

CEMENT & CONCRETE

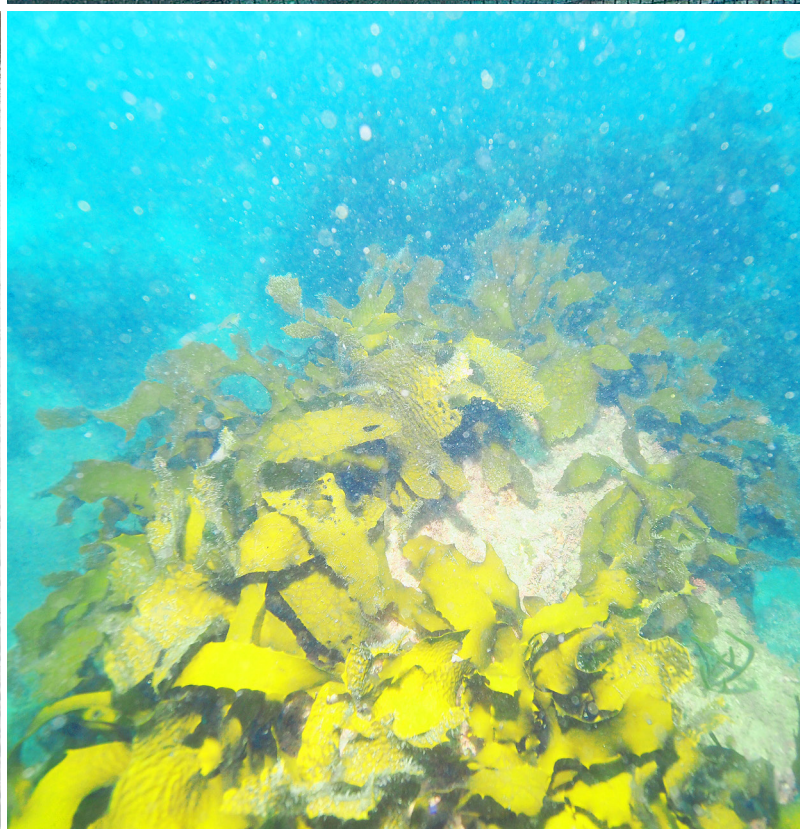
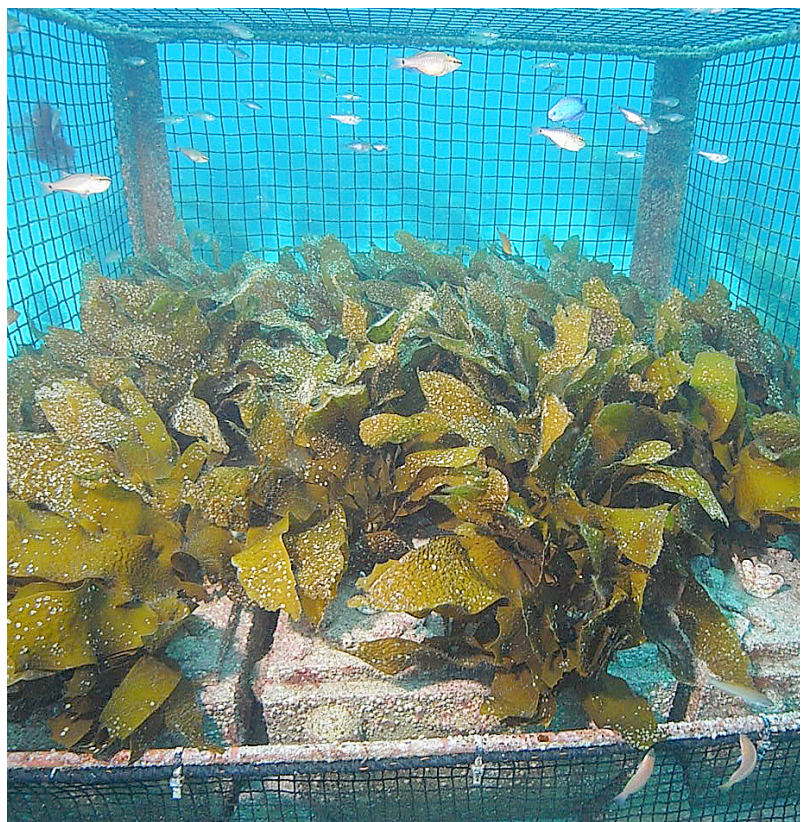
セメント・ コンクリート

