

CEMENT & CONCRETE

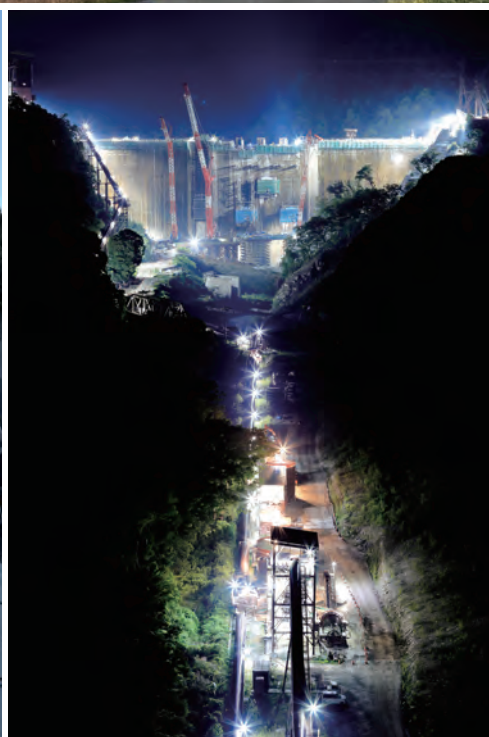
セメント・ コンクリート

令和6年4月15日発行 ISSN0371-0718

2024
No.926

4

一般社団法人セメント協会
JAPAN CEMENT ASSOCIATION



ハイブリッド混和剤

目指したのは「丈夫で長持ち」。

乾燥収縮の低減でひび割れを抑制、耐久性を向上。

過度なブリーディングを抑え、より緻密な組織へ。

高い減水性能で扱いやすく、施工不良のリスクも低減。

高品質なコンクリートは建設廃材を減少させ、環境にも貢献。



高性能AE減水剤（増粘剤一液タイプ）

チューポールHP-70

AE減水剤（高機能・ブリーディング低減タイプ）

チューポールEX60LB

高性能AE減水剤（収縮低減タイプ）

チューポールSR

AE減水剤（高機能・収縮低減タイプ）

チューポールLS



TAKEMOTO®

ケミカルで社会インフラの発展を支える

KAO

きれいを ところに 未来に

粉塵量を大幅削減
ビスコトップ UT



加振時の流動性向上
マイティ 21V-SG



花王株式会社 ケミカル事業部門

東京 〒131-8501 東京都墨田区文花2-1-3
大阪 〒550-0012 大阪市西区立売堀1-4-1
URL <https://chemical.kao.com/jp/>
E-mail chemical_eif@kao.com

AE減水剤 (高機能タイプ) ヤマソー 02NL

減水剤(遅延形) ヤマソー R

AE剤 ヴィンソル

AE減水剤 (耐寒促進剤 タイプ)

ヤマソー ウィン

硬化促進剤 ヤマソー ウィンS

AE減水剤(高機能・高保持タイプ) ヤマソー 22NEX

あした
明日へ繋げる

コンクリートという無機質の中から
人々が理想とする安心・安全・快適さを実感できる、
より良い街づくりのお手伝いをします。

収縮低減剤 ヤマソー DS100

AE減水剤(高機能タイプ・ブリーディング低減型) ヤマソー 16NB

高性能AE減水剤 ヤマソー V1S

AE減水剤 (高機能タイプ) ヤマソー 09NL

高性能AE減水剤(収縮低減タイプ) ヤマソー V1-DS

高流動コンクリート用分離低減剤 ヤマソー ビスコン

AE減水剤 ヤマソー 90SE

スランプ保持剤 ヤマソー 2020



山宗化学株式会社
YAMASO CHEMICAL CO., LTD.

本社 ●〒104-0032 東京都中央区八丁堀2-25-5 ☎03-3552-1341(代)
東京営業部 ●☎03-3552-1261
支店 ●大阪/☎06-6353-6051 福岡/☎092-483-8567 札幌/☎011-662-5552
営業所 ●広島/☎082-237-3083 仙台/☎022-224-0321 北陸/☎0776-28-2566
出張所 ●静岡/☎054-202-5111 高松/☎087-863-7565
事務所 ●平塚/☎0463-23-5536

<https://www.yamaso-chem.co.jp/>

セメント・コンクリート

CEMENT & CONCRETE

2024 No.926

もくじ

02 コンクリート構造物の耐久性の向上, 既設構造物の延命化,
さらに脱炭素化を目指して～近未来コンクリート研究会の活動～ … 十河 茂幸ほか

10 異強度場所打ち杭「T-CROWN PILE®」の開発 … 石崎 定幸

16 ICC2023 世界のセメント・コンクリート研究の動き① … 高橋 恵輔ほか

26 すいそう
65歳での家庭菜園デビュー … 宇治 公隆

28 超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート®」を用いた
道路橋床版のリニューアル技術 … 川西 貴士ほか

34 RC柱部材の軸方向鉄筋にフレア溶接継手を
配置して復旧した鉄道RCラーメン橋台について … 飯塚 大介ほか

40 寸思寸言
成熟の季節 … 宮川 豊章

42 セメント協会 研究奨励金による研究より
CO₂排出量, 廃棄物・副産物利用の両側面を考慮したセメントの環境影響評価 … 河合 研至

50 シリーズ/セメント産業 脱炭素・低炭素社会を目指すキーワード
ジオポリマーを含むアルカリ活性材料 … 一宮 一夫

49 セメント・コンクリート論文集 Vol.78 (2024年度)
論文募集のご案内

56 HOT NEWS

58 外国雑誌の記事情報

60 EVENT GUIDE

62 セメント・データファイル

64 主要建設工事・資材統計

66 5月号予告



今月の表紙

公式Instagram第2回フォ
トコンテスト入賞作品より
[56ページ, HOT NEWS]

■セメント協会ホームページ <https://www.jcassoc.or.jp> ■本誌への広告申込みはセメント協会 広報部門 TEL.03-5540-6175

コンクリート構造物の耐久性の向上， 既設構造物の延命化， さらに脱炭素化を目指して ～近未来コンクリート研究会の活動～

Improving the durability of concrete structures, Extending the life of aging structures,
and Aiming for a Decarbonization
～The activities of the Near-Future Concrete Association～

十河 茂幸 竹田 宣典 江良 和徳 坂本 英輔

1. はじめに

建設会社の技術研究所で37年間活動し，広島工業大学で6年間教鞭をとったのちに，近未来コンクリート研究会を立ち上げ，これまでに培った技術を社会に貢献するべく活動しているのは，代表を務める十河茂幸。現在，約7年間の活動で，近年の話題を取り上げ，産官学が集って議論を重ね，提案できる段階にきている。

近未来コンクリート研究会は3つの協議会で構成している。「初期ひび割れの抑制技術研究協議会」の主査を務めるのは，広島工業大学環境土木工学科教授の

竹田宣典である。初期ひび割れが耐久性に影響するかどうかは，その発生場所，発生状況，自然環境や使用環境により異なり，すべてのひび割れが耐久性を損なうかと言えばそうではない。しかし，構造物の設計者と発注者は，想定していないため補修を強いることになり，結果的に有害とは言えなくても施工者に負担が来る。それは不合理として，この研究協議会を始めた。

二つ目の協議会は，「既設コンクリート構造物の延命化技術研究協議会」で，主査を務めるのは，（一社）コンクリートメンテナンス協会の技術委員長を務めている江良和徳である。コンクリートはメンテナンス不要と言われた時代は終焉し，21世紀は維持管理の時代と呼ばれ，過去に建造したコンクリート構造物は軒並み維持管理が必要となってきた。これに応じる形で，既設コンクリート構造物の延命化を行うための点検，診断，補修・補強技術の研究協議会を始めている。

三つ目の協議会は，最近の課題を取り上げることになっている。当初は，「構造物の生産性向上技術研究協議会」として活動し，一定の成果が出たことから，その後は「脱炭素コンクリート技術研究協議会」として，現在活動中である。主査を務めるのは，広島工業大学建築工学科教授の坂本英輔である。

本稿では，それぞれの活動状況と研究成果の提案を以下に述べることとする。

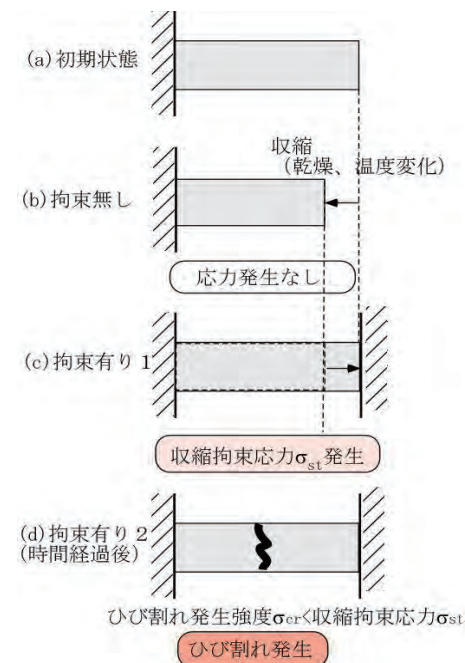


図1 収縮ひび割れのメカニズム¹⁾

2. 初期ひび割れの抑制技術研究協議会の活動

2-1. 活動の背景

コンクリートの初期ひび割れの発生は，古くからの問題でありコンクリート構造物の建設に関わる技術者を悩ませてきた。これまで様々な調査，研究や検討がなされ，学協会や発注機関から多くの指針類が出されている。

初期ひび割れは，コンクリート自体の「収縮しやすい」という材料の特性により生じる場合が多い（図1）。しかしながら，多くの場合は積極的に抑制対策を講じることなく施工に至り，ひび割れの発生後に補修をすることが行われている。初期ひび割れに対しては，コストを掛ければひび割れの防止は可能であるが，従前の計画，積算では防止は困難な場合が多い。

このような背景から，初期ひび割れの抑制技術研究協議会では，発注者，設計者，レディーミクストコンクリート製造者，建設会社などの実務者，技術者の参加により，初期ひび割れの合理的な抑制技術について協議し，初期ひび割れを抑制する方策を確立することを目的として活動している。参加者は，中国地区にとどま

近未来コンクリート研究会 初期ひび割れ技術研究協議会 初期ひび割れの抑制対策（案）	
目次	
1 はじめに	
2 温度ひび割れの抑制	
2.1 温度ひび割れの発生メカニズム	
2.2 設計面での抑制対策（配筋、誘発目地など）	
2.3 材料・配合面での抑制対策	
2.4 施工面での抑制対策	
3 沈下ひび割れの抑制	
3.1 沈下ひび割れの発生メカニズム	
3.2 沈下ひび割れの抑制対策	
4 まとめ	
参考資料	事例紹介 (温度ひび割れ対策としてのフライアッシュの活用)

図2 初期ひび割れの抑制対策(案)目次

近未来コンクリート研究会 初期ひび割れ技術研究協議会 初期ひび割れ抑制対策（工事事例集）	
1. フライアッシュコンクリート（北陸地区）	
2. 低熱ポルトランドセメント+低発熱型膨張剤（上下水道調整池）	
3. 低熱高炉セメントB種（重力式擁壁）	
4. 高炉セメントC種（パースクレーン基礎）	
5. フライアッシュコンクリート（橋脚）	

図3 初期ひび割れの抑制対策(工事事例集)

らず北陸地区，四国地区，九州地区からもあり，各地域における初期ひび割れに関する情報や対策事例などの情報提供を頂き，協議会で情報共有している。

2-2. 活動概要

コンクリートの初期ひび割れは，使用材料や配合に起因する場合が多く，施工後に生じることから，施工者にその責任が課せられることが往々にして多いが，本来，設計段階から検討を始めないと制御できないと考えられる。そのため，初期ひび割れの抑制は，構造物の発注者，設計者，コンクリートの製造者，施工者が共同で検討すべき課題である。初期ひび割れの抑制技術研究協議会では，コンクリート構造物に建設に関わる者のうち，だれが何をすれば初期ひび割れを抑制できるかを検討し，その抑制対策の提案に向けて検討を進めている。

初期ひび割れとして検討対象としているものは，主に温度ひび割れに対してであるが，その他ブリーディングに起因する沈下ひび割れについても検討を行っている。具体的には，下記の内容について検討を行っている。



写真1 温度ひび割れ対策として
フライアッシュを用いた橋脚²⁾

- ① 温度ひび割れが発生しやすい構造物の事例と対策
- ② フライアッシュ添加による温度ひび割れの抑制
- ③ 初期ひび割れ抑制のための適切な養生方法
- ④ 初期ひび割れを低減するためのチェックリスト
- ⑤ 「初期ひび割れ抑制対策(案)」, 「初期ひび割れ抑制対策工事事例集」(図2, 図3)の作成

特に、フライアッシュの初期ひび割れ抑制対策としての活用について多くの時間をかけて議論を行った。各地域のフライアッシュコンクリートの適用状況²⁾とフライアッシュを用いる場合の有効な活用方法や課題についての検討を行った結果、フライアッシュの温度ひび割れ対策としての有効性が認識された(写真1, 図4)。また、今後フライアッシュを温度ひび割れ対策として展開して行くに当たり、以下のような課題が抽出された。

① 製造施設(サイロ、投入方法など), ②フライアッシュの品質変動, ③強度の管理材齢(強度発現), ④発注者の仕様書における水セメント(W/C)の規定, ⑤養生の手間, ⑥コンクリートの価格, ⑦CO₂低減の定量化
フライアッシュの初期ひび割れ対策として効果的な活用を図るために、上記の課題について発注者、設計者、製造者、施工者がともに問題点を共有し、解決策を提案して行く予定である。

2-3. 今後の展望

現在までに「初期ひび割れの抑制対策(案)」および「初期ひび割れ抑制対策工事事例集」を作成しているが、さらに抑制対策(案)のブラッシュアップと初期ひび

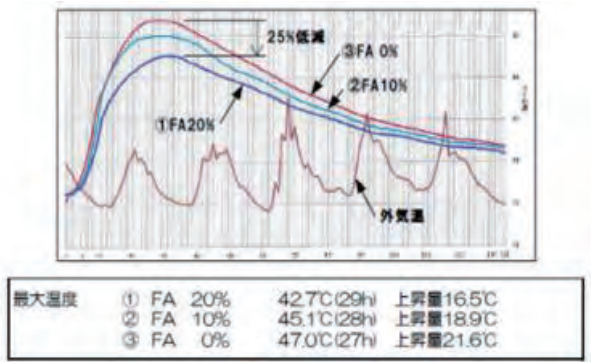


図4 フライアッシュを用いた
コンクリートの簡易断熱温度上昇²⁾



写真2 小規模橋梁の簡易点検要領(案)Ver2.0

割れの抑制対策を行った工事事例を増やし、発注者、設計者、製造者及び施工者へ広く展開を図ることにより、初期ひび割れ対策に対する意識向上の働きかけを行う予定である。

3. 既設構造物の延命化技術研究 協議会の活動

3-1. 協議会の活動概要

わが国の社会資本ストックの根幹をなすコンクリート構造物は、環境条件或使用材料によってさまざまな要因により劣化が進行しつつあり、今やそれら社会インフラの長寿命化、延命化の方策は喫緊の課題である。しかし、これらの状況に対して適切な維持管理技術の構築、延命化のための予算や人材確保などにおいて課題も多く、未だ抜本的な解決の糸口は見出されていない。そこで本協議会では、コンクリート構

表1 小規模橋梁の簡易点検要領(案)を適用した橋梁とその実施項目

自治体	橋梁名	実施項目
呉市	無名橋2橋	全橋共通で以下の項目を実施 ・形状寸法測定 ・外観目視調査(ひび割れ、浮き等) ・打音検査(テストハンマ) ・鉄筋かぶり厚さ測定(電磁波レーダ) ・圧縮強度推定(リバウンドハンマ) ・中性化深さ(ドリル法) ・塩化物イオン量(簡易塩分測定)
東広島市	堀田橋3号線1号橋	
安芸高田市	工業団地橋, 小原橋, 砂田線1号橋	
尾道市	坂石線2号橋, 中川橋	
大竹市	玖波3号線1号橋	
廿日市市	可愛ヶ丘1号線跨線橋	



写真3 対象構造物の例
(可愛ヶ丘1号線跨線橋: 廿日市市)

造物の適切な延命化、長寿命化を図るための維持管理について、現状の把握と課題の抽出整理を行うとともに、課題解決のための具体的な方策について検討することを目的として掲げた。

まず協議会内で維持管理分野に関する問題点や課題を抽出し、現状の把握および改善策の模索についてディスカッションを行った。抽出された主な課題として、①コンクリートの劣化(特に複合劣化、再劣化など), ②LCC評価(残存供用年数, 補修後の耐用年数評価など), ③事後保全と予防保全(予防保全の簡易度など), ④発注形態や事業体制(特に小規模な自治体が抱える経済的、人的資源の問題)などが挙げられる。これらのディスカッションを経て本協議会にて具体的に取り組んでいく課題を絞り込んだ結果、主な活動内容として小規模自治体が管理する小規模橋梁の維持管理について重点的に協議することとした。

3-2. 小規模橋梁の維持管理に関する取組み

国内に約73万橋存在するといわれる橋長2m以上

の道路橋を管理者別に見ると、その約66%の約50万橋が市町村などの地方自治体が管理していることが分かる。しかし、この膨大な数の橋梁を管理する小規模な市町村では予算不足と人材不足が特に厳しい状況にある。そのような状況を鑑み、2019年5月に近未来コンクリート研究会から「小規模橋梁の簡易点検要領(案)(執筆: 十河茂幸代表)」の初版が発刊された。

本書には小規模橋梁の特化した点検計画および具体的な点検要領、健全度診断の考え方や記録など一連の作業内容について記載されており、維持管理業務を少しでも簡素化する方策として提案する内容となっている。特に、維持管理業務の簡素化には予防保全的な観点が不可欠であり、本書での記述も予防保全を強く意識した内容となっている。また、本書の記載内容をさらに本協議会内で検討を行い、それらを反映させる形で2020年5月に「小規模橋梁の簡易点検要領(案)Ver2.0」¹⁾(写真2)として発刊した。

さらに、本協議会では小規模橋梁の簡易点検要領(案)に準じて実際の橋梁の点検作業を実施し、適用性評価および改善点抽出を行うための社会実装に取り組んでいる。(一社)広島県土木協会の協力のもと、広島県内の市町村が管理する小規模橋梁を対象として劣化状況の情報や点検作業フィールドの提供を受け、本書で提案した維持管理手順に準じて簡易点検を実施している。これまでに実施した内容を表1に、対象橋梁の例を写真3に示す。本橋は竣工後45年以上経過しており、かつ凍結防止剤に起因する塩害環境に位置しているため、塩害および中性化による劣化を想定した点検内容としている。具体的な実施項目



写真4 ドリル粉末採取状況(塩化物イオン量測定用)

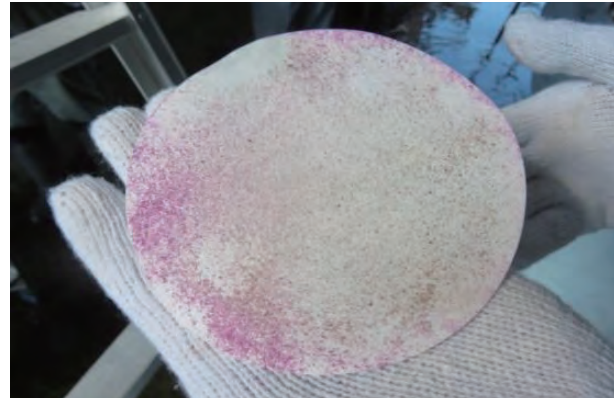


写真5 中性化深さ試験状況(ドリル法)



写真7 川上ダム見学会

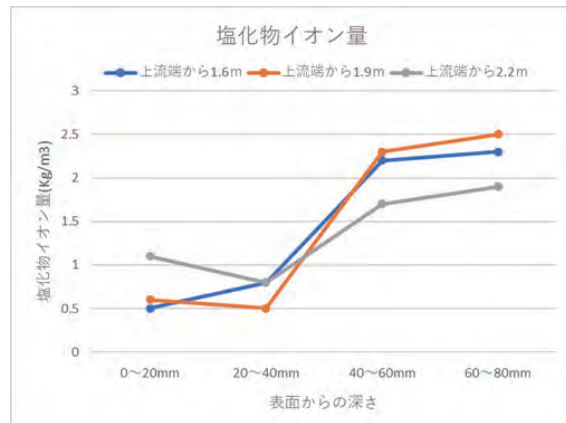


図5 塩化物イオン量測定結果の例



写真6 自治体職員向け現場見学会の状況

は、変状の把握を目的とした「形状寸法測定、外観目視調査、打音検査、鉄筋かぶり測定」と、想定される劣化に関する調査を目的とした「塩化物イオン量測定、中性化深さ測定」とした。ただし、作業内容をできる限り簡素化するために、塩化物イオン量はドリル粉末を採取して簡易試験キットにより測定した。このとき、ドリル粉末はコンクリート深さ方法に0~20mm, 20~40mm, 40~60mm, 60~80mmに区切って採取し、深さ方向の濃度分布も把握した。ドリル粉末採取状況を写真4に示す。また中性化深さもドリル法を採用し、フェノールフタレイン溶液を浸み込ませたろ紙にドリル粉末を落とし、呈色が現れた時点のドリル孔深さを中性化深さと評価した。中性化深さ試験の状況を写真5に示す。これらの測定値から塩害、中性化の劣化過程を評価するためには鉄筋位置の情報が不可欠であるが、小規模橋梁の場合には竣工図書などの橋梁基本情報が保存されていないことが多いため、初回点検時

にのみ鉄筋かぶり調査を実施する必要がある。塩化物イオン量測定および中性化深さ試験の結果の例を図5に示す。本橋においては塩害と中性化の複合劣化による塩分濃縮の影響により表層部の塩化物イオン量が減少している状況が認められた。これら一連の現地作業には協議会メンバーおよび自治体職員を招いて現場見学会(写真6)を開催し、実際に自治体職員が現場作業を体験する機会を設けた。

これらの点検結果より、現時点での劣化過程(潜伏期、進展期、加速期前期など)を評価する。塩害や中性化の潜伏期と判定された場合には劣化予測を行い、鉄筋が腐食環境に陥るまでの期間を予測する。その期間が十分長くと評価される場合には、以後の定期点検の頻度を下げたり点検項目を省略したりするなどの維持管理業務の簡素化が図れる可能性がある。塩害や中性化の進展期と判定された場合には、内部の鉄筋は既に腐食環境にあるため、できるだけ変状を

顕在化させないように鉄筋腐食抑制効果を考慮した予防保全対策を実施することで、将来の変状発生を遅らせることができる。劣化過程が加速期前期に達した後は事後保全対策の範疇であり、速やかな補修工事が必要となる。

3-3. 今後の展望

「小規模橋梁の簡易点検要領(案) Ver2.0」の発刊およびその社会実装を経て、さらなる改善点抽出や課題整理を行い、要領書の改訂に取り組んでいる。次年度には「小規模鉄筋コンクリート橋梁の予防保全を目的とした点検要領(案)」として発刊し、普及活動に取り組んでいく所存である。

4. 脱炭素コンクリート技術研究協議会の活動

4-1. 活動の背景

少子高齢化に向かうわが国では、建設業においても次世代を担う技術者・技能者の不足が予見され、建設現場の生産性が課題とされている。そこで、構造物の生産性向上に資する技術を検討するため、近未来コンクリート研究会発足当時は、構造物の生産性向上技術研究協議会としてスタートした。協議会では、現状の把握と課題の抽出・整理を通して課題解決のための具体的な要望・提案を行うとともに、協議会メン

バーから寄せられた話題提供や事例紹介などについての情報交換や議論などを行ってきた。そのような議論の中で、急激な社会情勢の変化にともない、コンクリート工事におけるSDGsの達成やカーボンニュートラルの実現が急務であることが協議会メンバーの共通の認識となった。そのため、2021年度からは協議会名を脱炭素コンクリート技術研究協議会に変更し、コンクリート工事における脱炭素技術についての情報収集・整理・分類および脱炭素コンクリート技術の提案を行うことを目的として2期目の活動をスタートした。

4-2. 活動の概要

構造物の生産性向上技術研究協議会では、コンクリート工事を対象として、①建設分野へのIT活用、②合理的な設計、③施工フローにおける合理化、の3項目に分類し、現状の把握と課題の抽出・整理を通して、課題解決のための具体的な要望・提案を行った。また、現状すでに進められている生産性向上技術の事例調査および見学会(写真7)を行うとともに、産官学の様々な立場の協議会メンバーからの話題提供・事例紹介といった情報交換・共有の場として活用され、一定の成果を収めた。

2021年度からは、脱炭素コンクリート技術研究協議会として、脱炭素社会の実現に向けた、脱炭素社会のあるべき姿についての議論、コンクリート工事における脱炭素技術に関する調査、脱炭素コンクリート技術の提言・技術提案に向けた検討を開始した。まず、脱炭素社会のあるべき姿については、コンクリート構造物は品質の良いコンクリートを用いて適切に施工され、予防保全により維持管理されることが重要であることを共通認識としたうえで、地球温暖化が待ったなしの現状において、産業構造や社会経済の変革のポジティブな機会と捉えて議論を進めていくこととした。

次に、ゼネコン・メーカー・学協会などの取り組みについての調査(情報収集・整理・分類など)を行った。2021年10月には、曾澤高圧コンクリート(株)における日本初となるカーボンキュア社の技術導入の状況を現



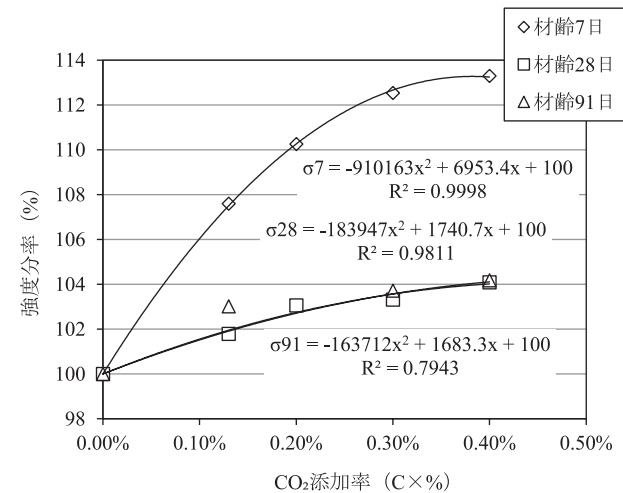
写真8 公開実験

地視察させていただいた。また、2023年1月には、中国電力(株)の大崎クールジェンにおける実ガスのCO₂を使用したカーボンリサイクル実証研究拠点の現地視察を行わせていただいた。現地では、CO₂を有効利用したコンクリートの適用範囲拡大に向けた、実大規模の試験体を用いた炭酸化技術の実証研究を見学した。

それらの調査と並行して、より現実的な脱炭素コンクリート技術の提案に向けた議論を行い、公開実験などにより検討を行っている。2022年3月と7月には、広島県生コンクリート工業組合と共同で、コンクリートの練混ぜ時にCO₂を固化したドライアイスを粉碎した状態で添加した場合の固定化量およびコンクリート諸物性を確認するための公開実験を実施した(写真8)。実験結果によれば、CO₂の添加率の増加に伴う圧縮強度の増加傾向(図6)が確認されている。詳細については参考文献4)を参照されたい。また、現在、広島県生コンクリート工業組合と共同でフライアッシュの常時少量使用に向けた検討⁵⁾を進めており、2023年3月に引き続き、2024年3月に公開実験を実施する予定である。

