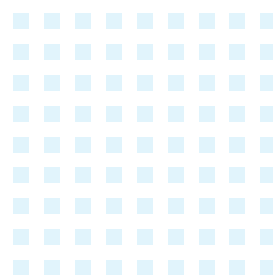
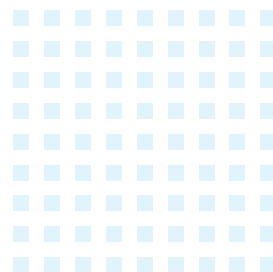
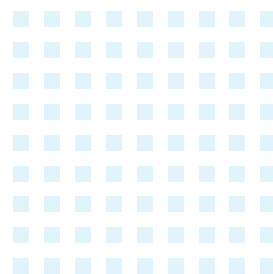


奥村組技術研究年報

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靱性のある社会実現、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でも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 寛樹



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パク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 2 35
Biswas Rajib Kumar・Takashi Misawa・Takahiro Saito

(安全管理)

3. 建設現場でのバイタルデータ取得方法の確立 3 43
ーヒューマンエラー軽減に向けたバイタルデータの活用ー
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 4 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 5 55
ー部分架構試験体による性能確認ー
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 6 61
ー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ー
増田貴之・中村裕介

■環境系■

(土壌環境)

7. 拡散溶出試験における有害物質溶出モデルの考案 7 67
 ー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ー
 鈴木奨士・小河篤史・清水祐也

(室内環境)

8. 自動制御エアカーテンシステムの開発 8 73
 ー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ー
 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
 遺伝的關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）

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 Kawasaki, 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。

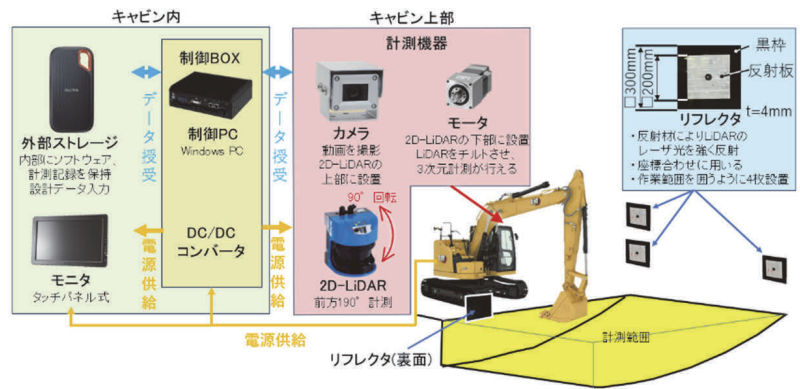


図-1 本システムの構成

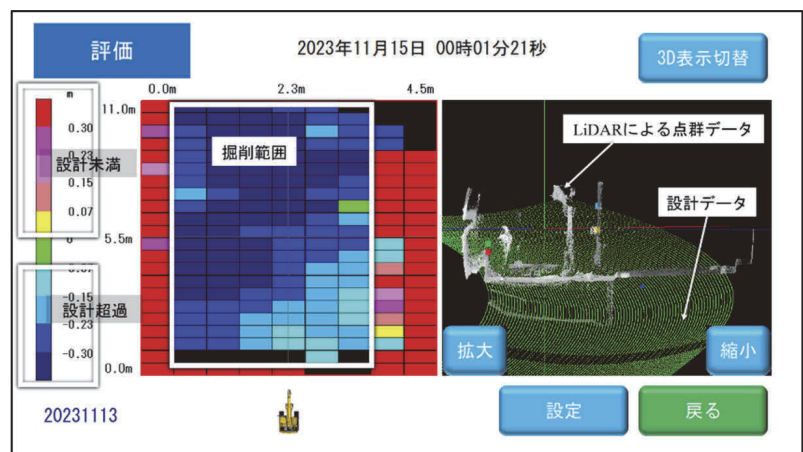


図-2 本システムによる出力結果例

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

*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

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

Biswas Rajib Kumar* Takashi Misawa** Takahiro Saito*

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.

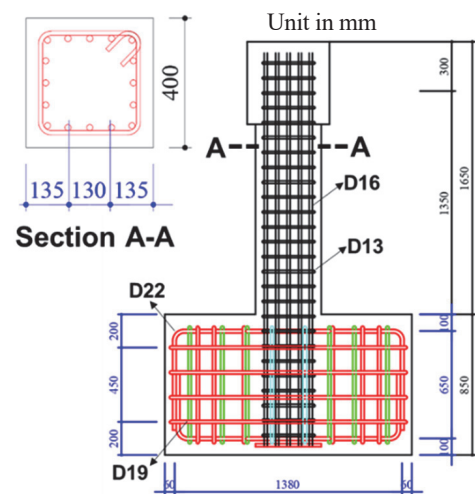


Fig 1: Specimen details

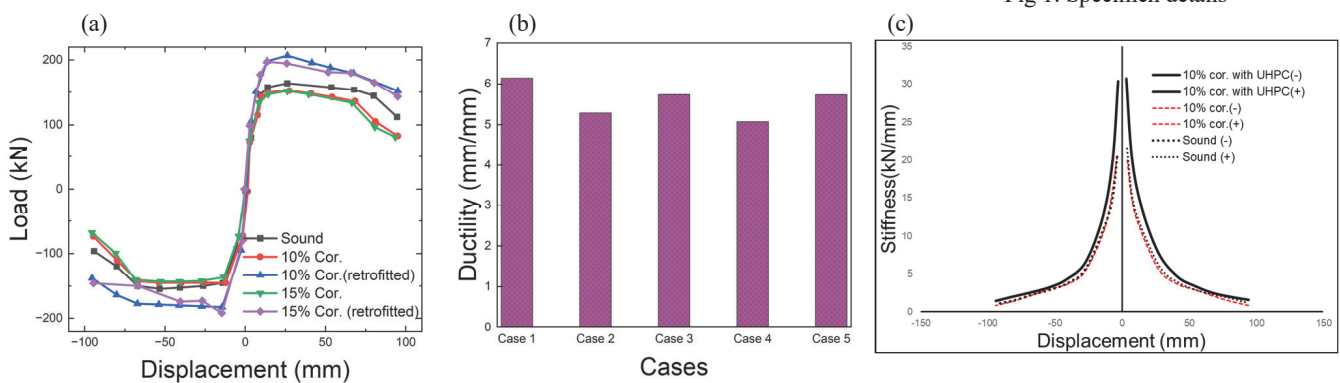


Fig 2: Experimental results (a) backbone curve (b) ductility (c) stiffness degradation

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.



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

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、法的観点から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低下する傾向や、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ので、今後のデータ蓄積と分析が必要な結果であった。

	チェック項目	結果
A	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 <input type="checkbox"/>
		具体的な利用目的について、特定/明確化されているか <input type="checkbox"/>
B	データの利用目的	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 <input type="checkbox"/>
		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ないか <input type="checkbox"/>
		利用目的の範囲を超えた取り扱いになっていないことを確認しているか <input type="checkbox"/>
		利用目的を遵守の体制/手順を構築できているか <input type="checkbox"/>
C	本人の同意	同意取得方法の検討がなされているか <input type="checkbox"/>
		同意依頼書が準備できているか（データ取得/第三者提供） <input type="checkbox"/>
		第三者提供範囲の具体的な検討ができていないか <input type="checkbox"/>
D	社内体制	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 <input type="checkbox"/>
		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 <input type="checkbox"/>
		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 <input type="checkbox"/>
E	データ管理	データ管理の委託可否の検討と、必要な委託契約ができていないか <input type="checkbox"/>
		委託する場合の個人情報保護法の対応ができていないか <input type="checkbox"/>
		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 <input type="checkbox"/>
F	損害賠償への対応	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 <input type="checkbox"/>
		損害保険加入の判断と補償内容の評価ができていないか <input type="checkbox"/>

図-1 バイタルデータ活用チェックリスト



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

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から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

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

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-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、 $F_c=60\text{N/mm}^2$ 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。

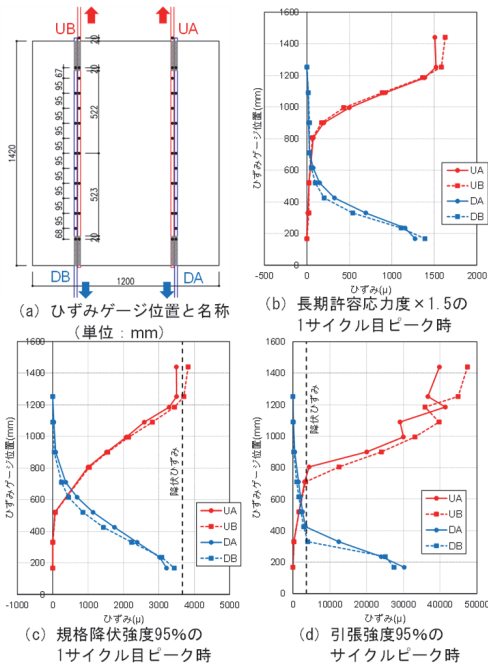


図-1 重ね継手実験の鉄筋のひずみ分布

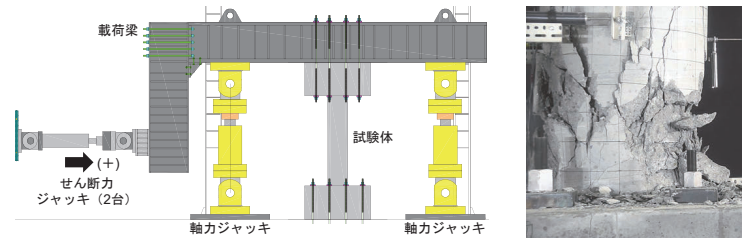


写真-1 No.4 最終破壊状況

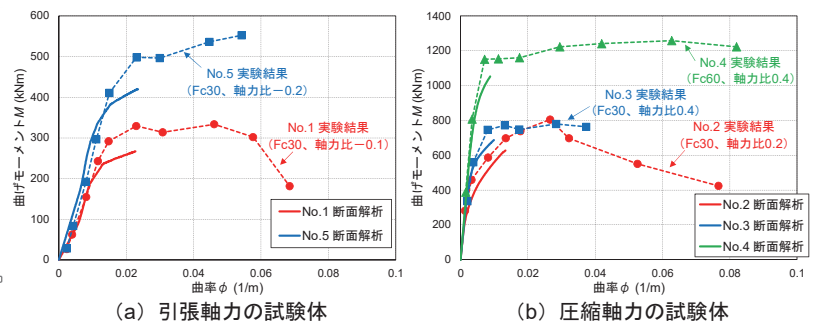


図-3 構造実験の結果と解析結果の比較

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 $M-\phi$ 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 $M-\phi$ 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

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 — 一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****
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-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。

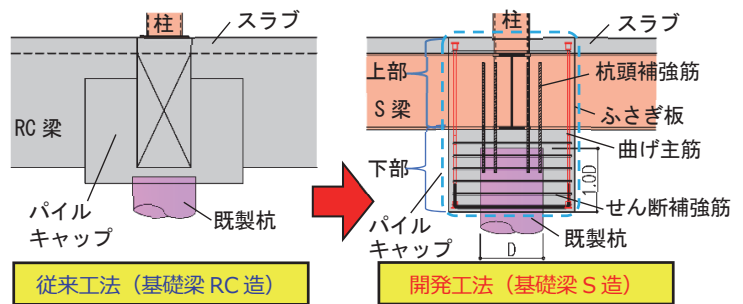


図-1 鉄骨基礎梁工法の概要

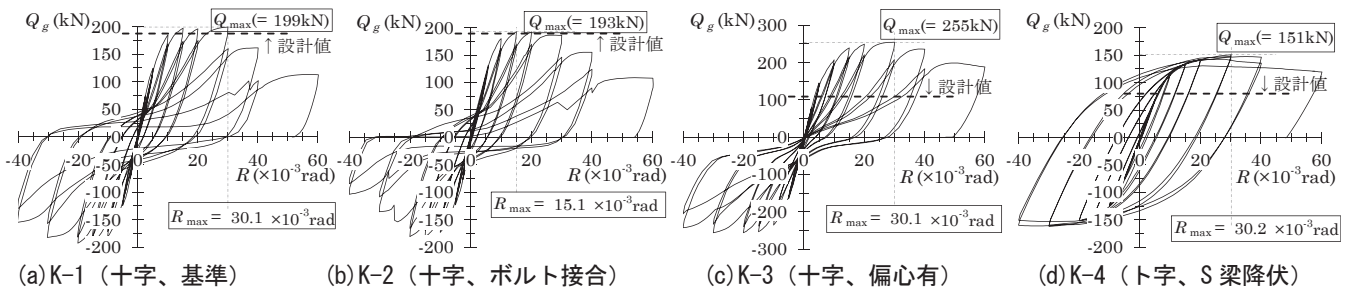


図-2 梁せん断力 Q_g -層間変形角 R 関係

研究の成果

- 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。
- 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
 - 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
 - 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
 - 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
 - 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

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力化—

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

増田貴之* 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 $\lambda=1,450\text{nm}$ 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 m^2 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-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。

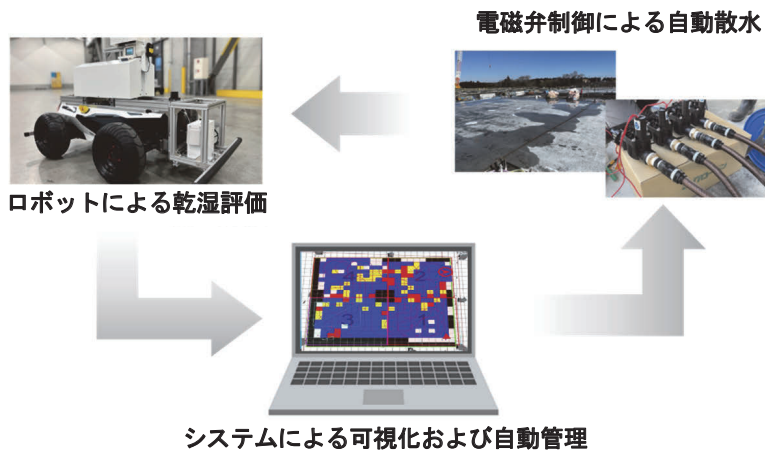


図-1 スラブ湿潤養生システムの概略構成図

評価回数	1回目	2回目
評価結果		
湿潤割合 (%)	71	67
初回比 (%)	—	94
評価回数	3回目	4回目
評価結果		
湿潤割合 (%)	75	80
初回比 (%)	105	113

図-2 評価結果一覧

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 m^2 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

*土木本部土木工務部 **ICT統括センターイノベーション部



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 D_F 変化時の結果を図-2に示す。 D_F 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 D_F 条件で K_d と溶出濃度の関係を検討すると、 K_d が大きい場合は D_F 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 K_d 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。

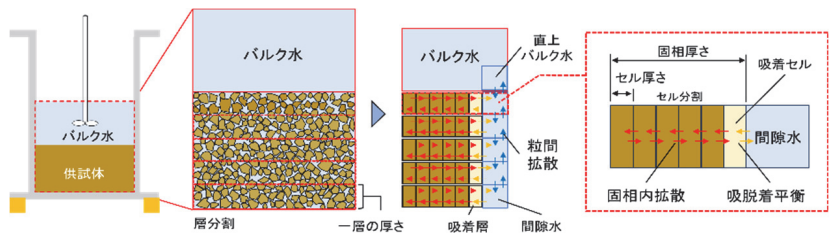


図-1 拡散溶出試験と二段階拡散モデル（DKD モデル）の概要

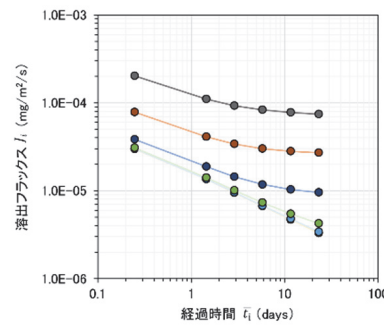


図-2 経過時間と溶出フラックスの関係

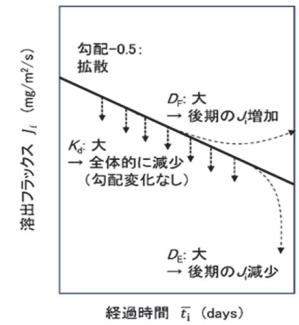


図-3 物質溶出挙動のまとめ

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. K_d が大きくなると溶出濃度は全体的に低くなり、 D_F が大きくなると溶出濃度は全体的に高くなり、 D_F は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