令和6年7月15日発行 ISSN0371-0718

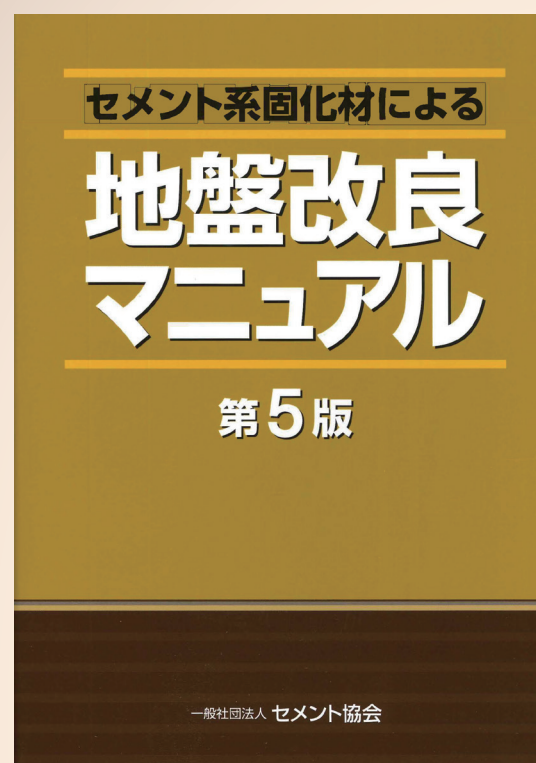
2024
No.930

8

一般社団法人セメント協会
JAPAN CEMENT ASSOCIATION



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

第3回 セメント協会主催 フォトコンテスト

フォト部門
日常生活の中で「セメント・コンクリート」を通して安全・安心を感じる写真をご応募ください。

フォトエッセイ部門
とっておきの写真に、エピソードを添えて…
思い出の場所や思い入れのある構造物、未来への願いや将来の夢など個人の想いを写真とともに、エッセイで綴ってください。

#セメント協会フォトコン2024



セメント協会
公式Instagramはコチラ



セメント協会 HP
応募フォームはコチラ

テーマ **私たちの安全・安心を支えているコンクリート**

私たちの安全・安心・快適な生活の営みを支えているコンクリート構造物。
日常生活の中で「セメント・コンクリート」を通して安全・安心を感じる写真をご応募ください。

締切 **2024年8月31日(土)** 発表 **2025年1月31日(金)**

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 ヴインソル

AE減水剤 (耐寒促進剤 タイプI)

ヤマソー ウイン

硬化促進剤 ヤマソー ウイン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.930

8

もくじ

- | | | |
|----|-------------------------------------|-----------|
| 02 | 3D コンクリートプリンティングの現状と将来展望 | … 國枝 稔 |
| 07 | セメント系材料のケイ酸構造解析のためのトリメチルシリル誘導体化法の活用 | … 小泉 公志郎 |
| 14 | 炭酸化したスラッジ再生セメントによるカーボンネガティブ結合材の開発 | … 大川 憲ほか |
| 20 | ずいそう
信州佐久 水紀行 | … 加藤 敏明 |
| 22 | TOPICS
第73回セメント安全衛生大会を開催 | |
| 24 | 韓国セメント産業のカーボンニュートラルの現況と今後の方案 | … 李 昌起ほか |
| 32 | 既存地下躯体の耐用年数評価取得による再利用～五反田JPビルディング～ | … 酒井 正樹ほか |
| 38 | コンクリート藻場増殖礁技術とブルーカーボン | … 久恒 成史 |
| 44 | トンネル覆工コンクリートの全自動打設システムによる施工実績 | … 松本 修治ほか |
| 50 | 第52回(2024年度)セメント協会論文賞の選考経過と推薦理由 | … 三五 弘之 |
| 54 | 論文賞を受賞して | |

- | | |
|----|--------------------------------------|
| 57 | HOT NEWS |
| 58 | 第39回(2025年度)セメント協会研究奨励金
テーマ募集のご案内 |
| 59 | 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 | 9月号予告 |



今月の表紙

コンクリート藻場増殖による
藻場造成の取組み[長崎
県壱岐市など/提供:住友
大阪セメント(株)]

■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

3Dコンクリートプリンティングの 現状と将来展望

State of the art on 3D concrete printing

國枝 稔

1. はじめに

建設用3Dコンクリートプリンティング(以下、3DCPと称す)は、Additive Manufacturing(付加製造)技術として、材料を付加しながら構造物や部材を構築する手法として分類される。3Dプリンタはプラスチック分野はもちろんのこと、鋼構造の分野やセメントコンクリート分野など、様々な分野での開発、適用が精力的に進められている。

本稿では、セメントコンクリートに関して、特に日本国内での動向と将来展望について解説する。

2. 建設用3DCPの特徴

建設用3DCPには様々な方式のものがあり、「材料」、「材料を吐出する機構」と「吐出部を3次元上で位置決めする機構」の主に3つの組合せにより実現される。

「材料」については、セメントコンクリートを対象とすれば、その配合上の特徴は、一般的なコンクリートと比較して、水セメント比(水結合材比)が小さい、粗骨材を使用しない、混和材が添加されている、短繊維が添加されている、などがある。また、海外では速硬性

や環境負荷低減を目的として、ジオポリマーを使用した3DCP技術の開発も盛んである。

「材料を吐出する機構」は、セメント系材料を用いた3DCPでは、材料押出方式(Material Extrusion)、粉末床結合方式(Particle-bed Binding)、吹付方式(Material Jetting)に大別できる。

