し、外気の 侵入を効果的に抑制することが可能となる。相対外気温 度と吹出角度の関係を図-12 に示す。相対外気温度が 9℃以上で吹出角度 20°、9℃未満 4℃以上で吹出角度 10°、4℃未満-4℃より大きい場合は垂直下方吹出と



図-12 相対外気温度と吹出角度の設定



写真-3 自動制御エアカーテンシステム (MK5010TA 対応)





× T型熱電対 (Z=1,3,5,7m) 温度センサー (Z=1m)

(a) 実験室平面

面 (b)実験室断面 図-13 実験空間

表-7 実験条件

| パラメータ種 | 条件 |
|-----------|----------------------------|
| 空調設定温度(℃) | 模擬室内側 : 24℃ 模擬屋外側 : 18℃ |
| 吹出角度(°) | 非稼働、自動制御 |
| ケース数 | 1×2(各3回実施) |

相対外気温度に応じて10°刻みで変更する。

本研究では、様々な開口高さに対応するため、異なる 定格風量を持つ三菱電気製のエアカーテン GK2509S (写真-1)、MK5010TA (写真-3)の2 種類に取付 可能な機構を製作した。

5.2 性能検証実験の概要

自動制御エアカーテンシステムによる室内空調保護 性能と省エネルギー性を検証するため、第4章で使用し た実験空間で検証実験を実施した。図-13 に示す実験 空間は、空冷ヒートポンプ式のパッケージエアコンによ り空調されている。この室内機は暖房能力 14.0kW、定 格暖房消費電力 4.05kW である。室外機は、圧縮機が 2.8kW、ファンが 0.39kW の出力を持つ。室中央の開口 部は高さ 6m に設定し、第4章とは異なる条件を採用し た。開口上部には自動制御機構を追加した既製エアカー テン (MK5010TA、定格風量 3700m³h、定格消費電力 0.43kW)を設置した。自動制御用の温度センサは図-13 に示された位置の高さ 1m 地点に配置した。

実験条件を表-7に示す。実験は3月25日~4月2日 の中間期に実施した。模擬室内空間を24℃設定で暖房 し、模擬室外空間は18℃設定で冷房をした。模擬室内 の平均室温が24℃付近に達した時点で、開口部を開放 し、30分間の温度変化と空調の消費電力を計測した。 実験はエアカーテン非稼働と自動制御エアカーテンを使 用するパターンの2ケースを各3回行い、その平均値を 用いて評価した。

5.3 性能検証実験の結果

図-14 は、各ケースを3 回実施した結果の30 分間の 模擬室内16 点の空間平均室温の推移を示している。エ アカーテン非稼働のケースでは、扉解放後に5 分ほどで 室温が約1.5℃低下している。一方、自動制御エアカー テンシステムを使用した場合は、30分間の間の温度低 下が1℃以下に抑えられている。このことから、自動制 御システムの空調保護効果が明確に見て取れる。

図-15 は、30 分間の模擬室内側空調機の消費電力の 瞬時値である。自動制御エアカーテンを使用した場合、 すべての時刻で消費電力がエアカーテン非稼働時と比較 して下回っている。特にエアカーテンを使用しないケー スでは、平均室温が上昇している実験開始後 10 分から



(各ケース3回の平均)



20分の間に消費電力も増加している。

図-16 は実験中における 10 分毎の模擬室内側空調機 の消費電力量の各ケース 3 回の平均値である。自動制御 エアカーテンを使用した場合の消費電力量には、エア カーテンの消費電力量も含まれている。実験開始後の最 初の10分間は、エアカーテン非稼働の場合は、1.22kWh、 自動制御エアカーテンを使用した場合は、計1.21kWh と 消費電力量はほぼ同じである。エアカーテン非稼働のパ ターンでは 10 分から 20 分の間に消費電力が増加し、全 体の消費電力量で両パターン間に0.13kWhの差が生じて いる。30 分間でみると、自動制御エアカーテンを使用 した場合は使用しない場合に比べて、エアカーテンの消 費電力量を含め約 0.3kWh (約 8%)の消費電力量を削減 できている。

6. まとめ

本研究では、エアカーテンの吹出角度がその熱遮断性 能に及ぼす影響を CFD 解析と実験によって評価した。 その結果から、空間平均温度が高い方向へ吹出角度を傾 けることにより熱遮断性能が向上することを確認した。