*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



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。

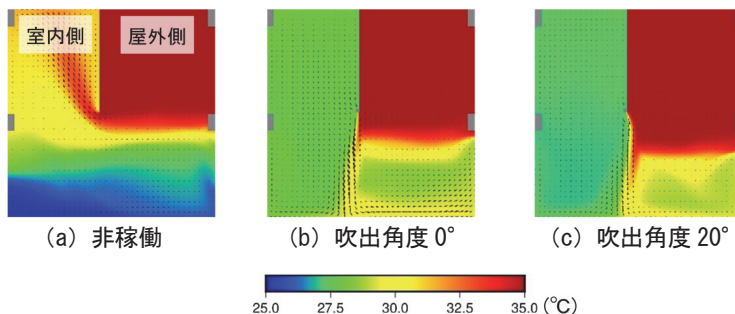


図-1 解析開始180秒後温度分布図 (冷房想定時 外気温35°C)

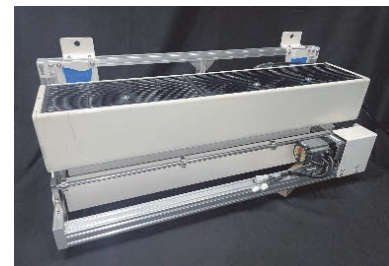


写真-1
自動制御エアカーテンシステム

表-1 冷房想定時のシーリング効率 (空気混合開始180秒後)

角度 (°)		初期相対外気温度 (°C)					
		+4	+6	+7	+8	+9	+10
0	実測	-56.6	9.4	38.9	41.1	24.6	6.8
	解析	65.1	54.7	48.7	51.4	38.9	39.1
10	実測	62.2	51.2	50.3	57.6	37.2	25.1
	解析	73.5	64.9	58.6	61.9	52.5	44.4
20	実測	16.1	24.7	35.6	57.3	63.2	39.5
	解析	72.2	71.1	66.8	65.9	56.6	53.1

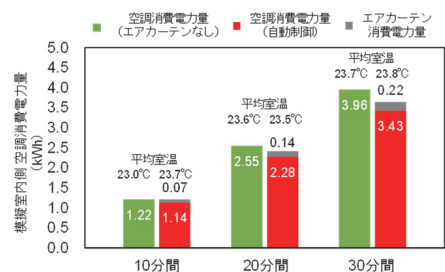


図-2 模擬室内側空調の消費電力量 (各ケース3回の平均)

研究の成果

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。

- 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

*技術本部技術研究所環境研究グループ

MIG-seq 法を用いた希少植物 (タチスミレ) の地域集団の 遺伝的關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、ソフトウェア 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。

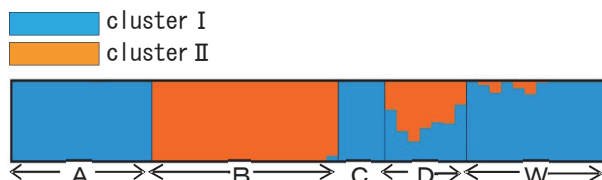


図-2 STRUCTURE 解析の結果



写真-1 タチスミレ



図-1 渡良瀬遊水地と菅生沼と小貝川での採取地

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。

*技術本部技術研究所環境研究グループ

■■ 英文サマリー ■■

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 500m² 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

■ ■ 社外発表論文一覧 ■ ■

【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
1	The effect of non-uniform steel bar corrosion on pre-stressed RC members subjected to hysteretic load at the mid-span: experimental study and three-dimensional FEM modeling	奥村組 東京工業大学 " 奥村組	ビスワス ラジブクマル 岩波光保 千々和伸浩 齋藤隆弘	Innovative Infrastructure Solutions	SPRINGER LINK	6月
2	若材齢に着目した加温養生時における覆工コンクリートの内部温度推移と強度発現性状	奥村組 " 中日本高速道路 "	松本隆太郎 齋藤隆弘 遠藤宏朗 稲垣太浩	コンクリート工学年次論文集 Vol.45 No.1 pp.394-399	日本コンクリート工学会	7月
3	STRUCTURAL BEHAVIOUR OF SEVERELY CORRODED RC BEAM STRENGTHENED WITH ULTRA HIGH-PERFORMANCE CONCRETE (UHPC)	奥村組 " " 東京工業大学	ビスワス ラジブクマル 齋藤隆弘 三澤孝史 岩波光保	77th RILEM Week 2023	RILEM	9月
4	覆工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関する検討	奥村組 " " 中日本高速道路 " 施工総合技術研究所 "	松本隆太郎 齋藤隆弘 浜田 元 遠藤宏朗 稲垣太浩 真下英人 安井成豊	トンネル工学報告集 第33巻 I-5	土木学会	11月
5	Structural behavior of severely corroded RC beams retrofitted with UHPC layer: an experimental study	奥村組 " " 東京工業大学	ビスワス ラジブクマル 齋藤隆弘 三澤孝史 岩波光保	Innovative Infrastructure Solutions	SPRINGER LINK	11月

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評価の検討	奥村組 "	塚本耕治 山田昂平	第58回地盤工学研究発表会 13-11-2-02	地盤工学会	7月
7	トンネル掘削ずりを用いた長期の不飽和カラム砒素溶出試験	奥村組 " ハイドロ総合技術研究所 岩手大学	清水祐也 鈴木奨士 森田修二 大河原正文	土木学会第78回年次学術講演会 III-209	土木学会	9月
8	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の検討(その1: Subloading tij modelを用いた弾塑性FEM解析の有効性確認)	地域地盤環境研究所 中日本高速道路 奥村組 " 地域地盤環境研究所	稲垣祐輔 稲垣太浩 外木場康将 板谷裕次 初谷樹弥 中井照夫	土木学会第78回年次学術講演会 III-335	土木学会	9月
9	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の地表沈下抑制効果)	中日本高速道路 奥村組 " 地域地盤環境研究所 "	稲垣太浩 外木場康将 岩崎 光 稲垣祐輔 初谷樹弥 中井照夫	土木学会第78回年次学術講演会 III-336	土木学会	9月
10	山岳覆工コンクリートの若材齢時の圧縮強度推定に関する解析的検討	奥村組 " "	ビスワス ラジブクマル 齋藤隆弘 松本隆太郎	土木学会第78回年次学術講演会 V-209	土木学会	9月
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歴データの活用-	戸田建設 " " " 西松建設 奥村組	吉澤功輝 丹沢昭義 重成康裕 本木章平 黒田卓也 高尾篤志	土木学会第78回年次学術講演会 VI-76	土木学会	9月
12	データ利活用型ICT土工管理システムの現場実証 -土工における施工管理の効率化及び高度化に向けた取り組み-	戸田建設 西松建設 奥村組	本木章平 黒田卓也 高尾篤史	土木学会第78回年次学術講演会 VI-81	土木学会	9月
13	供用中トンネルにおけるICTを活用したインパート掘削出来形管理システムの構築	奥村組 " " "	松田顕吾 松本清志 川澄悠馬 今泉克彦	土木学会第78回年次学術講演会 VI-117	土木学会	9月
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	奥村組 " " " " sMedio	今泉克彦 塩貝 悟 尾迫一樹 山田昂平 倉田桂政 浜田 元 園田香織	土木学会第78回年次学術講演会 VI-268	土木学会	9月
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評価システムの適用	奥村組 " " " " "	尾迫一樹 塩貝 悟 山田昂平 倉田桂政 平井 崇 今泉克彦 浜田 元	土木学会第78回年次学術講演会 VI-269	土木学会	9月

	標 題	所 属	氏 名	掲載論文集	主 催	2023年
16	切羽鏡面の吹付けコンクリートのひび割れ検出により肌落ちの予兆を知らせるシステムの開発	奥村組 " " システム計画研究所 " "	浜田 元 萩原 進 今泉克彦 清水隆司 久保陽平 西岡 拳	土木学会第78回年次学術講演会 VI-270	土木学会	9月
17	5次元施工シミュレーションシステムの開発・検証	奥村組 " " " " パスコ ビーイング	宮田岩往 丸谷尊彦 平井 崇 高尾篤志 五十嵐善一 穴久保剛	土木学会第78回年次学術講演会 VI-820	土木学会	9月
18	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の検討	奥村組 " "	塚本耕治 浜田 元	土木学会第78回年次学術講演会 VI-943	土木学会	9月
19	覆工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理の現場適用	奥村組 " " " " " 中日本高速道路 "	松本隆太郎 浜田 元 齋藤隆弘 加藤英一 黒木考洋 生田光輝 稲垣太浩 遠藤宏朗	土木学会第78回年次学術講演会 VI-982	土木学会	9月
20	覆工コンクリート脱型時の圧縮強度に関する日常管理手法の検討	中日本高速道路 " " 奥村組 " "	遠藤宏朗 稲垣太浩 岩崎真二郎 松本隆太郎 齋藤隆弘 板谷裕次	土木学会第78回年次学術講演会 VI-983	土木学会	9月
21	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パート補強の実験施工	奥村組 " " " 東日本高速道路 "	和田賢人 赤崎修一 小林俊彦 小暮英雄 金藤和慶	土木学会第78回年次学術講演会 VI-996	土木学会	9月
22	地盤改良の施工影響を可視化するXRソリューションの開発	奥村組 " " "	吉村藤子 宮田岩往 城井光雄 今泉和俊	土木学会第78回年次学術講演会 VI-1008	土木学会	9月
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適用	奥村組 " " " " "	山口 治 川口竜巨 本村伊章 三澤孝史 川澄悠馬 石井敏之	土木学会第78回年次学術講演会 VI-1077	土木学会	9月
24	各種結合材を用いた焼却飛灰固型化に関する検討	奥村組 " " " " 那須地区広域行政事務組合	齋藤隆弘 今井亮介 三宅栄一 酒井一紀 落合 繁 増山泰輔	土木学会第78回年次学術講演会 CS12-11	土木学会	9月
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	奥村組 " "	柴田憲一 山口 治 榎木正成	土木学会第78回年次学術講演会 CS18-05	土木学会	9月
26	アンカー孔の自動削孔装置の現場適用 - 既存RC構造物の耐震補強に伴う削孔作業の自動化 -	奥村組 " " " " "	川澄悠馬 三澤孝史 石井敏之 有川 健 山口 治 川口竜巨	第21回 建設ロボットシンポジウム	土木学会	9月
27	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いて - 一般県道佐世保世知原線道路改良工事 長崎板山トンネル -	奥村組 " "	平川晃司 山崎泰典 岡島 徹	第92回(山岳)施工体験発表会 「新技術・創意工夫により課題を解決した山岳トンネル新設・改修工事」 -生産性・安全性向上、働き方改革-	日本トンネル技術協会	10月
28	静穏な市街地での泥土圧シールド工法による急曲線かつ1D以下の小土かぶり施工 - 令和2年度下水道築造工事(新免幹線・その1)	奥村組 "	毛利大介 元永浩斗	第93回(都市)施工体験発表会 「輻輳した地下空間での創意工夫による地下構造物築造工事」 - デジタル技術の活用・環境配慮・課題克服事例 -	日本トンネル技術協会	10月
29	都市土木における安全に対する取り組みについて ~ICTを活用した安全管理~	奥村組	川谷真結子	第60回全国建設業労働災害防止大会研究論文集 pp.18-22	日本トンネル技術協会	10月
30	ICTを活用した次世代の安全管理手法	奥村組	加藤清孝	第60回全国建設業労働災害防止大会研究論文集 pp.354-357	日本トンネル技術協会	10月

	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るインパート補強の実験施工	奥村組 " " "	蜂谷真司 赤崎修一 板谷裕次 小林俊彦	2023年度 最新トンネル技術講演会	臨床トンネル 工学研究所	2024年 2月

雑誌掲載報文

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工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 " 奥村組	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 "	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 宮田岩住	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 栗原賢司	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工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)

査読付論文

No.	標 題	所 属	氏 名	掲載論文集	主 催	2023年
1	免震建物に適用する過大変位抑制用性能可変オイルダンパーの開発	奥村組 " " 東北大学 " "	小山慶樹 山上 聡 舟木秀尊 五十子幸樹 井上範夫	日本建築学会技術報告集 Vol.29 No.72 pp.701-706	日本建築学会	6月
2	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	奥村組 " " "	和田湧気 舟木秀尊 武田彰文 小谷俊二	日本建築学会技術報告集 Vol.30 No.74 pp.77-82	日本建築学会	2024年 2月

講演会発表論文

3	梁端溶接部の亀裂進展に及ぼす溶接欠陥の影響 –その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–	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 高塚康平 田中 剛 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 涼 田中 剛 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 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 " 奥村組 鋼管杭・鋼矢板技術協会 "	塩見忠彦 藤原良博 和田湧気 市川和臣 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 塩見忠彦 藤原良博 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 長谷工コーポレーション	川又 篤 林 晴佳 伊藤 淳 山下統太郎 李 暁赫 大賀智史 井出朋孝	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 " 角藤 "	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 " 奥村組 角藤 "	山本 涼 田中 剛 上田 遼 畔上 進 塚大空哉	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 "	高塚康平 田原侑季 田中 剛 上田 遼 畔上 進 塚大空哉	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 高塚康平 田中 剛 上田 遼 畔上 進 塚大空哉	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グ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	小林道和 津村千香子 鈴木好幸 榎本浩之 秋竹壮哉 新井 勲 吳 光正 加藤晃敏	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CO ₂ 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 " 大林組 奥村組 熊谷組 " 東急建設	鈴木好幸 小林道和 津村千香子 榎本浩之 秋竹壮哉 新井 勘 呉 光正 加藤晃敏	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	秋竹壮哉 小林道和 鈴木好幸 榎本浩之 新井 勘 呉 光正 津村千香子 加藤晃敏	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 " 安藤・間 大林組 奥村組 東急建設	呉 光正 新井 勘 小林道和 津村千香子 鈴木好幸 榎本浩之 秋竹壮哉 加藤晃敏	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附着性能 (その1 附着強度試験)	長谷工コーポレーション " " " 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	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 " 奥村組 鋼管杭・鋼矢板技術協会 " " 芝浦工業大学 芝浦工業大学	藤原良博 塩見忠彦 和田湧気 外山 征 柳 悦孝 廣瀬智治 土方勝一郎	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)	マインド " 奥村組 鋼管杭・鋼矢板技術協会 " "	土方勝一郎 塩見忠彦 藤原良博 和田湧気 外山 征 柳 悦孝 廣瀬智治	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 今井康幸 林 隆浩 根岸利昌	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 飛鳥建設 奥村組 戸田建設 五洋建設 淺沼組	川崎健二郎 加藤淳司 門井大祐 田口智也 富田祐介 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 鷲海 昂 宮里直也 岡田 章 廣石秀造 篠原大亮	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斂研計算	奥村組 日本大学 " "	篠原大亮 鷲海 昴 宮里直也 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 " "	大倉駿平 寺岡大輝 山田遊耶 中西三和 安達 洋 北嶋圭二	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 " "	寺岡大輝 大倉駿平 山田遊耶 中西三和 安達 洋 北嶋圭二	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 三須基規 舟木秀尊 山上 聡 小山慶樹 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	建築研究振興 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 <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	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)

査読付論文

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	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 " 鴻池組 " 熊谷組 東急建設 奥村組 東洋建設	丸尾純也 石田琢志 原田雅俊 伊藤真二 植村友昭 前川利雄 三輪晋也 柳沼勝夫 山本耕三	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

講演会発表論文

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	藤橋克己 笠井祐輔 平光厚雄 柳沼勝夫 堀尾貞治 鈴木俊男	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 竹林健一 藤橋克己 平光厚雄 鈴木俊男 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 " 奥村組 "	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シアム(奥村組) 土壌汚染対策コンソーシアム " " "	長 千佳 大岡啓史 吉田宗久 佐竹 哲 飯田哲也 吉川克彦	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 " "	羽瀨博臣 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 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 —その1:周辺酸素濃度—	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 —その2:温度および酸化還元電位—	奥村組 " 岩手大学	清水祐也 鈴木奨士 萩原 進 大河原正文	第58回地盤工学研究発表会 13-11-4-02	地盤工学会	7月
14	MIG-seq法による絶滅危惧種(タチスミレ)の地域集団の遺伝的關係解析	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 " " "	羽瀧博臣 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 治 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 " 日本設計 " 奥村組 泰成 万協	高根裕貴 稲留康一 柳沼勝夫 小泉 治 草野崇文 阪本一生 石丸岳史 北洞武志	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	阪本一生 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	小河篤史 佐藤幸孝 清水 計 加藤智大 伊藤浩子 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 京都大学大学院	鈴木奨士 小河篤史 肴倉宏史	第15回 環境地盤工学シンポジウ 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	" " " 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	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	ピオトープを活用した生物多様性保全の取り組み	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 ■■