「吐出部を3次元上で位置決めする機構」は、産業用ロボット(ロボットアーム)、ガントリー式などが用いられる。高い造形性を実現しようとするれば、高精度な位置決めが必要であり、製造能力を高めようとするれば、位置決めの際の移動速度が速い装置が必要となる。

現時点での主流は、写真1に示すような材料押出方式ではあるものの、写真2に示すような、乾式吹付システムとICTバックホウを組み合わせたシステムの試みもあり、「材料を吐出する機構」と「吐出部を3次元上で位置決めする機構」を要求性能(積層体の強度や寸法精度)のあわせて組み合わせることで自由にプリンタが構築できる可能性がある。

以降は、現時点で主流である材料押出形式を中心に、3DCPの一般的な特徴を紹介する。材料押出形式では、材料の練混ぜ(モルタルの製造)、圧送、積層の段階がある。材料の練混ぜ段階では、ミキサをはじめとする機械の違いはあるものの、セメントコンクリートで行われる練混ぜが行われる。各種媒体で目にする3DCPでは、この製造段階が示されていない場合が多く、また高性能なモルタル(例えば、高強度、混和材、



写真1 様々な造形例
[日揮グローバル提供]



写真2 乾式吹付システムとICTバックホウとの組合せ
[住友大阪セメント提供]



混和剤、繊維などの添加)とあらば、材料投入の行為が大変となる点に留意する必要がある。圧送段階に関しては、材料に対して圧送性(Pumpability)が求められる。一般に、圧送性を確保するためには軟練りのモルタルを使うことが有効であるが、後述の積層性を確保するために、比較的硬練りのモルタルが必要となることから、吐出圧が大きくなる傾向にあることと、脈動しない圧送が必要となる。積層段階に関しては、積層性(Buildability)の確保が重要である。すなわち、積層した後に潰れることなく、所定の形状寸法を確保するこ

とが必要である。また、ノズルから吐出したフィラメント(棒状のモルタル)の形状寸法は、圧送量とノズル筒先の移動速度に左右されることから、まさに「材料」、「材料を吐出する機構」と「吐出部を3次元上で位置決めする機構」の3つの要素の最適化が必要となってくる。

3. 最近の日本国内の動向

国内における実施例も増えつつあるが、連続補強材を有効に活用できていない現時点で、無筋部材とし



くにえだ みのる / KUNIEDA Minoru
岐阜大学 大学院
工学研究科
教授 博士(工学)



写真3 複雑な形状のベンチ
[大成建設提供]



写真4 産学共同で作製したベンチ
[曾澤高圧コンクリート提供]

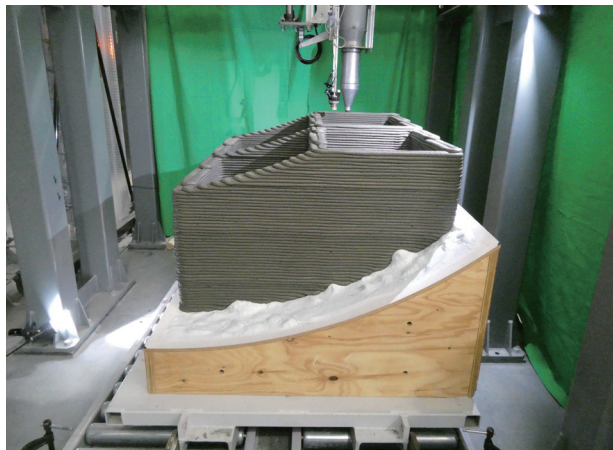


写真5 既設の形状に適合させるプリント技術
[大成建設提供]

での利用が活発であるといえる。将来的には、次章の課題を踏まえての利用拡大が期待される。

写真3や写真4に示すようなベンチを構築する試みがある。部材としての大きさも手ごろであることや、高い造形性を示す事例でもある。特に、写真4のベンチは、学生がデザインするなど産学が連携した取り組み事例であり、使用者のニーズを反映させた部材の構築が可能となる。

写真5は、3DCPで構築した構造物や部材と既設部(周辺地盤や既設構造物)とのインタラクションをシームレスにするための取り組みである。3Dスキャナ等によりサンプリングされた形状寸法にあわせて3DCPで積層体を構築するものである。

写真6～8に示すように、大型の部材を構築する事

例も増えつつある。現時点では残念ながら非構造部材としての位置づけのものも多いが、曲線美を活かした部材の構築が期待される。

4. 3DCPに期待するもの

前述のとおり3DCPへの期待が高まっている一方で、技術者が何を期待しているのかを整理したい。

■高い造形性

3D-CADソフトなどでデザインした造形をそのままプリントすることができるため、従来の型枠を用いたコンクリートでは実現が難しかったり、型枠製作にコストがかかったりするなどの課題を克服できる。