4-3. 今後の展望

産官学の様々な立場のメンバーが集う協議会ならではのメリットとフットワークの軽さを生かし、できるところから手を付け試行錯誤しながら、脱炭素コンクリート技術の提言・技術提案に向けた様々な取り組みを推し進めていく所存である。

図6 CO₂添加率と強度分率⁴⁾

5. おわりに

近未来コンクリート研究会の発足にあたり、なぜ近未来なのかと聞かれる。代表の十河は高齢であり、そんなに先まで生きられないからと答えている。しかし、各協議会の主査は若いので、この活動は継続してくれると信じている。産官学が集うこのような技術の交流は未来のコンクリートを良くしてくれると考え、活動を続ける予定である。広島で始めた研究会であるが、全国からの参加者も多く、是非ともと希望される方は、HPを開いていただきたい。

最後に、誌面を割いて下さったセメント協会の編集委員の皆様、およびこの活動にご協力いただいた皆様に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 十河茂幸、河野広隆／コンクリートのひび割れがわかる本、セメントジャーナル社
- 2) 生駒和久、横田昭彦／夏期における高強度コンクリートのマスコンクリートの施工について～温度ひび割れ対策としてのフライアッシュの活用～、第24回土木施工管理技術論文報告集、2020年6月
- 3) 小規模橋梁の簡易点検要領(案) Ver2.0：近未来コンクリート研究会、コンクリートメンテナンス協会、2020年5月
- 4) 實兼稔、砂田栄治、寺下良行、坂本英輔、十河茂幸／練混ぜ時にCO₂を添加したコンクリートの実用化に向けた実験、第22回(2023年)生コン技術大会研究発表論文集、pp.91～96、2023年4月
- 5) 月刊コンクリートテクノ：コンクリートから提案する使いやすい「低炭素」～広島工組のフライアッシュ常時少量使用に向けた取り組み、(株)セメント新聞社、Vol.42、No.6、pp.16～20、2023年6月

クリップボードの コンクリート化学編 出ました。



ブルーのカバー
e3 (シーズリー) クリップボード
コンクリート化学編
A4判・123頁・3,080円

月刊セメント・コンクリート誌に長期連載した人気シリーズが単行本になりました。コンクリートの気になるキーワード全47項目をそれぞれ2～3ページで簡潔に解説。既刊の[セメント化学編]とともにお役に立つこと間違いなしです。

4つのカテゴリーに分類 ● フレッシュコンクリートの物性
硬化コンクリート 耐久性 いろいろなコンクリート



グリーンのカバー
e3 (シーズリー) クリップボード
セメント化学編
A4判・134頁・3,080円

お求め・お問い合わせは…

一般社団法人セメント協会 図書販売係 まで

東京都中央区新富二丁目15番5号 RBM築地ビル2階
TEL 03-5540-6173 FAX 03-5540-6181

異強度場所打ち杭 「T-CROWN PILE工法®」の開発

Development of T-CROWN PILE Method,
Cast-in-place Concrete Piles with Vertically Varying Strength

石崎 定幸

1. はじめに

筆者らは、場所打ちコンクリート杭におけるコンクリート強度打分け技術の開発を実施している¹⁾(図1)。本工法では、地震時の曲げモーメントが大きくなる杭上部のみに高強度コンクリートを配置する技術であり、これにより深さ方向のコンクリート強度の適正化を図り、杭のスリム化が可能となる。そのメリットとして、工期、コスト、環境負荷(CO₂排出や建設汚泥など)の削減が挙げられる。本技術については、(一財)日本建築センターによるBCJ評定(BCJ評定-FD0608-01))を国内で初めて取得している。

場所打ちコンクリート杭の施工では、杭孔は安定液などで満たされており、トレミー管を用いたコンクリートの打込みを行う。その際、後から打ち込むコンクリートは、図2に示すように、トレミー管周囲を上昇し、コンクリート天端にて外周に流れ込み、先に打ち込まれたコンクリートの上に重なるように分布する²⁾。そのため、コンクリート強度の打分けを実施するには、設計上の高強度コンクリートが必要となる範囲に対して、より深い深度からその打込みを開始しなければならない。すなわち、施工管理では、その深度の差(以降、切換え長さ:L

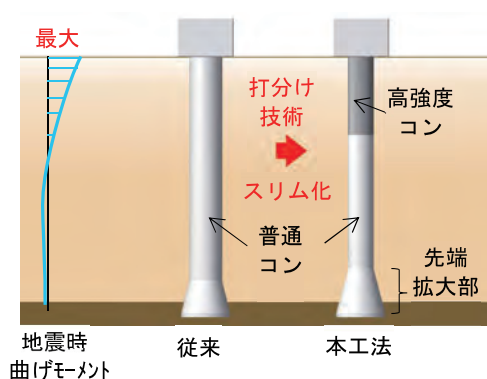


図1 本工法の概要

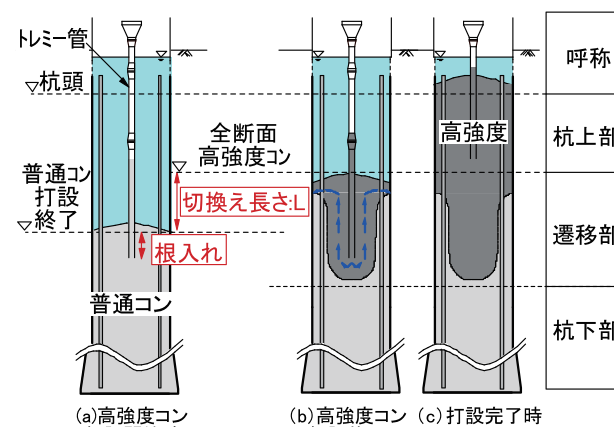


図2 施工手順とコンクリートの切り換え状況

と称す)を施工条件に応じて適切に設定することが重要となる。

本稿では、本工法の施工管理方法の構築に際して実施した模擬施工試験、CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学)を用いたコンクリート打込み状況の流動解析、コンクリートの切り換え確認方法の構築と実施適用を紹介する。



いしざき さだゆき / ISHIZAKI Sadayuki
大成建設(株) 主任研究員 博士(工学)

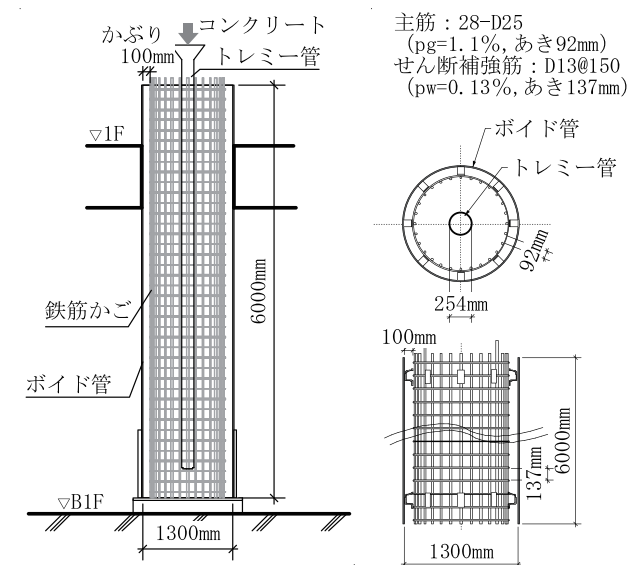


図3 試験体の概要



写真1 コンクリートの打込み状況

2. 模擬施工試験¹⁾

施工管理方法の妥当性を確認する目的で、模擬施工試験を実施した。なお、評定取得に際して、別途大規模な施工試験も実施している。図3に試験体の概要、表1にコンクリートの仕様を示す。以降①～④は生コン車1車目～4車目を表す。コンクリートは、Fc30のコンクリート(普通ポルトランドセメント、スランプ 210mm)とFc80のコンクリート(中庸熱ポルトランドセメント、スランプフロー 600mm)とし、それぞれを生コン車2台に分けて着色(無機顔料を添加)と無着色により区別できるようにした。

1車目の打込み開始時には、トレミー管先端を底面から300mmの位置にセットした。2～4車目の打込み開始時には、トレミー管を引上げ、コンクリートへの根入れ長さを800～1000mmとした。安定液は用いずに、気中で打ち込むことにより、杭頭部から流動状況を目

表1 コンクリートの仕様

コンクリートの呼称と仕様					受入れ試験の結果		
呼称	着色	呼び強度	W/C (%)	管理値 (mm)	SL (mm)	SF (mm)	T ₅₀₀ (s)
①Fc30	無	36	49.9	SL 210	195	350	—
②Fc30	黄			±15	215	330	—
③Fc80	赤	84	24.1	SF 600	—	588	8.7
④Fc80	無			±100	—	610	18.0

SL: スランプ, SF: スランプフロー,
T₅₀₀: 500mm フロータイム

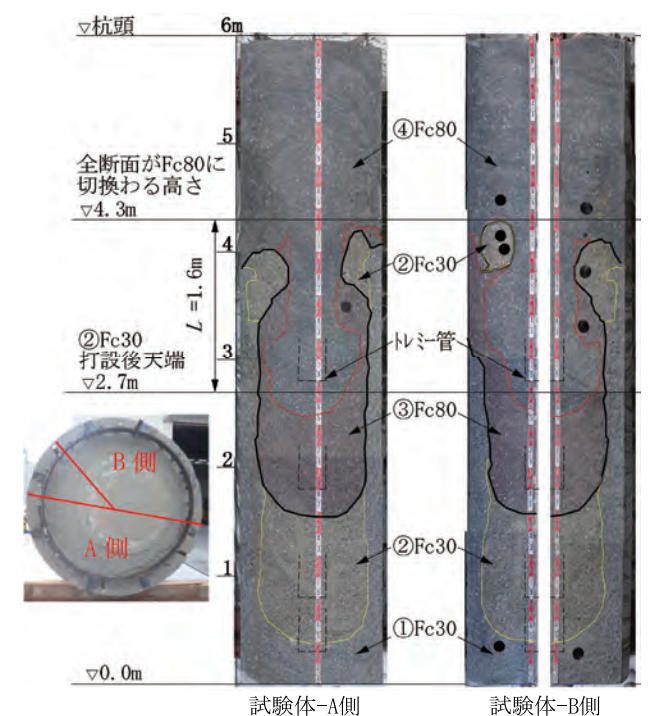


写真2 切断面におけるコンクリートの打重なり状況

視観察した。③Fc80の打込み完了直前には、トレミー管側面付近から③Fc80が出現し、外周に流れていく状況が確認できた(写真1(a))。また、④Fc80打込み時には、③Fc80に続き④Fc80が湧き出し、コンクリート上面全てが④Fc80に覆われた状況を確認した(写真1(b))。

コンクリート硬化後に、軸方向に2面切断し、コンクリートの分布状況を確認した。写真2に試験体切断面を示す。④Fc80の分布形状から、高強度コンクリートはトレミー管先端で球根状に広がり、トレミー管の周囲から上昇し、上面に広がったと推測できた。特徴的な分布形状として、トレミー管先端に形成されるコンクリート

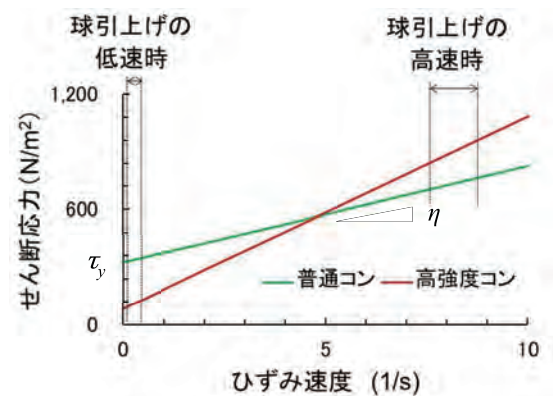


図4 コンクリートのモデル化

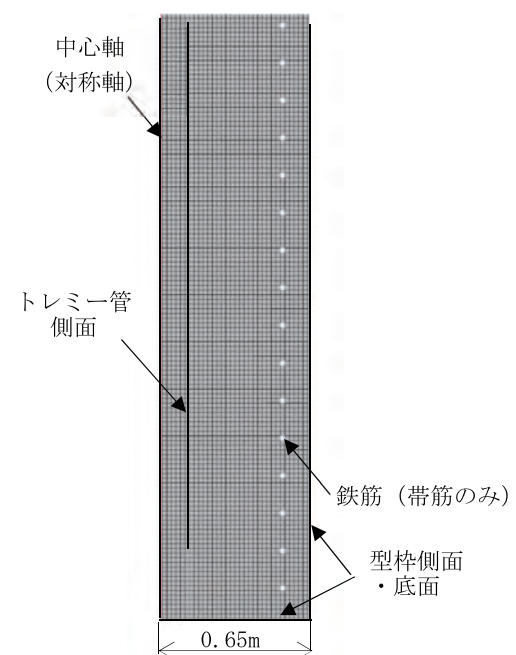


図6 流動解析の解析モデル(Case1)

の塊(②Fc30, ③Fc80, ④Fc80)が鉄筋かごの内側に留まっている点, ②Fc30が上下に分断されて分布している点, ①Fc30が杭底面から連続しながら鉄筋かごの外側で深度約4.3mまで分布していた点が確認できた。後から打ち込まれたコンクリートが鉄筋かごの内側に留まっている点から, トレミー管から吐出したコンクリートの流動挙動に対して, 鉄筋かごが抵抗になったことが考えられた。実験における切換え長さ: L は1.6mであった。

3. CFDを用いた流動解析¹⁾

コンクリートが切換るメカニズムや, 施工条件が切換

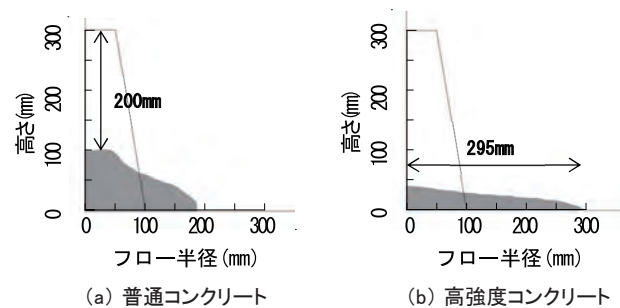


図5 スランブ試験の解析結果

え長さに与える影響を検討する目的でCFDによる流動解析を実施した。

3-1. 解析手法の概要

解析には汎用の熱流体解析コードSTAR-CCM+³⁾を使用した。コンクリートの流動挙動はビンガム流体として取り扱われることが一般的である⁴⁾。図4に後述する各コンクリートの解析モデルを示す。ビンガム流体は, せん断応力が降伏値: τ_y に達するまでは流動せず, τ_y 以上の応力が作用すると流動し, 応力の増大とともに変形速度が増加し, その比例係数が塑性粘度 η である。

コンクリート打込み状況の流動解析に際し, 表1に示す試験結果をターゲットとしたスランブ試験の解析を行い, コンクリートの解析定数を設定した(図4)。スランブ試験における解析終了時の形状を図5に示す。なお, 解析は軸対象(モデル化は中心軸から片側のみであるが, 中心軸に対して円周方向に連続するものとして3次元の応力状態を評価できる)で実施した。普通コンクリートのスランブは約200mmとなった。高強度コンクリートのスランブフローは約590mm, 500mmフロータイムは約3.2sとなった。

3-2. 模擬施工試験に対するシミュレーション

図6に解析モデルを示す。解析モデルは軸対象とし, 中心から片側0.65mをモデル化した。メッシュサイズは20mm×20mmとし, その1メッシュを帯筋とした。なお, 主筋は軸対象モデルのため考慮していない。Fc30(普通コンクリート)・Fc80(高強度コンクリート)の解析定数は3-1のスランブ試験から設定した。

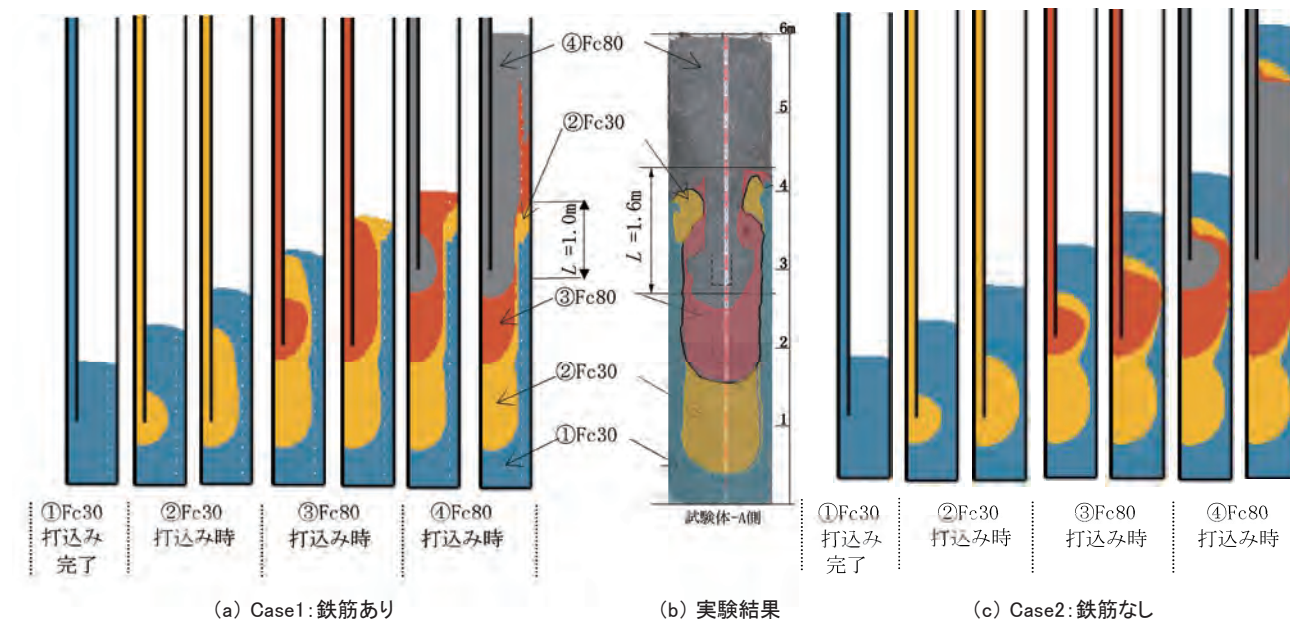


図7 模擬施工試験結果とシミュレーション結果の比較

実験結果から鉄筋かごがコンクリートの分布形状に大きな影響を与えることが示唆された。そこで解析では, 鉄筋をモデル化した解析(Case1)および鉄筋がない解析(Case2)を実施した。実験条件に基づきトレミー管先端高さやコンクリート量などを設定し, トレミー管上部よりコンクリートを打ち込んだ。

図7にコンクリートの分布状況を実験結果と合わせて示す。Case1では, トレミー管の先端付近において, 後から打ち込む②Fc30の塊の範囲は鉄筋かごの内側に留まり, その後上方に広がった。その後, その塊は, 後から打ち込まれる③Fc80により, 上下に分断されたが, その上部はコンクリートの上端に達した後, 鉄筋かごの外側に移動する状況が確認できた。その結果, ②Fc30が上下に分断される状況や, ①Fc30の範囲が杭先端と外周部(主に鉄筋かごの外側)の高さ約4.0mまでに連続して分布する状況が確認できた。これらの解析結果は実験結果の特徴を良く再現していた。

Case2の解析結果(図7(c))では, 後から打ち込まれた②Fc30の球根が孔壁(ボイド管側面)近くまで膨らみ, トレミー管根入れ部周辺にある①Fc30を上下に分けつつ, その上側のコンクリートを上方に押上げている。その結果, 打込み完了時点でコンクリート上面が高強度コンクリートに切換らず, ①Fc30が0.5m程度

残ることが確認できた。

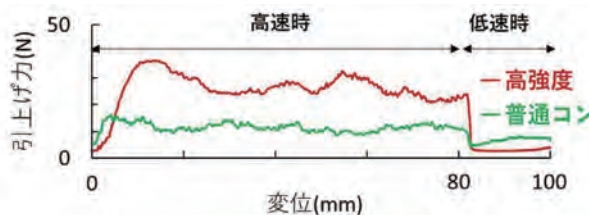
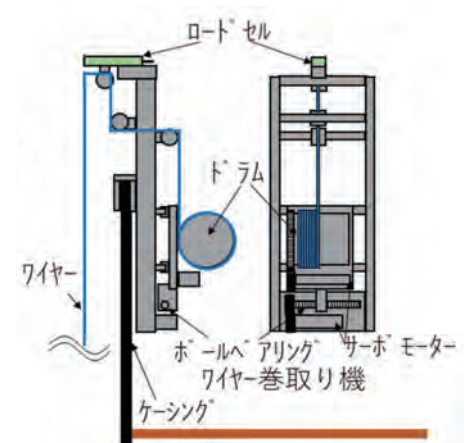
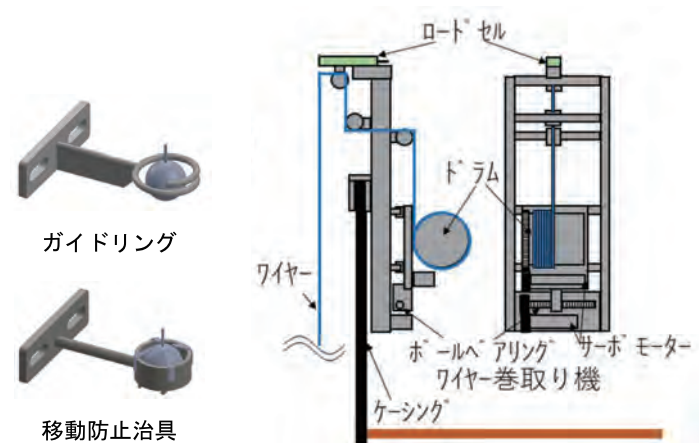
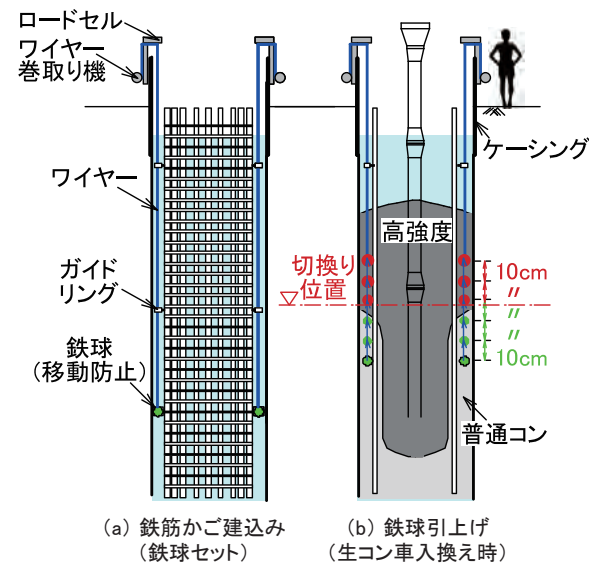
以上のことから, トレミー管から吐出されたコンクリートの流動に対して, 鉄筋かごが抵抗となることで, 先行するFc30の上に後行するFc80が打重なり, 図2に示すコンクリート強度の切換えが成立するものと考えられる。

なお, 施工管理上重要となる切換え長さ: L は, 実験結果1.6mに対して, 解析結果は1.0mであった。

4. コンクリートの切り換え確認⁵⁾

従来より, コンクリート打分けに関する施工管理は, コンクリート切換え時のトレミー管根入れ長さ, 全断面が高強度コンクリートに切換るまでの切換え長さを規定するプロセス管理により実施されている(図1)。本開発では, 従来の施工管理に加えて, コンクリート打設時に切り換えをリアルタイムに確認する方法を検討した。なお, 切り換え確認については, BCJ 評価の施工管理項目に含まれていない。

2・3で説明した通り, 下部に打設する普通コンクリートが最も上昇する位置は杭の外周部, 鉄筋かごの外側であると考えられる。そのため, 鉄筋のかぶり部(通常は100mm)で切り換えを確認する必要がある。判別

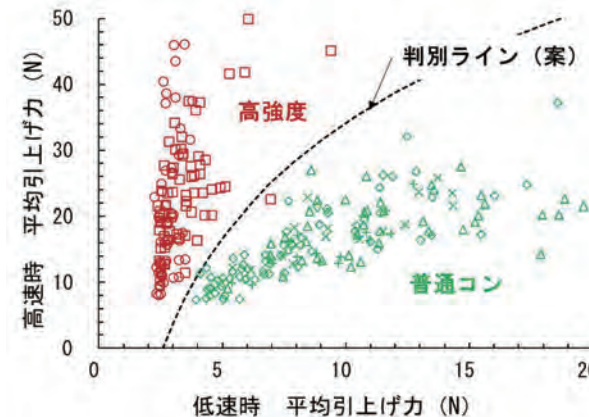


対象や施工性などを鑑みて、球引上げによる粘度計を応用したものを開発した。

判別の施工状況のイメージを図8に示す。鉄筋かご建込み時に、移動防止治具とガイドリングを用いて、鉄球およびワイヤーをセットする(図9)。移動防止治具は、鉄球がコンクリートに数m程度根入れされるまでその移動を防止すると同時に、計測時にはワイヤーを巻き取ることで鉄球が解放される構造となっている。ガイドリングは、ワイヤーの移動範囲を制限し、引上げ時に鉄球の孔壁への衝突などを回避するためのものである。

ロードセルとワイヤー巻取り機は、ケーシングに取り付ける構造となっている(図10)。引上げは、鉄球が1～3m程度コンクリートに根入れされた段階で、0.5～2m程度引き上げることとする。

コンクリート切換りの判別は引上げ長さ100mmごとに実施する。図11に引上げ力と引上げ長さの関係の例を示す。判別対象とするコンクリートの流動性は、生コン工場や製造時のばらつき、経時変化の影響などによ



り大きく変化する。そのため、速度差の大きい2段階の引上げ速度を用いている。高速時の引上げは150～175mm/sとし、低速は3～5mm/sとする。各コンクリートの流動性の違いにより、高速と低速時で引上げ力の大小関係が逆転している。その結果、高速および低速時の引上げ力の関係を図示すると、判別ラインを設定することが可能となる(図12)。図12では、図13に示す杭外周部を模擬した試験による結果とその判別ライン(案)を示している。

上記のように判別できる要因について、普通コンクリートと高強度コンクリートのレオロジー特性の違いから説明する。図4に、球引上げによりコンクリートに生じるひずみ速度の範囲を低速・高速について示す⁶⁾。コンクリートに生じるせん断力は低速時と高速時で大小関係が異

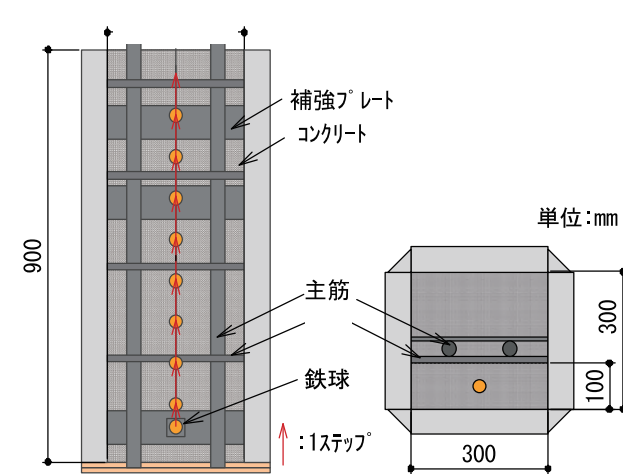


図 13 試験体概要

なっており、この違いが引上げ力の違いに現れ、判別が可能になると考えられる。

5. 实施適用

東京都内にて建設中のビルにおいて、耐震性能の向上を目的として、地震力が大きくなる一部の杭(ϕ 1.7m, 2本)に本工法を初適用した。建物概要を以下に示す(図14)。