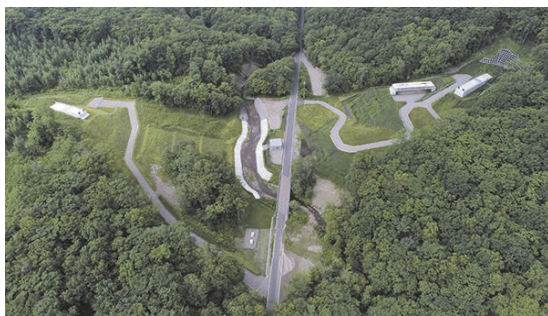
日建連表彰 第4回 土木賞（特別賞）
（一般社団法人日本建設業連合会）

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。



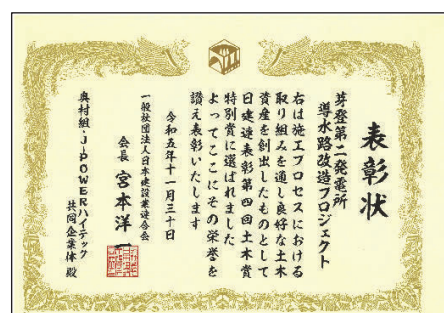
完成時全景



既設水路橋の発破解体（PC桁）



土木学会選奨土木遺産（P1～P2 径間）



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

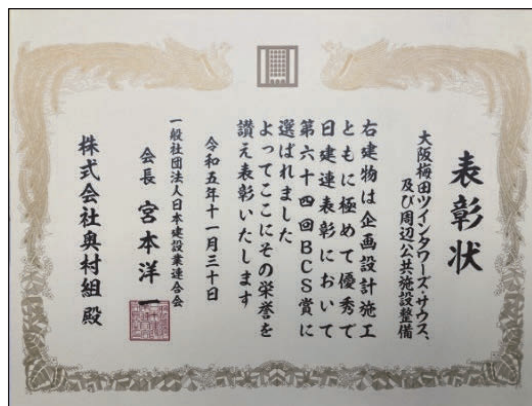
当社が周辺公共施設整備として大阪駅前地下道の拡幅・整備工事を担当した「大阪ツインタワーズ・サウス、及び周辺公共施設整備」が一般社団法人日本建設業連合会の日建連表彰第64回BCS賞を受賞した（大阪梅田ツインズタワーズ・サウスは、(株)竹中工務店の施工物件）。

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事なく、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復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、入力地震動の不確実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や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や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

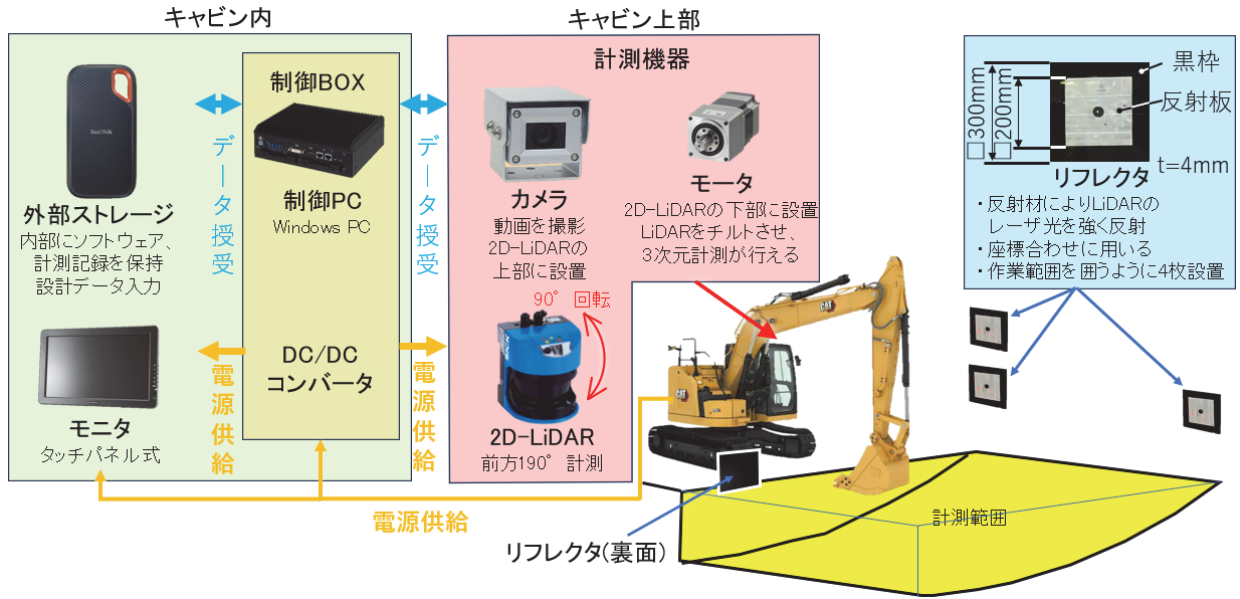


図-1 システムの機器構成

示す。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

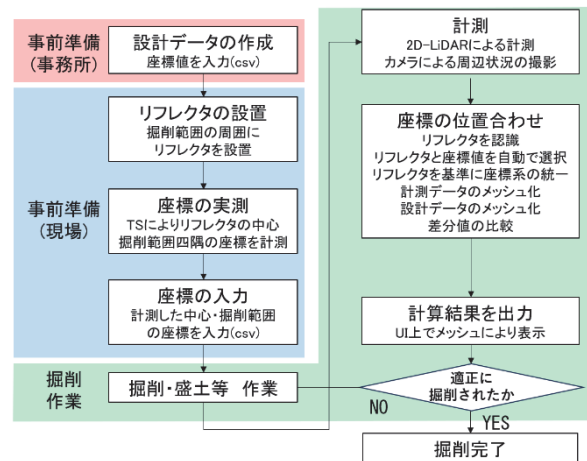


図-2 本システムの計測手順

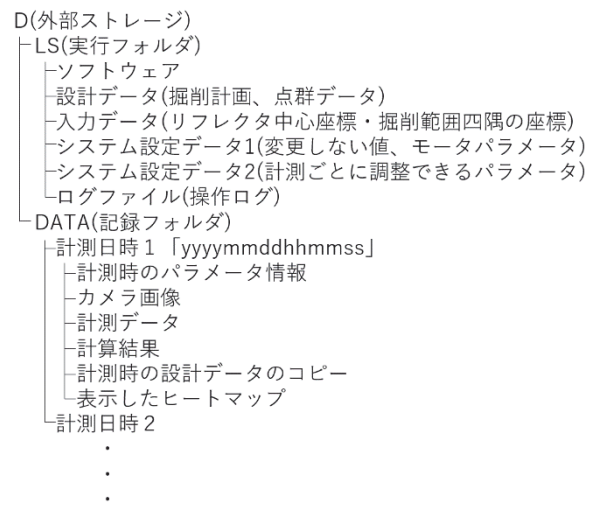


図-3 本システムのファイル構成

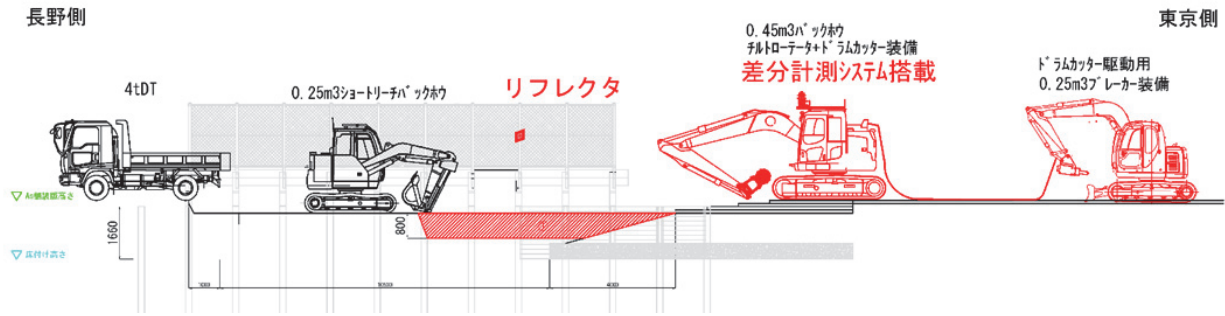


図-4 現場での機械配置

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、油圧ブレイカー（0.25m³ 級）を採用した。この油圧ブレイ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、油圧ブレイ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、油圧ブレイカーで掘削し、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、油圧ブレイ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）は設計値未滿、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



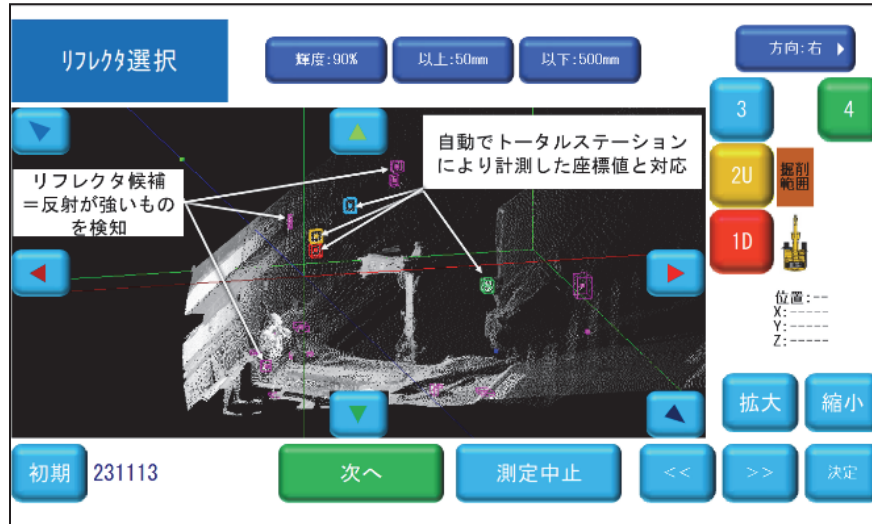
図-5 ドラムカッターによるインバート掘削状況



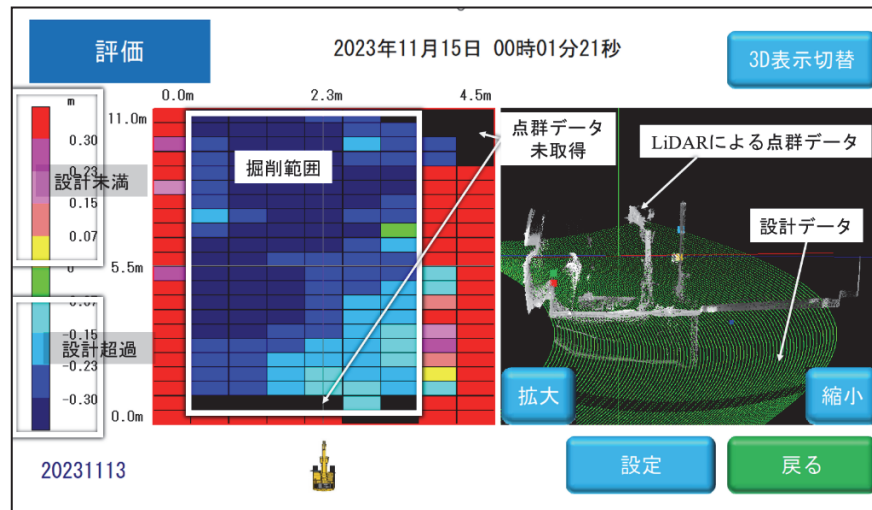
図-6 油圧ブレイカーによるインバート掘削状況

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



図ー7 リフレクタの自動認識状況



図ー8 出来形評価画面例

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部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】

- 1) 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(株)、中日本高速道路(株)、西日本高速道路(株)、「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 exceeding 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 corrosion-damaged 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

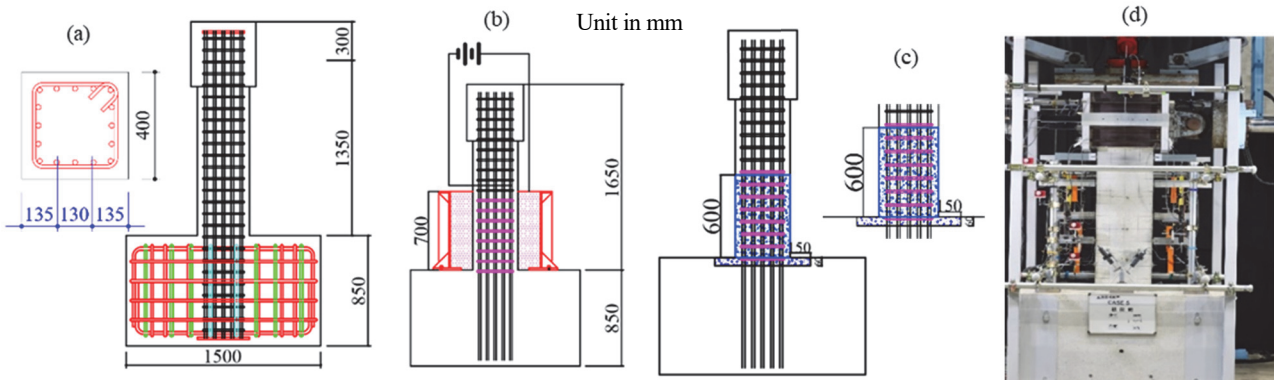


Figure 1. (a) Specimen details (b) Corrosion setup (c) Location of UHPC layer (d) Photo of experimental setup

axial and reverse cyclic loading. During the reversed cyclic loading, an axial force of 160 kN (1 N/mm²) 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 of the UHPC used in the 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:

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

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

Table 1: Experimental cases, corrosion ratio and crack width

Group	Cases	Remark	Corrosion ratio (%)	Max. corrosion ratio (%)	Maximum crack width
	Case 1	Sound	0		0
Group 1	Case 2	10% cor.	10	12.9	0.2
	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

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.

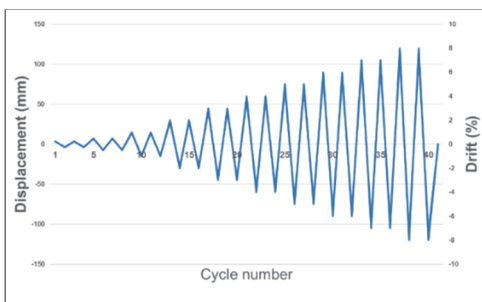


Figure 2. Quasi-static cyclic loading history

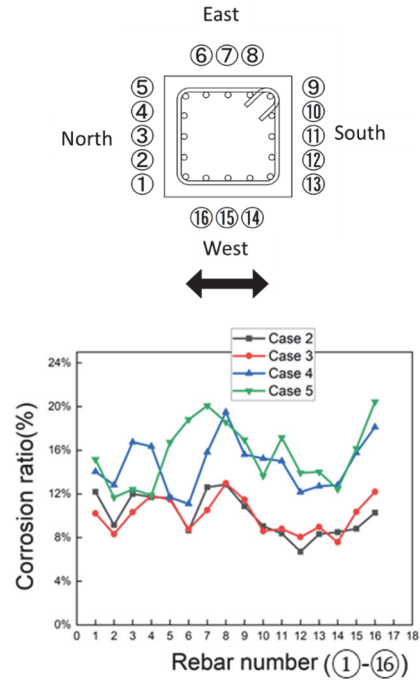


Figure 3. Mass loss of the longitudinal rebars

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.