この結果に基づき、室内外の温度差に応じて吹出角度 を自動的に調整する機構を開発した。このシステムの熱 遮断性能と省エネルギー性の検証実験を実施し、エア カーテン非稼働の場合と比較して、約8%の空調消費電 力量の削減を確認した。

7. あとがき

本研究により、エアカーテンの効果的な使用方法に関 する知見を得ることができた。地球温暖化の進行ととも に、将来的には高温多湿な外部環境がさらに顕著になる と予測されており、このような状況下では、エアカーテ ンによる空調保護が室内の快適性を維持し、消費電力を 削減する上でより一層重要となる。

今後も引き続き、この成果の普及に取り組み、エア カーテンの適用事例を増やしていくことを目指す。そし て、さらなるエアカーテンに関する知見を集積し、持続 可能な建築環境の実現を推進していく。

【参考文献】

- 空気調和・衛生工学会編、「空気調和・衛生工学便覧 (第14版)、3巻、pp.212-215、2010
- 2)田中優汰、近藤靖史、「建物出入り口に設置するエア カーテンの高効率化に関する研究」、日本建築学会環 境系論文集 第86巻 第790号、pp.899-908、2021.12

MIG-seq 法を用いた希少植物(タチスミレ)の 地域集団の遺伝的関係による保全策の検討

Study on Conservation Measures Based on Genetic Relationships Among Local Populations of Endangered *Viola raddeana* Plant Using MIG-seq

白石祐彰*

要旨

土地の開発・改変に際して、その事業地域で希少植物種が確認された場合、対象となる植物を人 間の管理下で保全する「域外保全」という方法がある。域外保全では、限られた個体での近親交配 による遺伝的多様性の低下などの弊害をできるだけ排除することが重要である。保護増殖における 遺伝的撹乱を防ぐためには、あらかじめ遺伝構造を把握し、保全単位を設定しておく必要がある。 本研究では、MIG-seq 法による SNP(DNA の塩基配列が1つ分だけ他の塩基に置き換わっているこ と)を用いて、渡良瀬遊水地、菅生沼および小貝川河川敷に生息する希少植物タチスミレの遺伝的 多様性と遺伝構造を評価した。その結果、タチスミレはそれぞれの場所で任意交配が可能な個体数 が存在すること、地理的に近い2 つの集団の間で遺伝的分化が見られることなどが示された。そこ で、保全策として、生息域外保全に十分な予算が確保できない場合は、渡良瀬遊水地のタチスミレ と菅生沼のタチスミレを1つの大きな管理単位として扱うことを提案した。

キーワード: MIG-seq 法、一塩基多型、遺伝的多様性、集団遺伝構造、遺伝的分化

1. まえがき

建設工事により土地の開発・改変を行う際に、事業区 域内に希少動植物の生息が確認されることが多々ある。 生息域への影響を回避・低減することができない場合、 現在の生息場から他の場所に移動させ、生息を継続させ る措置を求められることがある(生息域外保全)。

希少植物の保全に際して、ごく少数の家系の植物個体 を増殖して植栽すること、血縁度を考慮しないで人工交 配を行うこと、近縁種を交雑させること等、さまざまな 不適切な活動が行われることがある¹⁾。人間による意図 的・非意図的な生物の移動により、その生育地本来のも のと全く異なる遺伝的な構造に変化してしまう遺伝的撹 乱が生じると、種が長い期間にわたって経験してきた進 化的な履歴を破壊することにつながる。逆に、種内を必 要以上に細かいグループに分け、それぞれを個別に保 全・管理することは、より多くの労力と資金を要し、生 物保全に使用できる限られた資源を浪費することになる。 保護増殖における遺伝的撹乱を防ぐためには、あらか

じめ遺伝構造を把握し、保全単位を設定しておく必要が

ある²⁾。こうしたアプローチにより、遺伝的要因による 絶滅のリスクを最小にすることを目的としているのが保 全遺伝学であり、国内希少野生動植物種をはじめ生物多 様性の保全に必要不可欠な学問分野といえる³⁾。