工事名称：(仮称)新宿共同ビル
オカダヤ本店建替えプロジェクト

用 途：物販店舗，飲食店など

建築面積：596.39m²

延床面積：6,670.04m²

階 数：地上11階，地下1階

構造種別：地上S造，地下SRC造

基礎形式：杭基礎 場所打ちコンクリート杭
(φ1.2～1.7m，L=約19～22m，計37本)

竣工予定：2025.1.31

6. おわりに

本工法は、場所打ちコンクリート杭において、コンクリート強度を打分けることで杭をスリム化し、従来工法と比べて工期を最大30%、コストおよびCO₂排出量を最大10~20%削減することができる。開発では、コンクリート



図14 (仮称)新宿共同ビル オカダヤ本店
建替えプロジェクト 完成予想パース

打分けに関する施工実験の他、CFDを用いた流動解析やコンクリートの切換り確認などの新しい取り組みを行うことで実施適用が可能となった。今後、都市部などで計画される高層から超高層までの幅広い建物に対して、T-CROWN PILE 工法[®]を積極的に提案していく予定である。

【謝辞】本記事の執筆に際し、本開発・実施適用における関係者（大成建設（株）技術センター 成原弘之、船原英樹、渡邊徹、渡邊悟士、富田菜都美、岩井創、大塚修平、同設計本部 高澤昌義、関根夕貴、同建築本部 秋月通孝、同東京支店作業所 今津洋也、出井宏和、丸五基礎工業（株）・（株）石川鉄工所の方々、敬称略）に記して謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 石崎定幸, 富田菜都美, 渡邊徹, 成原弘之/場所打ち杭を対象とした強度の異なるコンクリートの打込み実験と流動解析, 大成建設技術センター報, 第52号, No.29, 2019
- 2) 桑原文夫/最近の場所打ちコンクリート拡底杭の動向と課題, 基礎工, Vol.8, pp.2~7, 2009
- 3) シーメンスPLMソフトウェア/STAR-CCM+ ユーザーガイド, 2017
- 4) 谷川恭雄/フレッシュコンクリートの流動特性とその予測, 株式会社セメントジャーナル社, 2004
- 5) 石崎定幸, 富田菜都美, 渡邊悟士, 大塚修平/場所打ち杭のコンクリート強度打分けにおける切り換え確認方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp.427~430, 2023
- 6) 水口裕之, 藤嶋茂, 大城豊治/フレッシュコンクリートの塑性粘度および降伏値の測定, セメント技術年報, XXVIII, pp.154~155, 1974

ICCC2023

世界のセメント・コンクリート

研究の動き①



16th International Congress on the Chemistry of Cement in Thailand

2023年9月18～22日にタイの首都・バンコクで開催された「第16回セメント化学国際会議 (ICCC2023 / 主催：タイコンクリート協会)」では、世界各国からセメント・コンクリートに関係する研究者・技術者が参集し、最新の研究トレンドを始め、さまざまな情報提供や意見交換の場となった。前号 (No.925, 2024年2月号) では、この会議の全体概要とわが国から参加した視察団 (団長：丸山一平・東京大学／名古屋大学教授) が訪問した現地の建設現場や各種機関について報告をいただいた。

本号では、これから3回にわたり会議で取り上げられた全11項目にわたる研究トピックスを各参加者より紹介していただく。世界のセメント・コンクリート研究の動きをとらえる機会としていただければ幸いである。

(編集部)

1. 構造物の未来

Future of the construction (by TAKAHASHI Keisuke)

高橋 恵輔

1. 基調講演

Arup社 (ドイツ・イギリス) のStuart Smith氏による基調講演があった。同氏の専門分野は、建設における循環型経済や再生・低炭素型の建設構造の設計等である。同氏は、2014年に開催されたロンドン・デザイン・フェスティバルの一環として、世界で初めてオープンソース化された技術でデジタルプリントした家「WikiHouse」を建設し、サステナブルなデザインと高断熱省エネシステムを備えたLEEDプラチナ認定のTorre Reformaを建設するなど、新しく革新的な材料と技術の社会実装に携わっている。

建設から排出されるCO₂は運用と内包エネルギーによる2種類であり、後者は材料の製造、輸送、建設

利用に由来する。同氏の基調講演では、材料の低炭素化や再利用、建設物の再生などの取組みが紹介された。例えば、2016年に建築された、コンクリート・木材ハイブリッド構造の7階建てオフィスビル「H7」についてである。ドイツ・ミュンスター港にある同建築物は、鉄筋コンクリートや集成材の柱・梁と木材・コンクリートの複合床で構成され、従来の鉄筋コンクリート構造と比較して、CO₂排出量の約1/3を削減した。また、BIMとCO₂排出を連携させて建築物からの排出を可視化している。

近年、欧州は木材建設ブームにある。木材には再生可能というポジティブな側面がある反面、伐採木材の一部しか建設材として利用できない、乾燥工程のエネルギー使用や森林破壊など、ネガティブな側面もある。

鉄筋コンクリート等の従来型材料と木材等のサステナブル材料を適材適所で使うことが必要で、建設の設計と哲学を変えていく必要がある。コストの最小化だけを目指してきた従来の手法から、サステナビリティを主な目標とする方向転換が必要となる¹⁾。その実現には、材料の使用に関する新しいマニフェストの確立をしなければならないとしていた。

また、プレハブ化とモジュール化によって、循環型の建設物の可能性が広がるかもしれない。建設物は常に恒久的なものではなく、街で見られる全ての解体工事が示すように、建設物は完全に一時的なものである。例えば、ビルを一連のレイヤーとして考え、構成部品の寿命をあらかじめ設定し、経年劣化にあわせてその部品を再構成していく。解体後に寿命の残った部品は他の建設物に再利用することで資源循環の実現に繋がると考えらえる²⁾。

2. 一般講演

当セッションは大きく分けて、新素材、3Dプリント材料、CO₂固定技術に関する講演であった。

最初に新素材に関する講演について紹介する。PA0001では、プレハブ建設部材の生産性向上のための初期強度発現改善として酸化グラフェンとシリカフェームの混和材利用が報告された。PA0003では、バチルス属微生物の胞子を混和したポーラスコンクリートの自己修復性能が評価された。PA0015では、ホウ素含有量の高い可溶性水素化ホウ素化合物の中性子遮蔽体への適用性が評価された。K₂B₁₀H₁₀やK₂B₁₂H₁₂などのホウ素化合物はセメントの水和を大きく遅延することなく、飽和石灰水中で高濃度のホウ素量を保つことができたため、高効率な遮蔽材を開発できる可能性がある。PA0028では、ビーライトを主成分としたイーリマイトセメントによるCO₂排出削減効果が評価された。アルミナ源のボーキサイトは偏って賦存しており、粘土等でのアルミナ源の代替を観点にしている。初期強度発現を汎用セメントに合わせると、ビーライト・イーリマ

イトセメントはCO₂排出量を半減できる。

次にセメント系3Dプリント材料に関する講演について紹介する。PA0008では、硫酸アルミニウム系促進剤を用いた高炉スラグ・石灰石粉セメント (CEMⅢ) の硬化促進に関する基礎的なデータが報告された。アルミン酸塩の反応とエトリンサイト生成はCEMIよりも顕著に促進された。PA0009では、CO₂排出量削減を目的としたマグネシウムシリケート水和物系材料の適用性が評価された。PA0010では、X線CT法を用いた積層界面の断面観察や破壊挙動に起因する三次元変形が測定された。積層体の載荷による亀裂は積層界面の空隙を起点に発生し、積層方向が破壊に伴う変形の方方向性に影響を与えることが明らかになった。PA0012では、フライアッシュを火山灰に置換した自己修復配合の積層性とひび割れ修復が測定された。PA0018では、タイのプレハブ建設での実用化事例が紹介された。PA0021では、極初期の乾燥による微細構造の変化が評価された。PA0023では、タイの2階建て医療センタービルの建設事例が紹介された。耐力壁などの構造部材はプレキャスト製造し、建築コードTMS 402/ACI 530/ASCE 5に基づき部材接合された。PA0025では、押出フロー試験を用いて積層性が評価された。

最後にCO₂固定技術に関する講演について紹介する。PA0013とPA0031では、NEDOムーンショットプロジェクトに関連した、CO₂排出／固定の収支シミュレーションや廃コンクリートを用いた炭酸化固化体の製造に関する紹介があった。



たかはし けいすけ / TAKAHASHI Keisuke
香川大学
イノベーションデザイン研究所 特命教授
UBE三菱セメント(株)
研究所 主幹 Ph. D.

【参考文献】

- 1) G. Nieri, C. Hein, S. Smith, Hybrid structures in high-rise buildings: the use of appropriate materials, Proceeding of World Conference on Timber Engineering, 2023, Norway, 1017-1026.
- 2) S. Smith, Upcycle through the whole materials supply chain, Holcim Foundation, 2021, <<https://www.holcimfoundation.org/media/news/upcycle-through-the-whole-materials-supply-chain>>

2. クリンカ製造の新しい局面，セメント水和化学の進歩

New dimensions in clinker production, Advances in hydration chemistry
(by NAKATA Hironobu and KAMIGOUCHI Takashi)

中田 裕伸 上河内 貴

1. はじめに

本稿では、「クリンカ製造の新しい局面」と「セメント水和化学の進歩」の2つのトピックスについて紹介する。内容はICCCで公開されて閲覧可能となっている投稿論文から筆者らの独断によりピックアップしたものを紹介させていただく。

2. クリンカ製造の新しい局面

本トピックスについては、キーノートレクチャー論文が1件、投稿論文が17件であり、そのうち閲覧可能なものが11件となる。

11件の内訳としては、ポルトランドセメントクリンカ設計・易焼成性に関するものが4件、ピーライト-アウイン系クリンカ設計に関するものが3件、AIによるセメント製造に関するものが1件、セメント粉砕助剤に関するものが1件、その他のものが2件と分類される。

前回の2019年でも20件の報告であったことから、セメント製造プロセスに関わる研究は、世界的にも成熟が進み、少々下火になっていると思われる。しかしながら、本技術はセメント業界における根幹技術であり、日本では廃棄物代替率の高さから、安定的なセメント製造は環境負荷、SDGsの取組を遂行する上で必要不可欠な要素である。

キーノートレクチャー論文はMartin Schneider博士より2022年に更新されたECRAのテクノロジーペーパーの要約版として投稿されており、ネットゼロを目指す上で、将来のセメントプラントに適用され得るCO₂削減技術やCCUS技術とその実績、将来的な見通しについて広範かつ網羅的に紹介されている。

・エネルギー由来CO₂削減技術

ロータリーキルンのエネルギー効率向上，代替燃料と代替原料の利用，水素燃焼，焼成炉の電化(プラズマ加熱，誘導加熱，抵抗加熱，マイクロ波加熱)が挙げられている。現時点で熱効率を大幅に向上させる技術は見つかっておらず，電化も工業的には利用された実績はない。

・プロセス由来CO₂削減技術

間接脱炭酸技術によるプロセス由来排出の回収への取り組みが挙げられており，LEILAC2プロジェクトなどTRLが8に引き上げられ，長期安定性が評価される段階に進んだものが存在している。

・CO₂回収技術

酸素燃料技術による排ガスCO₂濃度向上，CO₂吸収技術，CO₂分離膜技術，物理吸収法，カルシウムルーピングによる燃焼後回収，鉱物炭酸塩化が挙げられている。

・クリンカ係数削減技術

SCMとして挙げられているものはJISの少量混合成分として利用可能な高炉スラグ，FA，天然ポゾラン質，シリカフューム，石灰石以外に建設廃材からの再生コンクリート微粉末が挙げられている。実用にはSCMの地域的な入手性や，加工・輸送コストが課題となるほかに，迅速なセメントやコンクリートの規格の見直しと市場の受け入れ体制の構築など重要であると述べられている。

投稿論文の傾向としては，クリンカ中のCa量の低減，Mg増加による影響，低温焼成技術などCO₂削減に関わる技術が報告されている。それ以外の報告としては，添加剤としてアルカノールアミンなどの粉砕助

剤の強度増進効果，硫黄燃焼によるクリンカ鉱物への影響，シミュレーション・AI技術とそれを用いたGX化などが報告されている。セメント製造におけるCO₂の排出は2つに分類され，原料石灰石の脱炭酸反応によるプロセス由来の排出と，燃料の燃焼によるエネルギー由来の排出である。報告内容の分類からもわかるように，CO₂排出量削減は研究の動機の中心となっており，エネルギー由来・プロセス由来の両方の切り口，またGX化による効率化など幅広く検討されていた。今後のセメント業界が生き残るためには多様なCO₂削減方法を検討し，日本のセメント製造に合わせた手法を採用していく必要がある。

本報告では，Ca低減，低温焼成技術やMgの影響，粉砕助剤の効果といった今後のCO₂削減に関わる技術について紹介したい。

以下，（ ）の数字は本会議での各論文に割り振られたID番号である。

(1) 低カルシウムポルトランドセメント

本技術は従来の普通ポルトランドセメントよりもCa含有量を低下させ，プロセス由来のCO₂を削減する技術である。しかしながら，Ca量の低下はクリンカ中のC₃S量の低下を招き，コンクリート強度が低下するため，それを担保する手法が併せて必要である。

Yuwei Liら(PB0007)は，クリンカ中のCaO量を5%低減させると共に，鉱化剤としてCaFを添加することで焼成温度を1300℃に低温化させ，K，Mnを添加することでC₃SとYe'elimiteが共存したクリンカを焼成した。K，Mnともに初期強度の増進には寄与しなかったが，C₃S生成を促進させ，一度の焼成でC₃S-Ye'elimite共存クリンカの焼成が可能となった。本報告では7日までの初期強度の増進は期待できなかったが，焼成温度を下げて別種のクリンカ鉱物を存在させた上でC₃S含有量を維持できることから，SCMへのCa供給源としては利用可能性があると思われる。この観点からはイオンドーピングは今後も研究が期待される。

(2) Mg添加によるセメント物性への影響

本技術は，今後枯渇すると考えられる高品質石灰

石に代わり，MgOを多量に含有する低品質石灰石を用いた際のクリンカ鉱物およびセメント物性への影響を確認するものである。MgOを多量に含有するクリンカはf.MgOの生成を促し，コンクリート構造物に膨張性を付与し，耐久性に影響を及ぼす。

Tao Luら(PB0009)は，MgOを8%含有する低品位石灰石を用い，強度，収縮挙動への影響を報告した。強度はC₃S-M3相の増加に伴い，若干の低下を示し，72時間での収縮は改善した。また，石灰石以外として鉄滓を用いた場合でも同様の傾向を示し，天然石灰石以外の利活用可能性に言及している。

Z. Renら(PB0015)は，MgOを最大で6%添加したクリンカの冷却速度の影響に言及しており，徐冷，急冷，水冷によるクリンカ鉱物への影響を検討している。MgOは γ -C₂Sの生成を促すが，冷却速度を早めることでその生成を抑制でき， β -C₂Sを安定的に生成することが可能となると報告している。

MgOの増加は日本でも今後起こりうる事象であるが，これら研究により，クリンカ鉱物の安定化を図り，セメント物性を保持することが可能となると期待される。

(3) 強度増進を目的とした粉砕助剤の影響

本技術はセメント製造における粉砕効率の向上とセメント物性の向上を両立させる手法として広く用いられている技術である。日本におけるセメントの粉砕助剤はジエチレングリコールが主体であるが，今後，SCMを使用してクリンカ係数を大きく削減していく中でSCM種に応じた強度増進などの付帯効果を持つアルカノールアミン系などの助剤の選定・活用が必要になってくると考えられる。

R.G Sibbickら(PB0008)は，クリンカ中の含有成分が化学添加材を用いた際の被粉砕性および強度増進性に及ぼす影響因子について報告している。クリンカ中の斜方晶C₃A量が化学添加材との良好な関係性を持ち，硫酸塩が少ないことが斜方晶C₃Aの安定化を促し，添加反応の向上に寄与していると示唆している。

粉砕助剤とアルミネート相，フェライト相との関係性は多くの論文でも言及されており，本報告でも，その有

用性が示された。

3. セメント水和化学の進歩

本トピックスは、キーノートレクチャー論文が1件、投稿論文が77件であり、そのうち閲覧可能なものが42件となる。

42件の内訳としては、ベースセメントがポルトランドセメント系およびPC+SCM系で、これらの水和に関するものが26件と半数を超え、PC+SCM系はLC³に関するものが4件、その他SCMに関するものが4件となっている。非PC系は全体として11件で、ビーライト-アウイン系が1件、テルネサイト系が1件、アルミナセメント系が4件、アルカリ活性材料(AAMs)が3件、マグネシウムバインダーが2件となっている。その他セメント材料を水和させず、C-S-HやC-A-S-Hなどの水和物を直接合成したもの、シミュレーションによって評価したものが5件と分類される。

キーノートレクチャー論文はKaren L. Scrivener教授より資源、エネルギー、CO₂浪費を避けるためにセメント系材料の水和を最適化すること目的として、セメント水和生成物と水溶液の熱力学について取りまとめた論文が投稿されている。

投稿論文の報告の内容としては、SCMを始めとした混合材添加によるC-S-H、C-A-S-Hなどの水和挙動の変化など、クリンカ係数の削減を目的とした研究が盛んに行われている。近年ではLC³に代表されるクリンカ置換率が高いセメントの研究が欧米を中心に盛んに行われており、日本における研究の方向性とは異なる観点的なものが多い分野であった。

(1) LC³セメント

本技術はセメント中のクリンカ係数を低減させ、セメント配合によってCO₂削減を実現させる技術の中でも最も研究が盛んなものである。そのなかでもメタカオリンに代表される焼成粘土を用いた高置換率セメントはCO₂の削減率が高く、欧米で盛んに研究されているが、未だセメント設計および水和挙動に関する詳細な検討は

発展途上であると思われる。

F. Zuninoら(PC0002)は、メタカオリンを用いたLC³の水和挙動について①硫酸塩必要量、②カーボアルミネート相と強度発現の関係、③メタカオリンの長期的な水和について取りまとめており、それぞれ、①硫酸塩必要量は使用される粘土と石灰石の比表面積に依存し、反応性アルミナの含有量とは関連がないこと、②カーボアルミネート相がクリンカの水和後の細孔に、CHを消費して析出して空間を充填し、機械的強度の発現に寄与すること、③メタカオリンからのヘミカーボネート相(HC)、モノカーボネート相(MC)の生成は硫酸塩の枯渇後に進行するが、CHが枯渇したとしてもC-A-S-H由来のCaを消費して更に進行する。このため長期的にカーボアルミネート相は安定的に存在し、構造の緻密化により機械的性能は向上していくことを報告している。

Lucas Goldenberg Pyら(PC0004)は、カオリナイト含有量が異なる焼成カオリナイト粘土の影響をカロリメータの水和発熱速度などにより評価している。メタカオリン含有量が高いと圧縮強さが高くなる結果が得られた一方で、硫酸塩必要量はカオリナイト含有量が低いものの方が多くなるという結果を示し、この主要因が比表面積にあると考察している。

E. Qokuら(PC0055)はLC³セメントとヒドロキシエチルメチルセルロース(HEMC)との相互作用について検討している。HEMCの添加はエトリンガイト形成を遅延させ、CHの増加を促し、ゲル状生成物の増加も確認された。LC³の繊維補強コンクリートとしての水和挙動に関する情報が得られたことにより、幅広い用途開発が進むと予想される。

(2) C-S-H、C-A-S-H

セメントの水和を議論する上で、主生成物であるC-S-H、C-A-S-Hの言及は必要不可欠である。本開催でもその検討は広く行われており、混合セメントの普及とともに、これまで検討の少なかったC-A-S-Hの検討が重要視されてきている。本開催でも混合セメントの報告が多くあることから、詳細な検討を進める必要がある。

X. Ouyangら(PC0026)は、微小骨材表面へのCa²⁺の吸着挙動がC-S-H生成に寄与する影響を検討している。ナノスケールでのCa²⁺の吸着挙動に関してはゼータ電位により評価し、セメント水和物および凝集体との相互評価を行っている。石灰石などの骨材表面へのCa²⁺の吸着はC-S-Hの核生成を促し、流動性や強度などのセメント物性を改善する一方で、マグネサイトなどはCa²⁺の吸着が行われず、セメント物性の低下を引き起こす結果が報告された。

T. Sowoidnichら(PC0005)は、分析的超遠心(AUC)と特別にデザインされた反応制御により希釈と連続攪拌を行いCa(OH)₂析出を抑制してC₃S(三斜晶系)の水和24時間までのC-S-Hの核生成、成長を評価している。

具体的にはICP-OESにより水相のCa、Si濃度をモニタリングしてpHとCa濃度が維持された状態でSi濃度が低下してC-S-Hが形成するまでを確認し、AUCとレイリー干渉光学系により水和沈降種の沈降係数を評価し、イオンからクラスターサイズの粒子沈降を確認している。その結果、C-S-Hの核生成は水分子を含む予備核生成クラスターを介して起こると結論付けている。本検討の純粋なC₃S(三斜晶系)に替えてAl、Feが固溶するC₃S-M1、M3相およびC₂Sなどの水和へ適用するなど今後の更なる展開を期待したい。

(3) アルカリ活性材料(AAMs)

Feng Wuら(PC0070)は、NaOH-石炭ガス化残渣(CGR)系のAAMに対して、促進剤としてPC(10wt%)、Ca(OH)₂(5wt%)を添加し80℃、24h養生を行った系を比較検討している。PC添加では水和によりCa(OH)₂とC-S-Hを生成し、Ca²⁺が供給されることから添加による促進効果が小さい一方、Ca(OH)₂は促進効果がPCより大きかった理由として、Ca(OH)₂は直接溶解によりCa²⁺が供給され活性を有するSiとAlと反応することができるため効果が大きかったと考察している。

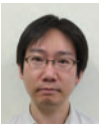
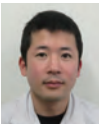
(4) その他

J.L. García Calvoら(PC0003)は、エトリンガイト系膨張材の膨張作用と収縮のメカニズムについて検討し

ており、硬化時に外部からの水の供給の有無によって生じる膨張後の収縮量に差が生じる要因を解明するために、湿空中養生と封緘養生による自由膨張量を比較し、更にAE剤によってセメントマトリクスの空隙率を変化させた試料について周方向の拘束膨張量の評価している。その結果AE剤により空気を導入した試料は無添加と比較して周方向の膨張量が大きくなること、SEM観察ではAE剤で導入された気孔には膨張材由来のエトリンガイトが充填されていないことから、得られた膨張のメカニズムはエトリンガイトの構成成分がその場で析出し、エトリンガイトを形成して膨張作用を示したと考察している。

4. まとめ

ICCC2023において、セメント製造プロセスに関する報告は、大学などの専門機関による報告に偏っており、これまでのようなセメント会社の報告はほとんど見られなかった。現在の世界的なCO₂削減はクリンカ係数の削減(混合材の増量)に重きを置いている結果であるが、セメント業界としてのカーボンニュートラルを考えた場合、セメント製造プロセスからのCO₂削減は必須であり、今後も研究を進める必要があると筆者は考えている。日本発の技術が世界をリードするために、現在達成されている高い廃棄物の利用率を維持したまま、プロセス由来排出の削減に努め、環境負荷の低減とCO₂削減が両立されることを期待したい。

	なかた ひろのぶ / NAKATA Hironobu 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 副主任研究員
	かみごうち たかし / KAMIGOUCHI Takashi 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 副主任研究員

3. クリンカ代替，SCMsの利用に関する研究動向

Enhancing clinker substitution / Supplementary Cementitious Materials (by KOBAYASHI Mari)

小林 真理

1. はじめに

本トピックスに関する基調講演は2件であり，それぞれ，“Low clinker systems: towards a rational use of SCMS for optimal performance”がDr. Bruno Huet (Holcim社)とDr. Mohsen Ben Haha (Heidelberg Materials社)により，“Future and emerging supplementary cementitious materials”がDr. Ruben Snellingsにより行われた。一般発表は111件(ポスター発表14件を含む)にも上り，世界的なホットピックであることが伺える。基調講演に関してはCement and Concrete Researchから論文が発表されており，詳細は参照されたい。本稿では基調講演の内容を中心に，著者の視点で内容を抜粋して報告する。

2. SCMsに関する研究動向

Ben Haha et al.では，「合理的な混和材(SCMs)利用に向けた性能の最適化」という視点から，石灰石フィラー，高炉スラグ，フライアッシュ，焼成粘土を含む2成分あるいは3成分系に関する研究動向について報告された。欧州を中心にSCMsの積極的利用が進む中，初期強度低下の改善が利用をさらに促進する鍵となる。たとえば，石灰石粉末の添加による水和促進効果に関して，希釈効果に加え，石灰石粉末の微粉化，すなわち，比表面積の増加に伴ってカルシウムシリケート水和物(C-S-H)の核生成サイトが増加し，水和促進効果が得られる。また，ドロマイト(CaMg(CO₃)₂)の添加では，Alの一部がMgと結合してハイドロタルサイトを生成，結果としてAlに対するSが増加し，エトリングイトが安定化することで，固体のモル体

積を増加させ，強度が改善される。

SCMsが2種以上添加された3成分系のバインダーに関しても積極的検討がなされている。例えば，スラグセメントに石灰石粉末を5%以上添加することで，水和反応に変化が生じ，石灰石微粉単体の添加と比べ，より石灰石が反応に利用され，エトリングイトやAFm相が安定化する。また，エーライト，アルミネート相，フェライト相の反応が促進されることも報告されている。そのほかのボゾラン反応性を有する材料，例えばフライアッシュやか焼粘土に対しても石灰石微粉を添加することで，性能の向上が確認されている。

材料の粒度分布という視点から，充填性の向上によってSCMs添加時の初期強度改善を試みた報告もある。石灰石粉末をSCMsとして添加した系において，未水和クリンカ粒子を“フィラー(補強材)”とみなし，石灰石粉末の粒度を充填性が高くなるよう調整することで，クリンカ含有量を最大70%削減できるとの試算もある。

すなわち，世界的にSCMsを含むセメントの規格化と利用拡大が進む中，これからはSCMsの添加率でバインダー特性が決まるという認識では不十分となるだろう。例えば，初期強度を担保するためにクリンカの細粒化が必要なら，SCMsの粒度を調整する(必要以上に細かくしない)ことでバインダー全体としての粒度分布をコンシステンシーが維持されるよう最適化するなどの手法も提案されている。ただし，粒度分布を最適化させたSCMsバインダーの製造には課題が多く，効率的な粉碎方法や製造方法の確立が期待される。

SCMsバインダーは2成分系から3成分系へと進化しており，加えて，粒度，配合，混和剤など様々なパラメータが複雑に作用したバインダー特性になっている。その結果，未だ不明確なことも多く，論文数も限られていることから，今後の調査が期待される。

3. 新興SCMs

Snellings et al.では，今後，利用が進むと見込まれるSCMsおよび将来的に利用が検討されるであろうSCMsに関して報告があった。

新興的なSCMsとして，天然ボゾラン，か焼粘土，埋立処分フライアッシュ，バイオマス灰，コンクリート微粉，廃陶磁器(レンガや瓦など)，再生ガラス等が挙げられた。これらの利用可能性は種々の研究によって示されているものの，入手可能地域が限られていたり，潜在的な入手量はあるものの，一か所で大量に発生しなかったりと，利用には課題が残されている。例えば，バイオマス灰は一般的な作物(小麦や米など)由来が年間約8億t，林業由来の灰が年間約1億t，そのほかにも地域的な農作物由来や製紙スラッジ灰なども併せると，全体で年間10億tにもなるが，セメントやコンクリートに利用されている量はかなり限られている。欧州では，バイオマス灰がフライアッシュと同様に30%まで添加することが認められているが，十分な量のバイオマス灰をどのように収集し，処理するかは課題として残っている。