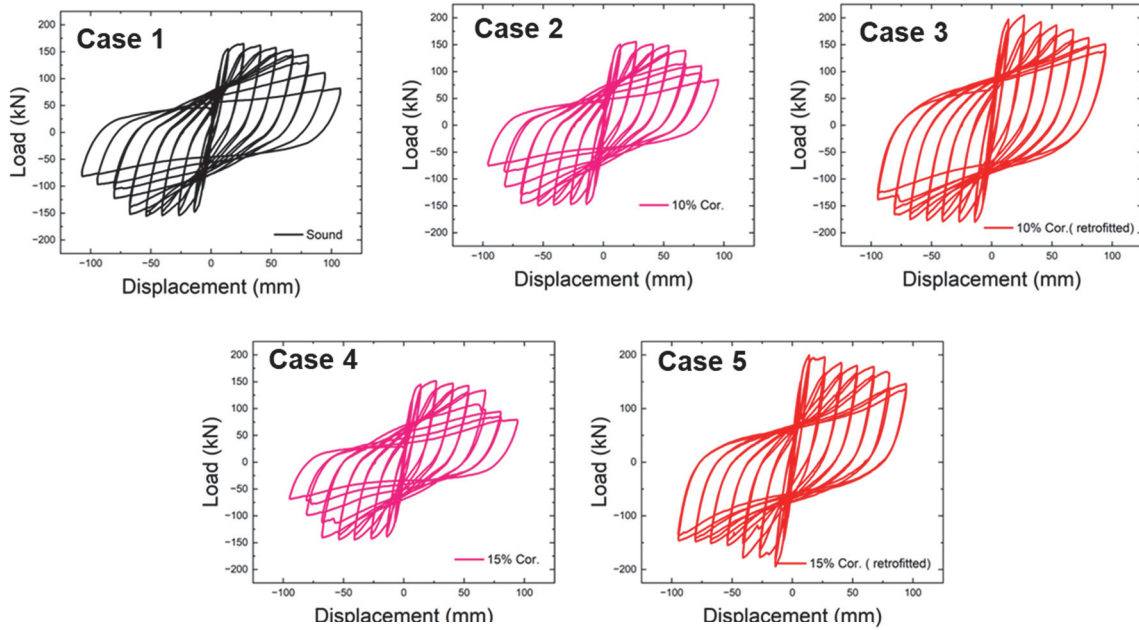


Figure 4. Hysteretic response of specimens

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 the sound specimen. 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

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.

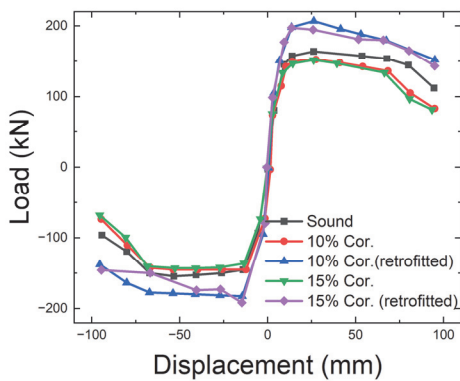
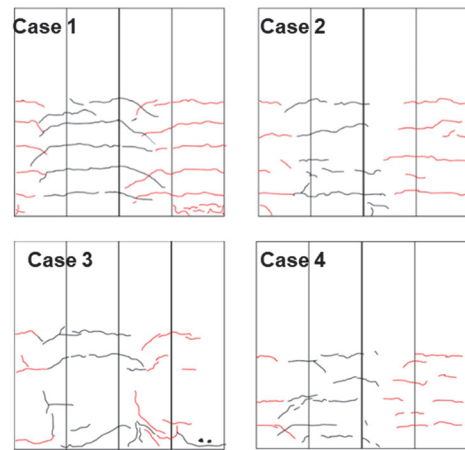


Figure 5. Backbone curve comparison of the sound, corroded, and strengthened specimens



(a)



(b)

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

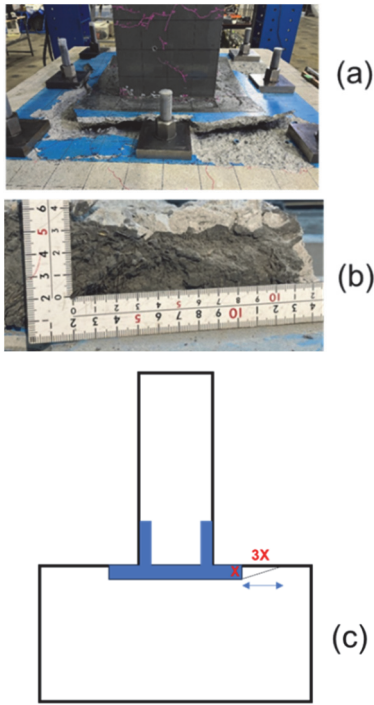


Figure 7. (a) Photo of failed surface (b) UHPC layer thickness (c) Failure Analysis

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

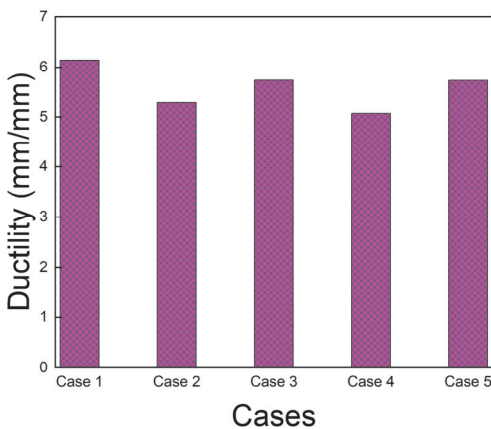


Figure 8. Comparison of ductility

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.

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

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

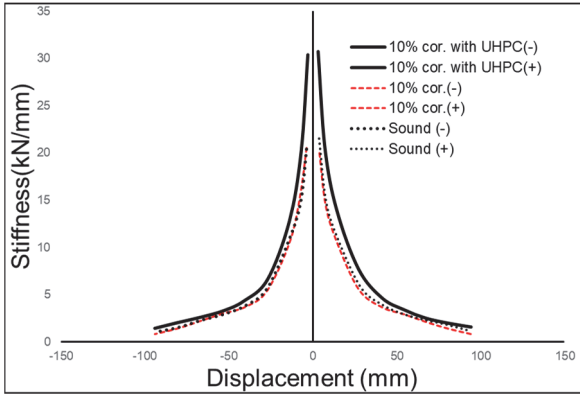


Figure 9. Stiffness degradation of sound and corroded specimens

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 $K = \text{load}/\text{deflection}$. 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.

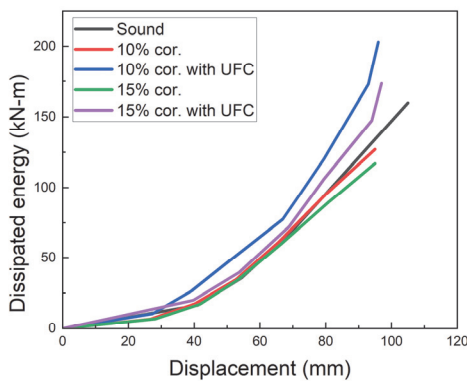


Figure 10. Comparison of dissipated energy

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:

1. 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.
2. 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.
4. UHPC jacketing improves the displacement capacity or ductility of corroded specimens. Case 3 displayed 7.3% higher ductility than Case 2.

5. 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】

- 1) 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*
- 3) 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

ーヒューマンエラー軽減に向けたバイタルデータの活用ー

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こなさ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・ゆりのり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 ヒューマンエラーの原因分類³⁾

建設現場での重点度を加味した12分類	
1. 無知、未熟練、不慣れ、経験不足、教育不足	7. 場面行動本能
2. 危険軽視、安易、慣れ	8. 慌て、驚愕、パニック
3. 不注意	9. 錯覚
4. 連絡不足	10. 中高年の機能低下
5. 集団欠陥	11. 疾病、疲労、体質、酷暑等
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

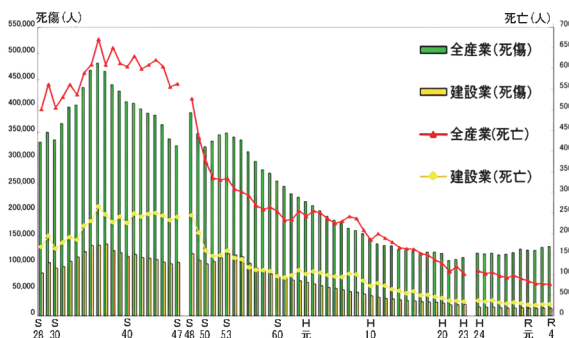


図-1 建設業の労働災害発生状況(死傷・死亡)¹⁾

* 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られる。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. 法的観点から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つ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。

C. 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、口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従業員研修の検討：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。

E. データ管理

10委託の可否：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（従業員に対する教育・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。

F. 損害賠償への対応

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/留意点	
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	一次的なデータ取得主体の明確化	A 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	<input type="checkbox"/>	
B データの利用目的	2 利用目的の特定	具体的な利用目的の特定	B データの利用目的	具体的な利用目的について、特定/明確化されているか	<input type="checkbox"/>	
	3 利用目的の明示方法の検討	既存のプライバシーポリシーの改善検討 本人告知/説明機会の設定検討		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	<input type="checkbox"/>	
	4 利用目的の遵守	利用目的の範囲を超えた取組みでないことの確認 利用目的遵守の体制を構築		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ないか	<input type="checkbox"/>	
				利用目的の範囲を超えた取組みになっていないことを確認しているか	<input type="checkbox"/>	
C 本人の同意	5 同意取得方法の検討	同意取得方法の検討（書面または電子メール等）	C 本人の同意	同意取得方法の検討がなされているか	<input type="checkbox"/>	
	6 同意文言と第三者提供の検討	汎用的な同意依頼書の策定（データ取得/第三者提供） 第三者提供範囲の具体的な検討		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ないか	<input type="checkbox"/>	
D 社内体制	7 社内規程・必要書式の整備	個人情報保護に係る規程類と書式の検討/見直し	D 社内体制	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	<input type="checkbox"/>	
	8 従業員研修の検討	データ取扱者を対象とした研修の検討（計画/実施）		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	<input type="checkbox"/>	
	9 組織体制	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ないか	<input type="checkbox"/>	
E データ管理	10 委託の可否	データ管理の委託可否の検討	E データ管理	データ管理の委託可否の検討と、必要な委託契約ができていないか	<input type="checkbox"/>	
	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の実施		委託する場合の個人情報保護法対応の実施 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	<input type="checkbox"/>	
F 損害賠償への対応	12 損害賠償への対応	過去事例の確認と賠償額（可能性）の確認 損害保険加入判断/補償内容の評価	F 損害賠償への対応	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	<input type="checkbox"/>	
				損害保険加入の判断と補償内容の評価ができていないか	<input type="checkbox"/>	

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られる。なお、埋め込み型(インプラント)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、作業員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

デバイスの型	専用設備型	据え置き型	携帯型	着用型 (ウェアラブルタイプ)	貼付型 (パッチタイプ)	埋め込み型 (インプラント)
			建設業(現場) ターゲット		(将来性)	
大きさ	[横長の棒グラフ]					
精度	[横長の棒グラフ]					
価格	[横長の棒グラフ]					

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た作業員もおり、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た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）。



個人入力選択画面 体調データ入力画面
図-4 管理ツール入力画面

【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。

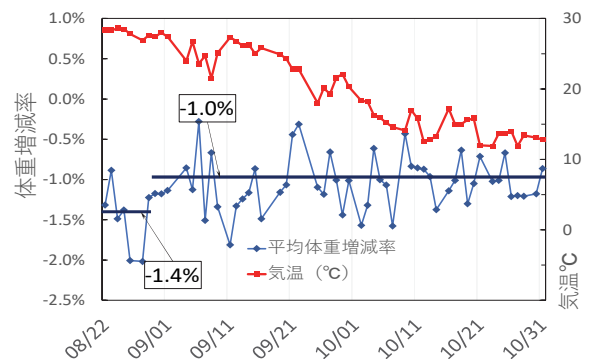


図-5 体重増減率の推移

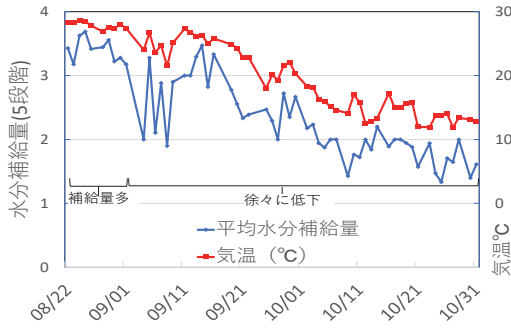


図-6 水分補給量の推移

(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。

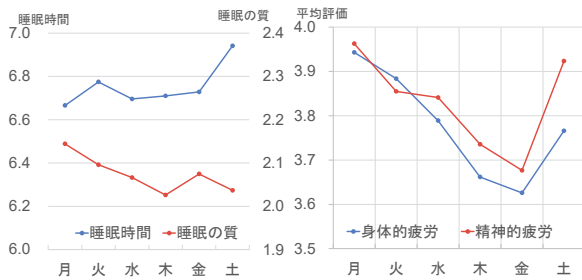


図-7 睡眠の時間と質の推移

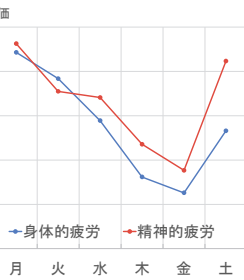


図-8 身体的疲労、精神的疲労の推移

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。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。

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
- 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】

- 1) 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
- 7) (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-okumuragumi-wellness>、2023.6
- 8) 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 ねじ筋) 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に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、上端からおおよそ 10d (d: 鉄筋の呼び径) の範囲に、プ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 回繰り返した後、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。

表-1 引抜き実験のパラメータ

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)	あり
B-30-52d-G	あり	30	52d(1,664mm)	あり
60-36d	なし	60	36d(1,152mm)	なし
B-60-36d	あり	60	36d(1,152mm)	なし

表-2 安定液・模擬土の配合と安定液試験結果

安定液配合		模擬土配合			安定液試験結果*		
ペントナイト	CMC	粘性土	砂質土	砂分率	比重	粘性(s)	pH
5.0%	0.2%	16.0%	5.0%	5.0%	1.15	32.78	9.0

※試験方法 比重: マッドバランス 粘性: ファンネル粘度計
pH: pH メータ

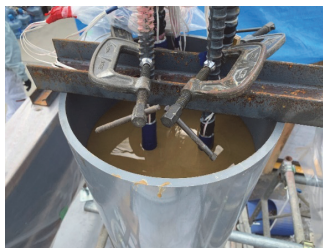


写真-1 鉄筋の安定液浸漬

表-3 材料試験結果 (引抜き実験)

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

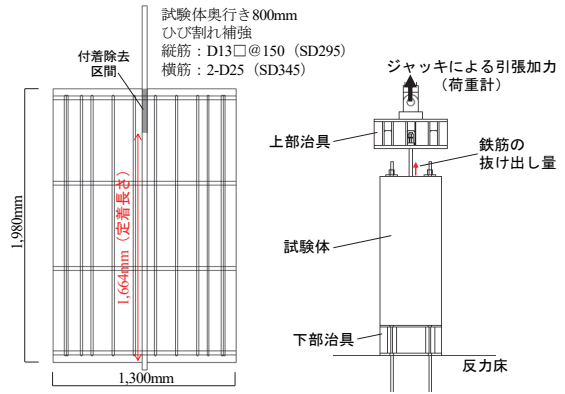


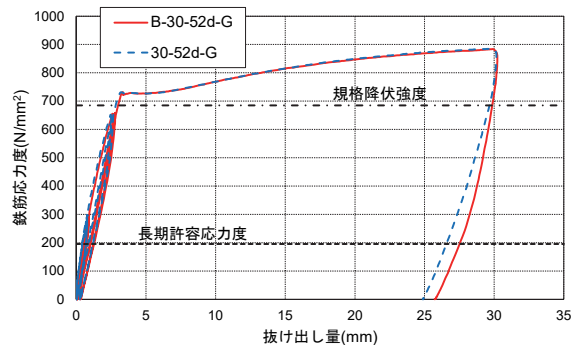
図-1 引抜き実験の試験体と加力・変位計測状況

2.4 実験結果および考察

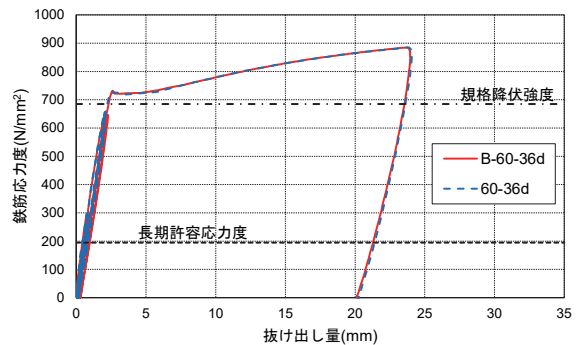
鉄筋応力度-抜け出し量関係の比較を図-2に示す。鉄筋応力度はジャッキ荷重を鉄筋の公称断面積で除した値、抜け出し量は 2 箇所計測値の相加平均値とした。図より、安定液浸漬の有無に関わらず、いずれの試験体も引張強度の 95% 相当まで荷重を保持している。