従来の保全遺伝学では、生物の希少性を評価するうえ で最も重要なものは、個体数や生育面積の多寡や減少率 であり、これらの項目が、例えばレッドリスト掲載の主 要な判断基準とされてきた⁴。さらに、個体数と遺伝的 多様性は相関関係を示すことが多いが、個体数が減少し たことにより遺伝的多様性が低下して近交弱勢をもたら し、希少種の存続性を低下させるという前提で解析がな されてきた⁵。

近年、次世代シーケンサーを用いた塩基配列解読技術 の発展により、大容量のゲノム(生物のもつ遺伝情報の 総体を指す言葉)の解読が可能となっている。多数の個 体のゲノム全体にわたる DNA 多型(DNAの微細な構造 の差異)を比較的簡単に取得できるようになり、遺伝的 多様性、遺伝構造、遺伝子発現の研究が正確に迅速に行 えるようになった。

Multiplexed ISSR genotyping by sequencing (MIG-seq)

*技術本部技術研究所環境研究グループ

法は、次世代シーケンサーを用いた一塩基多型(single nucleotide polymorphism, SNP)の検出、およびその読み 取り(遺伝子型特定)を、より迅速・簡便・安価に実現 するために考案された方法である⁹。SNPは、遺伝情報 を保つ DNA 配列を構成する1つの塩基(ヌクレオチド) が別の塩基に置き換わる現象である。DNA は、アデニ ン(A)、チミン(T)、グアニン(G)、シトシン(C) という4種類の塩基から成り立っているが、SNPは、例 えばCがTに1か所だけ置き換わることをいう。MIGseq 法は、遺伝的に固定された作物等の品種識別、同一 種内の集団間を対象としたいわゆる集団遺伝・分子系統 地理学等の研究、近縁種間を対象とした雑種判定等の研 究、属内レベル程度の種間関係を対象とした系統解析等、 個体レベルから属レベルまで、広い階層の生物群を対象 として適用できるのが大きな特徴である⁷。

本研究では、茨城県の県南などに生息する希少植物の タチスミレを対象にして、MIG-seq法によりSNPを用い てタチスミレの遺伝的多様性や遺伝構造などを評価し、 今後の保全策について検討した。

2. 材料および方法

2.1 対象植物

タチスミレは、環境省のレッドリストでは絶滅危惧種 Ⅱ類に指定されている多年生草本種である(写真-1)。 絶滅危惧種に指定されるまで減少した要因は、生育地の 管理放棄、自然遷移、河川開発とされ、関東地方の生育 地は利根川水系に属している。

低湿地の葦原や河畔林などに生息している。茎の高さ は30~100cmで、根出葉の葉身は両面とも深緑色で三角 状披針形(平たくて細長く、先のほうがとがり、基部の ほうがやや広い形)、長さは4~8cmである。淡紅紫色ま たは白色の花は葉の付け根から生じ、花期は 5~6 月である。

2.2 実験方法

a. 植物試料の採取

タチスミレは、茨城県の菅生沼(A地点とC地点)、 小貝川の河川敷(B地点とD地点)および渡良瀬遊水地 (W地点)で採取した。菅生沼、小貝川の河川敷およ び渡良瀬遊水地との位置関係を図-1に示す。採取した 試料数および採取地点の湿地規模を表-1に示す。A地 点とB地点はタチスミレの大集団で、C地点とD地点 は小集団であった。タチスミレの群生地はC地点で2~ 3か所、D地点で4~5か所であった。

b. MIG-seq 法および遺伝的関係解析

採取したサンプルから、DNeasy Plant MiniKit を用い て DNA を抽出した。一般的なゲノム DNA 中に多数存 在する単純反復配列に挟まれた領域 (inter-simple



写真-1 タチスミレ

表-1 試料数および採取地点の湿地規模

| 地点(集団) | 試料数 | 湿地規模 |
|--------|-----|----------------------|
| А | 12 | 150m × 100m |
| В | 16 | 50 ~ 100m×50m |
| С | 4 | 5m × 10m |
| D | 7 | 10m × 10m |
| W | 12 | 9000m × 6000m |



図-1 渡良瀬遊水地と菅生沼と小貝川の位置関係



図-2 韓国集団、A、B、C、DおよびW集団のタチスミレ 61 個体の系統樹

sequence repeat, ISSR)を対象とし、抽出した DNA から MIG-seq 法によって、SNP の検出を行った $^{8,9)}$ 。単純反 復配列とは、数塩基の単純な塩基配列(例えば AG や TCC 等)が繰り返す、例えば TCCTCCTCCTCC のよう な配列である。MIG-seq 法は、DNA 中に多数存在する 単純反復配列を利用することにより、生物種を問わずに 次世代シーケンサーを適用することができる利点がある。