■自動化、省人化

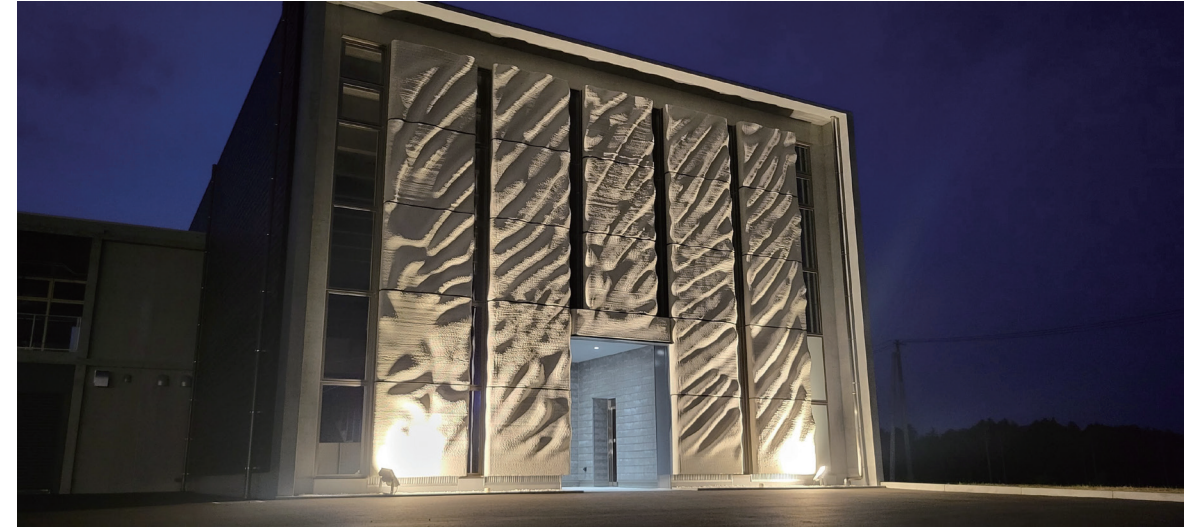


写真6 非構造のカーテンウォール
[曾澤高圧コンクリート提供]

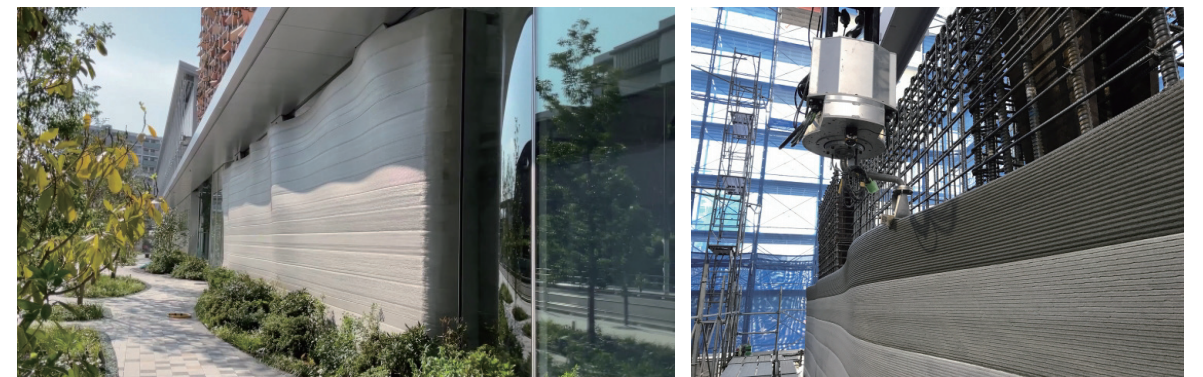


写真7 局面形状の壁柱
[清水建設提供]



写真8 支柱外枠
[大成建設提供]

施工において3DCPが自動で稼働することに加え、型枠や締固めを必要としないため省人化が可能となる。

■型枠工を必要としない

積層性を有する3DCPにより、型枠工を必要としない。これに伴う熟練工不足への対応や、塗装合板などの材料の削減につながる。

■省資源

十分な設計ができているという前提であれば、必要最小限の部材厚での構築が可能となることから、省資源化に貢献できる可能性がある。

5. 今後の課題

3DCPに対する期待も込めて、今後の課題として以下のようなものが挙げられる。



写真9 学生製作によるモルタル製バリケード

■設計方法の確立

3DCPにより積層された部材に対する設計方法が未整備である。積層部材の異方性や層間に対する構造設計上の考え方、耐久性の考え方などを体系化する必要がある。

■積層痕

従来の土木構造物，とりわけプレキャスト製品の表面の平滑性に対する要求は高く，一方で3DCPによる積層痕に対して違和感を持つ技術者も多い。

■補強材の配置

短繊維補強モルタルを使用した事例は多いが，連続補強材の配置方法などについての課題がある。

■品質確保

従来のコンクリートに従い，モルタルの練混ぜ直後のフローの測定，強度試験用供試体の作製と試験，など従来までの品質管理方法に従うことで自動化・自律化の優位性が失われる可能性があり，3DCP独自の方法を模索すべきである。