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。



(a) 安定液浸漬の有無による比較 ($F_c=30\text{N/mm}^2$)



(b) 安定液浸漬の有無による比較 ($F_c=60\text{N/mm}^2$)

図-2 鉄筋応力度-抜け出し量関係 (引抜き実験)

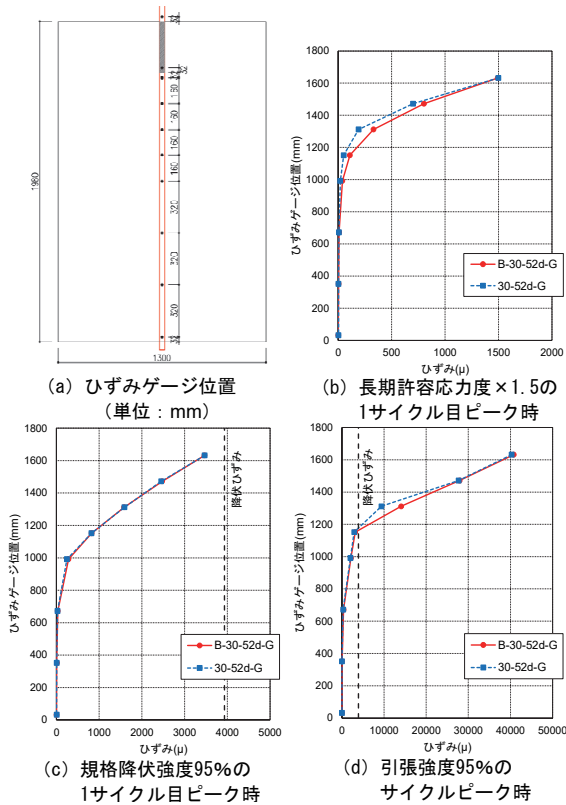


図-3 安定液浸漬有無による鉄筋のひずみ分布の比較

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⁷⁾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 ねじ筋) 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に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に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。ジャッキ側には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)	なし
J-B-30-55d	あり	30	55d (1,045mm)	
J-B-60-38d		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 (μ)	3,667

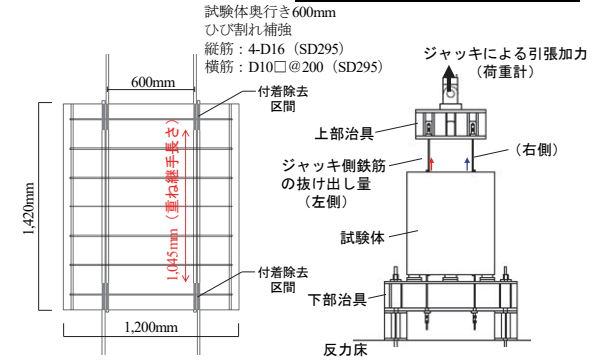


図-4 重ね継手実験の試験体と加力・変位計測状況

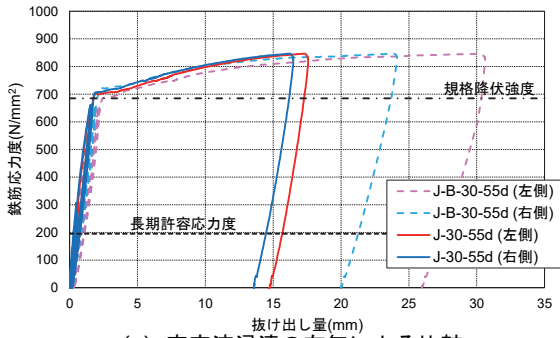
3.4 実験結果および考察

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。

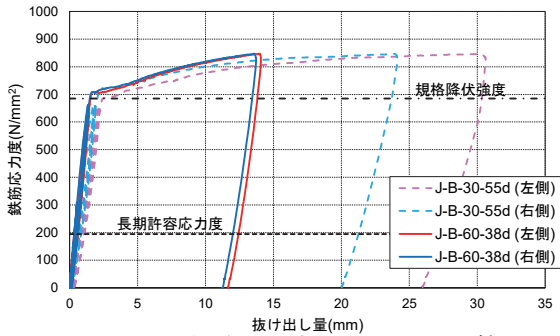
J-B-30-55d-G について、サイクルピーク時の鉄筋のひずみ分布を図-6に示す。図より、荷重が大きくなるにつれて、ひずみの生じる範囲がジャッキ側鉄筋では上端

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。



(a) 安定液浸漬の有無による比較



(b) F_c と重ね継手長さの違いによる比較

図-5 鉄筋応力度-抜け出し量 (重ね継手実験)

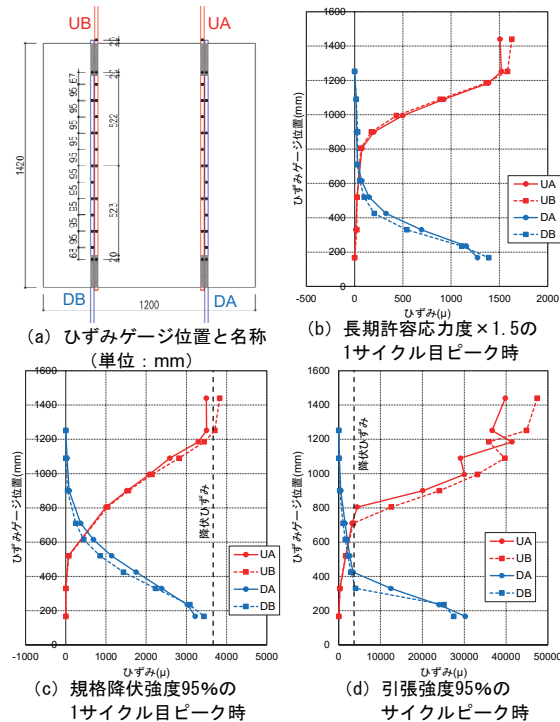


図-6 J-B-30-55d-Gの鉄筋のひずみ分布

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	10-D19 $p_g=1.01\%$	U9@150 $p_w=0.14\%$	$N=-944$ kN $\eta=-0.1$
No.2	30		U9@150 $p_w=0.14\%$	$N=1,702$ kN $\eta=0.2$
No.3	30		U9@100 $p_w=0.21\%$	$N=3,551$ kN $\eta=0.4$
No.4	60	18-D19 $p_g=1.82\%$	U9@50 $p_w=0.42\%$	$N=6,379$ kN $\eta=0.4$
No.5	30	18-D19 $p_g=1.82\%$	U12.6@50 $p_w=0.83\%$	$N=-1,880$ kN $\eta=-0.2$

※1 主筋比 $p_g=a_g/A_c$ a_g : 主筋全断面積 A_c : 杭の断面積

※2 せん断補強筋比 $p_w=a_w/(D \cdot x)$ 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 $\eta=N/(\sigma_B \times A_c)$ σ_B : コンクリートの圧縮強度 N : 作用軸力 (圧縮: 正、引張: 負)

表-7 材料試験結果
(構造実験)

(a) 杭体コンクリート		
試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
No.1	33.4	28,900
No.2	30.1	28,300
No.3	31.4	29,000
No.4	56.4	32,900
No.5	33.3	28,100

(b) 鉄筋		
主筋		
試験体名	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
No.1~5	748.1	202,200
せん断補強筋		
試験体名	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
No.1~4	1,417	207,900
No.5	1,387	206,600

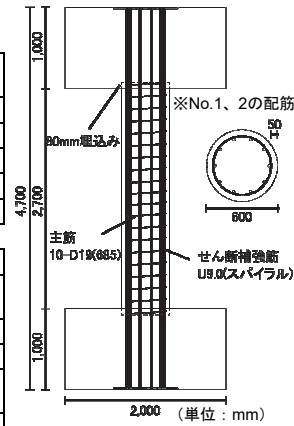


図-7 構造実験の試験体

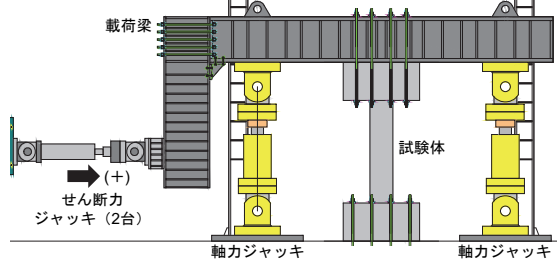


図-8 加力装置の概要

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⁵⁾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靱性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。

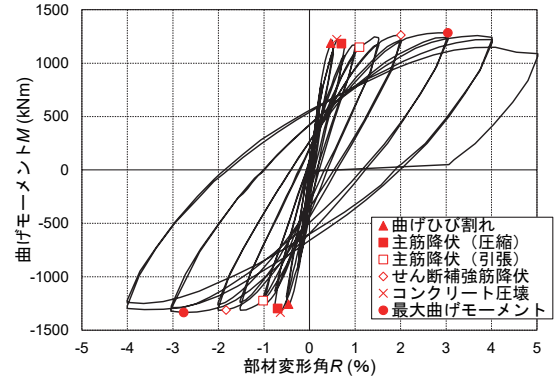


図-9 No. 4 の $M-R$ 関係と損傷過程

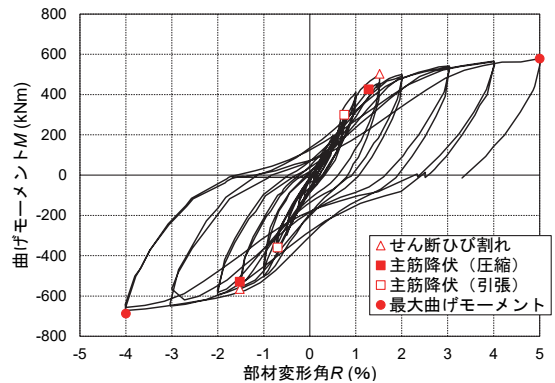


図-10 No. 5 の $M-R$ 関係と損傷過程

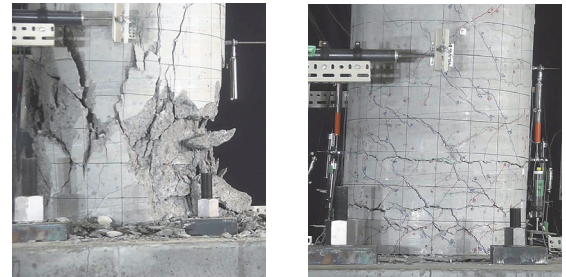


写真-2 最終破壊状況 (杭体脚部)

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 $M-\phi$ 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て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 $3,000\mu$ 、または主筋の限界ひずみ $10,000\mu$ 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。

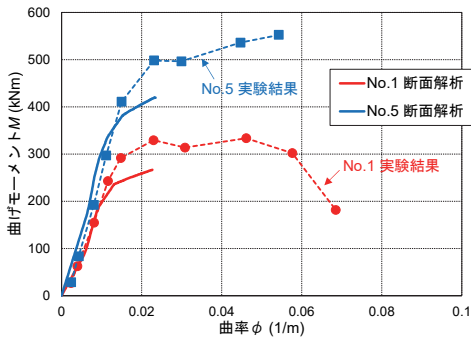
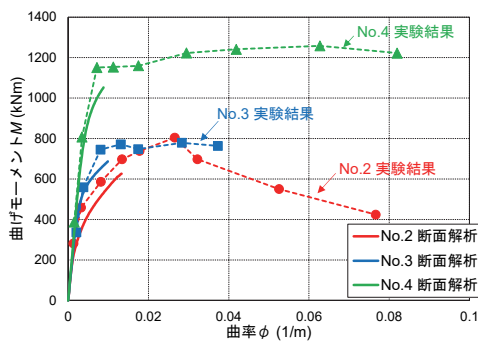
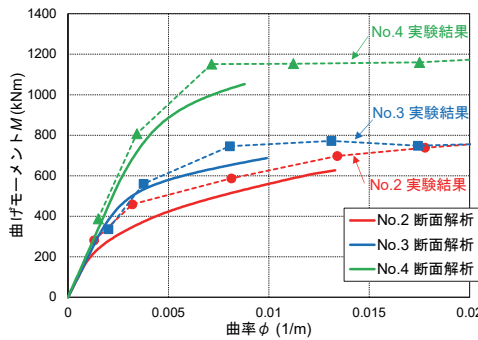


図-11 実験結果と解析結果の比較（引張軸力）



(a) $\phi=0.1$ (1/m) まで表示



(b) $\phi=0.02$ (1/m) まで表示

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 $M-\phi$ 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 $M-\phi$ 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、長谷工コーポレーション、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】

- 1) 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 静雄、「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

－ 一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 梁のリップ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

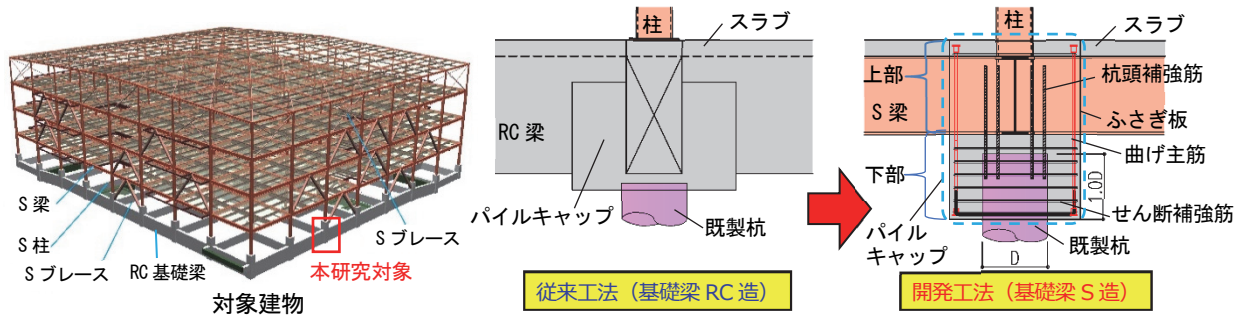


図-1 鉄骨基礎梁工法の概要

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荷重実験を実施した。

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

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

表-1 試験体一覧

試験体	梁	柱	SC杭		パイルキャップ				柱軸力		想定破壊形式	特徴		
	断面(材質) mm	断面(材質) mm	断面(材質) mm	杭頭埋込み長 mm	杭頭補強筋(材質)	F_c N/mm ²	杭偏心	ふさぎ板(材質) mm	接合	S梁幅/フーチング幅			軸力 kN	軸力比 η
K-1	BH-400×125×9×19 (SN490B)	B□-200×200×19 (SN490B)	φ318.5×T69×t12.7 (STK490) (T:全厚, t:鋼管厚)	318.5 (1.0D)	8-D16 (SD390)	36	無	PL-3.2 (SS400)	溶接	0.20	200	0.04	パイキャップ下部のせん断破壊	標準試験体 ふさぎ板ボルト接合 溶融亜鉛メッキ処理 杭偏心
K-2				478 (1.5D)	—		有		ボルト					
K-3				318.5 (1.0D)	8-D16 (SD390)		無	溶接	0.16	-350	-0.14	梁曲げ降伏破壊		
K-4	BH-325×100×6×9 (SN490B)	□-200×200×12 (BCR295)	—	—	—		—	—	—	—	—	—		

注) F_c : 目標コンクリート強度、軸力比 $\eta = N / (A \cdot \sigma_y)$ 、 N : 軸力、 A : 鉄骨柱断面積、 σ_y : 鉄骨柱規格降伏強度