A、B、C、D、W集団のタチスミレに、韓国のキョン サン北道南西部の川沿いの湿地から採取したタチスミレ (10 個体)の遺伝情報を加え、IQ-TREE ver. 2.1.2 を用 いて最尤系統樹を作成した。A、B、C、D、W 集団のタ チスミレの地域的な集団遺伝構造を把握するため、 STRUCTURE Version 2.3.4 を用いてクラスター解析を 行った。クラスター解析とは、異なる性質のものが混ざ り合った標本の中から、互いに似たものを集めて集落 (クラスター)を作り、対象を分類するという方法であ る。STRUCTURE 解析では共通祖先を持つ遺伝的クラ スターを仮定して、各個体がそれぞれのクラスターに割 り振られる確率が計算される。しかし、最適なクラス ター(K)を選ぶことは難しく、複数の手法による結果 を見比べることが推奨されている10。そこで、対数尤度 に基づく基準 LnP(D)の二階差分に基づく基準 ΔK の変 動を見比べる方法および LnP(D)の K の変化における変 動を見比べる方法の 2 種類を行った^{11),12)}。ΔK や LnP(D)は、値が高いほどその K が最適であると認容し た。各集団内の近親交配の程度を表す近交係数 Fis、お よび集団間の遺伝的分化度 Fst を Stacks v. 1.48 を用いて 求めた。Fst は、集団間の塩基配列の違いの相対的指標 の一つで、2 集団間の遺伝的分化の程度を各集団の遺伝 的多様性を考慮して定量化している。Fstは、0~1の値

をとり、遺伝的分化の程度が大きいほど、大きな値をとる¹³⁾。

3.結果

韓国集団、A集団、B集団、C集団、D集団およびW 集団のタチスミレ 61 個体の系統樹を図-2に示す。系 統樹上に小さく書かれている数字は、その系統樹の形の 信頼性を表した数値で、ブートストラップ(Bootstrap) 値という。0~100の値で示し,100に近いほど信頼性が 高いことを示す。系統樹の末端には、各集団の個体がそ れぞれ近い位置に集まり、ひと塊となった。したがって、 A、B、C、D、W集団のタチスミレは、遺伝的に明瞭に 分かれた。また、韓国集団の枝の先にある節(図中の赤 丸)を境にして、A集団、C集団およびW集団のグルー プとB集団およびD集団のグループに分かれた。

A、B、C、D、W 集団の STRUCTURE 解析の結果、 Δ K は K = 2 で最大値を示した(図-3)。LnP(D)は K =3, 7、8, 9, 10 でばらつきが大きく、K = 2、4, 5、6 で比較的大きな値を示した(図-4)。K = 2~6の個体 毎のクラスター配分を図-5に示す。このグラフは、横 方向にタチスミレ 51 個体の祖先性の推定値が並べてあ る。1 本の棒グラフの中に異なる色のクラスターが混 ざっている場合には、その個体が複数のクラスターにそ れぞれの確率で帰属することを意味する。すなわち、各 個体内の遺伝的組成を、各想定集団に由来する要素の割 合として 100%積み上げ棒グラフで色分けして表してい る。K=2 のとき、一つのクラスターはA集団とC集団 と W集団が優占し、もう一つのクラスターが混合していた。



K=2 から K=3 へと一つクラスターが増えたとき、その クラスターはA集団が優占し、K=4へと一つクラスター が増えたとき、そのクラスターは W 集団が優占し、 K=5へと一つクラスターが増えたとき、そのクラスター は C 集団が優占した。また D 集団は K=2 から K=4 のと きは、二つのクラスターが混合していたが、K=5 のとき は一つのクラスターが優占した。K=5 から K=6 へと一 つクラスターが増えたとき、そのクラスターは主に W 集団に含まれていた。

集団間の遺伝的分化度 Fst を表-2に示す。A、B、C、 Dの4集団間では0.265~0.470と比較的高い値を示した が、W集団と他のA、B、C、D集団との間では0.198~ 0.261と比較的低い値を示した。最も高いFst 値は、B集 団とC集団の0.470 であった。