■完全自動化，自律化

現時点での3DCPというと，積層の部分を自動化したものが多く。自動車の製造ラインのように，モルタルの製造，積層，補強材の配置，など様々な役割を担うロボットの集合システムが構築されることが期待される。

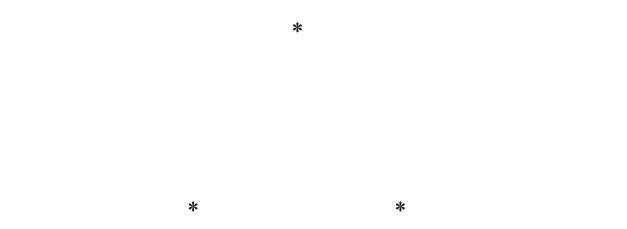
■研究者・技術者人口の増大

現在のコンクリート工学に関する技術は，長年にわたる多くの研究者・技術者の知見や実績が蓄積，醸成されたものである。一方で，新技術である3DCPは，装置を有していないと研究・開発に参加できないことから，何らかのしくみにより研究者・技術者人口を増

加させることが急務である。

6. おわりに

3DCPは，材料からプリントシステムまでがシステム化されている場合が多く，興味のある人がすぐに研究・開発をスタートするのが難しい分野でもある。しかし，先述のとおり萌芽的な技術であり，期待が高い分，様々な課題が残されており，研究開発テーマが豊富な分野であることは間違いない。従来までのコンクリート工学の材料，製造，施工技術の基本にこだわることなく，次世代コンクリート技術として取り組む価値があると考ええる。本学においても学生がCADを用いてデザインし，ロボットを操作するのに慣れるスピード感は凄まじく，写真9に示すようなモルタル製バリケードも簡単に作れるのである。若者がインフラ業界に興味を持ってくれるきっかけになることが期待される。



セメント系材料のケイ酸構造解析のための トリメチルシリル誘導体化法の活用

Application of trimethylsilylation method for silicate structure analysis of cementitious materials.

小泉 公志郎

1. はじめに

著者自身，セメントや補助セメント材料の化学的な性質や化学反応特性を中心とした研究を続けて20年以上経つが，たとえば単純に水和セメントの化学的な分析と言っても，その詳細を検討するには粉末X線回折(XRD)や熱分析，電子顕微鏡による微細組織の観察など様々な分析が必要となる。

セメント系材料の水和反応解析の際，最も厄介な分析の一つが水和物中のシリケート相の形態(構造)および組成の推定である。セメントの水和反応で最も生成量の多い成分はエーライトおよびビーライトを由来とするケイ酸カルシウム水和物群(Calcium Silicate Hydrates；C-S-H)と称されるゲル状の水和物であるとされており，その形態については様々なモデルが提唱されているものの，実際のセメント水和物中のシリケート構造は未だに明確になっていないことも多い。C-S-HはCaO/SiO₂のモル比が一定では無い水和物の集合体であるためほぼ完全に非晶質であり，このような成分のシリケートの構成・形態をある一つの手法で簡便かつ包括的に分析できる手法が実質的に存在しないこともその一因であると思われる。また，シリケートと言ってもその形態

は様々で，岩石や粘土鉱物に含まれる結晶性のシリケートとして存在しているケースや，ガラスを構成する非晶質のシリケートなど，結晶／非晶質にかかわらず，それぞれ特徴のあるケイ酸塩(シリケート)構造をとり得るため，その形態は複雑であり分析も極めて困難なものとなる。

近年では水和セメントのシリケート構造を把握するための手段として，固体NMRを用いる手法(²⁹Si-NMR法)が一般的となっている。しかしながら固体NMRにてシリケート相の構造に関する情報を得るには，高価な測定装置が必要(特にSi元素についてのスペクトルを得るには高磁場をかけることが可能なNMR装置が必須)となることや，測定そのものに長時間を要する点などもあり，誰でも簡単に測定を実施できる状況であるとはいえない。一方，著者らはこれまでにシリケート相(ケイ酸アニオン)の構造解析の手段の一つとして利用可能なトリメチルシリル誘導体化法(TMS法)を用いた分析を適用することで，²⁹Si-NMR法による測定結果とほぼ同様のシリケート相に関する情報を取得してきた。本稿では，TMS法によるケイ酸アニオン構造の分析でどのような情報を得ることが可能なのか，またどの程度²⁹Si-NMR法の情報を補完できる可能性があるのか紹介させていただく。

なお誌面の都合上，別紙にも同様のTMS法について寄稿した文章があり，参考文献の末尾に紹介させていただくので，併せてご参照いただけると幸いである¹⁷⁾。



こいずみ こうしろう / KOIZUMI Koshiro
日本大学
理工学部
教授 博士(工学)