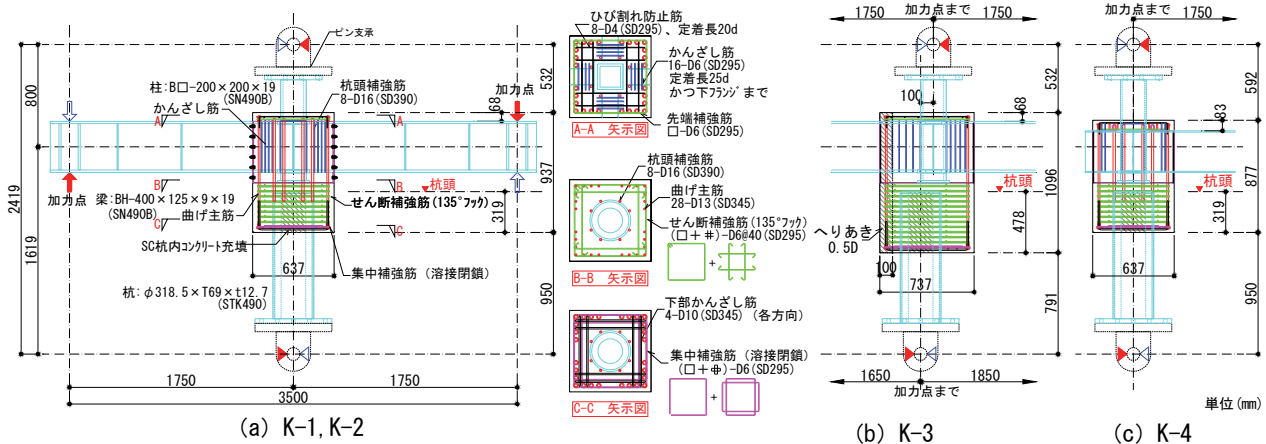


図-2 試験体形状

加曲げモーメントが生じることに對して、パイルキャップに對策（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/mm^2 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 $\phi 318.5 \times T69 \times t12.7$ (STK490)を用いた。また、コンクリートの設計基準強度を 105N/mm^2 とした。

3.3 荷重方法

荷重装置を図-3に示す。荷重については、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 Q_g 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器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 $\eta=0.04$ (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 $\eta=0.18$ (圧縮 800kN)、K-4 では短期における隅柱での引張を想定して $\eta=-0.14$ (引張 350kN) とした。なお、試験体 K-3 では、杭芯が柱芯に對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。

梁への荷重については、層間変形角 R によって制御し、加力方向は、図-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。荷重履歴は、層間変形角 $R=2.5, 5, 10, 15, 20, 30, 40 \times 10^{-3} \text{ rad}$ まで2サイクルずつの正負交番繰返し荷重を行い、その後、正加力方向へ $R=60 \times 10^{-3} \text{ rad}$ まで単調荷重を行った。

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} ($\times 10^{-3}$)	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、 σ_B : 圧縮強度、 ϵ_{co} : σ_B 時ひずみ、 E_c : ヤング係数、 σ_t : 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	使用試験体	E_s (kN/mm^2)	σ_{sy} (N/mm^2)	ϵ_{sy} ($\times 10^{-3}$)
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_s : ヤング係数、 σ_{sy} : 降伏点、 ϵ_{sy} : 降伏ひずみ ($=\sigma_{sy}/E_s$)、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。

表-4 鋼板の材料試験結果

公称厚さ	材質	使用部位	使用試験体	E_s (kN/mm^2)	σ_{sy} (N/mm^2)	ϵ_{sy} ($\times 10^{-3}$)
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_s : ヤング係数、 σ_{sy} : 降伏点 (0.2%オフセット耐力)、 ϵ_{sy} : 降伏ひずみ ($=\sigma_{sy}/E_s$)、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。

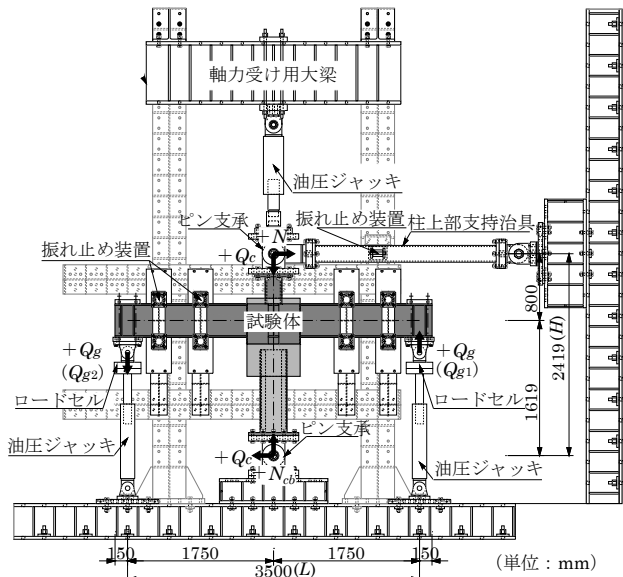


図-3 荷重装置

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 Q_g については、式(1)、(2)によって算出した。

$$Q_g = (Q_{g1} - Q_{g2})/2 \quad (\text{十字形}) \quad (1)$$

$$Q_g = -Q_{g2} \quad (\text{ト字形}) \quad (2)$$

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 -層間変形角 R 関係を図-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 $R=+5.1 \times 10^{-3}$ rad 時まで発生し、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 $R=+20.1 \times 10^{-3}$ rad 時まで発生した。

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

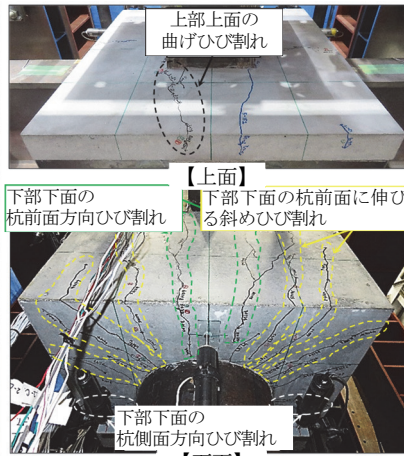
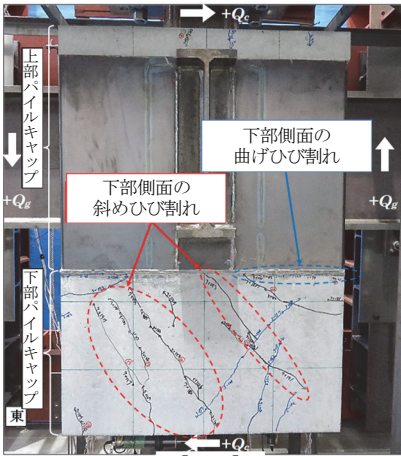
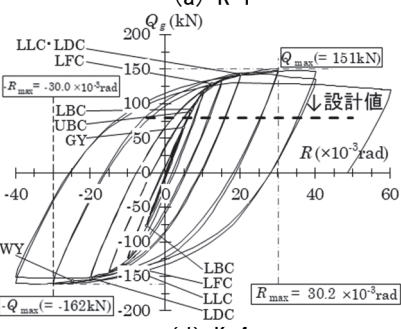
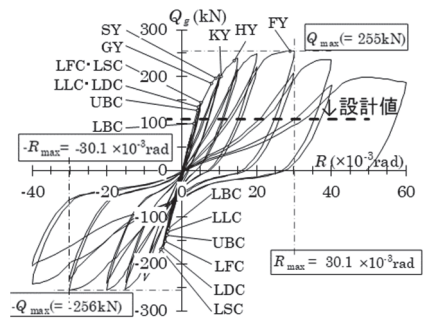
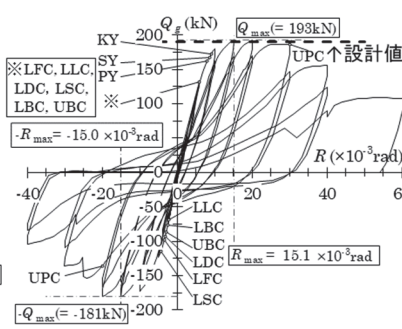
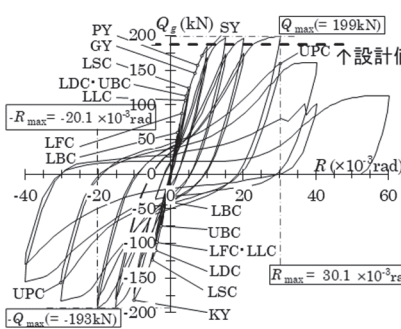


写真-1 試験体の典型的なひび割れ発生状況 (K-1 : $R=+15 \times 10^{-3}$ rad 時)

写真-2 ふさぎ板内コンクリートの状況 (K-2)



【主な発生現象】	
[下部パイルキャップのひび割れ]	[鉄骨部・鉄筋の降伏]
LFC : 下面の杭前面方向ひび割れ	GY : 鉄骨梁フランジの引張降伏
LLC : 下面の杭側面方向ひび割れ	WY : 鉄骨梁ウェブのせん断降伏
LDC : 下面の杭前面に伸びる斜めひび割れ	HY : 鉄骨柱の圧縮降伏
LSC : 側面の斜めひび割れ	PY : 杭頭補強筋の引張降伏
LBC : 側面の曲げひび割れ	SY : せん断補強筋の引張降伏
[上部パイルキャップのひび割れ]	KY : 下部かんざし筋の引張降伏
UBC : 上面の曲げひび割れ	FY : パイルキャップ主筋の引張降伏

図-4 梁せん断力 Q_g -層間変形角 R 関係

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、 $R=7.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に杭頭補強筋、 $R=8.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時にせん断補強筋、 $R=9.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に下部かんざし筋で発生した。なお、K-1 では $R=6.6 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に鉄骨梁フランジの引張降伏も発生した。さらに、 $R=15 \times 10^{-3} \text{rad}$ 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 $R=30.1 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に最大耐力 $Q_{\max}=199 \text{kN}$ に、K-2 では $R=15.1 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に $Q_{\max}=193 \text{kN}$ 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、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-5に示す。K-1 と K-2 の Q_g-R 関係は、最大耐力時の $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 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、 $R=8.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に発生した。また、鉄筋の引張降伏は、 $R=9.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時にせん断補強筋、 $R=10.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に下部かんざし筋で発生した。さらに、S 柱の圧縮降伏が、 $R=14.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に発生した。 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 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、 $R=29.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時にパイルキャップ主筋で引張降伏が発生し、 $R=30.1 \times 10^{-3} \text{rad}$ で最大耐力 $Q_{\max}=255 \text{kN}$ 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、 $R=4.8 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に鉄骨梁フランジの引張降伏が発生し、 $R=30.2 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に最大耐力 $Q_{\max}=151 \text{kN}$ 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。

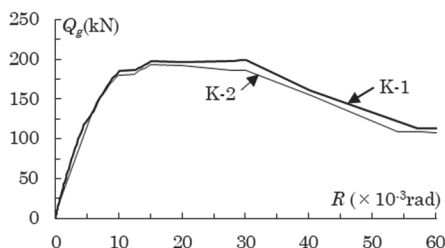


図-5 包絡線の比較

4. 設計式の検証

下部パイルキャップの耐力(uQ_{up})の算定には、学会指針²⁾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(uM_{ph})から、式(5)により求めるせん断強度(uQ_{ph1})と、式(6)による杭埋込み部前面の安全限界せん断強度(uQ_{ph2})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(uM_{rb})から式(8)により求めるせん断強度(uQ_{rb})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。

$$uQ_{up} = \min(uQ_{ph1}, uQ_{ph2}) + uQ_{rb} \quad (3)$$

$$uM_{ph} = \sigma_B \cdot \left(\frac{D \cdot h^2 \cdot L}{6L + 4h} \right) \quad (4)$$

$$uQ_{ph1} = uM_{ph} / L \quad (5)$$

$$uQ_{ph2} = c \sigma_s \cdot A_s \quad (6)$$

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)
- 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 $\sigma_s = 0.335 \sqrt{F_c}$
- 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)

$$\left. \begin{aligned} & (N_{min} \leq N < 0 \text{ の時}) \\ & uM_{rb} = 0.8a_r \sigma_y D' + 0.4ND' \\ & (0 \leq N \leq 0.4bD'F_c \text{ の時}) \\ & uM_{rb} = 0.8a_r \sigma_y D' + 0.5ND' \left(1 - \frac{N}{bD'F_c} \right) \end{aligned} \right\} (7)$$

$$uQ_{rb} = uM_{rb} / L' \quad (8)$$

ここで、

- N_{min} : 中心引張時終局強度 ($= -a_g \cdot \sigma_y$) (N)
- N : 軸方向力(N)
- a_r : 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(Q_{\max})と比較したものを表-5に示す。全ての試験体において uQ_{ph1} に比

べて uQ_{ph2} 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 Q_{max})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、 Q_{max} となる前に杭頭補強筋が降伏し、実験値は uQ_{ph1} 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加えられるが、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、鉄骨部を溶融垂鉛めっき処理した試験体 K-2 の梁せん断力 Q_g -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、 Q_g - 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)

試験体	uQ_{ph1}	uQ_{ph2}	uQ_{rb}	uQ_{up}	Q_{max}	Q_{max}/uQ_{up}
K-1	121	108	79	187	199	1.06
K-2	126	110	79	190	193	1.02
K-3	295	109	0	109	255	2.34
K-4	124	110	20	130	(151)	(1.16)

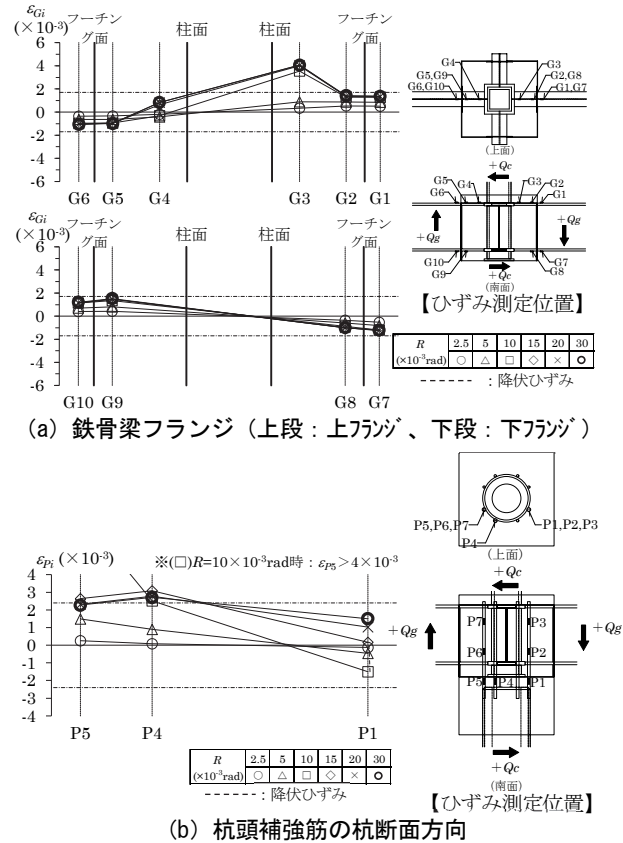


図-6 ひずみ分布の推移 (K-1 正加力目標変形角時)

- 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
- 2) 「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
- 3) 「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

ー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ー

Development of Moist Curing System for Concrete Slab

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

増田貴之* 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日以上湿潤養生期間が求められる。

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り。

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 $\lambda=1,450\text{nm}$ 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を確認できたので、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。

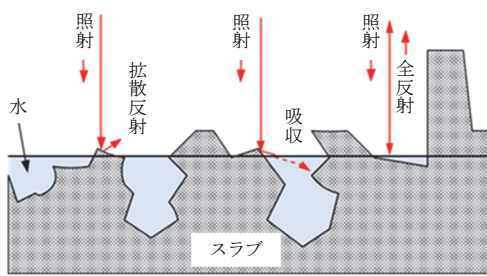


図-1 スラブ表面模式図

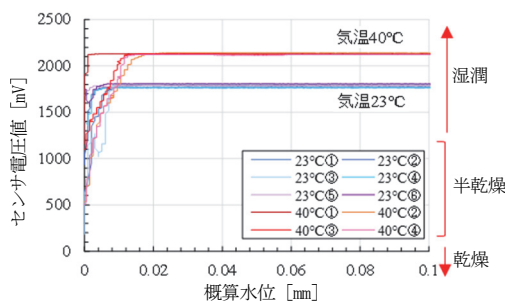


図-2 表面水位と反射光量(電圧値)の関係

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。

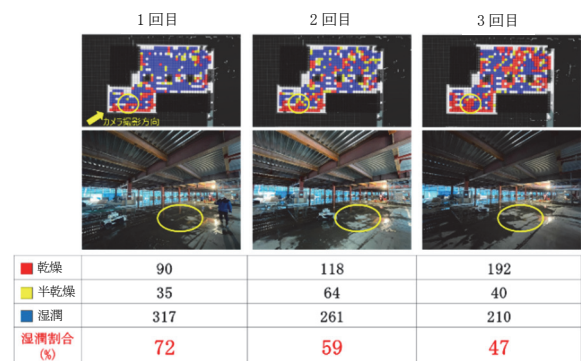


図-3 湿潤評価結果と目視結果の比較

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800m²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。