各集団内の近交係数 Fis の算出結果を表-3に示す。 Fisが1に近い集団は近親交配、0に近い集団は任意交配 であることを示し、すべての集団のタチスミレは0に近 かった。

4. 考察

韓国集団と日本の5集団を用いた系統解析の結果、A、B、C、D、W集団のタチスミレは、遺伝的に明瞭に分かれた。日本の5集団のSTRUCTRE解析においても、K=5のとき、A、B、C、D、W集団はそれぞれ紫色、橙色、えんじ色、青色、緑色のクラスターが優占し、祖先が異なることが示された。

また、系統樹では、A集団、C集団、W集団は一つの 遺伝的グループに属することが示された。STRUCTRE 解析ではK=2のとき、A集団とC集団とW集団は一つ のクラスターが優占した。渡良瀬遊水地(W集団)と 菅生沼(A集団とC集団)は遺伝的に近いことが示され た。渡良瀬遊水地(W地点)は利根川の上流に位置し、 菅生沼(A地点およびC地点)はその下流に位置する。 渡良瀬遊水地と菅生沼のタチスミレが遺伝的に近かった 理由として、渡良瀬遊水地から菅生沼にタチスミレの種 子が移動し、定着した可能性が考えられる。種子の水流

| 表-2 | 集団間の遺伝的分化度 | Fst |
|-----|------------|-----|
| ~ ~ | | |

| | А | В | С | D | W |
|---|---|-------|-------|-------|-------|
| А | | 0.378 | 0.313 | 0.293 | 0.198 |
| В | | | 0.470 | 0.265 | 0.261 |
| С | | | | 0.367 | 0.256 |
| D | | | | | 0.203 |
| | | | | | |

表-3 各集団内の近交係数 F_{IS}

| 地点(集団) | F _{IS} |
|--------|-----------------|
| А | 0.00022 |
| В | 0.00018 |
| С | -0.00004 |
| D | 0.00032 |
| W | 0.00029 |

散布に関して、米国ワシントン DC の復元された潮汐の ある淡水湿地において、水と風を通して飛散する種子を 収集し、その構成と種子の飛散を測定した結果、この場 所に飛散した種子の主な供給源は水であることが示され た¹⁴⁾。また、ドイツ北部の小さな河谷では、河道沿いの 周期的に氾濫する生息地において、氾濫時の水上種子輸 送が、分断された個体群をつなぐ重要な役割を果たして いる可能性が示された¹⁵⁾。タチスミレの受粉媒介者はマ ルハナバチなどの昆虫であるため、遺伝子流動の範囲は 非常に限られている。一方、種子は河川を移動すること ができるため、種子は渡良瀬遊水地(集団 W)から菅 生沼の大集団(集団 A) へ頻繁に移動することが示唆さ れた。

系統樹では、B集団とD集団は一つの遺伝的グループ に属することが示された。STRUCTRE解析ではK=2~4 のとき、B集団は、D集団が占めた二つのクラスターの うちの一つのクラスターが優占した。D地点は、B地点 の小貝川上流にあり、D地点のタチスミレがB地点へ移 動したと考えられる。個体の生存や繁殖に有利であるか 不利であるかにかかわらず、ある遺伝子の頻度が集団内 で確率的に減少する現象を遺伝的浮動という。B地点で タチスミレの遺伝的浮動が生じたことで、B集団は、D 集団が占めた二つのクラスターのうちの一つのクラス ターが減少したと推察した。

W 地点と A、B、C、D 地点は地理的に離れているが W集団と他のA、B、C、D集団との遺伝的分化度Fst値 は、0.198~0.261 と比較的低い値を示し、遺伝的分化の 程度は小さかった。一方、A、B、C、D地点は地理的に 近いが、4 集団間では 0.265~0.470 と比較的高い値を示 し、遺伝的分化の程度は大きかった。W集団と他のA、 B、C、D 集団よりも A、B、C、D 集団のタチスミレの ほうが遺伝的に分化していた。最も遺伝的に分化してい たのは B 集団と C 集団のタチスミレであった。このよ うに地理的に近いにもかかわらず遺伝的に分化していた 事例として、絶滅危惧種のアマミマツバボタンおよびラ ンダイミズがある。アマミマツバボタンの個体群間の系 統関係を明らかにするため、MIG-seq を用いた系統解析 を行ったところ、地理的に近い奄美大島西部と北部で遺 伝的な分化が見られた¹⁰。奄美大島西部では冬季に強い 北風が吹くなどの環境的な選別によって系統的な分離が 起こった可能性があると考えたが、本種の植物間の形態 学的・生理学的な比較についてはさらなる研究が必要で ある。また、ランダイミズの保全価値を決定するために、 MIG-seq を用いて個体および集団レベルでの系統、遺伝 的構造、遺伝的多様性を解析した結果、地理的に近い台 湾の2つの集団間で遺伝的分化があることが示された ¹⁷⁾。