将来的にSCMsとしての利用可能性あるとして挙げられたのは，鉄鋼スラグ，非鉄金属スラグ，ボーキサイト残渣，都市ごみ焼却灰，採鉱・採石廃棄物，浚渫土等である。基本的にどれも反応性が悪く，初期強度発現が課題と言われている。そのため，多くの研究が反応性改善を目的として行われている。反応性および初期強度改善の主なアプローチとしては，①粒度の最適化および微粉化，②石灰石等そのほかのSCMsと合わせた3・4成分系で利用する，③焼成や溶融によって反応性を付与する，④アルカリ刺激剤等や水和促進剤などの混和剤を利用するなどであり，加工に要するエネルギーとCO₂削減量を比較し，その妥当性も併せて議論されている。

都市ごみ焼却灰や採鉱・採石廃棄物の利用には，バインダーの用途によって，重金属含有量と溶出が問題となりうる。鉄鋼スラグも同様に一定量の重金属を含

む。実際の環境リスク評価にはバインダー中の重金属濃度よりも，当然，溶出量が重要であり，バインダーとしての基準を設けることは難しいだろう。SCMsバインダーの利用には，その用途に応じて，環境適合性を評価しなければならないことを理解し，場合によっては，重金属を分離するためのSCMsの前処理も検討されるだろう。

4. SCMsバインダーのモデリング・機械学習

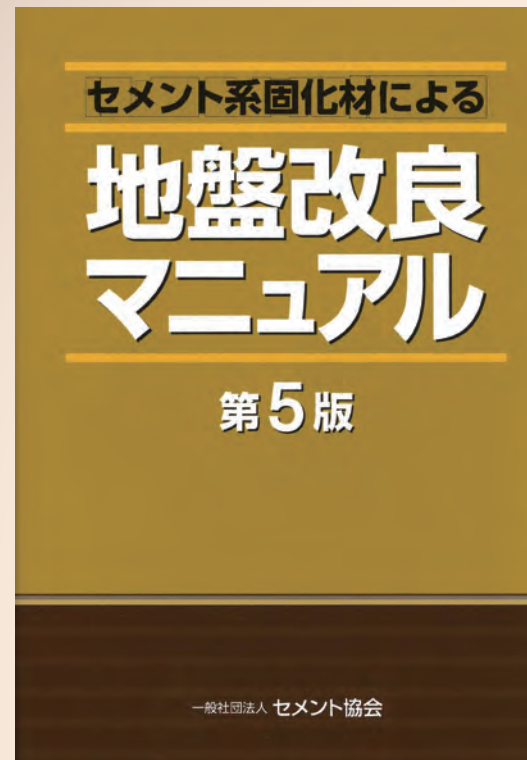
SCMsの利用には合理的な材料選択が求められ，数学的に定式化，モデルの構築が望ましい。しかし，SCMsの添加されたバインダー特性はポルトランドセメントよりも多くの変数に依存し，3成分系以上となると非常に複雑になるため，モデル構築は容易ではない。2000年代後期以降，大きなブレイクスルーによって，機械学習や人口ニュートラルネットワークなどがモデル構築に寄与する可能性が浮上してきた。一般講演でも機械学習やディープラーニングを利用した検討に関する報告があり，今後，こういった研究が増えてくと予想される。しかしまだ，学習に利用可能なデータが不足しているのが現状である。今後は最新の機械学習技術を使うことに焦点を当てるだけではなく，質の高いデータセットを構築していくことがモデルの確立，さらには最適なバインダーの配合を決定するのに役立つと考えられる。

5. おわりに

SCMsの利用はCO₂削減に向けた有効な手段のひとつになりうるが，入手可能な量や場所が限られてしまうという課題があり，CO₂削減という目的を考えると長距離の輸送は避けられるべきである。したがって，“地産地消”のローカライズをどのように達成していけるかが重要な焦点となるだろう。少量ずつ各地で発生するようなSCMsも上手に利用できることが好ましく，そのための議論が我々には必要なのではないだろう。

セメント系固化材による 地盤改良マニュアル

最新第5版
発刊しました。
1985年に初版を発刊し、以降ほぼ9年ごとに改訂を重ねてきた本書の第5版が完成しました。災害からの強化復旧、大規模災害への対策、ICTの活用、最新技術データ・指針類の反映など、頁数・図表数を増やしての改訂です。



第5版改訂のポイント

- ① 最新の技術データ・指針類を用いて全章の内容を見直し。
- ② セメント系固化材の特徴と固化の原理をよりわかりやすく解説。
- ③ 浅層改良および深層改良に加えて、近年使用実績が増えている中層改良についても記述。
- ④ 大規模災害におけるセメント系固化材の活用方法やその適用について新章を設けて解説。
- ⑤ 実施例をすべて刷新。15 事例を紹介。

A5判 502頁
税込定価 6600円

1. セメント系固化材とその適用
2. セメント系固化材による地盤改良の原理と改良土の特性
3. 地盤改良にあたっての事前調査および試験
4. 浅層改良・中層改良
5. 深層改良
6. 建築物のための地盤改良
7. 発生土の改良
8. 環境と固化処理
9. 災害に強いセメント系固化材 **新章**
10. 実施例

お求め・お問い合わせは…

一般社団法人セメント協会 図書販売係 まで

東京都中央区新富二丁目15番5号 RBM築地ビル2階

TEL 03-5540-6173 FAX 03-5540-6181

諸外国では低炭素バインダーの規格化や利用を着実に進め、各々がアピールし、プレゼンスを示している。我々は遅れをとってはいないだろうか。著者のような材料側の人間はなかなか“強度至上主義”から抜け出せず、構造側の人間は構造視点から材料に求めるスペックを議論することが少なく、結果、低炭素への取り組みにブレーキをかけてはいないだろうか。国内セメント業界で低炭素関連の研究開発に対する関心が高まっている状況にも関わらず、包括的にみると世界の動き

についていけないのは、少し悲しい。今後の活発な議論が望まれるばかりである。



こばやし まり / KOBAYASHI Mari
UBE三菱セメント(株)
研究所 セメント研究室 セメントグループ
Ph. D.

懇談会

「近藤・大門賞を振り返って今後を考える」

東京工業大学名誉教授の大門正機先生が2023年8月17日にご逝去され、早くも半年が経過しました。大門先生とご縁のある皆様に、先生のご冥福を偲びながら、ともにお集まりいただき、先生の足跡を振り返る「懇談会」を企画いたしました。

皆様のご多忙を承知の上で、ご臨席賜りますようお願い申し上げます。

日 時：2024年5月13日(月)13：00～16：00

会 場：(一社)セメント協会 研究所 会議室(東京都北区豊島4-17-33)

※アクセス 王子駅(JR京浜東北線・東京メトロ南北線)より都営バス10番のりば(豊島五丁目団地行き王57系統、西新井駅前行き王40甲)より豊島五丁目団地地下車徒歩4分

参加費：無料

申込み：不要

連絡先：daimonsensei.shinobukai@gmail.com

発起人代表：坂井悦郎，宮内雅浩，新大軌，大宅淳一，井元晴丈，大崎雅史，斎藤豪，二戸信和，中村明則，細川佳史，宮原茂禎，盛岡実，吉田夏樹，渡邊賢三，後藤誠史，浅賀喜与志，秋葉徳二，倉田昭郎，福原実

※5月11日(土)に学士会館にて開催予定の「大門先生を偲ぶ会」は3月31日に申込を締切りました。

65歳での 家庭菜園デビュー

宇治 公隆

マンション住まいながら3年前、65歳から家庭菜園を始めた。3年ごとにある相模原市・市民農園の募集を定年退職直前に目にし、何かの巡り合わせと思って申し込み、運よく当選。43区画ある中の1区画、高々 20m²で人生初の土いじり。自分自身は神奈川県西部の田んぼや畑が広がる地域で育ったが、サラリーマン家庭で土に触れる機会はなかった。しかし、小学校などで収穫体験をする時代になり、わが家でも子供たちが楽しそうに収穫の話をしていく記憶や自身の体力の衰えから、この機会にやらないと、と思い農業の真似事をスタートした。

約4m四方の畑を耕し、畝を4本作ることから始めたが、これが以外に重労働。関連の本を読んでもイメージトレーニング通りにはいかず、息が切れ、腰は痛くなり、結局2日掛かりの作業となった。

1年目は謙虚に、支柱は立てず地面を相手に葉物や根菜類で様子見だったが、2年目はミニトマトにも挑戦。苗も売ってはいるが、種から育ててみることにした。本では、まず苗づくりのために25℃以上の室内でポリポットに種をまきさい、と書いてあったが、そんな手間をかけなくても大丈夫だろうと昼間は結構暖かい3月下

旬、畑に直に種をまいた。が、1週間経っても2週間経っても芽が出ない。しびれを切らし、4月半ばに、前回の場所を避けて種をまく。しかし、同じく変化なし。へこんだ気持ちで5月はじめに、残りの種をまいたら何と1週間で芽が出てきた。ところが、先にまいた種も目を覚まし、僕も私もと芽を出して枝が乱立し、茎葉だけが密集。肝心のミニトマトの収穫はほぼゼロに終わった。さすがに3年目は、農園仲間から教わった緑化センターで割安な苗を買って来て植えるところから始めた。結果、順調に実がなったが、カラスに取られたり、雨に当たって割れたりの残念な結果で、更なる課題に遭遇した。

本で見た発芽に必要な温度の説明が正しいことに納得したが、コンクリートにも似たような話があることを思い出す。コンクリートの混和材料であるフライアッシュは、10℃程度以上の温度条件でないと反応が進まない、と研究論文で述べており、農作物と工業製品という違いがあるが、ミニトマトもフライアッシュも、生育・化学反応のための温度条件という共通点があることに感心した。

種まきの1回目と2回目の間隔の読みが違った話を。夏場のビールのお供に枝豆をと目論

み、日にちを逆算し4月の終わりに1回目の種をまいた。そして、10日ほど日を置いて2回目の種をまいたが、莢が膨らむタイミングがほとんど一緒となってしまった。収穫に感謝しつつ、自己採点は70点かな。野菜たちの成長にも、コンクリートの強度発現と同様の積算温度の概念が適用できるようなのである。今後、注意しよう。

関連して、農業用マルチシートのすごさを実感した。自分は、シートを使わないことにこだわり、寒さの中でも野菜たちに耐えて貰ったが、周りの区画では、シートの保温の恩恵で生育が速い。冬を越す玉ねぎではその効果が顕著で、シートに守られた苗たちは冬場を楽勝で乗り切り、わが家の玉ねぎに大差をつけてすくすく成長。おそろべし、マルチシート。農家さんの畑で普通に目にするのも納得である。

脱線するが、水やりのほか生育中に行う追肥は難しい。塩茹でにして食べたいと思ってまいた落花生。元気に育つようにといっぱい肥料を与えたが、不作だった。後から本で、肥料をそれなりに与える野菜と、敢えて少なめにする野菜があることを知った。特に落花生は肥料少なめ、枝豆は多すぎるとダメと。どうも、これは人間の教育方法にも当てはまるようだ。

最近の気候変動に関連した話で。初心者向きとされる里芋は1年目から挑戦した。1、2年目は、さほど苦労もなく、まずまずの大きさのものを収穫できたが、3年目は小ぶりなもの

がほとんど。わが家では私の技量不足を指摘されたが、昨年夏の猛暑が原因だったようで、スーパーに並ぶ里芋も多くが小ぶり。通常の大きさの里芋の値段が高いことに頷き、農家さんの苦労を改めて理解した。

3年間の家庭菜園で、畑仕事の難しさと面白さを知った。もっと早くから始めればよかった。次回も申し込んでみよう。当たればいいな。

[うじ きみたか／

東京都立大学 名誉教授 博士(工学)]



超高強度繊維補強コンクリート 「スリムクリート®」を用いた 道路橋床版のリニューアル技術

Renewal Technology for Road Bridge Deck using Ultra-High Strength Fiber Reinforced Concrete
“Slim-Crete®”

川西 貴士 佐々木 一成

1. はじめに

1-1. 道路橋床版の現状

わが国の多くの高速道路は、建設から40～50年が経過し、道路橋の老朽化が進行している。高速道路ネットワークは重要な社会インフラであり、適切に維持管理していく必要がある。限られた財源の中、効率的に維持管理するには、既存の道路橋の長寿命化や強靱化が重要となる。安全・安心を提供することが社会的使命である。

床版は、大型車の通行による疲労および凍結防止剤の散布による塩化物イオンの侵入など、厳しい使用環境に晒されている。そのため、床版上面の土砂化、鉄筋の腐食、床版下面の剥離などの損傷が顕在化しており、老朽化した床版のリニューアル工事が進められている¹⁾。このうち、床版取替工事は、交通規制を伴うことから短工期での施工が求められている。また、長寿命化や強靱化の観点から、一般に100年の耐用年数が求められており、床版の品質の向上が不可欠

となっている。

著者らは、高い強度特性と優れた耐久性を有する超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート®」をすでに開発している²⁾。このスリムクリートは、施工現場での製造や打込みが可能であり、床版取替工事に適用することで、工期短縮や床版の品質向上に貢献できると考えられる。そこで、スリムクリートを用いた道路橋床版のリニューアル技術を開発した。

1-2. 床版取替工事における課題と開発技術

床版取替工事の課題には、①工期短縮、②床版の耐久性向上、③床版接合部の施工の省力化、④防水工の省略、⑤交通規制期間の短縮などが挙げられる。これらの課題を解決するために、スリムクリートを活用した3種類の技術を開発した。これらは、品質向上と工期短縮を実現したプレキャスト床版(以下、PCa床版と呼称)の接合法「スリムファスナー®」、あらかじめ防水性能を付与したPCa床版「スリムトップ®」および交通渋滞の大幅な低減を可能とした夜間1車線規制下での床版取替工法「DAYFREE®」である。課題に対する各技術の対応を表1に示す。また、各技術の組合せを図1に示す。接合法であるスリムファスナーを基本として、現場の要望や目的に応じて、スリムトップおよびDAYFREEを組合せて使用できる。

本稿では、床版取替工事におけるこれら3種類のリニューアル技術を紹介する。

表1 課題に対する各技術の対応

技術名	スリムファスナー	スリムトップ	DAYFREE
技術の概要	品質向上と工期短縮を実現したPCa床版の接合法	あらかじめ防水性能を付与したPCa床版	交通渋滞を大幅に低減できる夜間1車線規制下での床版取替工法
① 工期短縮	◎	◎	○
② 床版の耐久性向上	◎	◎	◎
③ 接合部の施工の省力化	◎		○
④ 防水工の省略		◎	
⑤ 交通規制期間の短縮	○		◎
各技術の組合せの例			
a) 接合部の施工を省力化したい場合	使用		
b) 防水工を省略したい場合	使用	使用	
c) 早期に交通規制を解除したい場合	使用		使用
d) b)とc)を両者が必要な場合	使用	使用	使用

表2 諸物性

試験項目	単位	値	備考
圧縮強度	N/mm ²	180	特性値 標準養生28日
ひび割れ発生強度	N/mm ²	8.0	
引張強度	N/mm ²	8.8	
静弾性係数	N/mm ²	4.6×10 ⁴	平均値 標準養生28日
ポアソン比		0.2	
熱膨張係数	1/℃	10.7×10 ⁻⁶	
透気係数	m ³	1.1×10 ⁻²¹	
塩化物イオンの拡散係数	cm ² /年	0.0034	10%NaCl溶液 浸漬期間:1年 測定範囲: 0.003～120×10 ⁻⁶ m 標準養生91日
細孔空隙率	%	4.1	

2. スリムクリートの概要

構造物の部材断面の縮小や長期耐久性の向上など構造物の合理的な構築に向けて、高強度、高靱性および高耐久性を有する超高強度繊維補強コンクリートが開発され、土木学会より設計・施工指針案が発刊されている³⁾。筆者らは、この超高強度繊維補強コンクリートに適合する材料として、圧縮強度180N/mm²以上、ひび割れ発生強度8.0N/mm²、引張強度8.8N/mm²を有するスリムクリートを開発している²⁾。スリムクリートは、中性化、塩害、凍害などに対して100年の耐久性を確保できる材料である。スリムクリートの諸物性を表2に示す。

【スリムファスナー】
接合部の施工を省力化したい場合

【スリムトップ】
防水工を省略
したい場合

【スリムトップ】
＋
【DAYFREE】

【DAYFREE】
早期に交通規制を
解除したい場合

図1 各技術の組合せ

表3 使用材料および配合

空気量 (%)	水粉体比 (%)	単位量(kg/m ³)				鋼繊維 (kg/m ³)
		水	専用 プレミ ックス 粉体	細骨材	高性能 減水剤 [*]	
	W/P	W	P	S	SP	SF
2.0	12.6	230	1830	331	22	157

※添加量は適宜調整



写真1 鋼繊維およびフロー試験の状況

スリムクリートに使用する材料および配合を表3に示す。スリムクリートは、反応速度の速いエーライト(C₃S)の多いセメントを使用しており、常温養生において早期に緻密な組織を形成するため、現場打ちでの構造物の構築が可能な材料である。曲げや引張特性を向上させるため、引張強度2000N/mm²以上の鋼繊維を容積比で2%混入している。フロー(JIS A 6201 落下無し)の目標値は260mmとしており、自己充填性を有する材料である。鋼繊維とフロー試験の状況を写真1に示す。

このスリムクリートを、床版取替工事に用いるPCa床版やそのPCa床版同士の接合部に適用することとした。高い強度や靱性により合理的な設計が可能となり、コストダウンや施工の省力化が可能となる。また、厳しい塩害環境下に晒される道路橋床版でも、かぶり20mmを確保することで、鋼材腐食に対して十分な耐



かわにし たかし / KAWANISHI Takashi
(株)大林組 技術研究所
生産技術研究部
上席研究員 博士(工学)



ささき かずなり / SASAKI Kazunari
同上
構造技術研究部
主任研究員 修士(工学)



写真2 モバイル型の練混ぜミキサ

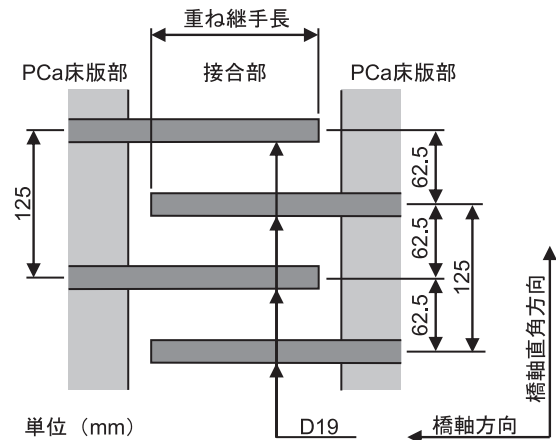


図3 接合部の鉄筋配置の例

久性を満たすことができる。

スリムクリートは、市中の生コンプラントで製造できるのはもちろんのこと、モバイル型のプラントを用いて施工現場で製造することも可能である。床版取替工事の接合部の施工は、高速道路上での打込みとなるため、生コンプラントからでは運搬時間が長くなることから、モバイル型のプラントでの製造が有利となる。練混ぜミキサを写真2に示す。なお、施工ヤードが狭く、かつ交通規制期間が短い場合には、ミキサをトラックに積載した状態でスリムクリートを製造することも可能である。

3. スリムファスナー

3-1. 床版接合部における課題

床版取替工事では、工期短縮や品質向上の観点から一般にPCa床版が用いられる。しかし、PCa床版

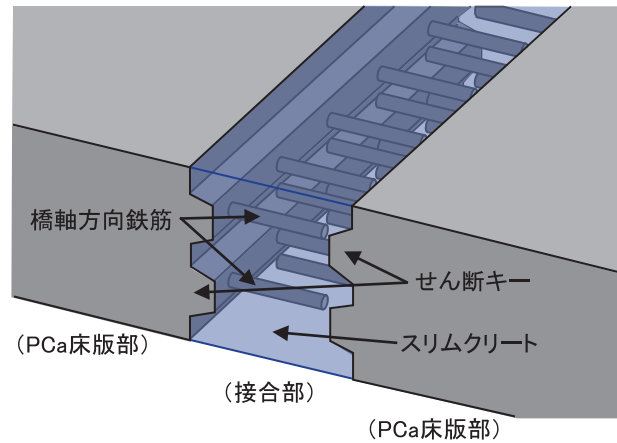


図2 スリムファスナーの構造

同士の接合部は、現場打ちコンクリートにて連結する。そのため、さらに工期を短縮するには、接合部の施工を省力化することが重要となる。

接合部の鉄筋継手を通常の重ね継手とする場合、鉄筋径の25倍の重ね継手長が必要であり、接合部の幅が大きくなり、不経済となる。そのため、接合部の鉄筋を曲げ加工し、コンクリートの支圧による応力伝達を期待することにより重ね継手長を短くしたループ継手が一般に用いられる。しかし、ループ継手は、鉄筋の曲げ半径を確保する必要があるため薄い床版には適用できない。橋軸直角方向の鉄筋を現場で組み立てる必要があるため、現場での作業が煩雑となるなどの課題がある。

3-2. スリムファスナーの概要

接合部の施工の省力化を図るため、スリムクリートをPCa床版の接合部に用いることで、鉄筋の重ね継手長を短くしたスリムファスナーを開発した⁴⁾。スリムファスナーの構造を図2に示す。接合部の橋軸方向の鉄筋は、床版設置の省力化を図るため、曲げや定着加工をしない直筋を用い、鉄筋同士にあきを設けたあき重ね継手としている。また、PCa床版との打継目にせん断キーを設けることで、目開きを抑制し、打継目で破壊しないよう付着性を高めた構造としている。

スリムファスナーの接合部の鉄筋配置の例を図3に示す。鉄筋の重ね継手長を鉄筋径の5倍とすることが

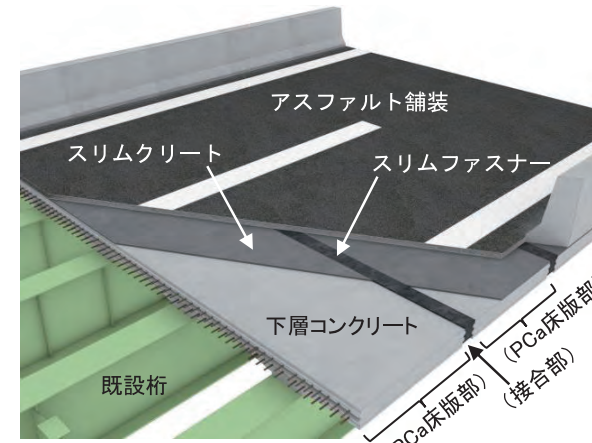


図4 スリムトップの構造

でき、従来の継手に比べ、接合幅を大幅に削減できる。また、接合部にスリムクリートを使用することで、スリムクリートを介して鉄筋の応力を伝達させることができ、橋軸直角方向の鉄筋を省略することができる。

このように、スリムファスナーを適用することで、接合部の現場施工が省力化され、工期が短縮できる。また、道路橋床版の弱点となりやすい接合部の耐久性を向上することができる。

4. スリムトップ

4-1. 床版防水工における課題

床版の劣化要因として、床版のひび割れへの水や塩化物イオンの侵入が挙げられる。そのため、これらの劣化要因の侵入を防止するために、床版を構築した後は防水工を施すことが標準となっている。床版防水工は、床版の構築後に施工するため工期が長くなる、雨天時には施工できないため天候不良により工程が遅延するリスクが高まるなどの課題がある。さらに、リニューアルした高速道路には100年の耐久性が求められているが、従来の床版防水工は30年程度での更新が必要で、更新期間を延長できる耐久性の高い材料が求められている。

4-2. スリムトップの概要

防水工を省略するために、物質侵入抵抗性が極め



写真3 スリムクリートの打込み状況

て高いスリムクリートをあらかじめ床版の表層に配置したハイブリッド型のPCa床版スリムトップを開発した⁵⁾。スリムトップの構造を図4に示す。スリムトップを適用することで、床版防水工が不要となるため工期を短縮でき、雨天時の工程遅延リスクも回避することができる。また、耐久性の高いスリムクリートを適用することで、100年の耐用年数を確保することができる。そのため、維持管理手間を省力化でき、ライフサイクルコストを低減できる。

床版防水工を省略する場合、高速道路会社の規格における床版防水層(グレードⅡ)と同等以上の防水性能が求められる。スリムトップは、マイクロクラックが発生したとしてもグレードⅡと同等以上の透水を有することを確認している。

スリムトップにおけるスリムクリートの打込み状況を写真3に示す。表層のスリムクリートと下層コンクリートとの一体性を高めること、スリムクリートの収縮が下層コンクリートに拘束されてひび割れを生じるのを抑制するため、下層のコンクリートが固まる前にスリムクリートを打ち重ねている。

PCa床版同士の接合部についてもスリムファスナーを適用している。しかし、スリムトップの表層のスリムクリートと接合部に打ち込むスリムクリートの打継目は、繊維の架橋効果が期待できず、引張強度が低下する。そのため、接合部において引張性能を確保するために、スリムクリート同士の打継目については、

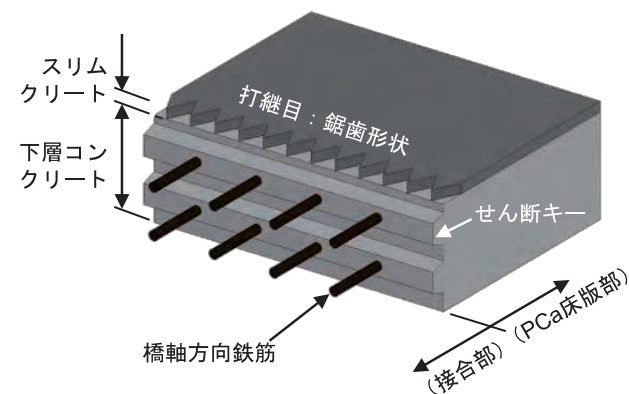
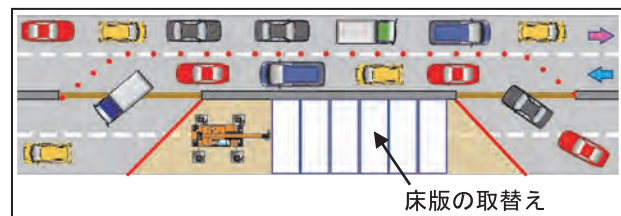


図5 接合部の概要

従来の工法：片側対面通行規制



DAYFREE：夜間半断面施工

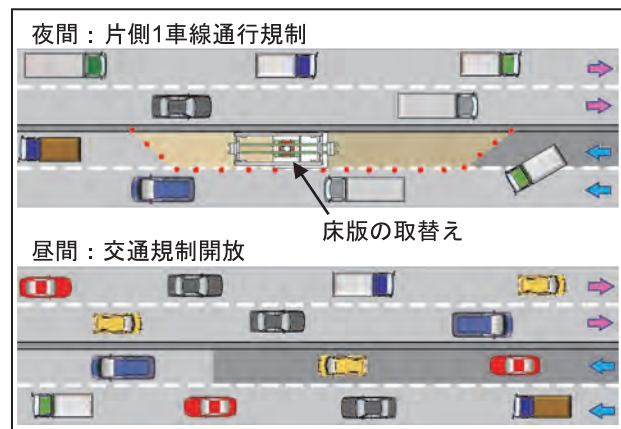


図6 床版取替工事における交通規制の概要

図5に示す鋸歯形状を採用している。

5. DAYFREE

5-1. 交通規制における課題

床版取替工事では、床版の撤去から架設の完了まで上下線のいずれかを通行止めにし、対面通行規制を行うなどの交通規制が必要となる。PCa床版の接合部にコンクリートを打ち込む場合、所要の強度が発現するまでに日数を要するため、交通規制の期間が長くなる。しかし、都市部の高速道路のように交通渋滞が常態化