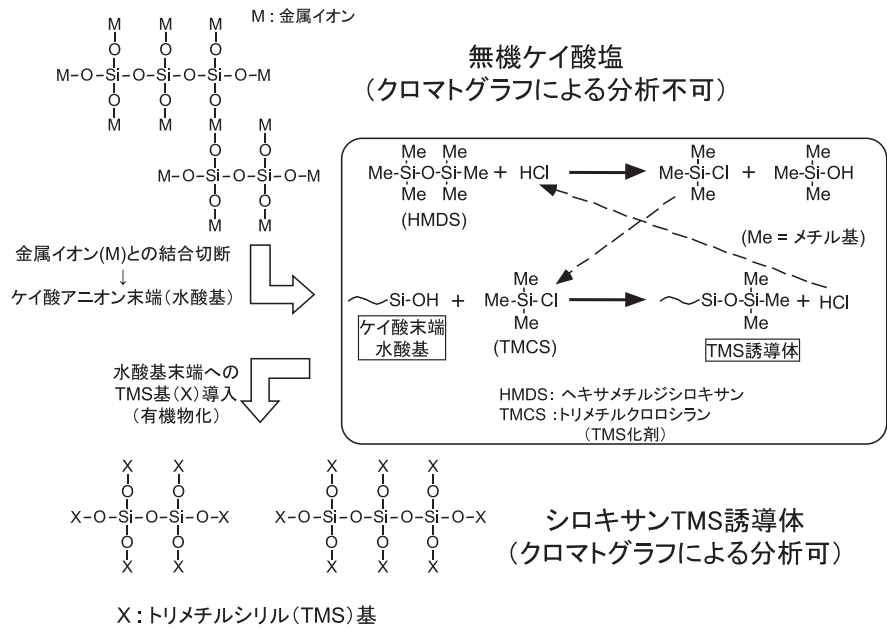


図 1 トリメチルシリル誘導体化反応スキーム

2. トリメチルシリル誘導体化(TMS)法とは

TMS法は無機材料化学の分野ではあまり聞きなれない分析手法ではあるが、そもそものTMS化は主に有機化合物の定性・定量分析の際に常用される手法である。高極性のヒドロキシ基(−OH)やカルボキシ基(−COOH)などの置換基末端を分子中に含む化合物をクロマトグラフで分析する場合、分析カラム中の固定液相への親和力が強いと、テーリングなどによるピークの不分離や定量性の低下が懸念される。そこで対象試料(置換基)に対してTMS化処理を行い、−OH末端をTMS基(−Si(CH₃)₃)に誘導体化(エンドキャッピング)することで、分析カラム中の固定液相への吸着を弱め、構成成分の分離性能や定量性を向上させることを目的に使用される。

一方で、セメントやSCMsを含む多くの無機系シリケート材料(イオン結晶もしくはイオン結合性の化合物)は有機化合物のような水酸基末端を持たないケースがほとんどであるが、例えばケイ酸塩の場合、試薬の選択次第でシロキサン末端の切断(Ca²⁺等金属イオンとの結合部に対する酸加水分解)により生じた水酸基に対してTMS化を施すことが可能である(図1)。これにより、一部のケイ酸塩のシロキサン鎖(⋯−O−Si−O−⋯)

の主鎖そのものを切断することなく(ケイ酸アニオンの骨格を破壊しない状態で)、末端にTMS基を導入した「シロキサンTMS誘導体」を得ることができ、一般的な有機化合物と同様、(導入コストがNMRに比べて安価な)ガスクロマトグラフ等による機器分析が可能となる。これにより、ケイ酸塩を構成するシロキサン単位(鎖長)の分布に関する情報を間接的に得ることが可能となる。すなわち、無機材料分野におけるTMS化法は、無機ケイ酸塩を「有機物化」して“シロキサン鎖の鎖長分布”として定量化するための手法の一つといえる。

3. TMS法の詳細

3-1. TMS法の変遷

ケイ酸アニオンの構造を分析するためのTMS法自体は、1970～1980年頃に数多くの検討が行われており、様々なケイ酸塩のシリケート構造についての分析例や、分析手法が報告されている。しかしながら、それとほぼ同時期に利用されるようになった²⁹Si-NMR法でもほぼ同様の分析が可能で、かつ後述のようなTMS法に必要な前処理(誘導体化反応処理)が不要であることもあり、以降から現在に至るまでケイ酸塩のシリケート構造についての分析は専ら固体NMR法による測定