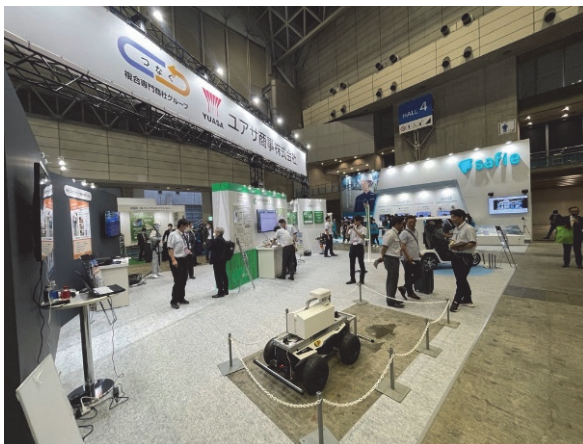


写真-2 CSPI-EXPO 2023 での出展状況

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、金鍍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、金鍍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。金鍍仕上げ後から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 金鍍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、金罫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。金罫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 $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 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 $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ であるため、スラブ表面へ歩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 200m^2 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、 200m^2 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。

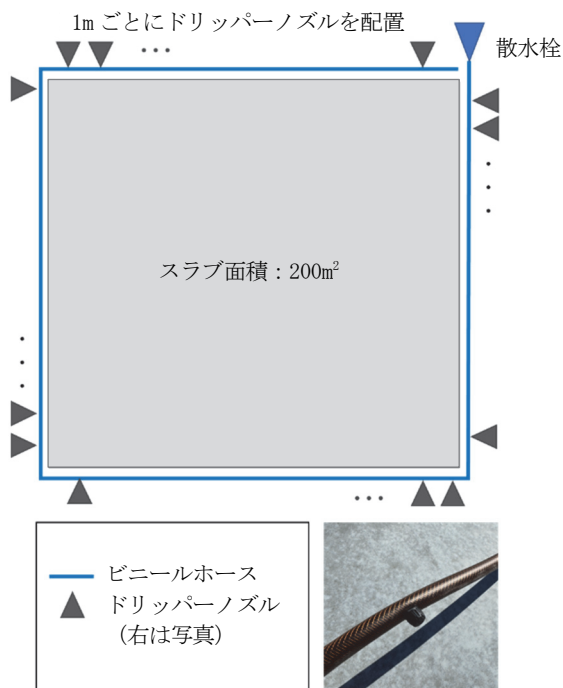


図-4 散水可能範囲の検証概況

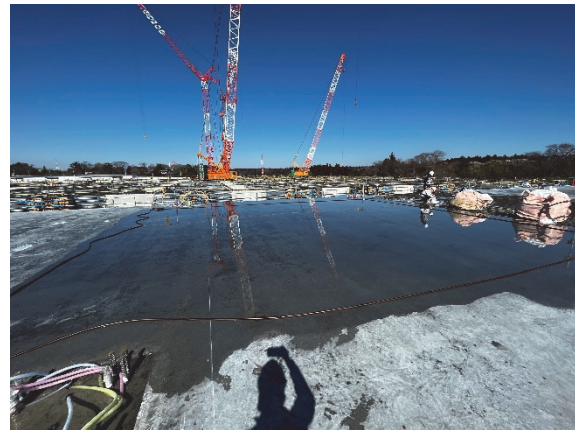


写真-4 スラブ面積 200m^2 に対する散水状況
(上) 散水開始時
(下) 開始から 30 分後

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、 500m^2 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 500m^2 を四分割し、3.2節で検証した散水可能範囲である 200m^2 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°C 、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。

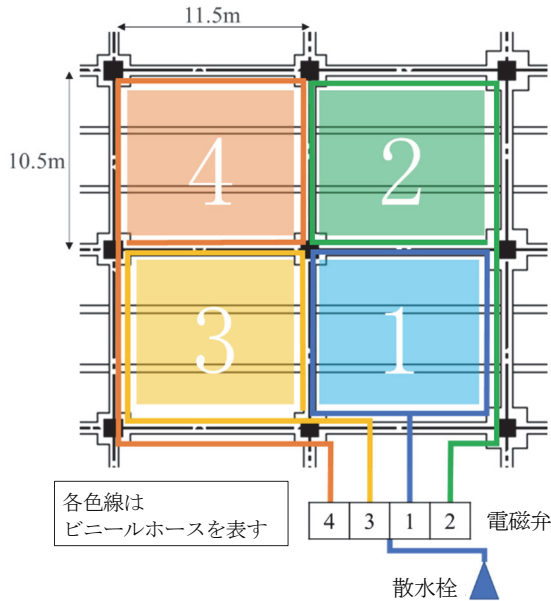


図-5 現場適用実験の概況
(上) 対象スラブの全景写真
(下) 対象スラブを四分割した時の模式図

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態を評価する。

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
■ 湿潤	257	273
湿潤割合(%)	75	80
初回比(%)	105	113

図-6 金鍍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】

- 1) 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 ANSI16.1、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⁶⁾。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、固体内部と固体表面で濃度差が生じ、有害物質は固体内部から

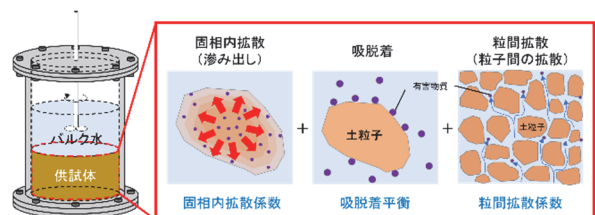


図-1 拡散溶出試験による物質溶出の内訳

*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

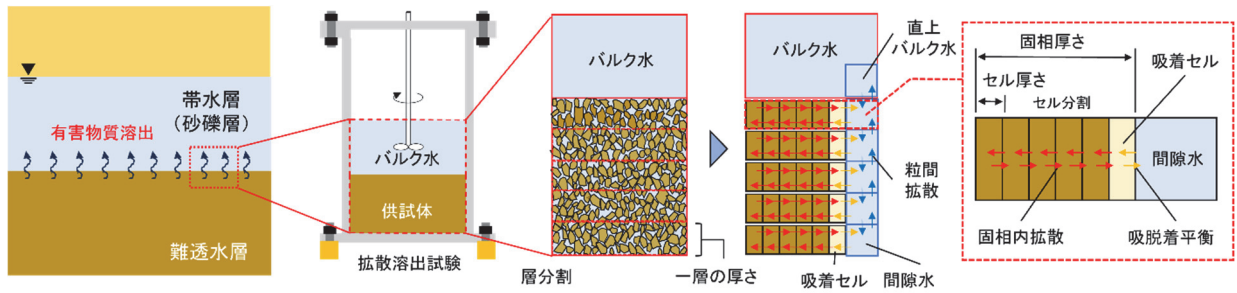


図-2 拡散溶出試験と二段階拡散モデル (DKD モデル) の概要

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。

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⁾。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_F-K_d モデル) を提案し、 D_F-K_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られるが、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 (図-1)。

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 (固相内拡散係数 D_F や分配係数 K_d) 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

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、ラングミュア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。

$$q = K_d C_L \quad (1)$$

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。

$$M_T m_s = M_{AL} m_{AL} + C_L V_L \quad (2)$$

$$C_L = \frac{M_T}{K_d + R_{LS}} \quad (3)$$

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积 (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。

$$M_T^{(n)} = \frac{(M_{AL,pre}^{(n)} m_{AL} + C^{(n-1)} V_L)}{m_s} \quad (4)$$

$$C_{pre}^{(n)} = \frac{M_T^{(n)}}{K_d + R_{LS}} \quad (5)$$

ここで、 $M_{AL,pre}$ 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 $C^{(n)}$ 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。

$$M_{AL}^{(n)} = \frac{K_d C_{pre}^{(n)} m_s}{m_{AL}} \quad (6)$$

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。

$$J = -\theta D_e \frac{dC}{dx} \quad (7)$$

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。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (8)$$

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。

$$M_{AL,pre}^{(n)} = M_{AL}^{(n-1)} + \frac{D_F \Delta t}{\Delta z^2} (F_k^{(n-1)} - M_{AL}^{(n-1)}) \quad (9)$$

$$F_i^{(n)} = F_i^{(n-1)} + \frac{D_F \Delta t}{\Delta z^2} (F_{i+1}^{(n-1)} - 2F_i^{(n-1)} + F_{i-1}^{(n-1)}) \quad (10)$$

$$F_k^{(n)} = F_k^{(n-1)} + \frac{D_F \Delta t}{\Delta z^2} (M_{AL}^{(n-1)} - 2F_k^{(n-1)} + F_{k-1}^{(n-1)}) \quad (11)$$

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

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。

$$C_p^{(n)} = C_{pre,p}^{(n)} + \frac{D_E \Delta t}{\Delta x^2} (C_{BL}^{(n-1)} - 2C_{pre,p}^{(n)} + C_{pre,p-1}^{(n)}) \quad (13)$$

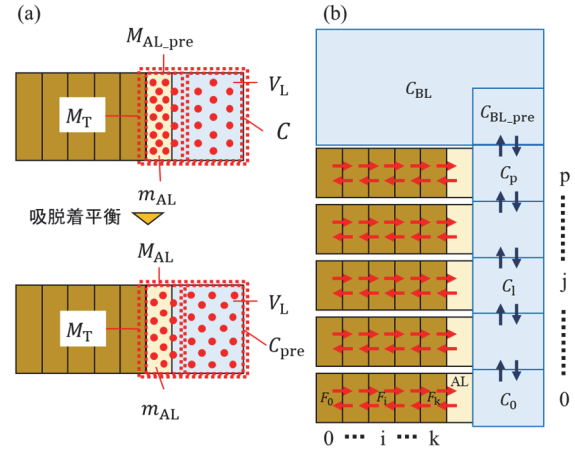


図-3 吸脱着平衡および二段階拡散のモデル詳細

$$C_j^{(n)} = C_{pre,j}^{(n)} + \frac{D_E \Delta t}{\Delta x^2} (C_{pre,j+1}^{(n-1)} - 2C_{pre,j}^{(n)} + C_{pre,j-1}^{(n)}) \quad (14)$$

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

$$C_{BL,pre}^{(n)} = C_{BL}^{(n-1)} + \frac{D_E \Delta t}{\Delta x^2} (C_{pre,p}^{(n)} - C_{BL}^{(n-1)}) \quad (16)$$

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 や 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 や $C_{pre,0}$ 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。

$$C_{BL}^{(n)} = \frac{(C_{BL,pre}^{(n-1)} V_L + C_{BL}^{(n-1)} (V_{BL} - V_{BL,pre}))}{V_{BL}} \quad (17)$$

$V_{BL,pre}$ 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 0.1 m の円筒状カラムの下部に含水比 55% の湿潤試料を 1 kg、高さ 0.08 m 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706.5mLを設け、一層の厚さを 5.0×10^{-4} mとし、0.06m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) H_s は、土粒子の平均半径から 2.2×10^{-5} mとした。吸着セル H_{AL} の厚さは 5.0×10^{-7} m、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50.0mg/kgとした。刻み時間を200sとし、1、2、4、8、16日目にバルク水の入れ替えを再現するため、上記日数のバルク水濃度を0mg/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日目の入れ替え直前の C_{BL} を算出し、それぞれの C_{BL} 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 を0.01~100.0L/kg、 D_F を 1.0×10^{-25} ~ 10^{-18} m²/sの範囲でそれぞれ計算した。 Δx は 5.0×10^{-4} mとし供試体を120層に分割した。 K_d を変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 は 1.0×10^{-25} m²/sとし、 D_F を変えて解析を行う際は、 K_d は0.01L/kgとした。また、 D_E は 1.0×10^{-10} m²/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 C_{BL} から、単位面積あたりの溶出量 q_i 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) J_i は式(19)から算出できる。

$$q_i = \frac{C_i V_{BL}}{A} \tag{18}$$

$$J_i = \frac{q_i}{t_i - t_{i-1}} \tag{19}$$

ここで、 C_i は各画分の C_{BL} 、 A はカラム断面積、 $t_i - t_{i-1}$ 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

表-1 各パラメーター設定条件

記号	名称	値	単位
H_s	固相厚さ	2.2×10^{-5}	m
H_{AL}	吸着セル厚さ	5.0×10^{-7}	m
m_{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_E	粒間拡散係数	1.0×10^{-10}	m ² /s
K_d	分配係数	0.01~100.0	L/kg
D_F	固相内拡散係数	1.0×10^{-25} ~ 10^{-18}	m ² /s

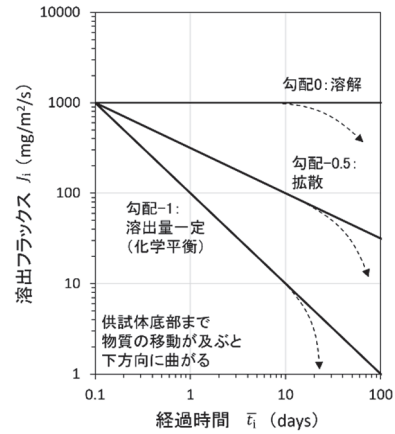


図-4 溶出機構と勾配との関係

けるフラックスに対応する時刻は式(20)で求めた。

$$\bar{t}_i = \left(\frac{\sqrt{t_i} + \sqrt{t_{i-1}}}{2} \right)^2 \tag{20}$$

以上より、 $\log \bar{t}_i$ および $\log J_i$ を求め、両者の関係から溶出機構を判定した。各画分の J_i と \bar{t}_i 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、 $\log \bar{t}_i$ 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 C_{BL} を求めたので、いずれの画分においても、 C_{BL} がほぼ一定となる場合、 C_{BL} は経過時間のみ依存し、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 C_{BL} から溶出フラックスを求め、 K_d 、 D_F 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の関係は**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

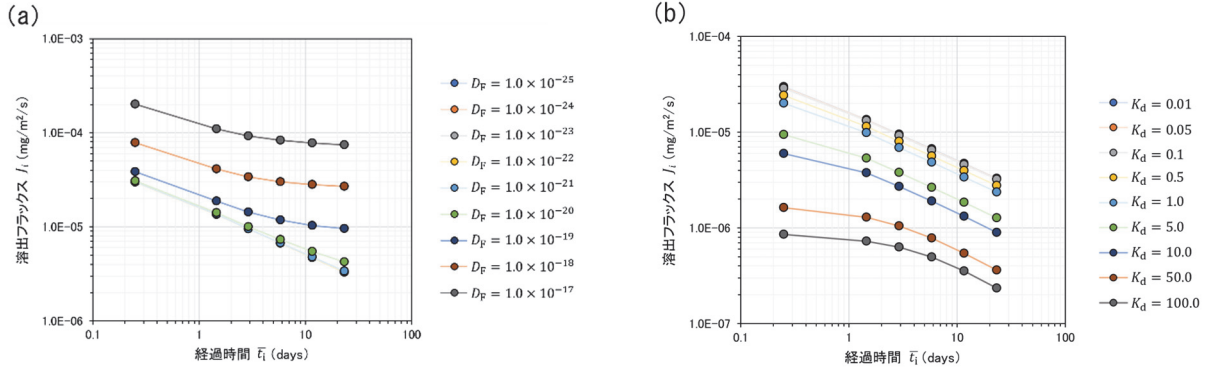


図-5 C_{BL}から得られた経過時間と溶出フラックスの関係 ((a) : D_Fの影響、(b) : K_dの影響)

表-2 近似直線の勾配と決定係数 (D_F変化時)

D _F (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

表-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
100.0	-0.278	0.864

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 = 1.0×10⁻²⁰ m²/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、 $\bar{t} = 2.9\sim 23.3$ 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 D_E、遅延係数 R で表現される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D_E}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (21)$$

また、式(22)より遅延係数 R には K_d が含まれている。

$$R = 1 + \frac{\rho_d}{\theta} K_d \quad (22)$$

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、 $\bar{t} = 0.25, 1.46$ の溶出フ