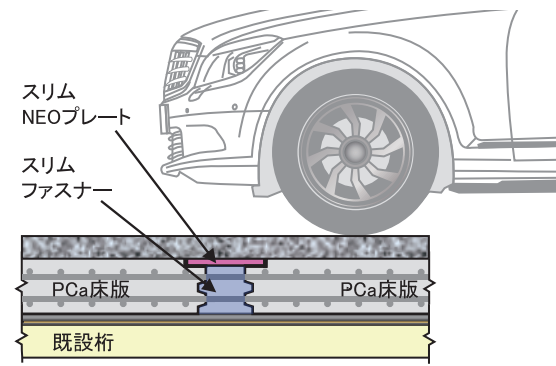


図7 DAYFREEにおける接合部の構造の概要

している区間では、できるだけ交通規制の期間を短縮する必要があり、床版取替工事の課題となっている。

5-2. DAYFREEの概要

早期に交通解放を行うために、交通量が比較的に少ない夜間に1車線のみを規制して工事を行い、交通量の多い昼間は交通開放できるDAYFREEを開発した⁶⁾。床版取替工事における交通規制の概要を図6に示す。また、DAYFREEにおける接合部の構造の概要を図7に示す。交通荷重を支えるために、接合部の上部に設置する高強度で高靱性を有するスリムク

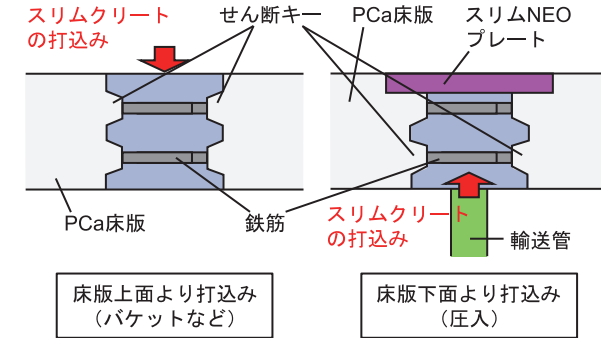


図8 接合部の施工方法の比較

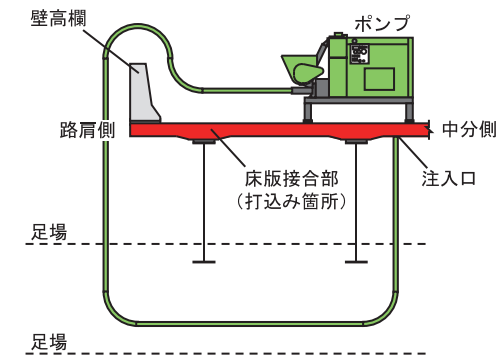


図9 接合部への圧送における施工の概要

リート製の平板「スリムNEOプレート[®]」を開発した。スリムNEOプレートを設置して交通開放した後、床版下面から接合部へスリムクリートを圧送して充填することで、長期的な安全性や耐久性を確保する。なお、PCa床版にスリムトップを用いることも可能である。

接合部の施工方法の比較を図8に示す。また、接合部への圧送による施工の概要を図9に示す。床版上にポンプを設置し、壁高欄を超えて床版の桁下空間まで配管し、床版の下面より圧送する。スリムクリートは、粉体量が極めて多く、高粘性の材料であるが、圧送条件を配慮することにより、数十mの距離を圧送することが可能である⁷⁾。

6. まとめ

高強度、高靱性および高耐久性を有する超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」を用いた道路橋床版のリニューアル技術（スリムファスナー、スリムトップ、DAYFREE）を紹介した。本技術の適用により、床版取替工事の課題となっていた①工期短縮、②床版の

耐久性の向上、③接合部の施工の省力化、④防水工の省略、および⑤交通規制期間の短縮が可能となる。社会インフラの維持管理や更新に要する費用が年々増大する中、これらのリニューアル技術は、道路橋の効率的な更新や長寿命化に大きく貢献できると考えられる。今後、老朽化が進む道路橋床版のリニューアル工事に積極的に適用・展開し、社会インフラ設備の良好な維持管理に貢献していく予定である。

【参考文献】

- 1) 長谷俊彦／高速道路橋における長寿命化の取組み，コンクリート工学，Vol. 57，pp. 329～334，2019.5
- 2) 土木学会／超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリー No. 10，2012.1
- 3) 土木学会／超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー，No.113，2004.9
- 4) 佐々木一成／急速施工を可能にしながら高い耐久性を発揮するプレキャスト床版接合法「スリムファスナー[®]」の開発，セメント・コンクリート，No.862，pp26～31，2018.12
- 5) 塩畑英俊他／防水層にUFCを用いた複合プレキャストPC床版の開発，コンクリート工学，Vol.59，No.7，pp574～581，2021.7
- 6) 岩城孝之他／夜間1車線規制下での床版取替工法の技術開発と施工－中央自動車道 弓振川橋床版取替工事－，橋梁と基礎，Vol.5，pp.21～25，2021.5
- 7) 川西貴士他／超高強度繊維補強コンクリートの圧送性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.179～184，2021.6

RC柱部材の軸方向鉄筋に フレア溶接継手を配置して復旧した 鉄道RCラーメン橋台について

The restoration of railway RC rigid frame abutment by jointing the axial rebar of the column members with flare welded

飯塚 大介 田附 伸一 倉岡 希樹 小林 將志

1. はじめに

2022年福島県沖地震により、東北新幹線の第1小坂街道架道橋は図1に示すように、鉄筋コンクリート(以下、RCと呼ぶ)ラーメン橋台の柱部材が損傷および傾斜し、桁受け部が沈下する被害を生じた。復旧工事は、新幹線の早期運転再開を念頭に損傷の少ない部材をなるべく活かす方針とし、損傷範囲の軸方向鉄筋はフレア溶接継手を用いて復旧した。

塑性ヒンジ区間の軸方向鉄筋には継手を設けないのが一般的であるが、RC柱試験体の実験的検討等の既往研究から、塑性ヒンジ区間近傍における軸方向鉄筋にフレア溶接継手を用いたRC柱部材の変形性能を



図1 地震直後におけるRCラーメン橋台の損傷状況

確認した上で適用したものである。

本稿は、これらの既往研究について概説するとともに、2022年福島県沖地震で被災した鉄道RCラーメン橋台の復旧について報告するものである。

2. 地震で損傷した構造物の損傷状況と 復旧方法の検討

第1小坂街道架道橋では、地震により下層柱下端部が損傷し、桁受け部が沈下した。本章では、損傷した構造物の概要に加え、軸方向鉄筋でのフレア溶接継手の適用性について述べる。

2-1. 損傷した構造物の概要と損傷状況

東北新幹線福島・白石蔵王間にある第1小坂街道

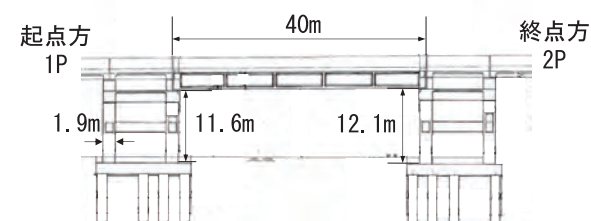


図2 第1小坂街道架道橋 構造一般図

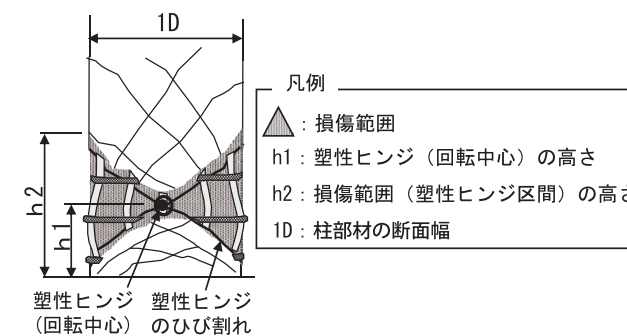


図3 交番载荷を受ける柱部材の損傷イメージ
[石橋ら⁴⁾の図に加筆]

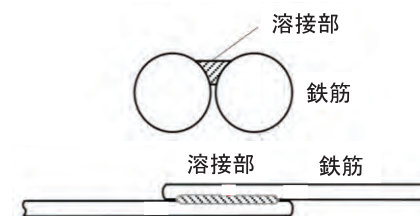


図4 フレア溶接継手の概念図

架道橋は、桁長40mの単純PC桁1連と2層式RCラーメン橋台2基で構成される架道橋である。橋台高さ(フーチング上端～桁座上面)は、1Pが11.6m、2Pが12.1mであり、RC柱部材の断面寸法は1.4m×1.9mである。軸方向鉄筋はD32を線路方向は1段、線路直角方向は2段で配置している。本構造物は、RC場所打ち杭($\phi=1500\text{mm}$, $L=30\text{m}$)10本で支持される構造である。図2に構造一般図を、表1に構造諸元を示す。

当該構造物の下層柱は、曲げ破壊先行型の破壊形態であるものの耐震性能が低い部材であったため、耐震補強を計画していたが、2022年福島県沖地震発生時には耐震補強は未実施であった。2022年福島県沖地震により、図1のように1P橋台PC桁側の下層柱下

表1 第1小坂街道架道橋 構造諸元

線名	東北新幹線
駅間	福島・白石蔵王間
上部工形式	T型PC桁
支間	40m
製作年度	1977年12月
下部工形式	RCラーメン橋台
基礎形式	場所打ち杭($\Phi 1500$)

端部に損傷が集中し、軸方向鉄筋の変形や内部コンクリートの粉砕に伴って桁受け部が約400mm沈下した¹⁾。

2-2. 柱部材の塑性ヒンジ区間における鉄筋継手の適用性

曲げ破壊先行型のRC高架橋柱部材が地震により損傷する場合、曲げひび割れ発生後、図3のようにRC柱の端部で曲げひび割れが斜めひび割れに進展して交差し、その交点に塑性ヒンジ(以下、回転中心と呼ぶ)が形成され、損傷が卓越(以下、塑性ヒンジ区間と呼ぶ)していく。一般に、塑性ヒンジ区間の軸方向鉄筋に継手がある場合、継手の損傷により地震時変形性能が早期に低下する恐れがあるため、塑性ヒンジ区間の軸方向鉄筋には継手を設けないこととされている²⁾。

しかしながら、軸方向鉄筋が2段配置された配筋の場合、鉄筋整正とガス圧接器具の設置が非常に困難となるため、損傷した範囲の鉄筋を現場で容易に接合する手法が求められる。

図4に示すフレア溶接継手は、現場で容易に接合作業ができるものの、溶接した鉄筋の軸線が一致しな



いづか だいすけ / IIZUKA Daisuke
東日本旅客鉄道(株) 構造技術センター
指導係



たつき しんいち / TATSUKI Shinichi
同上
マネージャー 博士(工学)



くらおか まれき / KURAOKA Mareki
同上
副長(チーフ)



こばやし まさし / KOBAYASHI Masashi
同上
ユニットリーダー 博士(工学)

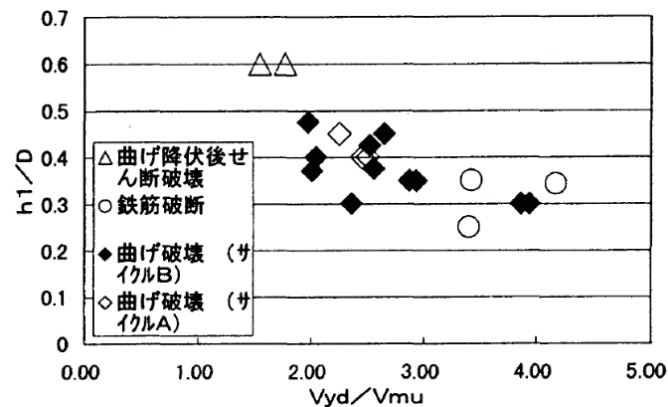


図5 h1/Dと耐力比の関係

という特徴がある。そのため、鉄筋に引張力が作用すると、く体の外縁のかぶりコンクリートにひび割れや剥離・剥落を助長する懸念があることから、他の継手と同様に、同一断面に集中して継手を設置しないこと等が定められている³⁾。

そこで、RC柱部材の耐力比と塑性ヒンジに関する既往研究⁴⁾を参考にしつつ、塑性ヒンジ近傍の軸方向鉄筋にフレア溶接継手を集中配置できないか既往研究⁵⁾により検討することとした。

3. 既往研究による復旧方針の検討

既往研究⁴⁾では、RC柱部材の耐力比と損傷範囲の関係性について実験的に明らかにしている。また、最新研究⁵⁾では、塑性ヒンジ区間端部の軸方向鉄筋にフレア溶接継手を配置した試験体を用いて、損傷状況と変形性能について実験的に検証を行っている。

本章では、フレア溶接継手を用いた復旧方針を策定するにあたり、参考とした既往研究の知見を概説し、それを元に策定した復旧方針の概要を述べる。

3-1. 柱部材の地震時損傷範囲と継手を配置できる範囲の検討

石橋ら⁴⁾は、正負交番載荷実験により、RC柱部材をじん性率10程度以上の領域まで変形させ、RC柱部材の損傷範囲との関係を検討している。その結果、図5に示すように、耐力比(V_{yd}/V_{mu} , V_{yd} :せん

断耐力, V_{mu} :曲げ耐力に達するときのせん断力)と柱部材の断面幅1Dに対する回転中心の高さの比 $h1/D$ は負の相関が見られた⁴⁾。また、図5より、耐力比が1.5以上の場合においては $h1/D$ が0.25 ~ 0.6となっており、1Dの半分程度の高さに回転中心が形成され、変形が進むにつれて、回転中心付近を起点にかぶりコンクリートの剥落や鉄筋のはらみ出しが生じる。以上より、耐力比の増加に伴って、コンクリートの損傷が柱端部に集中し、塑性ヒンジ区間の高さが1D程度となることが明らかとなった。

3-2. 塑性ヒンジ区間にフレア溶接継手を用いた場合の実験的検証

醍醐ら⁵⁾は、RCラーメン高架橋の柱部材を対象として、フレア溶接継手を軸方向鉄筋の同一断面に配置した試験体を用いて、正負交番載荷試験により、損傷状況および変形性能の確認を行っている。

図6にNo.1, No.2試験体の概要図を示す(以下、醍醐らの実験⁵⁾における1D-2, 2D-2試験体を、それぞれNo.1, No.2試験体と呼ぶ)。試験パラメータはフレア溶接継手位置であり、No.1試験体とNo.2試験体のフーチング上面から継手中心までの距離は、それぞれ100mm (0.2D), 600mm (1.2D)としている。各試験体の耐力比は1.6程度である。

図7に載荷終了後にかぶりコンクリートの脆弱部を撤去した各試験体の損傷状況と回転中心の高さ $h1$ を示す。フレア溶接継手位置付近の損傷状況について、

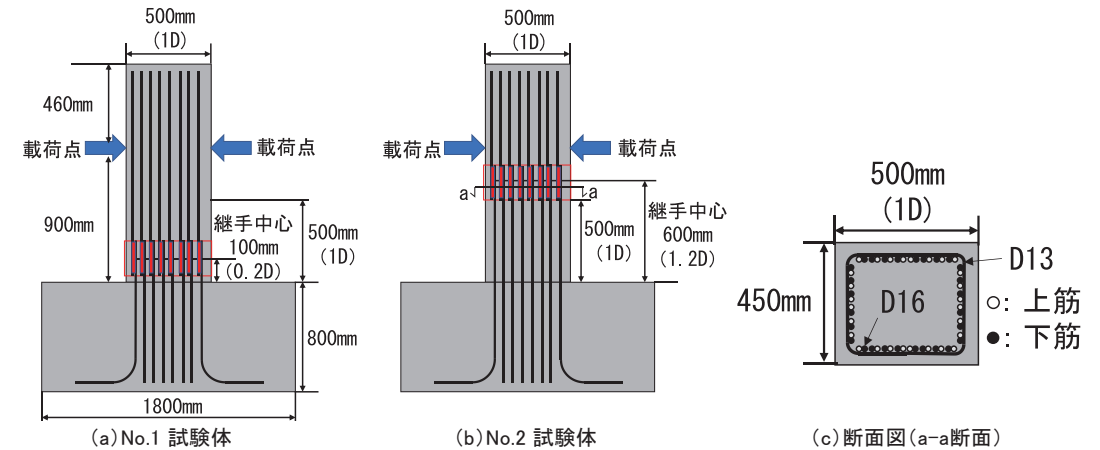


図6 試験体の概要図

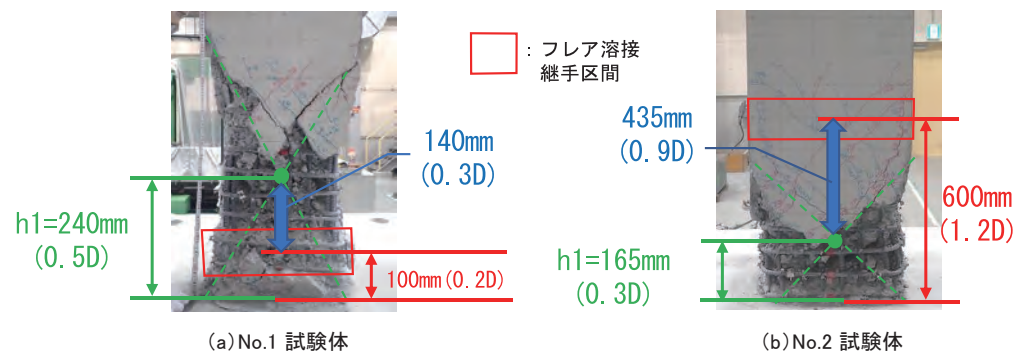


図7 載荷終了後の試験体の損傷状況と回転中心の高さ $h1$

[醍醐ら⁵⁾の図に加筆]

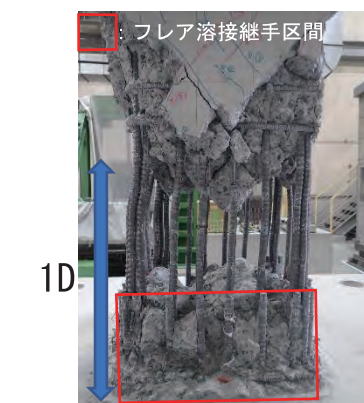


図8 載荷終了後におけるNo.1試験体の軸方向鉄筋の状況

No.1試験体では、かぶりコンクリートが剥落したものの、軸方向鉄筋内部のコアコンクリートは細粒化していなかった。

一方、No.2試験体ではコンクリートにひび割れが生じる程度で、かぶりコンクリートの剥落は見られなかった。No.1試験体では、回転中心の高さ $h1$ が240mm (0.5D)で、フレア溶接継手中心の高さとは140mm (0.3D)の離

隔があるのに対し、No.2試験体では、回転中心の高さ $h1$ が165mm (0.3D)で、フレア溶接継手中心の高さとは435mm (0.9D)の離隔があった。

各試験体の耐力比が1.6程度であるため、図5から、回転中心の高さ $h1$ が0.6D程度になると推定されるが、醍醐らの実験結果は石橋らの実験結果と比べ、回転中心の高さ $h1$ が低い結果となった。これは、フレア溶接継手位置の軸方向鉄筋の剛性が大きくなったことにより、回転中心の高さ $h1$ が変化したものと考えられる。

図8に載荷終了後におけるNo.1試験体の軸方向鉄筋の状況を示す。No.1試験体のフレア溶接継手は、割れ等の損傷が見られず、健全な状態を保持していた。フレア溶接継手位置の軸方向鉄筋の剛性が大きいことで、回転中心の高さ $h1$ とフレア溶接継手中心の高さに0.3D程度の離隔が生じたことと、フーチング近傍の柱下端部にフレア溶接継手を配置したことで、軸方向鉄筋に座屈等の変形が生じなかったことによるもの

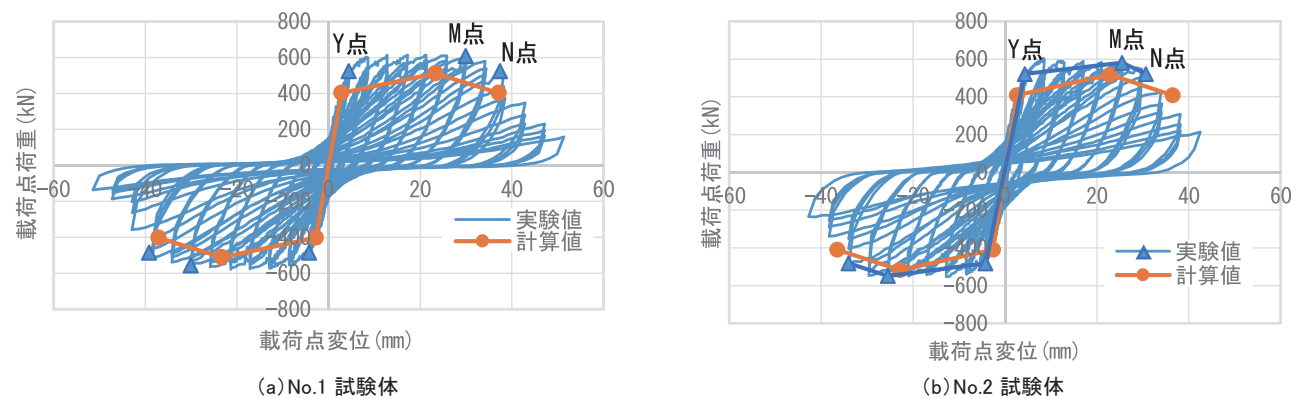


図9 荷重－変位関係

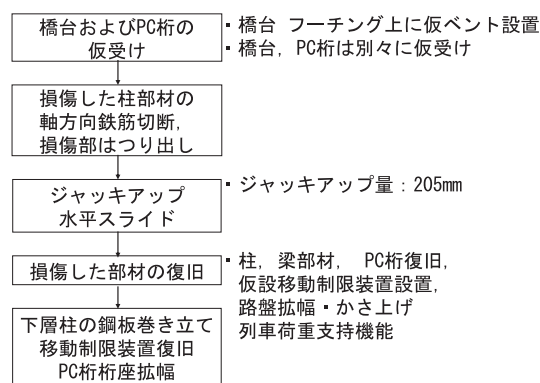


図10 主な復旧工事の施工ステップ

と考えられる。また、No.2 試験体もフレア溶接継手自体の変形や損傷は見られず、健全な状態であった。

図9に各試験体の荷重－変位関係を示す。図中の丸印と三角形のプロットは、それぞれ耐震標準⁶⁾により算出した各試験体のY点(降伏荷重)、M点(最大荷重)、N点(降伏荷重を維持する荷重)の計算値と実験値を示しており、実験値が計算値を上回る結果であった。

以上より、今回の実験範囲では、塑性ヒンジ区間の上下端の同一断面にフレア溶接継手を配置しても、軸方向鉄筋が十分に定着された場合は耐震標準と同等以上の変形性能を有することを確認した。

3-3. フレア溶接継手を用いた復旧方針

石橋ら⁴⁾および醍醐ら⁵⁾の知見を踏まえ、十分な変形性能がある場合に、回転中心の高さ h_1 とフレア溶接継手中心の高さに0.3D程度の離隔を確保すれば、RC柱部材は十分な変形性能を発揮できると判断し、第1小坂街道架道橋の復旧工事では、軸方向鉄筋の

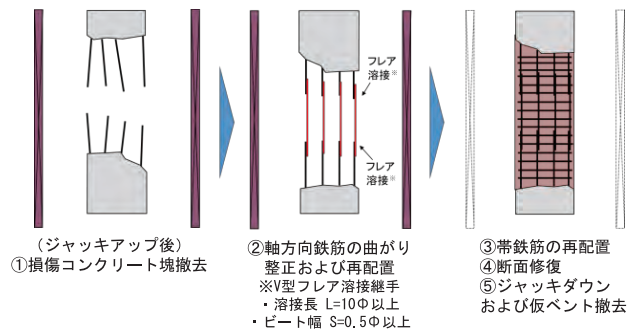


図11 ジャッキアップ後における RC柱部材の復旧手順の概要

接合にフレア溶接継手を適用することとした。

4. 損傷した構造物の復旧計画および工事

4-1. 復旧計画

第1小坂街道架道橋の1P橋台は、2-1.で述べた下層柱下端部の損傷により、橋台全体の沈下が生じた。復旧には、梁部材等に新たな損傷が生じない範囲で、可能な限りジャッキアップにより1P橋台を所定の高さへ戻した後、損傷した部材の補修を行い、列車荷重を支持させる計画とした。図10に主な復旧工事の施工ステップを示す。

4-2. 復旧工事

図11にRC柱部材の復旧手順の概要を示す。復旧工事では、2.および3.での検討結果を元に、損傷したコアコンクリートを取り除いた上で、軸方向鉄筋を再配置し、フレア溶接継手により接合した。図12にフレア溶接継手位置と回転中心の高さ h_1 を示す。帯鉄

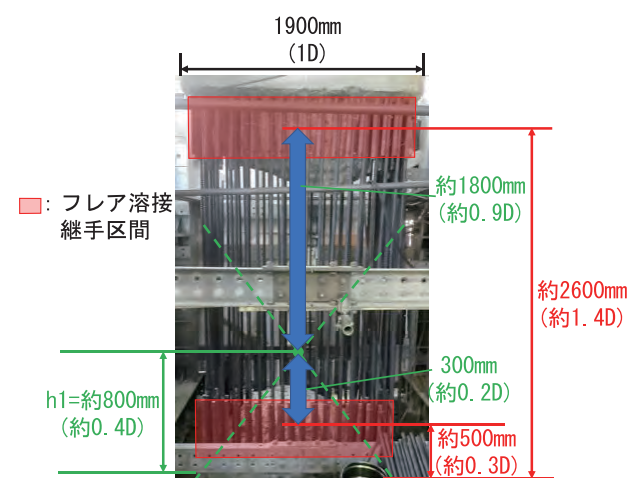


図12 フレア溶接継手位置と回転中心の高さ h_1



写真1 RC柱部材の復旧状況



写真2 鋼板巻き立て耐震補強完了状況

筋は、D22を75mmピッチで配置して、復旧後のRC柱部材の耐力比を2程度にした。石橋ら⁴⁾の知見を用いて回転中心の高さ h_1 を推定すると800mm (0.4D) 付近となる。そこで、軸方向鉄筋のフレア溶接継手位置は、回転中心から下方に0.2Dと上方に0.9D付近に配置することとした。

写真1にRC柱部材の復旧完了の状況を示す。下層柱の復旧工事完了後は、恒久対策として鋼板巻き立て耐震補強(鋼板の厚さ地上部 $t=12\text{mm}$ 、地中部 $t=14\text{mm}$)を実施した。写真2に耐震補強完了後の状況を示す。なお、RC柱部材の復旧工事は、昼夜作業により地震発生から24日間で完了することができた¹⁾。

5. おわりに

塑性ヒンジにおける軸方向鉄筋の中心を避けるようにフレア溶接継手を適用したRCラーメン橋台の復旧事

【参考文献】

- 清水達哉他／2022年福島県沖地震とコンクリート被害、セメント・コンクリート、No.913、pp.14～21、2023
- 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、鉄道総合技術研究所編、pp.252～254、2004.4
- 土木学会／コンクリートライブラリー 156 鉄筋定着・継手指針 [2020年版]、pp.141、2020.3
- 石橋忠良他／大変形正負交番載荷を受けるRC柱の損傷状況及び補修効果に関する実験的研究、土木学会論文集、No.648/V-47、pp.55～69、2000.5
- 醍醐宏治他／フレア溶接継手により軸方向鉄筋を接合した柱の正負交番載荷試験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.43、No.2、pp.493～498、2021.6
- 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、鉄道総合技術研究所編、pp.288～291、2012.9