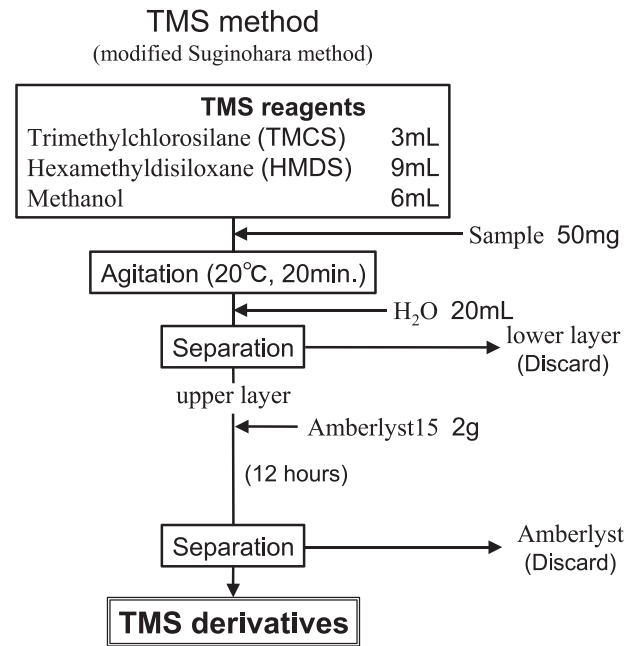


図 2 改良杉ノ原法によるTMS化フロー

が主流となっている。特に最近では、TMS法を無機ケイ酸塩の分析に適用している報告は著者らを除けばほぼ皆無である。

無機ケイ酸塩へのTMS法の適用報告およびその歴史的な改良の流れについては、安江ら¹⁾の報告で詳細にまとめられているが、その歴史的な変遷²⁻⁸⁾については誌面の都合上、別紙¹⁷⁾をご参照いただきたい。

3-2. 杉ノ原法の詳細およびその改良⁶⁻⁸⁾

著者らが適用しているTMS化法は、杉ノ原によるTMS法に対して著者らが経験上の若干の改良を加えたもので(「改良杉ノ原法」)あるが、この誘導体化処理のフローを図2に示す。

誘導体化処理後のサンプルは一般的なガスクロマトグラフ(Gas Liquid Chromatography : GLC)による分析が可能であり、シロキサン鎖のSi数(n)がn=1(SiO₄⁴⁻)～n=6(Si₆O₁₉¹⁴⁻)の“オリゴマーサイズ”の鎖状ケイ酸アニオンがTMS化された成分についての分析が可能となる。ちなみに、TMS誘導体化処理の過程におけるアンバーリスト処理(メチル異性化体の完全TMS化)に多少時間を要するものの、誘導体化後の試料のGLCによる分析は1件あたり30～40分で完了

することから、一度に複数の誘導体化サンプルを準備することで(1日あたりの)分析件数を稼げる点は²⁹Si-NMR法と比較した場合のメリットと言える。

3-3. ²⁹Si-NMR法との比較

TMS法も²⁹Si-NMR法も無機ケイ酸塩のシリケート構造についての情報を得る手段であるものの、双方の分析によって得られるデータの性質には若干の差がある。先述の通りTMS法では、分析対象の無機ケイ酸塩が構成する「ケイ酸アニオン(=シロキサンオリゴマー骨格)の鎖長分布」が直接測定できる。分析により得られるシロキサンオリゴマー(のTMS誘導体化物)の各成分ピークはGLCにより完全に分離されるため、鎖長分布の平均値を計算することでシロキサン鎖(ただしGLCによる分析の場合は鎖長n=1～6のオリゴマーサイズに限られる)の「平均重合度」の検討も可能である。

一方、²⁹Si-NMR法ではSi原子に直接結合している架橋酸素数(実質的には、あるSi原子が酸素原子を介していくつのSi原子と隣接しているか)に対応したケミカルシフト値ごとのピークがQ₀～Q₄サイトとして得られる(後述)。また一般的に各サイトのピークはオーバーラップしているケースがほとんどで、波形分離処理を実施することが必須となる。また得られるシグナルの性質上、²⁹Si-NMR法で得られるのは材料を構成している全てのシリケートの平均像をとるが、Q₀～Q₂サイトの応答強度の割合からTMS法と同様の「平均重合度」の算出も可能となっている。

具体的に単純な例で比較を行うと、例えば、あるケイ酸塩を形成するシロキサン骨格(鎖長)の構成単位が2量体：3量体=1：1にて構成されていたとすると、TMS法の場合はそのまま2量体と3量体として検出される(平均重合度は2.5)。一方²⁹Si-NMR法では、2量体(Q₁×2)と3量体(Q₁×2(両端のSi)+Q₂×1(中央のSi))が積算された「Q₁×4+Q₂×1」として検出されることになる(平均的な重合度(MCL)は2/ {Q₁/ (Q₁+Q₂)} と計算されるため、この場合もMCL=2.5となる)。

ただしセメント水和物の場合、アルミネート相やフェラ

表 1 各種シリケートのタイプとTMS法での適用範囲

材 料	主なシリケート形状	²⁹ Si-NMR 法での 主なシグナル	TMS 法
セメント (エーライト・ビーライト)	未水和：結晶性 (単量体)	Q0	適用可
	↓ 水和物：非晶質 (短鎖オリゴマー)	Q0, Q1, Q2	
高炉水砕スラグ	非晶質 (短鎖オリゴマー)	Q0, Q1, Q2	適用可
各種ポゾラン材料 (フライアッシュ、シリカフ ューム、ガラスなど)	非晶質 (ランダム長鎖型)	Q4	不可※
粘土鉱物 (アルミノケイ酸塩など)	結晶性 (二次元層状)	Q3	不可
粗骨材・細骨材 (石英など)	結晶性 (三次元立体状)	Q4	不可