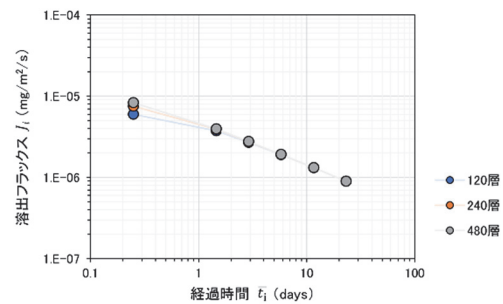


図-6 層分割数変化時の近似直線勾配の変化

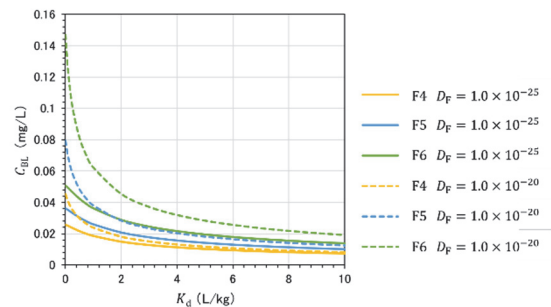


図-7 K_dと各画分のC_{BL}との関係

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_E や K_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} と 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 と C_{BL} の関係を見ると、図-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り、 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/kg⁹⁾、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 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。数値解析の結果、 K_d および D_F 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. K_d が大きくなると溶出濃度は全体的に低くなり、 D_F 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】

- 1) 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
- 2) 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

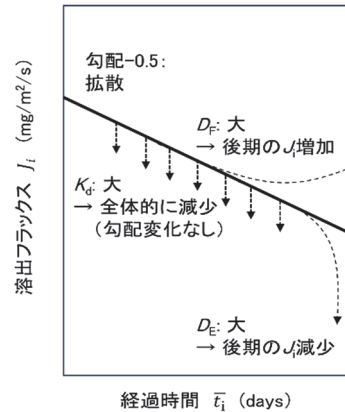


図-8 DKDモデルで得られる拡散溶出試験の物質溶出挙動のまとめ

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

- 4) 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
- 8) 中嶋英雄、「固体における拡散」、まてりあ、Vol.36、No.9、pp.851-853、1997
- 9) 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
- 10) 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

ー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ー

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。

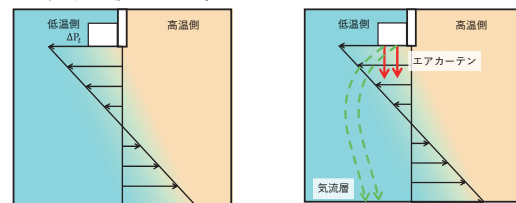
キーワード：エアカーテン シーリング効率 CFD 解析 実験室実験 熱遮断性能 温度差

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パ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。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

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よる圧力分布 (b) 圧力により湾曲するエアカーテン気流

図-1 温度差による空気の流れの模式図

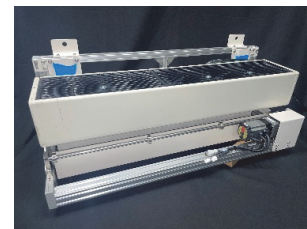


写真-1 自動制御エアカーテンシステム (GK2509S 対応)

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⁾ η (t) により評価する。

*技術本部技術研究所環境研究グループ

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

ここで、 $T(t)$: エアカーテン稼働時の室内平均温度 (°C)、 $T_0(t)$: エアカーテン非稼働時の室内平均温度 (°C)、 T_{ini} : 室内空間の平均初期温度 (°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 1060m³/h 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°Cとし、外気温度を 10~16°Cの間を 1°C刻みで変化させる。冷房想定時では室温の初期値を 25°Cとし、外気温度を 29°C~35°Cの間を 1°C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度で行う。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度 35°C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

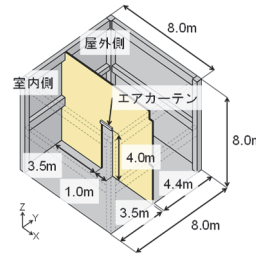


図-2 解析領域

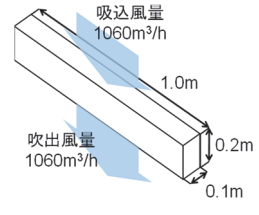


図-3 エアカーテン詳細

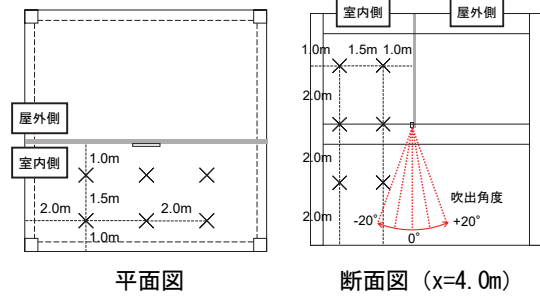


図-4 空間平均温度の算出点

表-1 解析条件

解析領域	8.0m (X) × 8.0m (Y) × 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、Δt: 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	1060m³/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 (°C)	25	20
初期外気温 (°C)	29、30、31、32、 33、34、35	10、11、12、 13、14、15、16
吹出角度 (°)	0、10、20、 非稼働	-20、-10、 0、非稼働
解析ケース数	7×4=28	7×4=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」とし、初期相対外気温ごとにシーリング効率を示す。また各初期相対外気温で最もシーリング効率の高い値を黄色背景で示す。相対外気温が低いほど室内側に、相対外気温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。

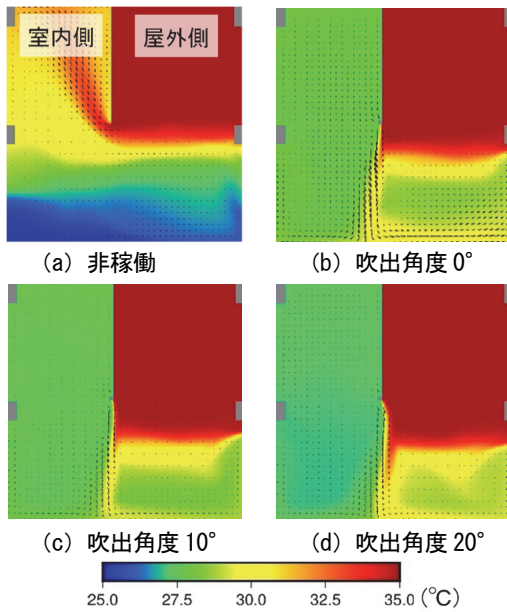


図-5 解析開始 180 秒後の温度分布図 (冷房想定時 外気温 35°C)

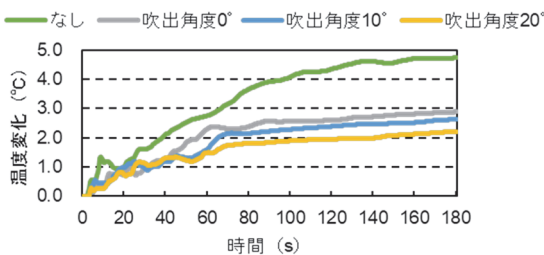


図-6 初期室温からの温度変化 (冷房想定時 外気温 35°C)

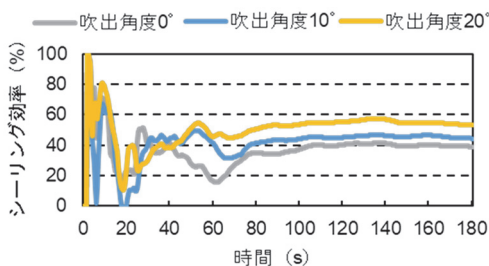


図-7 シーリング効率の時間変化 (冷房想定時 外気温 35°C)

表-3 初期相対外気温・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)

吹出角度 (°)	初期相対外気温 (°C)						
	-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°C)

吹出角度 (°)	初期相対外気温 (°C)						
	+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。

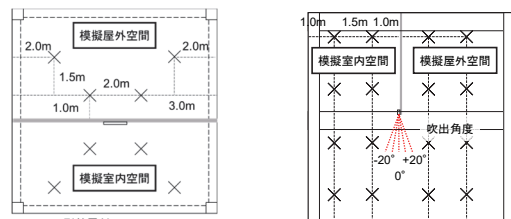


図-8 実験空間



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。

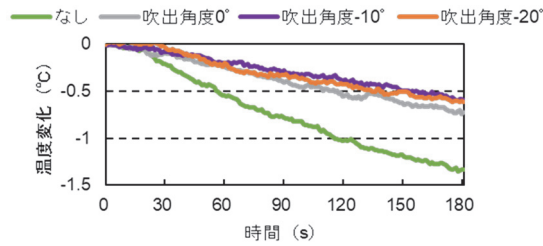
これらの温度推移を元に、シーリング効率の時間推移を示したものを図-10に示す。シーリング効率は、扉解放後は温度変化に応じて大きく上下するものの、概ね3分で安定している。また、下方垂直で吹き出すよりも、温度が高い側に向かって吹き出す方が、シーリング効率が向上している。

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。

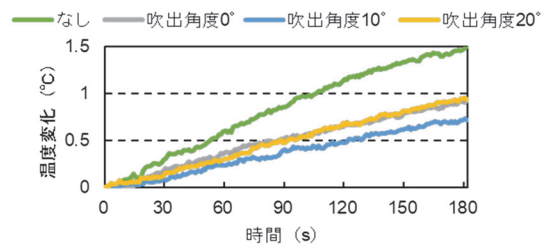
実測と解析値を比較すると、暖房想定時では最大で約48point 差があり、全体として乖離が見られる。一方冷房想定時は全体として10point ほどの差であり、比較的良好な対応がみられた。この差の原因としては、躯体蓄

表-4 実験パラメータ

パラメータ種	冷房想定時	暖房想定時
初期相対外気温度 (°C)	+4、+6、+7、+8、+9、+10	-7、-6、-5、-4
吹出角度 (°)	0、10、20、非稼働	-20、-10、0、非稼働
ケース数	6×4=24	4×4=16

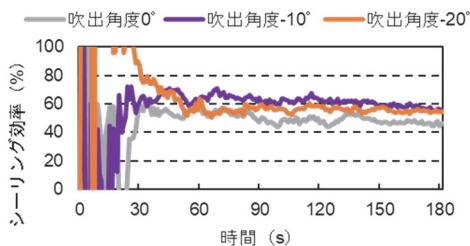


(a) 初期相対外気温度 -7℃

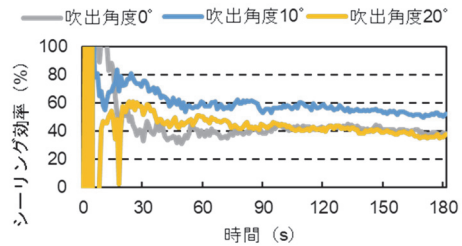


(b) 初期相対外気温度 +7℃

図-9 扉解放後3分までの室温変化



(a) 初期相対外気温度 -7℃



(b) 初期相対外気温度 +7℃

図-10 扉解放後3分までのシーリング効率

表-5 暖房想定時のシーリング効率

角度 (°)		初期相対外気温度 (°C)			
		-7	-6	-5	-4
-20	実測	54.5	74.3	70.5	<u>70.1</u>
	解析	<u>32.4</u>	36	40.9	48.5
-10	実測	<u>56.5</u>	<u>76.6</u>	<u>73.4</u>	56.4
	解析	26.3	<u>40.8</u>	<u>50.1</u>	<u>55.7</u>
0	実測	44.3	65.1	61.3	51.3
	解析	4	16.9	39.1	52.7

表-6 冷房想定時のシーリング効率

角度 (°)		初期相対外気温度 (°C)					
		+4	+6	+7	+8	+9	+10
0	実測	-56.6	9.4	38.9	41.1	24.6	6.8
	解析	65.1	54.7	48.7	51.4	38.9	39.1
10	実測	<u>62.2</u>	<u>51.2</u>	<u>50.3</u>	<u>57.6</u>	37.2	25.1
	解析	<u>73.5</u>	64.9	58.6	61.9	52.5	44.4
20	実測	16.1	24.7	35.6	57.3	<u>63.2</u>	<u>39.5</u>
	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。相対外気温と吹出角度の関係を図-12 に示す。相対外気温が 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

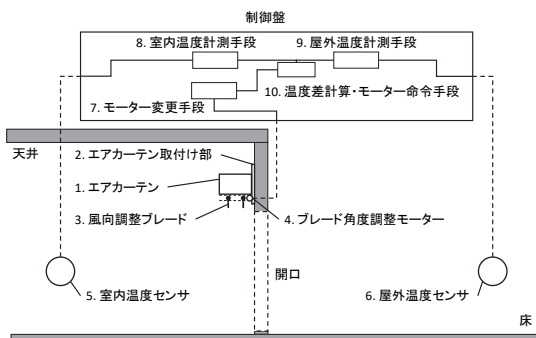


図-11 自動制御エアカーテンシステムの構成

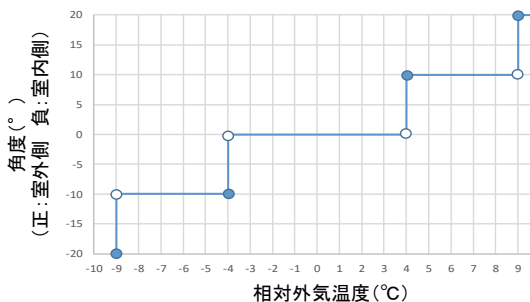


図-12 相対外気温と吹出角度の設定

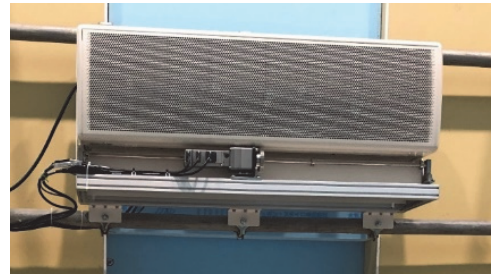


写真-3 自動制御エアカーテンシステム (MK5010TA 対応)

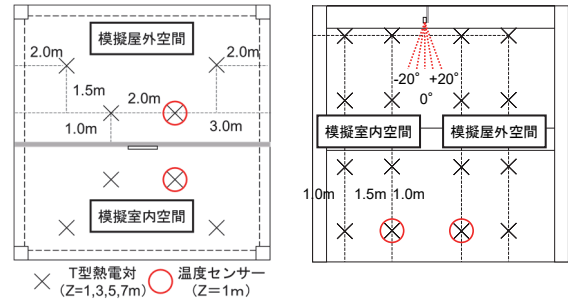


図-13 実験空間

表-7 実験条件

パラメータ種	条件
空調設定温度 (°C)	模擬室内側: 24°C 模擬屋外側: 18°C
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 3700m³/h、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

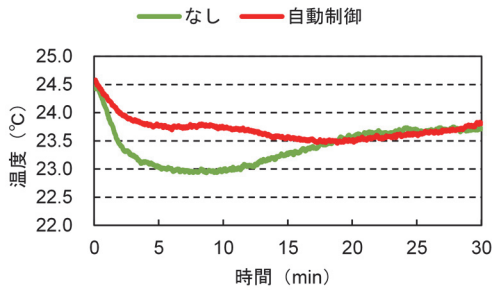


図-14 30分間の模擬室内側平均温度 (各ケース3回の平均)

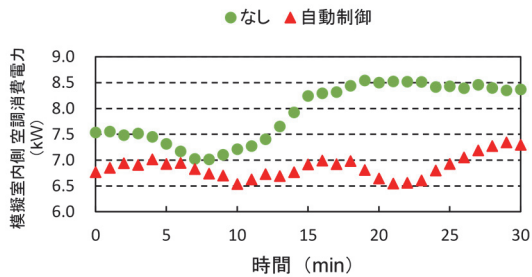


図-15 30分間の模擬室内側消費電力瞬時値 (各ケース3回の平均)

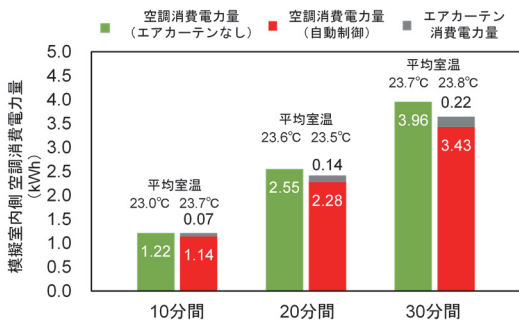


図-16 模擬室内側空調の消費電力量 (各ケース3回の平均)

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】

- 1) 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、「建物出入りに設置するエアカーテンの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

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

 検索

奥村組技術研究年報 No. 50

2024年9月1日発行

編集発行 株式会社奥村組 技術本部技術研究所

〒300-2612 茨城県つくば市大砂387

電話 (029) 865-1521(代)

印刷 (株)イセブ

電話 (029) 851-2515

(禁無断転載)



本誌は環境保護のため
再生紙を使用しております。