成熟の季節

小津安二郎

コロナ禍以降映画館ではあまり映画を見なかった。「ボヘミアン・ラプソディー (2018)」を見ての次は「名探偵ポアロ：ベネチアの亡霊 (2023)」だったと思う。近年は、BS放送等で映画を見ることも多く、「ボヘミアン・ラプソディー」はテレビでも見た。やはり映画館で大画面に見入る方がはるかに強く魅了される。しかし今、熟年層が見て深く味わい楽しめる映画はあまり多くはないように思う。

このところ映画監督の小津安二郎にかかわる本を見かけることが多く、その作品もテレビでよく見られた。生誕120年ということだったらしい。小津は熟年が見て納得する映画を作った代表的な監督であろう。小津は1957年イギリスできわめて高く評価され、それから6年後にはフランスで発見された(?)と言われる。私が1991年にイギリスに留学した時に、BBCテレビで最初に見た日本映画が小津の「東京物語」であったことは何処かで書いた覚えがある。それから30年以上たった今でも海外特にヨーロッパで高く評価されているようである。

小津の言葉に、「なんでもないことは流行に従う。重大なことは道徳に従う。芸術のことは自分に従う。」というものがあった。このように言い切れることは幸せであろうと思う。小津は60歳の誕生日に亡くなっている。そのころの60歳は今では70歳以上に相当するのだろうかと思うが、現在74歳の私には、小津のこの言葉は若気の至りであったようにも思える。

小津には好みの俳優がいて、笠智衆、原節子、杉村春子などが典型なのであろう。「麦秋」や「東

京物語」で見られる東山千栄子も一種好みの俳優だったのかもしれない。東山は貴族院議員の父親を持ち、18歳で貿易商と結婚しロシアでの暮らしが長かったという異色の経歴で、アバンギャルド臭をぶんぶんと発散していた筈の築地小劇場に36歳で入っているが、ふくよかな容姿で知られる。

マリー・ローランサン

ふくよかと言えばふくよかな魔法というキャッチ・コピーで知られる画家フェルナンド・ボテロがいる。モナ・リザ、聖職者たち、聖母子像やサーカス風景などふくよかさのオンパレードである。しかし、過剰なふくよかさには考えさせられるものがあり、豊かさとともに過剰性の恐ろしさを思い知らされるようにも思う。

京都の京セラ美術館では昨年、ボテロ展の後、マリー・ローランサンとモードに関する展覧会が開催された。ローランサン生誕140年ということだったらしい。小津よりは少し上の世代である。アーネスト・ヘミングウェイも生きていた、狂乱の時代と言われる1920年代のパリを二人とも駆け抜けている。ローランサンの絵は一見いわゆる女の子らしいやわらかな絵だが、近くで見ると骨格や影の付け方が鋭い。こうでなければ長く愛されはしなかっただろうと思った。世界で唯一のローランサン専門の美術館は長野にあって、日本人の感覚はローランサン向きなのだろうと思う。

ローランサン展では、若き日のガブリエル、通称ココ・シャネルを描いた絵なども展示されていた。なお、シャネルは単なる服飾デザイナーではなく、文化・芸術活動に大枚の資金を提供して支援するメセナもしていたらしい。骨太なのである。シャネルとローランサンは同年生まれなのだが、シャネルが男性服の機能美を取り入れた服で女性の社会進出を声高に主張したように見えるのに対し、ローランサンは繊細優美なイメージで、一見対照的である。しかしローランサンも自立する女性の象徴ととらえられているらしい。それは絵を実際に見るとよくわかるような気がする。

学園紛争の頃

先程狂乱の時代と書いたが、狂乱の時代と言えば私の世代は1970年安保闘争の前後を思う。学園紛争が吹き荒れた時代であった。日本では、本格的には日本大学から始まった紛争は全国各地に広がり、闘争は世界的にも同時発生していった。フランスの学生街で発生したカルチュ・ラタン闘争を日本では百万遍に!などと京都大学では叫ばれた。大学ばかりではなく高校でも紛争は発生した。東京大学の安田講堂の占拠と機動隊による解放はテレビ中継され、あさま山荘事件につながって行った。結果として東京大学は入学試験がなかった。京都大学の紛争は私の入学前から始まったが、入学試験は行われた。

入学式は紛争の真ただ中であつた。入学式の日、当時の奥田東総長は時計台二階の式場に入ることができなかった。まともな講義は秋以降まで実質上は1年近く無く、そのようなときには講義を受けたくなり、自主講義などの名目で先生にお願いして講義してもらったりもした。講義が始まると今度はさっぱり講義には気が向かなくなってしまう。大学とは壁に貼り付けられたアジビラおびいitずら書きで校舎が飾られ、声高で単調なアジ演説が聞こえ、対話に見えて一方的で乱暴な言葉が飛び交うところだと思っていた。大学は経年劣化したのだと思った。経年優化するばよいのにと願った。

4回生になってからは土木紛争があり、「京都大学暴力黒書」,「全臨闘電気闘争裁判●起訴状・判決文・控訴趣意書,冒頭陳述書,弁論要旨・判決」などの資料を読んだ覚えがある。土木紛争そのものに関連するものではないが、はらはら時計や警察で尋問を受けた場合の心得のような資料もあったはずだ。あの時代にはずいぶん団交,団体交渉が行われた。土木系の最高会議に土木紛争関係者が乱入し、教室主任のI先生の頬をペタペタとなぶるのも見た。団交の中で強硬に反論する先生もおられたがそうでもない先生もおられた。いろいろな対応の仕方があることが分かった。デカンショ節の

一節“先生、先生と威張るな先生。先生生徒の成れの果て”と言う言葉が頭をよぎった。しかし、ほとんどの先生がご自分を持っておられたように見えた。私ならどう対応するかと考え込んだ。このことは後の私に大きな影響を与えた。

成熟のすすめ

いろんな場面に立ち会い、私自身は大人のつもりだったのだが、まだまだ子供だったようだ。今となつては恥ずかしい言動ばかりであつた。しかし、若さの中でそれらの言動が肥やしになって行ったように思える。若さはありがたいものである。全てを飲み込んでその後の成長に役立ててくれたのである。若さゆえの失敗は大いにみなさんやって欲しいものだ。ただし成熟の年を迎えることを前提としておいた方がよいのかもしれない。

成熟し老成した人間を良しとする儒教的な教えや亭主関白の考え方は明治以降の非(反)徳川的な流れの中で確立されたという話がある。私はどちらも徳川体制下に確立したシステムだと思っていたが、どうも必ずしもそうではないようなのである。儒教が世俗の原理として徳川社会を支配したようなことは無く、店主関白の例として知られる去り状・三行半は女性が今の亭主と分かれて自由に他の男性と結婚することができる必要な証明書として、女房が亭主に書かせたものであるとも言われる。もともとこれは成熟とは少々違う話題かもしれない。

種々の草木が色々な花を咲かせ多様な実を結ぶように、成熟は人によっていろいろな形をとるように思う。成熟することは煩わしい、未成熟を楽しもうと成熟を拒否する人もいるだろう。今の日本では個人の本来の成熟はあり得ないなどという人もいようである。しかし、やはり成熟は意味あるものだと思う。その人間的な結果である熟年が楽しめる成熟した文化が欲しく、またあるべきだろうと思っているのである。

【みやがわ とよあき／京都大学 名誉教授 工博】

CO₂排出量，廃棄物・副産物利用の 両側面を考慮したセメントの環境影響評価

Environmental impact assessment of cement considering both aspects of CO₂ emissions and the use of wastes and byproducts

河合 研至

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて，セメント・コンクリート分野においても，CO₂排出量の削減，CO₂回収，CO₂固定など，脱炭素化に向けた様々な研究・技術開発が進められている。

コンクリートにおけるCO₂排出量の削減では，混和材使用によるポルトランドセメント使用量の削減が代表的な取組みとなっており，CO₂排出量の多いポルトランドセメントを混和材で置換することによって，ほぼ置換率と同程度のCO₂排出量削減を達成できるとするものである。しかし，これはセメントの環境影響の一側面のみをとらえて行われる環境負荷低減策であり，ポルトランドセメントの使用量削減がセメント製造時における廃棄物・副産物使用量の低下につながることは念頭にない。

セメント産業におけるCO₂排出量は，国内総CO₂排出量の3～5%を占め，国内におけるCO₂排出の大きな一因となっている。しかしその一方で，セメント製造時における廃棄物・副産物利用量は，国内における資源循環量の10～11%を占めており，環境への負荷低減に大きな貢献をもたらしている。CO₂排出量の削減は，地球規模の喫緊の課題ではあるものの，国土の

狭隘なわが国では，逼迫した廃棄物処分場への負荷の削減も，極めて緊急性の高い重要な課題である。この両者を理解したうえで，本来は環境負荷低減策が講じられる必要がある。

環境影響は多面性を有しており，その多面的な影響を考慮したうえで環境負荷の低減策が検討されるべきものであるが，CO₂排出量以外の環境側面に関する情報が乏しいことならびに温室効果ガス削減の重要性が高いことから，環境負荷低減策の大半はCO₂排出量削減を意図したものとなっている。本研究の目的は，セメントの環境影響を，CO₂排出量の側面のみならず廃棄物・副産物利用といった資源循環の側面を考慮して評価できる指標を開発することにある。

環境影響は本来，ISOで規定されたライフサイクルアセスメント(LCA)に準拠して実施されるべきものであるが，性質の異なる複数の環境影響を統合化する具体的な手法をISOでは定めていない。そのため，様々な環境影響を総合して評価するための環境影響評価手法が各国で開発され実用化されているが，計算が煩雑であったり，時間や労力を要することから，セメント・コンクリート分野にてこれを活用した評価はほとんど行われていない。本研究で目指す指標は，セメントの環境影響を検討する際に，混和材の種類や量を変化させた場合に対して，手軽にわかりやすく計算が行えるものである。

なお，表題は，セメント協会より第31回(2017年度)

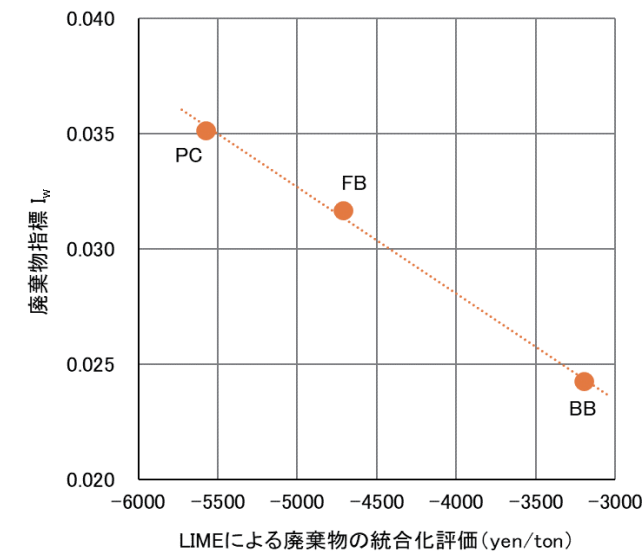


図1 各種セメントにおける廃棄物指標とLIMEによる
廃棄物の統合化評価との関係²⁾

セメント協会研究奨励金を交付いただき実施した研究課題である。本稿は，その概要と研究成果の一端，その後の展開と最新の状況を紹介するものであるが，研究成果の内容については本誌906号における解説記事¹⁾と重複する内容が多いため，重複する内容については簡潔に記している。あらかじめご了承くださいとともに，詳細については文献¹⁾を参照されたい。

2. 廃棄物・副産物利用の指標化

廃棄物・副産物利用の指標を検討するに当たっては，以下の点を考慮することとした。

(1) CO₂排出量，廃棄物・副産物利用量を統合するうえで，客観的妥当性があること。すなわち，セメント産業のみならず，資源循環への貢献度が高い他産業(鉄鋼業，製紙業等)に対しても適用可能な指標であること。

(2) 廃棄物・副産物利用量を検討するうえでは，リサイクルが困難な廃棄物・副産物ほど高い指標値が得られること。すなわち，単にリサイクル量を評価するのみならず，リサイクルの難易性をも加味した指標であること。

(3) 指標は簡易な式で表され，式の内容もわかりや

すいこと。

そして，検討を行った指標が次式で表されるものである。

$$I_w = \frac{\sum(\gamma_k \times w_k) - C_w}{U_v + U_r} \dots\dots\dots (1)$$

あるいは

$$I_w = \sum(\gamma_k \times w_k) - \sum(\gamma_j \times c_j) \dots\dots\dots (2)$$

ここで，

I_w : 廃棄物指標

γ_k, γ_j : リサイクル資源 k, j の未利用率

(小数, = $1 - R\%$ /100, $1 - R\%$ /100)

$Rk, R\%$: リサイクル資源 k, j のリサイクル率(%)

w_k : リサイクル資源 k の使用量(kg/t)

c_j : リサイクル資源 j の発生量(kg/t)

C_w : 廃棄物発生量(kg/t, = $\sum c_j$)

U_v : バージン資源使用量(kg/t)

U_r : リサイクル資源使用量(kg/t, = $\sum w_k$)

指標は，大きな数値を示すほど，評価が高いことを示すよう定義をしており，式(1)と式(2)で示される本質的な意味合いは同じである。資源の使用量を指標に反映させることが適切と判断したことから，各種セメントを用いた場合の検討では式(1)を用いていたが，指標の検討を他産業まで拡張するにあたり，式(1)の分子が負となってしまった場合には，評価の高低が式(1)の分子が正の場合とは逆転してしまうため，不都合が生じることとなった。そのため，他産業まで拡張した検討では，式(1)の分母は省略して式(2)を用いることとした。

式(1)を用いて各種セメントの評価を行った結果を，日本版被害算定型影響評価手法(LIME)により廃棄物の統合化評価を行った結果との比較で図1に示す。ここで検討に用いたセメントは，ポルトランドセメント(PC)，高炉セメントB種(BB，高炉スラグ混合率42.6%)，フライアッシュセメントB種(FB，フライアッシュ混合率15.5%)である。LIMEはLCA国家プロジェクトとしてわが国で開発された環境影響評価手法であ



かわい けんじ / KAWAI Kenji
広島大学
大学院先進理工系科学研究科
教授 工博

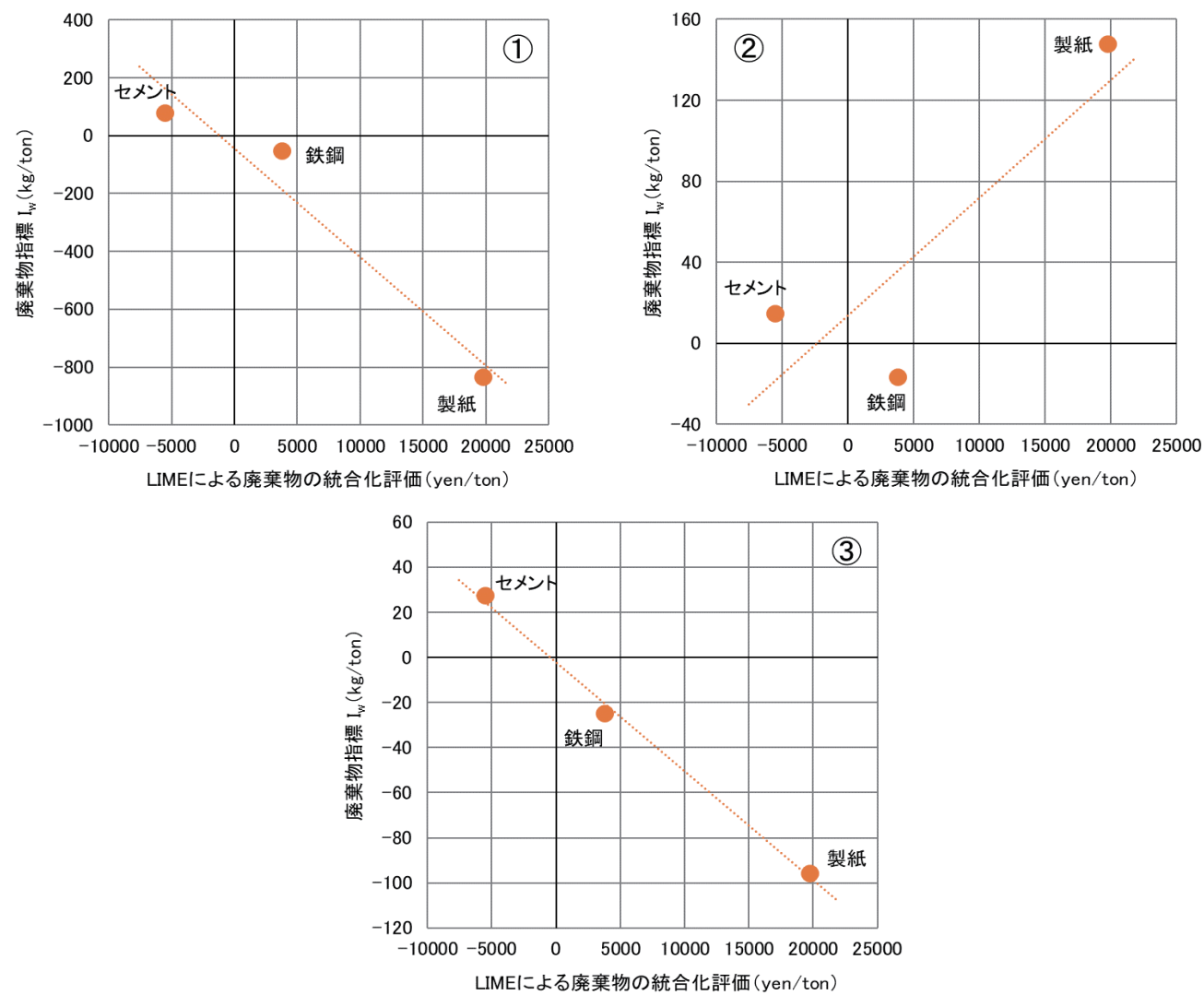


図2 各産業における廃棄物指標とLIMEによる廃棄物の統合化評価との比較³⁾

り、国内の環境事情や社会条件を考慮して、様々な環境被害を単一指標まで統合化することができる。LIMEによる統合化評価では、数値が大きいほど環境負荷が大きいことを示し、負の場合には環境貢献が大きいことを示す。図1でLIMEによる統合化評価の数値が負となっているのは、セメント製造時における廃棄物利用に伴う埋立回避が環境貢献とみなされているためである。この結果から、両者には高い相関があることが示され、式(1)で示される指標は、廃棄物・副産物利用を示す指標としての妥当性を有することがわかる。また、この結果から、廃棄物・副産物利用の観点からは、PC>FB>BBの順で環境への貢献が高いことが示された。

さらに、式(2)を用いて、セメント産業と同様に資源

循環への貢献度の高い鉄鋼業、製紙業に対して評価を行った結果を、LIMEにより廃棄物の統合化評価を行った結果との比較で図2に示す。図2として3つの図が示されているが、①、②、③ではリサイクル率の定義が異なり、それぞれリサイクル率を以下のように定義したものである。

$$\begin{aligned} \text{① リサイクル率 (\%)} &= \frac{\text{再生利用量}}{\text{再生利用量} + \text{減量化量} + \text{最終処分量}} \times 100 \\ \text{② リサイクル率 (\%)} &= \frac{\text{再生利用量} + \text{減量化量}}{\text{再生利用量} + \text{減量化量} + \text{最終処分量}} \times 100 \\ \text{③ リサイクル率 (\%)} &= \frac{\text{再生利用量}}{\text{再生利用量} + \text{最終処分量}} \times 100 \end{aligned}$$

図2に示されるように、リサイクル率の定義に関わらず、式(2)の評価値とLIMEによる評価値は、セメント

産業、鉄鋼業のそれぞれにおいて、同様の結果を与えている。すなわち、セメント産業では廃棄物・副産物利用が高く評価され、鉄鋼業では廃棄物・副産物利用の評価が低くなっている。これに対して、製紙業では、リサイクル率の定義によって評価結果が大きく異なる。これは、製紙業で廃棄物として多量に発生する汚泥の反映のさせ方が、評価値によって相違することに起因する。指標の検討にあたり考慮する点として挙げたように、指標はリサイクルの難易性を加味するものとすることを勘案すると、処理の困難性を高めてしまう減量化量を再生利用量と等価で考える②の定義や、減量化量を無視する③の定義は、趣旨に沿わない定義となってしまうものと思われる。このことから、本研究でのリサイクル率の定義に関しては、①の定義が妥当と思われる。この①を用いた結果では、セメント産業、鉄鋼業、製紙業の評価値に高い相関性が認められ、この結果から、廃棄物・副産物利用の観点からは、セメント産業>鉄鋼業>製紙業の順で環境への貢献が高いことが示された。なお、図1で示した結果でも、式(1)ではリサイクル率として①の定義を使用している。

以上の結果から、式(1)あるいは式(2)は、廃棄物・副産物利用の指標として考慮したい点を満足し、かつ、環境影響評価手法として汎用的に利用されているLIMEによる結果とも整合性の高い評価値を与える指標となっているものと判断される。

3. CO₂排出と廃棄物・副産物利用の統合化

続いて、前章で検討を行った廃棄物・副産物利用の指標とCO₂排出の統合化について検討を行った。複数の指標を統合化する場合、それぞれの指標の和を取る、あるいは、それぞれの指標の比で示すことが方法として考えられるが、ここでは和を取ることにによる統合化を検討した。C

$$I = -wg \cdot IG + ww \cdot IW \cdots \cdots (3)$$

ここで、

I : 統合化指標

Gwg : CO₂排出に関する指標に対する重み

IG : CO₂排出に関する指標

ww : 廃棄物指標に対する重み

Iw : 廃棄物指標

なお、単純化して検討するため、CO₂排出に関する指標には、CO₂排出量そのものを用いることとした。また、式(3)では、環境貢献となる場合を正、環境負荷となる場合を負として表している。ただし、それぞれの指標に対して、正で大きな値となるほど環境貢献が大きい、負に大きな値となるほど環境負荷が大きいといった、定性的な意味を持たせることは可能であるが、数値の絶対値そのものに定量的な意味合いを持たせて指標化することは非常に難しい。そこで、何らかの基準を設定して統合化を試みることとし、ポルトランドセメントの環境影響を基準とした重み付けを行うこととした。C

$$wg = wg, PC / IG, PC \cdots \cdots (4) \quad C$$

$$ww = ww, PC / Iw, PC \cdots \cdots (5)$$

ここで、

wG, PC : ポルトランドセメントのCO₂排出に関する指標に対する重み

IG, PC : ポルトランドセメントのCO₂排出に関する指標

wI, PC : ポルトランドセメントの廃棄物指標に対する重み

Iw, PC : ポルトランドセメントの廃棄物指標

そして、この重みの wG, PC 、 wI, PC として、以下の3つのケースについて、各種セメントを対象とした試算を行った。C

$$\text{① } wg, PC = 1, \quad wI, PC = 1C$$

$$\begin{aligned} \text{② } wg, PC &= \text{セメント産業のCO}_2\text{排出量} / \text{国内のCO}_2\text{排出量} \times 100 (=3.102), \quad C \\ ww, PC &= \text{セメント産業のリサイクル資源使用量} / \text{国内の資源循環量} \times 100 (=11.39) \quad C \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{③ } wg, PC &= \text{LIMEの統合化係数(CO}_2\text{)} \times \text{CO}_2\text{排出原単位(PC)} (=1780), \quad C \\ ww, PC &= \text{LIMEの統合化係数(産業廃棄物(ばいじん))} \times \text{リサイクル資源の使用原単位(PC)} (=5823) \end{aligned}$$

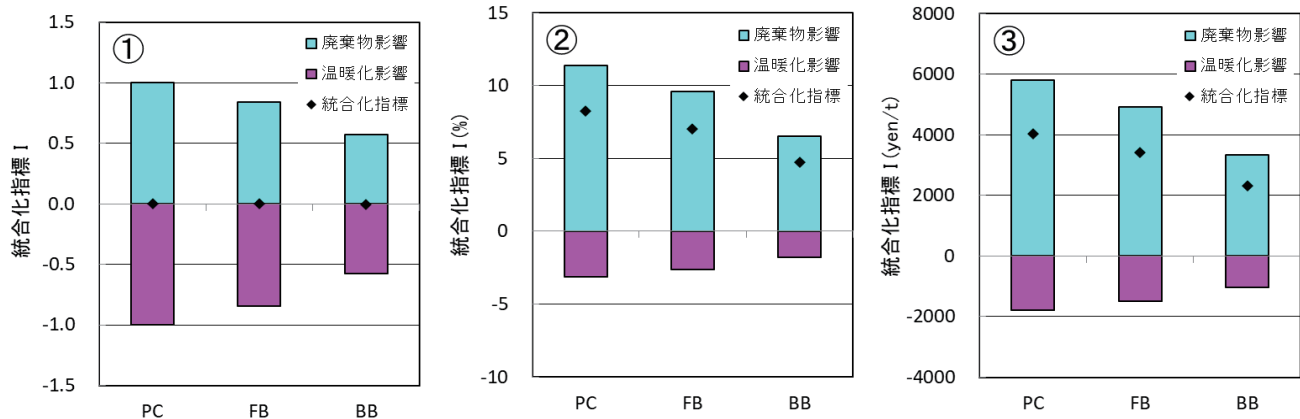


図3 異なる重み付けによる統合化指標の比較⁴⁾

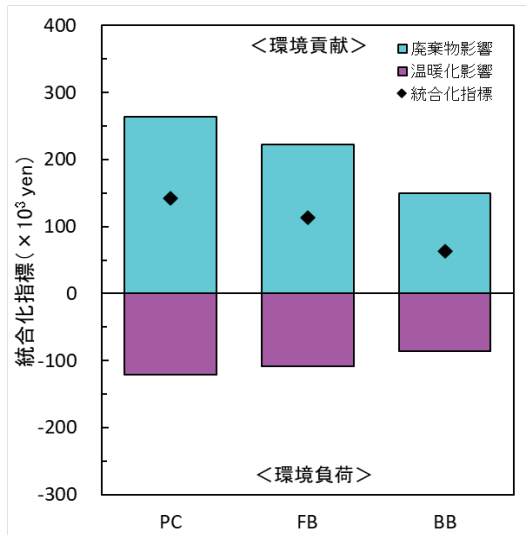


図4 提案指標によるモデル橋梁の統合化結果⁶⁾

PC, BB, FBに関する試算結果を図3に示す。図中の廃棄物影響は $w_w \cdot I_w$ を、温暖化影響は $w_g \cdot I_g$ を表している。①では、重み付けがポルトランドセメントの環境影響を基準としていることから、各セメントの廃棄物影響、温暖化影響は符号の異なる同じ数値を与えることとなり、その結果としていずれのセメントの統合化指標も0となった。②、③では、廃棄物指標が温暖化指標よりも大きな値を示し、統合化指標は正の値となり、PC>FB>BBの順で高い値を示す結果となった。これらの結果は、LIMEを用いた環境影響評価に関する既往の研究結果²⁾と整合する結果を示しており、②や③による重み付けを行う統合化は、ある程度の妥当性を有することが示唆された。

そこで、③の重み付けを用いた統合化を、橋梁の環境影響評価に対して適用した。複数の材料を用い

た場合の統合化は、以下のとおり行った。

$$I_s = \sum (m_i \cdot I_i) \dots \dots \dots (6)$$

$$= \sum \{m_i \cdot (-w_g \cdot I_{g,i} + w_w \cdot I_{w,i})\} \dots \dots \dots (7)$$

$$= -w_g \cdot \sum (m_i \cdot I_{g,i}) + w_w \cdot \sum (m_i \cdot I_{w,i}) \dots \dots (8)$$