各集団のタチスミレの近交係数 *F*_{IS}は 0 に近かったの で、任意交配を行っていると推察できた。したがって、 タチスミレは、A、B、C、D、Wのすべての地点におい て任意交配を行える程度の個体数が維持されていること が推定できた。

5. 結論

タチスミレは絶滅危惧種に指定されるほど個体数が減 少している。その要因として植生の自然遷移、河川の開 発、管理の放棄などが挙げられているが、タチスミレの 各集団の Fis は 0 に近く、任意交配を行っていると推測 された。スミレは蜜を出し、多くの花粉媒介昆虫を惹き つける。花粉媒介昆虫は花蜜や花粉などを求めて花を訪 れ、その際、偶然体に付着した花粉が雌しべに運ばれる ことで、受粉が成立し、任意交配が行われる。

工事等の開発行為により生息環境が著しく悪化し、生 息域での生存が困難となり、生息域外での保全が必要と なった場合を想定し、遺伝的多様性を維持するために以 下のことを実施すべきと考える。

- i. A、B、C、D および W 地点は地理的に近くても 遺伝的に分化しているため、人為的な移植による 遺伝的撹乱が起こらないように各集団間の移動を 管理する
- ii. 生息域外保全に十分な予算が確保できない場合は、
 渡良瀬遊水地のタチスミレ(W 集団)と菅生沼のタチスミレ(A 集団とC集団)を1つの大きな
 管理単位として扱う
- iii. A集団とC集団のタチスミレは渡良瀬遊水地に移 植することができるが、B集団とD集団のタチス ミレを移植して保存するためには、別々の場所に 生育環境を準備する必要がある

6. あとがき

生物多様性保全に向けて企業などが策定した計画を国 が認定する「生物多様性増進活動促進法」が 2024 年 4 月に国会で可決された。本法では、「在来生物の生息 地・生育地の保護・整備」が掲げられている。希少植物 の地域集団の遺伝的関係解析により、生息地の保護や整 備が効率的に行われるように技術を確立していきたいと 考えている。

MIG-seq 法を用いたタチスミレの地域集団の遺伝的関 係解析について研究を行うにあたって、筑波大学生命環 境学群生命地球科学研究群生命環境系の津村義彦教授、 東北大学大学院農学研究科の陶山佳久教授、大阪公立大 学附属植物園の廣田峻特任助教並びに、茨城県霞ケ浦環 境科学センターの小幡和男氏に技術指導を頂いた。また、 タチスミレ採取においては、ミュージアムパーク茨城県 自然博物館の飯田勝明氏、伊藤彩乃氏、渡良瀬遊水地植 物の会の大和田真澄氏、当社の高嶋則雄氏、富山陽子氏 に協力頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- Yuji Isagi, Shingo Kaneko, [「]Ubiquitous Genotyping for Conservation of Endangered Plant Speciesr. Shinichi Nakano, Tetsukazu Yahara and Tohru Nakashizuka T (Eds.) J ,In Integrative Observations and Assessments; Springer Japan, pp. 311–326,2014
- Naoyuki Nakahama, Yuji Isagi, [「]Recent Transitions in Genetic Diversity and Structure in the Endangered Semi-Natural Grassland Butterfly, Melitaea Protomedia, in Japan. J ,Insect Conservation and Diversity, Vol. 11, pp. 330–340,2018
- 3) Richard Frankham, Jonathan D. Ballou, David A. Briscoe,