ここで、

I_s : 構造物の統合化指標

C_{mi} : 材料*i*の使用量

I_i : 材料*i*の統合化指標

$I_{g,i}$: 材料*i*のCO₂排出に関する指標

$I_{w,i}$: 材料*i*の廃棄物指標

モデル橋梁は、武者らの報告⁵⁾で酒田みらい橋との構造形式比較として掲載された、設計基準強度40N/mm²、スパン長50m、3径間の鉄筋コンクリート箱桁橋で、上部工の材料のみを評価の範囲として、セメントの種類をPC, BB, FBに変化させた場合について検討した。配合の設定等の詳細は文献⁶⁾を参照されたい。

モデル橋梁について統合化を行った結果を図4に示す。統合化指標は、いずれのセメント種類でも正、すなわち、環境貢献が環境負荷を上回る結果となり、PC>FB>BBの順で大きな値を示す結果となった。使用材料の中でも、骨材や鉄筋の使用量はそれぞれのセメント種類でほとんど変わらないため、セメントの種類による影響がそのまま反映された結果となっている。

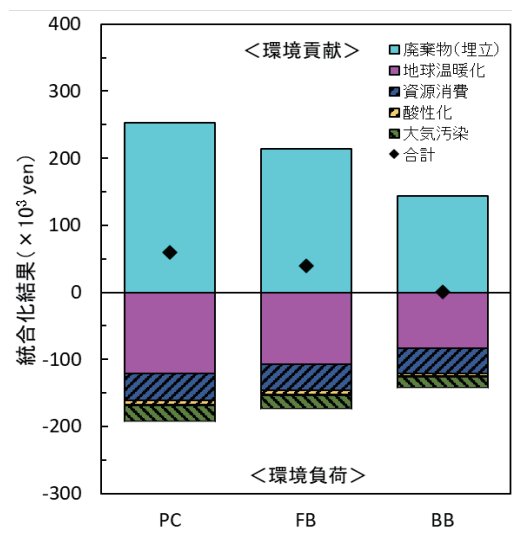


図5 LIMEによるモデル橋梁の統合化結果⁶⁾

比較として、同様の検討をLIMEにより行った結果を図5に示す。ここでは、図4との比較をわかりやすくするため、前章とは異なり環境貢献を正、環境負荷を負として示している。環境負荷をもたらす環境影響では、地球温暖化による負荷が最も大きく、次いで資源消費、大気汚染、酸性化の順となっている。廃棄物活用による環境貢献と環境負荷を合計した統合評価値では、いずれもプラスの値となったが、BBでは0に近い値である。ここでの環境影響評価は材料に対してのみ行っているものではあるものの、結果として、構造物の環境影響評価では、セメントによる廃棄物利用によってもたらされる環境貢献が、大きく寄与していることを示している。

本研究での提案指標による結果とLIMEによる結果を比較して図6に示す。両者には高い相関性が認められ、特に廃棄物影響、温暖化影響での相関性は、両者ではほぼ一致するものとなっている。統合値において、高い相関性が認められるもののLIMEによる統合化評価の数値が提案指標での統合値よりも小さくなっているのは、提案指標が廃棄物・副産物と地球温暖化のみを対象として指標化を行っているのに対して、LIMEでは資源消費、大気汚染、酸性化など他の多くの環境影響が考慮されているためである。

以上の結果より、廃棄物・副産物利用の指標と

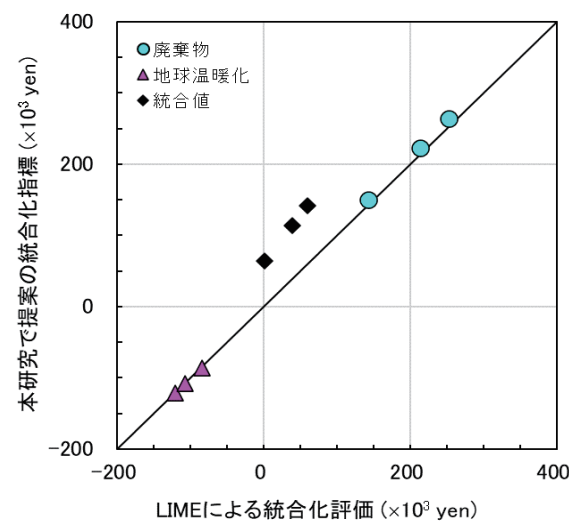


図6 提案指標とLIMEによる結果の比較⁶⁾

CO₂排出に関する指標の和を取り、それぞれの指標に適切な重み付けを行うことで、汎用的に利用されている環境影響評価手法と整合性の高い結果を得ることができることが示された。

4. おわりに

本研究では、セメントのCO₂排出量が多いといった環境負荷の側面のみではなく、廃棄物・副産物利用量が多いといった資源循環に資する環境貢献の側面をもあわせて評価できる指標を開発することを目的として、CO₂排出量、廃棄物・副産物利用の両側面を考慮したセメントの環境影響評価について検討を行った。その結果、廃棄物・副産物利用に関する指標では、廃棄物・副産物のリサイクルにおける難易性(処理困難さ)をリサイクル率によって示すことにより、汎用的に用いられている環境影響評価手法と整合性のある結果を得ることができた。さらに、この廃棄物・副産物利用に関する指標とCO₂排出に関する指標に対して、それぞれ適切な重み付けを行い和を取ることで、汎用的に用いられている環境影響評価手法と整合性のある結果を得ることができ、構造物に対しても適用可能であることが示唆された。

このことは、本研究の手法が廃棄物・副産物利用

セメント・コンクリート論文集 Vol.78（2024年度） 論文募集のご案内

一般社団法人セメント協会

セメント協会では、セメント・コンクリート論文集 Vol.78（2024年度）に掲載するための論文を募集いたします。「セメント・コンクリート論文集投稿要領」および「セメント・コンクリート論文集原稿執筆要領」をご高覧のうえ、ふるってご応募ください。

● 1. 論文の申込み

1. 1 申込み方法

セメント協会ホームページの「イベント・募集」>>募集「セメント・コンクリート論文集」>>募集要項から論文申込み（下記 URL）の申込みフォームに必要事項すべてを明記のうえ、締切日までにお申込ください。C

<https://req.qubo.jp/jcalab/form/S0A3d6NW>

1. 2 提出原稿

査読原稿の PDF ファイル
（「原稿執筆要領」および「投稿要領」をご参照ください）

● 2. 論文投稿受付期間 2024年4月1日(月)～5月31日(金)17時（厳守）

● 3. 公開までのスケジュール（予定）

- 1) 申込みの送信：5月31日（金）17時まで
- 2) 申込み受理の通知：申込み後、数日以内
- 3) 審査番号の通知：6月3日～4日
- 4) 原稿（PDF ファイル）の提出：審査番号通知から3日以内
- 5) 査読：6月下旬～8月下旬
- 6) 1次審査結果の通知：9月下旬
- 7) 著者の審査結果に対する応答（修正原稿の提出）：10月中旬～11月上旬
- 8) 2次審査結果の通知：11月中旬
- 9) 版下原稿の著者校正：版下原稿到着より2週間以内
- 10) 公開：2025年3月

● 4. 投稿のための費用 無料

● 5. 論文賞の授与

セメント・コンクリート論文集（過去2ヵ年）に掲載された論文の中から特に優秀と認めた論文に対し、『セメント協会論文賞』を授与いたします。C

● 6. セメント・コンクリート論文集の公開

採択された論文は、国立研究開発法人科学技術振興機構の J-STAGE および当協会ホームページの論文検索サービスより公開いたします。C

● 7. 問合せ先（事務局）

〒114-0003 東京都北区豊島4丁目17番33号
一般社団法人セメント協会 研究所 技術情報グループ
TEL：03-3914-2692 E-mail：jca_event@jcassoc.or.jp

投稿要領、原稿執筆要領はセメント協会ホームページに掲載していますのでご確認ください。

やCO₂排出以外の環境側面に対しても拡張可能であることを示すものであると思われる。ただし、その場合には、それぞれの環境側面に対して適切な重み付けを行うことが必要となり、考慮する環境側面を増やしていけば、指標の複雑さや煩雑さは増していくことになる。

また、ここで用いた汎用的な環境影響評価手法では、国内の環境条件が考慮されているため、廃棄物の資源化(埋立回避)が高く評価されるものとなっている。したがって、本研究で開発した指標においても、廃棄物・副産物利用が非常に高く評価される指標となっている。本文中で示したように、構造物の環境影響評価において、総合的な評価結果が環境貢献をもたらすことを示すということは、構造物を建造すればするほど環境貢献がもたらされるとも解釈ができる。しかし現実には、コスト面からの制約が生じることから、環境側面に対する検討とあわせてコストの検討を行う必要があることになる。誌面の制約からここでは紹介でき

ないが、環境側面とコスト面をあわせた評価についても検討を行っており、詳細は文献⁷⁾を参照いただきたい。

【参考文献】

- 1) 河合研至／セメント製造における廃棄物・副産物の資源化を表す環境指標、セメント・コンクリート、No.906、pp.2～9、2022
- 2) 星野清一、河合研至、久保田修、平尾宙／セメントの廃棄物・副産物の資源化を表す環境指標による各種セメントの評価、セメント・コンクリート論文集、Vol.69、pp.679～686、2016
- 3) 柴崎悠吾、河合研至、桐野裕介、新見龍男／廃棄物・副産物の資源化を表す環境指標による資源循環型産業の評価、セメント・コンクリート論文集、Vol.73、pp.394～400、2020
- 4) 桐野裕介、河合研至、平尾宙、新見龍男／セメントのリサイクル資源活用を考慮した環境影響評価(その2)廃棄物活用とCO₂排出の統合化手法の検討、第72回セメント技術大会講演要旨、pp.130～131、2018
- 5) 武者浩透、田中良弘、大竹明朗／ダクトルを用いた橋梁建設技術の開発—ダクトルPC橋梁の計画から施工まで—、大成建設技術センター報、No.37、pp.22-1～22-8、2004
- 6) 桐野裕介、新見龍男、星野清一、河合研至／廃棄物・副産物活用およびCO₂排出を考慮した環境指標による橋梁の評価、セメント・コンクリート論文集、Vol.72、pp.352～358、2019
- 7) 新見龍男、桐野裕介、加藤弘義、河合研至／環境と経済の両側面を考慮したセメントおよびコンクリートの評価、日本建築学会構造系論文集、Vol.86、No.788、pp.1391～1399、2021

わたしたちの暮らしのサポーター

セメント

安全で快適な暮らしを支えています。

日々の生活の安心・安全を支え、省エネ、省資源で環境貢献をしているセメント産業について、一般・小・中学生向けにわかりやすく解説したパンフレットを作成しています。

大人から子供たちまで、あらゆる世代の方々にご理解いただける内容です。ご希望の方には無料でお届けいたします。申込みは部数と送付先を明記の上、下記までファクスでお申込み下さい。

(一社)セメント協会

広報部門 FAX 03-5540-6181



【おもな内容】セメントって知ってる？／みんなの安全なくらしを守るコンクリート！／みんなの身のまわりにあるセメント・コンクリート／セメントができるまで／世界トップクラスの省エネ技術！／廃棄物をセメントの原料に！／セメント工場が無かったら日本はゴミの山！？／未来を守るセメント工場

ジオポリマーを含むアルカリ活性材料

Alkali-active materials including geopolymer

一宮 一夫

1. はじめに

高炉スラグ微粉末（以下、BSと称す）ベースのアルカリ活性材料（以下、AAMと称す）についての先駆的な研究としてPurdonの研究が知られている¹⁾。1970年代になりフランスの化学者Davidovitsによってアルミナシリカ粉末とアルカリシリカ溶液の反応によって生成される硬化体であるジオポリマー（以下、GPと称す）が提唱された²⁾。現在、建設分野で研究対象となっているGPは、フライアッシュ（以下、FAと称す）を基本とし、強度増進のためにその一部をBSで置換したFA-BS併用タイプが主流である。低炭素、各種副産物の有効利用に加えて、強酸、高温に対する抵抗性に優れ、重金属やセシウムなどの有害物質固定能力を有する。

図1にGPを含むアルカリ活性材料（以下、AAMsと称す）の研究の国内外のトピックスを示した。上段はRILEM（国際材料構造試験研究機関・専門家連合）における研究委員会である。活動開始はDavidovitsの研究発表から27年後で、製造・基礎物性（AAM）、耐久性（DTA）、塩化物イオンによる鋼材腐食性（CAM）、機械的特性（MPA）などについて情報整理

が行われた。中段はわが国の場合で、RILEMの活動開始から7年遅れて2014年にJCI九州で研究委員会*が立ち上がった。その後は、JCI(TC155A)**、土木学会で2件（以下、361委員会***、233委員会****と称す）の研究委員会が活動した。わが国でのGP研究はインフラに関する重大事故とも関連している。2011年の福島原発事故に伴う石炭火力発電へのシフトならびに放射性物質固定技術への関心の高まり、2012年の笹子トンネル事故ではインフラ長寿命化が喫緊の課題となった。いずれもGP研究にとっては強力な推進力となった。それに対し、2020年のカーボンニュートラル宣言以降はFAを主材料とするGPにとっては将来的な材料確保が大きな課題となった。

本稿では、361委員会の成果の一部ならびに筆者が取り組んでいる新しいフィラー材料について紹介する^{3,4)}。なお、361委員会ならびに233委員会の報告書はインターネット上で自由に閲覧可能である⁵⁾。

2. 硬化メカニズム

GPは、アルミナシリカ粉末（活性フィラー）とアルカリシリカ溶液（アルカリ溶液）の縮重合反応によって生成される硬化体であり、セメントの水和反応とは異なり、硬化に必ずしもカルシウム（Ca）を必要としない。前者にはFAやBS、後者には水ガラスや苛性ソーダが使用される場合が多い。

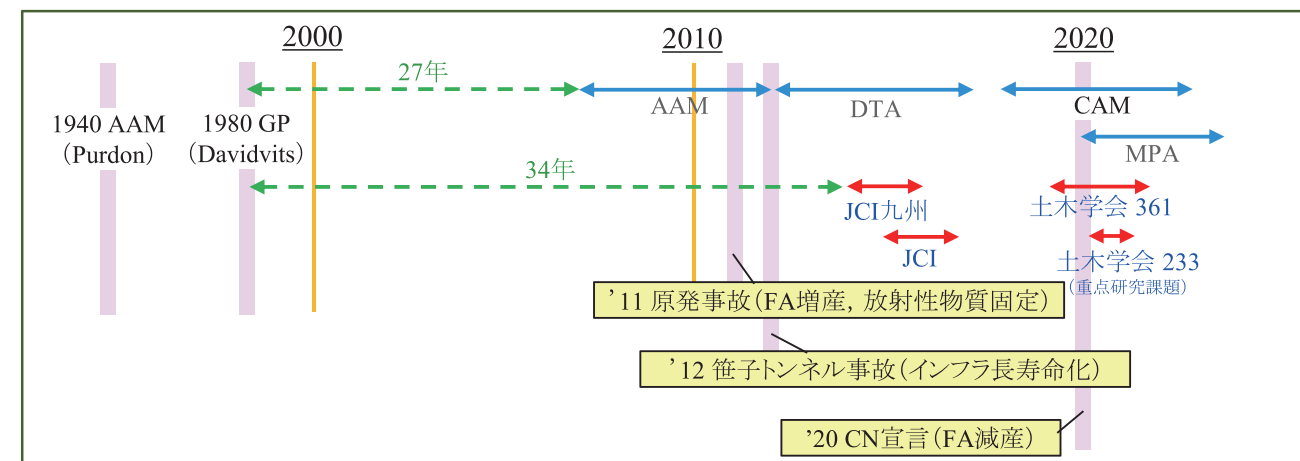


図1 GPを含むAAMs研究の流れ

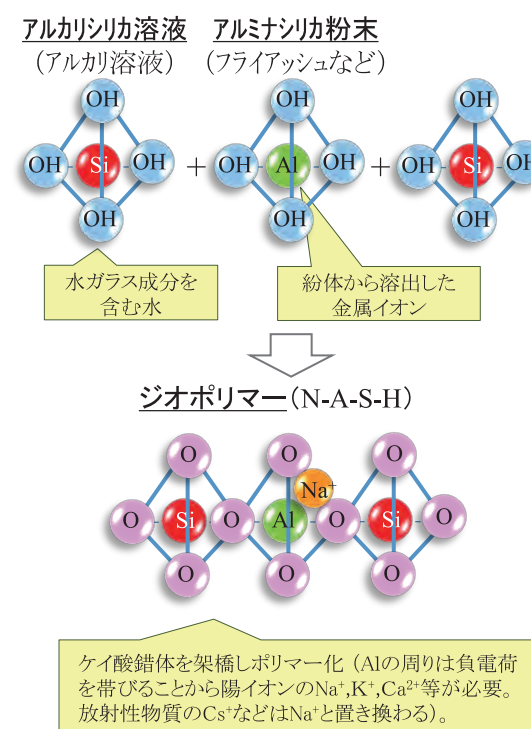


図2 GPの縮重合反応(N-A-S-Hの場合)

図2は、GPの縮重合反応を模式的に表したものである。水ガラスなどのアルカリシリカ溶液中には、ケイ酸イオン $[\text{SiO}_4^{4-}]$ が存在し、強アルカリ環境下では活性フィラーであるFAやメタカオリン（以下、MKと称す）の非晶質相からケイ酸イオン $[\text{SiO}_4^{4-}]$ およびアルミン酸イオン $[\text{AlO}_4^{5-}]$ が溶出する。これらの縮重合反応が生じることでアルミノケイ酸塩のフレームワークが形成される。 Si^{4+} と Al^{3+} の電荷の差から、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等の陽イオンがフレームワーク中に取り込まれる（放射性物質の Cs^+ 、 Sr^{2+} などはこれらの陽イオンと置換できること

から有害物質の固定が可能となる）。GPの反応生成物は、化学組成は天然ゼオライトに似ているが、非晶質構造である。ゼオライトは結晶性の化合物であり、その結晶構造は SiO_4 四面体のみで構成される石英（Quartz）のような3次元構造を有する。一方でGPの場合は、 SiO_4 四面体中の Si^{4+} の一部が Al^{3+} に置換しており、電荷のバランスを保つために Na^+ や K^+ 等の陽イオンが取り込まれ、規則性をもった長周期構造を取りにくくなる。そのため、GPの反応生成物は非晶質であり、3次元の網目構造を有するとされている。

BSを使用した場合は、ケイ酸アルミニウム系活性フィラー（MKやFAなど）だけで作製したものと比べて反応生成物の構造は複雑である。ケイ酸イオンは、 Ca^{2+} の存在下ではゼオライトのような3次元構造を形成しづらく、セメントの水和反応で生成するC-S-Hと類似したカルシウムアルミノケイ酸塩、すなわちC-A-S-Hと記されるような層状あるいは鎖状の構造をとりやすいとされている。これは、前述のGPの反応生成物とは組成も構造も異なる。わが国では、主に初期強度発現性を得ることを目的に、FA-BS併用GPに関する研究例が多い。

3. 結合材

3-1. 活性フィラー

セメント系ならびにAAMs系の結合材の分類と各々

※建設材料としてのジオポリマーに関する研究委員会（2014-2015）、※※ JCI-TC155A：建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会（2015-2016）、※※※ JSCE-361：土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会（2019～2022年）、※※※※ JSCE-233：（重点研究課題）新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究委員会（2021）

表 1 結合材の分類と各々に関する説明

系統	結合材	CO ₂ 排出量	材料	主な硬化メカニズム	主な生成物
セメント系	OPC	高	C, W	水和反応	C-S-H 水酸化カルシウム
	混合セメント	中	C, W	水和反応	C-S-H 水酸化カルシウム
	OPC (CO ₂ 吸収型)	低	C, W	水和反応	C-S-H 水酸化カルシウム
AAMs系	GP	低	FA, アルカリ溶液	縮重合反応	N-A-S-H
	FA-BS併用GP	低	FA, BS, アルカリ溶液	縮重合反応 水和反応	N-A-S-H C-A-S-H
	AAM	低	BS, アルカリ溶液	水和反応	C-A-S-H

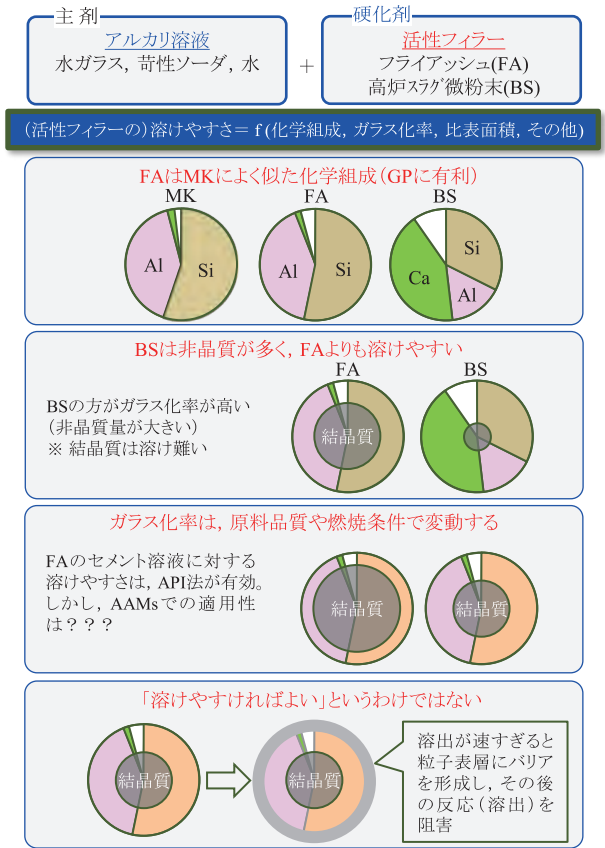


図3 GP活性フィラーの反応性概念図

に関する説明を表 1 に示す。セメント系をCO₂排出量が大きい方からOPC（普通ポルトランドセメント）、混合セメント、OPC（CO₂吸収型）に分類した。近年ではBS高置換コンクリートやCO₂吸収コンクリートなどが検討されており、カーボンニュートラルやカーボンネガティブを目指した材料開発も進められている。

一方のAAMsはGP、FA-BS併用GP、AAMに分類した。GPはMKやFAとアルカリ溶液が縮重合反応によりN-A-S-Hを生成する。GPは、元来はカオリン鉱物を焼成したMKとアルカリ溶液との縮重合反応により生成したケイ酸塩無機ポリマー硬化体のことを指し、

活性フィラーにはMKが用いられていた。わが国では、コスト面や入手の容易さ、「SiおよびAlを主成分とする非晶質」というMKとの特徴の類似性からFAを用いることが一般的である。

FAのみを用いたGPは、凝結時間が遅く初期強度発現性に劣り、実用的な強度発現性とするには加温養生が必要である。FA-BS併用GPは硬化促進のためにFAの一部をBSで置換した配合であり、BS置換率が高いほど強度発現上は有利であるが、可使時間が短くなることから実用上のBS置換率は10～20%である。AAMはBSなどの高Ca含有率のフィラーの使用を想定した場合で、N-A-S-Hの生成は見込めないことから、GP特有の様々な機能は期待できない。しかし、常温で硬化し、水酸化カルシウムが生成しないため酸による劣化速度はOPC硬化体よりも遅い。また、従来のコンクリート用の化学混和剤が適用できる可能性があり、社会実装化ではGPよりも優位と考えている⁶⁾。

GP活性フィラーの反応性について、図 3 に概念図としてまとめて示す。「二液混合接着剤」に例えると、アルカリ溶液が主剤、活性フィラーが硬化剤に相当する。GPを生成するためのフィラー材料は、Si、Alを主成分とした非晶質である必要があり、粉体中の結晶相は反応には寄与しないと考えられる。その意味で、活性フィラー中の非晶質量（ガラス化率）を把握しておくことが重要である。一般に、BSはほぼ全量が非晶質であるのに対し、国内のFAのガラス化率は60-80%程度であり、FAのガラス化率は、原料である石炭の品質や燃焼条件で変動することが指摘されている。また、「ガラスの量」であるガラス化率のみならず、「ガラ

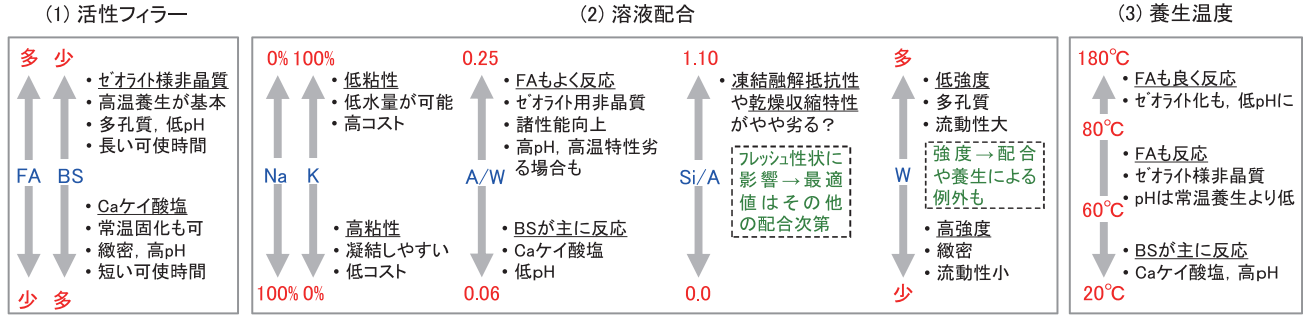


図 4 各指標における大まかな生成物およびその性質の傾向¹⁰⁾

スの質」ともいうべき非晶質中のCaやSi、Alなどの量の相違による反応のしやすさの程度の差を把握する必要もある。

3-2. アルカリ溶液

アルカリ溶液では、ケイ酸ナトリウム（水ガラス）、水酸化ナトリウム（苛性ソーダ）を使用するNa系とケイ酸カリウム、水酸化カリウムを使用するK系とに大別される。材料コストはNa系がK系よりも低いことから、一般にはNa系が用いられる。施工性や耐高温性はK系の方が有利である。「一般法」と「溶解法」の比較では、前者が広く用いられている。「一般法」はアルカリ溶液の粘性が高く、GPの製造・施工に難があるが、「溶解法」と比べて溶液の安全性は高い。「溶解法」は水ガラスを使用しないのでGPの粘性を大幅に低減でき、その結果として配合の自由度が格段に高まるなどの利点も多く、工場製品を中心にGP普及の牽引役となることが期待される。一方、苛性ソーダをGP練混ぜ時に直に添加することから、作業安全性に対する特別な配慮が必要となる。

他方、アルカリ溶液に炭酸ナトリウム、オルトケイ酸ナトリウム、メタケイ酸ナトリウム九水和物を用いる研究も登場した^{7～9)}。「扱いやすいアルカリ溶液」に関するアイデアはAAMsの社会実装をスピードアップできる重要な技術であり、今後の研究の発展を期待したい。

3-3. 配 合

以上のように、GPの作製にて活性フィラーとアルカリ溶液の組み合わせや配合比は多岐にわたり、一般的

なセメントコンクリートでのセメント種類や水セメント比の選定と比較して複雑となる。図 4 は各指標における大まかな生成物およびその性質の傾向を図示したものである¹⁰⁾、GPの性質は、活性フィラーにおけるFAとBSの混合割合、溶液配合（NaならびにKの量、A/W、Si/A、W）、養生温度で整理される。なお、同図は簡易的に全体的な傾向を図示したものであり、局所的には反対の傾向となる場合もある。また、長期的耐久性の検証は十分とは言えず、今後の研究課題であることにも留意しなければならない。

4. 土木分野へ適用する場合の基礎知識（複合材料の特性）

本章と次章では361委員会報告書の該当箇所のまとめを紹介する。詳細は同委員会報告書³⁾ならびに既報⁴⁾を参照していただきたい。

なお、以下は表 1 に示したGPならびにFA-BS併用GPに関するものであり、ここでは両者を合わせてGP系と表記した。

- 1) 各種のGP系硬化体を製造する際の配合等の製造条件が混練物の流動性、凝結特性、ブリーディングに及ぼす影響、そして養生条件が硬化後の強度特性に及ぼす影響等に関する知見を整理した。
- 2) 水ガラスをアルカリ溶液の主成分としてFAとBSを活性フィラーの主要構成物としたコンクリートの静弾性係数は、同等の圧縮強度となるOPCコンクリートに比べて小さくなる。
- 3) 水ガラスをアルカリ溶液の主成分としてFAを活性

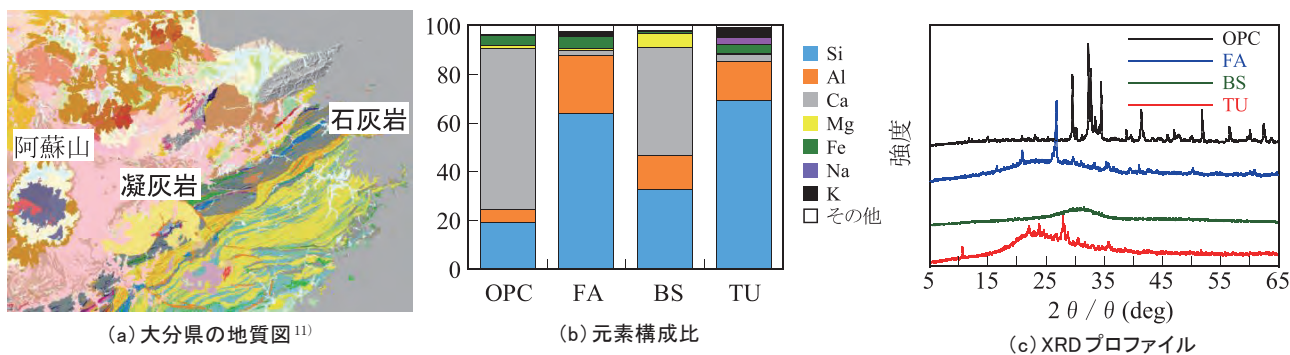


図5 凝灰岩のAAMsフィラーへの適用性検討のための基礎データ

フィラーとしたコンクリートおよびFAとBSを活性フィラーとしたコンクリートのクリープ係数は同等強度のOPCコンクリートの同等以下となる。

4) GP系硬化体を製造する際に型枠への固着を防ぐための剥離剤の製品化が求められているように、金属に対する付着力が高い。

5) 水ガラスをアルカリ溶液の主成分としてFAとBSを活性フィラーとしたモルタルを対象とした鉄筋の引き抜き試験の結果から、異形ならびに丸鋼鉄筋ともにOPCモルタルに比べて優れた付着特性を有する。

6) 静弾性係数がOPCコンクリートに比べて小さいGP系コンクリートでRCはりを製造した場合でも曲げひび割れの分散性が高い。また、OPCコンクリート製のRCはりと同等の曲げ挙動を確保できる。

7) 力学的な特性と併せてASR、中性化、凍結融解、鉄筋腐食、摩耗、高温影響等の耐久性関連の知見も整理した。それぞれの耐久性の項目における知見の数が少ないため、GP系硬化体の種類、試験条件に留意した試験を重ね、今後多くの知見が得られることを期待する。

5. 使用目的ごとの現状と課題

1) GP系材料で製造したコンクリート、モルタル、ペーストの各硬化体の使用目的に応じた要求性能とそれらに対する適用性を整理、検討した。

2) 工場製品としてGP系コンクリートを製造する場合はフレッシュ性状、適切な強度レベルを得るまでの養生条

件がOPCコンクリートの場合と異なるため、OPCコンクリートを使った全ての製品に置き換えることはできない。

3) 力学的な特性と併せて耐久性に関する特性も見極めることでGP系コンクリートを使用する目的を明示し、製品開発を進めていくべきと考える。

4) GP系コンクリートを用いたRCおよびPC構造物を設計する場合、静弾性係数、鉄筋との付着特性が影響を及ぼすRCはりにおける曲げ挙動の評価等に関する知見が十分でない。そのため、必要となる各種の安全係数を適切に設定することができず、現状ではOPCコンクリートのように示方書等で様に規定することができない。関連データの蓄積を進め、構造物の設計に備えたい。

5) GP系硬化体がOPC硬化体に比べて耐酸性、耐薬品性に優れる特性を活用して温泉地および化学工場の床等で劣化したコンクリート表層部の補修材への適用が期待されており、製品の開発に向けた検討が進められている。

6) GP系硬化体はOPC硬化体とは異なる反応相を形成することで重金属、放射性物質を物理的、化学的に固定、吸着する効果を発揮する。その結果、重金属、放射性廃棄物等の有害物質を対象とした固化化材料としての材料開発、適用性評価等の検討が進められている。

6. おわりに

将来の石炭火力発電の縮小に伴うFAの減産に

向けて、未利用資源の有効利用を含めた代替材料に関する研究開発が望まれる。AAMsは硬化に必ずしもCaを必要としないことから、FAやBS以外にも様々な材料の利用が期待できる。

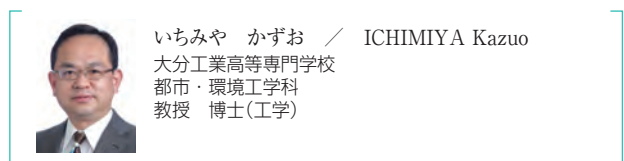
図5に筆者が取り組んでいる凝灰岩の適用性検討のための基礎データを示す。大分県西部には阿蘇火山堆積物である凝灰岩(桃色部分)が広範囲に堆積している(青色部分は石灰石)。凝灰岩(TU)の元素構成比ならびにXRDプロファイルはFAと酷似していることからフィラーとしての利用が期待できる。現在はアルカリ溶液との反応性を高めるための材料調製方法を検討している。

さて、わが国で初めてのGP研究委員会が活動を開始されてから今年で10年になる。その後の関係各位の尽力で数多くの有用な情報を収集・整理できた。補修材や工場製品を中心に施工例も増えている。対象箇所ならびに対象物のモニタリングを継続し、そこで得られた長期性能に関する情報を広く共有ができる仕組

みが求められる。

同時に、鉄筋コンクリート部材への適用も急がれる。AAMsの特性の一部はセメント系コンクリートとは異なるために従来の製造や設計に関する規準類を適用できない場合があるが、使用目的を限定したうえで施工実績を重ねることで認定取得、規格の整備を行い、社会実装につなげる必要がある。

【謝辞】土木学会コンクリート委員会「土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会(委員長：一宮一夫)」での議論ならびに同報告書の一部を参考にさせていただきました。誌面を借り関係各位にお礼申し上げます。



いちみや かずお / ICHIMIYA Kazuo
大分工業高等専門学校
都市・環境工学科
教授 博士(工学)

【参考文献】

- 1) Purdon A.O., et al. / The action of alkalis on blast-furnace slag. Journal of the Society of Chemical Industry - Transactions and Communications, vol.59, pp.191~202, 1940
- 2) Davidvits, J. / The need to create a new technical language for the transfer of basic scientific information, Transfer and Exploitation of Scientific and Technical Information, EUR7716. Luxembourg, Commission of the European Communities, 1982
- 3) 土木学会 / コンクリート技術シリーズ132 土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会(361委員会)成果報告書, <https://committees.jsce.or.jp/concrete/node/86>
- 4) 一宮一夫, 山本武志, 佐川孝広, 藤山知加子, 佐川康貴 / 土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための取組み, コンクリート工学, Vol. 61, No. 10, pp.891~898, 2023. 10
- 5) 土木学会 / 「2021年度 土木学会重点研究課題 新しいアルカリ活性材料を用いた低炭素社会におけるインフラ構築に関する研究報告書, https://committees.jsce.or.jp/s_research/taxonomy/term/6
- 6) 一宮一夫, 山本大介, 池田攻 / 高炉スラグ微粉末ベースのアルカリ活性材料の基本物性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp.1012~1017, 2023
- 7) 大西雄大, 大村昂平, 関卓哉, 新大軌 / 炭酸ナトリウムを刺激剤としたプレミックス型ジオポリマーの物性及び耐久性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.994~999, 2023
- 8) 山田宏, 若杉三紀夫, 神田利之, 関友則 / オルトケイ酸ナトリウムを用いた超速硬型アルカリ活性材料に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.988~993, 2023
- 9) 篠原弘充, 長谷川樹, 安琳 / メタケイ酸ナトリウム九水和物を使用したジオポリマーコンクリートの力学的特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1024~1029, 2023
- 10) 一宮一夫, 池田攻, 上原元樹 / 低炭素材料としてのジオポリマーの普及・活用, コンクリート工学, Vol. 59, No. 9, pp.794~800, 2021. 9
- 11) 産総研地質調査総合センター(2022)20万分の1日本シームレス地質図V2. <https://gbank.gsj.jp/seamless>(閲覧日: 2022年6月17日)

私たちの安全・安心を支えているコンクリート
～第2回フォトコンテストを開催～

セメント協会はこのほど、公式Instagram第2回フォトコンテストを開催、去る2月29日に協会ウェブサイトなどで入選作品を発表した。

このフォトコンテストのテーマは「私たちの安全・安心を支えているコンクリート」で携わってる部門（現場や工場を介してセメント・コンクリートに携わっている方の部門）と支えられてる部門（日常生活の中で「セメント・コンクリート」を通じて安全・安心を感じる写真）の2部門



受賞者一覧（敬称略）

	タイトル	受賞者名	撮影場所
協会長賞	1. 越後の治水	古川 睦	大河津分水（新潟県燕市）
特選 （支えられてる部門）	2. 驚嘆	高橋 裕子	ハッ場ダム（群馬県吾妻郡）
特選 （携わってる部門）	3. ライフライン	登坂 直紀	ハッ場ダム（群馬県吾妻郡）
入選 （支えられてる部門）	4. 橋上の大運動会 5. インフラを支える 6. 海のピラミッド	田中 雅之 ひろ niiiiicon	潜没橋（京都府笠置町） 新青山トンネル（三重県伊賀市） 三角港フェリーターミナル（熊本県宇城市）
入選 （携わってる部門）	7. 太東ビーチ 8. 霧の中の黒部ダム 9. 明日を支える背中、コンクリートの温もり	mettle_pump 福西 博 曾澤高圧コンクリート（株）	太東ビーチ（千葉県いすみ市） 黒部ダム（富山県中新川郡） 防災・安全交付金事業1級河川 雁来川改修工事（北海道札幌市）

セメント協会 フォトコンテスト受賞作品詳細 <https://www.jcassoc.or.jp/photocon/info.html>



第52回セメント協会論文賞 受賞論文の決定

セメント協会は、セメント・コンクリート論文集に掲載された論文の中から、特に優秀と認められた論文に「セメント協会論文賞」を授与しており、この度、第52回（2024年度）セメント協会論文賞を下記の3件に決定した。

論文賞の選考は学識経験者を交えた論文賞選考委員会によって行われた。表彰式は5月15～17日に赤坂インターシティコンファレンス（東京都港区赤坂1-8-1 赤坂インターシティ AIR 4F）で開催の「第78回セメント技術大会」2日目午後に行われる予定。

（敬称略）

β -C ₂ SおよびC-A-S-Hの炭酸化における二酸化炭素固定化機構の解析 セメント・コンクリート論文集 Vol.77 pp.53～61 セメント・コンクリート論文集 Vol.77 pp.71～79	扇 嘉史 細川 佳史	太平洋セメント（株） 太平洋セメント（株）
気泡の分布と凍害保護範囲を考慮した凍害抵抗性のメカニズムの解明 セメント・コンクリート論文集 Vol.76 pp.211～219 セメント・コンクリート論文集 Vol.77 pp.240～247	大山 和哉 上原 典香 田邊 駿 五十嵐 心一	金沢大学大学院 鉄建建設（株） 金沢大学 金沢大学
機械学習を援用した高流動コンクリートの目視材料分離判定とレオロジー定数の予測 セメント・コンクリート論文集 Vol.76 pp.410～418 セメント・コンクリート論文集 Vol.77 pp.394～402	東舟道 裕亮 比嘉 龍一 山田 義智 平野 修也	琉球大学 琉球大学 琉球大学 （株）フローリック

セメント協会研究奨励金の交付決定

セメント協会は、セメント化学およびコンクリート化学の研究振興ならびに研究者の育成を図ることを目的に「セメント協会研究奨励金」を交付しており、この度、第38回（2024年度）交付対象者を下記の5名に決定した。

審査は学識経験者を交えた研究奨励金審査委員会によって行われ、1987年の第1回から今回までに延べで約350名の研究者に研究奨励金を交付している。なお、2025年度の募集については、本誌8月号および当協会ホームページ（<https://www.jcassoc.or.jp>）等でも紹介の予定。

（敬称略・順不同）

氏名	所属*	研究題目
KONG, Yukun	Hokkaido University Division of sustainable resources engineering PhD candidate	Effects of antimicrobial agents on hydration, mechanical properties and antimicrobial performance of alkaline salts-activated binary slag-cement
Aili Abudushalamu	名古屋大学 環境学研究科 助教	湿式・半乾燥式炭酸化セメントペーストの体積安定性の比較
福永 隆之	九州大学 大学院 工学研究院 社会基盤部門 助教	無水石膏の添加量が高炉スラグ高置換した海水練りコンクリートの初期強度に与える影響の解明
金氏 裕也	鳥取大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 助教	不飽和状態のコンクリート内部へ圧入した液状補修材の浸透予測モデルの開発
鎌田 知久	東京都立大学 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域 助教	高炉スラグ微粉末の混和による空隙構造の複雑化の実態に関する研究

※）交付対象者の所属は申請時のものである



磁器質セラミックタイルを細骨材および粗骨材として
使用したコンクリートの熱的・力学的特性について
Hamed Gharibi, ほか
Magazine of Concrete Research
vol.75 [3] 123～134 (2023)

建設分野における持続可能な開発と環境保護への
一歩として、コンクリートへの廃棄物利用がある。その
中で通常埋立て処理されているセラミック廃棄物を活用
することは、環境汚染を低減するだけでなく、細骨材
や粗骨材の代替品としての使用によりコンクリートの特
性を改善すると注目されている。

セラミック廃棄物を骨材置換した場合、コンクリートや
モルタルの圧縮強度を高めることが報告されている
が、熱的特性に関する研究は限られる。本稿では天然
骨材の代替として磁器タイル廃材 (PCTW) の細骨
材および粗骨材を様々な割合で置換したコンクリートに
ついて、コンクリートの作業性に与える影響や熱伝導
率などを調査した。

実験の結果、天然骨材をPCTW骨材に置換した
場合、PCTW骨材の表面粗さに起因しコンクリートの
作業性は低下した。ただし、高性能AE減水剤の添
加量を変化させることで同一の作業性を確保できた。

また、PCTW骨材の置換率増加とともに熱伝導率
は低下した。様々な置換率の中で、骨材の全量を
PCTW骨材に置換した場合の低下率が最も大きく
-38%であった。細骨材または粗骨材のみPCTW骨材
に置換した場合を比較すると、細骨材のみを置換した
場合の熱伝導率の低下が顕著であった。理由として
は細骨材の方がより均一にコンクリート中に分布してい
るためと筆者らは考察している。

輻射熱源がある場合の熱性質については、PCTW

骨材に置換した場合、コンクリートへ熱が侵入しにくく
なることを確認した。また熱源を停止した後、コンク
リート中に蓄えた熱エネルギーを放出する速度は天然
骨材の場合よりも遅かった。この性質は、昼夜の気温
差が大きい環境において建物内での生活をより快適に
し、冷暖房のエネルギー消費量削減にも効果をもたら
す。よってコンクリート中の天然骨材をPCTW骨材で
置換することは、圧縮強度向上やリサイクル困難な廃
棄物の利用との相乗効果により、持続可能な開発にお
ける重要な一歩であると筆者らは述べている。

LC³における微細構造、表面電気抵抗率ならびに圧縮
強度発現性の関係
Oğulcan Canbek, ほか
Cement and Concrete Research
160 論文 No.106920 (2022)

石灰石-焼成粘土混合セメント (LC³) はCO₂低減に
向けて活用拡大が期待されているものの、構成材料
が多く、圧縮強度の予測が難しいことが知られている。
そこで、一般に圧縮強度と相関があり、非破壊かつ
素早く測定できる電気抵抗率 (AASHTO T358) に着
目した。一方、LC³には様々な設計因子があり、それ
らが電気抵抗率に及ぼす影響に関して未知の部分がある。
本研究ではLC³の焼成カオリン (MK) と石灰石
微粉末 (LSP) の比率、LSPの粒径、石膏添加量が
圧縮強度および電気抵抗率に及ぼす影響を調査し、
相関を検証した。また、各種化学分析により、電気抵
抗率に及ぼす影響要因を調査した。

その結果、MKの比率増加に伴い、初期の強度と
電気抵抗率が増加した。一方、長期材齢では強度は
増加したものの、MKの比率増加による電気抵抗率の
変化はなかった。LSPに関しては、その粒径が小さい
ほど、フィラー効果によって初期の強度と電気抵抗率
が増加した。一方、長期材齢では粒径による強度変
化はなかったものの、細粒になるほど電気抵抗率は大
きくなった。また、石膏添加量を増加するとエトリンガ
イト生成量が増加し、それに伴って初期の強度と電気抵
抗率が増加した。一方、長期材齢では石膏の増加に
より相対的にセメント量が減少するため、強度と電気抵

抗率の増加量は小さかった。

以上より、本研究の範囲では電気抵抗率と圧縮強
度は相関があり、強度予測に使用可能と考えられた。
一方、長期材齢では電気抵抗率の増加は強度の増
加に比べて大きいことも併せて判明した。これは
C-A-S-Hにアルカリが固溶し、細孔溶液のアルカリ濃
度が減少することによって電気伝導度が低下したため
と推察された。

フライアッシュを混和したセメント系材料の水和と性能を
予測するためのディープラーニング
Taihao Han, ほか
Cement and Concrete Research
165 論文 No.107093 (2023)

近年、産業副産物であるフライアッシュ (FA) を混
和したセメント系材料の需要が高まっているが、その硬
化体の物性を予測する理論式の研究は発展途上である。
本稿では、深層学習の手法である「ディープフォレ
スト」を使用し、FAを混和したセメント系材料の水和
反応と圧縮強度の予測モデルを作成し評価した。

水和反応の予測モデルは、限られたデータを使用
し、化学組成、FAの含有率、比表面積、時間を入力値、
水和による発熱を出力値として作成した。注水
から72時間後までデータを学習し予測した結果、発熱
のピークの予測精度が低いことが確認された。水和反
応の傾向に合わせ、データを時系列で3領域に分割し
て学習し予測した結果、発熱のピークの精度が向上し
た。本事例は、深層学習としては学習データ数が十分
ではないが、領域を分割し学習することで、高精度
なモデルを作成することが可能であることを示している。

強度予測モデルは、化学組成、FAの含有率、比
表面積、材齢を入力値、硬化体の圧縮強度を出力値
として作成した。その結果、既存の予測式と比較し、
予測精度が向上した。さらに、各入力値の予測結果
に対する寄与率は既知の知見と同様であることから、
本手法により強度発現のメカニズムを捉えることが出来
ることも明らかとなった。

以上より、深層学習は学習方法の工夫によって精度
の向上が見込めるほか、将来的には予測に留まら

ず、要因分析といった活用も考えられる。

セメント産業への中温SCR (選択式還元触媒) の適用
Tang Xinyu, ほか
ZKG Cement Lime Gypsum
[76] 50～55 (2023)

中国ではセメント工場排ガスの窒素酸化物の濃度が
50mg/m³未満、アンモニアの濃度が5mg/m³未満と
する厳格な排出基準が求められたことから、SCR
(Selective Catalytic Reduction_選択式還元触媒)
の導入が検討されている。筆者らは使用する触媒の
耐硫黄性や、劣化速度、排熱発生量を考慮してチタ
ニア・バナジア系の触媒を用いた中温 (200-250℃)
SCRのセメント工場への適用性を調査した。

SCRでは、アンモニアと窒素酸化物が化学反応して
窒素と水に還元される。そこで、従来のSNCR (高効
率無触媒脱硝技術) と中温SCRを併用する実機試験
を行った。SCRは排熱発電装置とK-IDFとの間に設
置し、アンモニアは従来の供給箇所である仮焼炉出口
および第5サイクロン出口から供給した。実験の結果、
排ガスの窒素酸化物およびアンモニアの濃度は排出基
準を下回ったが、SCRの脱硝効率には実機試験
(65%) と研究室試験 (90%) に大きな乖離があった。
これはSCRの4層目の触媒に硫酸水素アンモニウムが
生成され、触媒が劣化したためだと考えられた。

SCRの脱硝効率を高めるため、アンモニアの供給
量や供給箇所について検討した。アンモニアの供給量
は増加させることにより、SCRの効率は若干高まった
が、コスト面では効果的であるとは言えなかった。アン
モニアの供給箇所は、従来のSNCRでの供給箇所が
最も効果的であった。窒素酸化物の濃度に関わらず
SCRの脱硝効率は一定であったが、アンモニア供給
量の増加に伴い排ガスのアンモニア濃度は高くなる傾
向があった。

様々な検討を行った結果、排出基準を満たすため
にはSCRとSNCRを併用する必要があることが判明し
た。今後は排ガス中の窒素酸化物濃度が増加した場
合でも排出基準を満たすことができるよう検討を行うと
筆者は述べている。

顧問

長瀧 重義 東京工業大学 名誉教授

委員長

小堀 規行 住友大阪セメント(株) 常務執行役員 セメント・コンクリート研究所長

委員

石橋 忠良	J R東日本コンサルタンツ(株) 技術統括
伊藤 智章	UBE三菱セメント(株) 技術戦略部 部長
伊藤 康司	全国生コンクリート工業組合連合会 中央技術研究所 所長
浦野 真次	清水建設(株) 技術研究所 建設基盤技術センター 主任研究員
河村 直彦	(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会((株)ピーエス三菱)
岸 利治	東京大学 生産技術研究所 教授
黒岩 秀介	大成建設(株) 技術センター 都市基盤技術研究部 部長(研究担当)
黒川 大亮	太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 主席研究員
古賀 裕久	(国研)土木研究所 先端材料資源研究センター 上席研究員
小林 竜平	竹本油脂(株) 第三事業部 研究開発部 コンクリートグループ マネージャー
坂井 悦郎	東京工業大学 名誉教授
坂井 吾郎	鹿島建設(株) 技術研究所 主席研究員
棚野 博之	(国研)建築研究所 材料研究グループ 客員研究員
流 龍成	住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 研究企画グループ グループリーダー
野口 貴文	東京大学 大学院 工学系研究科 教授
平田 隆祥	(株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 上級首席技師
平本 真也	日鉄高炉セメント(株) 技術開発センター 技術開発グループ グループリーダー
前田 禎夫	麻生セメント(株) 品質技術部 部長
森川 嘉之	(国研)港湾空港技術研究所 地盤研究領域長
山路 徹	(国研)港湾空港技術研究所 構造研究領域長
窪木 康雄	(一社)セメント協会 セメント系固化工材普及専門委員会 委員長
宮脇 賢司	(一社)セメント協会 セメント系固化工材技術専門委員会 委員長
大石 英男	(一社)セメント協会 生産・環境幹事会 幹事
廣川 誠一	(一社)セメント協会 常務理事
吉田 雅彦	(一社)セメント協会 研究所長

編集委員会の動き

本誌の編集企画にご尽力いただいた編集委員の内田俊一郎氏(太平洋セメント(株))は3月号をもって退任されました。ここに長年にわたるご協力・ご支援に対し感謝の意を表します。なお、今月号より黒川大亮氏が就任されました。

一般社団法人 セメント協会加盟会社

八 戸 セ メ ン ト (株)	敦 賀 セ メ ン ト (株)
日 鉄 高 炉 セ メ ン ト (株)	(株) デ イ ・ シ イ
日 鉄 セ メ ン ト (株)	デ ン カ (株)
東 ソ ー (株)	麻 生 セ メ ン ト (株)
(株) ト ク ヤ マ	UBE三 菱 セ メ ン ト (株)
琉 球 セ メ ン ト (株)	明 星 セ メ ン ト (株)
苅 田 セ メ ン ト (株)	日 立 セ メ ン ト (株)
太 平 洋 セ メ ン ト (株)	住 友 大 阪 セ メ ン ト (株)

○埼玉コンクリートインフラの現状と予防—地域特性から見た
これからの維持管理の形—

○生コンクリート規格「JIS A 5308」2024年改正のポイント

○ICCC2023 世界のセメント・コンクリート研究の動き②

○AIを活用したコンクリートのスランプ予測システム

「PreSLump AI®」の開発

○竹チップ混合固化土の材料特性

○シリーズ/セメント産業 脱炭素・低炭素社会を目指すキー
ワード 鉱物化とセメント・コンクリートへの活用

○土壌に含まれる重金属等不溶化の最新動向

○粗骨材最大寸法40mmコンクリートへの凍結融解試験方
法の適用性

○ずいそう(桜本文敏) ほか



阪和自動車道土丸橋(上り線)のPCグラウト再充填工事

セメント・コンクリート No.926 4月号
2024(令和6)年4月15日発行

定価1100円 本体1000円 ⑩

発行者 乾 敏一
編集者 小宮山 慎一郎
発行所 一般社団法人 セメント協会
〒104-0041 東京都中央区新富2-15-5
RBM築地ビル2階
電話 03-5540-6171 (代表)
03-5540-6175 (広報部門 / 出版担当)
03-5540-6173 (図書販売)
FAX 03-5540-6181
研究所 〒114-0003 東京都北区豊島4-17-33
電話 03-3914-2691 (代表)
FAX 03-3914-2690

○予約購読のご案内/予約購読をご希望の方は1年分 11,000円(税込み/送料当協会負担)を「振替」または「現金書留」で直接当協会にお申込み下さい。

○本誌への広告申込みはセメント協会広報部門/出版担当 ☎ 03-5540-6175へ

○セメント協会加盟会社の購読料は会費に含まれます。

本誌へのご意見、ご感想、ご要望、送付先の変更などは、セメント協会ホームページまたは出版担当直通までEメールでお寄せください。

メールアドレス(出版担当)
cemecon@jcassoc.or.jp

ホームページ
https://www.jcassoc.or.jp

セメント協会ホームページ



第78回 THE ANNUAL MEETING OF CEMENT
AND CONCRETE ENGINEERING

セメント 技術大会

2024年5月15日(水)～17日(金)

会場:

赤坂インターシティコンファレンス
東京都港区赤坂1-8-1 赤坂インターシティAIR

形式: **会場(ライブ配信)** 参加費: **無料**

●聴講にあたっては事前申込が必要となります
(下記QRコードよりお申し込みください)

特別講演 5月16日(木) 15:30～16:45

**カーボンニュートラル実現に
向けたグリーンイノベーション
基金事業の取組**

国立研究開発法人
新エネルギー・産業技術総合開発機構 理事 **弓取 修二** 氏



一般研究発表

**セメント・コンクリートの
材料科学の研究発表**

○セメント製造技術
○セメント系新材料

○セメントの水和
○コンクリートの耐久性 等

○環境・リサイクル

一般社団法人 **セメント協会** 問合せ先: 研究所 技術情報グループ TEL.03-3914-2692

セメント技術大会
ホームページはこちら