 Introduction to Conservation Genetics, 2nd

 Ed. J., Cambridge University Press, 2010
- 4) Ulf G\u00e4rdenfors, Craig Hilton-Taylor, Georgina M. Mace, Jon Paul Rodr\u00efguez, \[7] The Application of IUCN Red List Criteria at Regional Levels \], Conservation Biology, Vol. 15, No. 5, pp. 1206–1212,2001
- Richard Frankham, [[]Genetics and Extinction], Biological Conservation, Vol. 126, No.2, pp.131-140,2005
- 6) Yoshihisa Suyama, Yu Matsuki, 「MIG-seq: an effective PCR based method for genome-wide single-nucleotide polymorphism genotyping using the nextgeneration sequencing platform」, Scientific Reports, Vol.5, 2015
- 7) Yoshihisa Suyama, Shun K. Hirota, Ayumi Matsuo, Yoshihiro Tsunamoto, Chika Mitsuyuki, Atsuki Shimura, Kunihiro Okano, Complementary combination of multiplex high-throughput DNA sequencing for molecular phylogeny J., Ecological Research, Vol.37, No. 1, pp. 171-181,2022
- 8) Yoshihisa Suyama, Yu Matsuki, 「MIG-seq: an effective PCR-based method for genome-wide single-nucleotide polymorphism genotyping using the next-generation sequencing platform.」, Scientific Reports 5,2015
- 9) Yoshihisa Suyama, Shun K. Hirota, Ayumi Matsuo, Yoshihiro Tsunamoto, Chika Mitsuyuki, Atsuki Shimura, Kunihiro Okano, Complementary combination of multiplex high-throughput DNA sequencing for molecular phylogeny. J , Ecological Research Vol.37, pp. 171– 181,2022
- 玉木一郎、「森林遺伝育種のデータ解析方法(実践 編 1)集団構造解析」森林遺伝育種、Vol.9、No.3、 pp.110-112、2020
- Pritchard JK, Stephens M, Donnelly P, Inference of population structure using multilocus genotype data.Genetics J, Vol.155, pp.945–959,2000

- 12) Evanno G, Regnaut S, Goudet J Detecting the number of clusters of individuals using the software STRUCTURE: a simulation study J, Molecular Ecology Vol.14 pp.2611– 2620,2005
- 13)東京工業大学、情報・システム研究機構、国立遺伝 学研究所、北里大学、「シクリッドゲノム中に適応進 化の痕跡を発見 祖先から受け継いだゲノム多様性 が急速な進化の鍵」、プレスリリース、用語解説、 2021.4
- 14) Neff, K.P, Baldwin, A.H. [Seed Dispersal into Wetlands: Techniques and Results for a Restored Tidal Freshwater Marsh.], WETLANDS, Vol.25, pp. 393–403, 2005
- 15) Vogt, K., Rasran, L, Jensen, K., Water-borne seed transport and seed deposition during flooding in a small river-valley in Northern Germany. Flora, Vol.199, pp.377-388,2004
- 16) Goro Kokubugata, Satoshi Kakishima, Atsushi Abe, Koh Nakamura, Kuo-Fang Chung, Masatsugu Yokota. [「] Phylogenetic Relationships among Populations of Portulaca Okinawensis (Portulacaceae) in the Ryukyu Archipelago of Japan Using MIG-Seq SNP Data. J., Bull. Natl. Mus. Nat. Sci., Ser. B, Vol. 49, No.1, pp. 33–40,2023
- 17) Mayu Shibabayashi, Taiga Shimizu, Chinatsu Tokuhiro, Yoshihisa Suyama, Shota Sakaguchi, Takuro Ito, Chih-Chieh Yu,Kuo-Fang Chung, Jun'ichi Nagasawa, Toshiaki Shiuchi, Goro Kokubugata, Atsushi Abe, Akiyo Naiki, Atsushi J. Nagano, Yuji Isagi, [「]The Contrary Conservation Situations of Two Local Critically Endangered Species, Vaccinium Emarginatum (Ericaceae) and Elatostema Platyphyllum (Urticaceae), Growing on the Eastern Edge of the Distribution. J., Front. Ecol. E, Vol.11,2023

| 奥村組技術研究年報 No.50 2024 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 2024 Q 検索 |

| 奥村組技術研究年報 No. 50 | | |
|------------------|--|--|
| 編集発行 | 2024年9月1日発行 株式会社奧村組 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)

•