イト相由来のAl³⁺イオンの一部が4配位となってSi原子(Si⁴⁺イオン)に置き換わることで長鎖ネットワークを形成(鎖長延長)するケース(アルミノケイ酸塩ゲル；C-A-S-H)があり，この場合，－Si-O-Al－結合中の酸素原子も「架橋酸素」として検出される。O-Al間の結合はイオン結合性がO-Si間よりも高いため，TMS法では誘導体化反応の過程で切断されることから，TMS法で検出できるのはあくまでもC-S-Hの構成単位のみであり，C-A-S-Hとしての鎖長分布は測定できない。そのため²⁹Si-NMR法により算出されるMCLは，TMS法で算出される「平均重合度」よりも高めに(長鎖長として)評価されることが多い。

4. ケイ酸塩の分類とTMS法の適用範囲

3-2.で記載した通り，TMS法を用いることで一部の無機ケイ酸塩のシロキサン鎖長に関する分析は可能ではあるが，すべての形態のケイ酸塩について分析可能である訳ではない。

表 1 に代表的な各種セメント系材料ごとのシリケート構造からみたTMS法での適用範囲の大まかな分類を記す(※一般的なポゾラン材料自身はTMS誘導体化の適用外であるが，ポゾラン反応により生成したケイ酸イオン(後述)はTMS誘導体化が可能でシロキサンオリゴマーとして分析可能)。

TMS誘導体化反応(図 1)の性質上，分析対象の材料が結晶性なのか非晶質で構成されているのかに関わらず，あくまでもシロキサン骨格の構造単位の末端が塩酸により切断されやすい(無機材料の場合，構造の末端が水酸基(－OH)であるか，架橋している金属イオンが酸(塩酸)により加水分解されて水酸基となり得るような水和ゲルもしくはイオン結晶など)ことが条件となる。

一方，表 1 の分類からわかるように，²⁹Si-NMR法でQ₃およびQ₄サイトとして検出されるようなシリケート構造(結晶性／非晶質にかかわらずシロキサン末端が極端に少ない巨大シリケート)の場合にはTMS誘導体化反応そのものが進行しないため，TMS誘導体化が不可能である。

よって，セメント化学の分野における水硬性材料の水和反応の進行過程や，ポゾラン材料の反応過程におけるケイ酸アニオンの挙動(構造変化)を詳細に観察する際に適した手法であると言える。

また，セメント・コンクリートの分野では，セメントペーストからモルタル／コンクリートまで様々な配合で実験を実施するが，基本的に骨材(砂・砂利)は多くのシリケート相を含むにも関わらずTMS誘導体化の対象外となる。そのためコンクリート試料をそのまま適用してもセメントペースト部の水和反応におけるシリケート構造のみを分析することが可能で，ペースト／モルタル／コンク

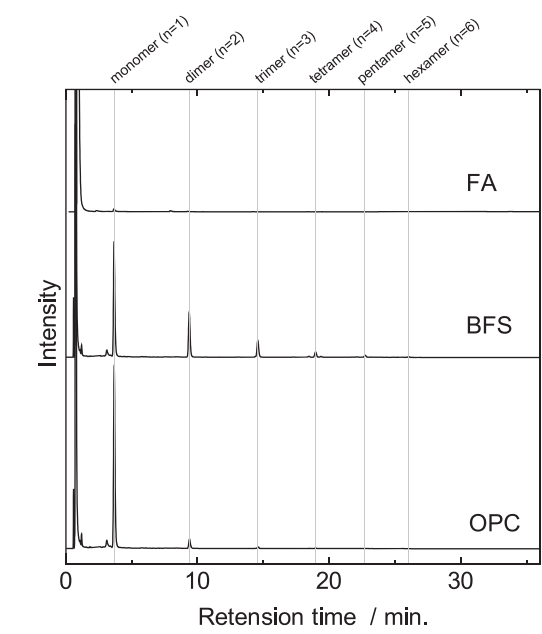


図 3 各種セメント系材料のGLCクロマトグラム

リート等の配合を限定せずに同様の分析が実施可能である。

5. TMS法によるケイ酸アニオンの分析例

著者が実際に「改良杉ノ原法」によって分析を行った結果を以下に紹介する。

5-1. セメント

未水和のOPCを前述の改良杉ノ原法で分析を行った際のガスクロマトグラムを図 3 に示す。この結果からOPCに含まれるシリケート相(エーライトおよびビーライトを構成するシリケート)は，ほぼ単量体(モノマー)タイプのケイ酸アニオン(オルトケイ酸塩)により構成されていることが分かる(²⁹Si-NMR法でも未水和セメントはQ₀サイトのみ検出)。

また，OPCの水和過程における試料(水和OPC)をTMS法で分析した際の，ケイ酸アニオンの鎖長分布の経時変化は図 4a のようになるが¹²⁾。この分析で検出された単量体(モノマー)タイプのケイ酸アニオンは，未水和の状態で残存しているエーライト，ビーライト由来の成分と，これらの水和反応に伴い生成した「水和

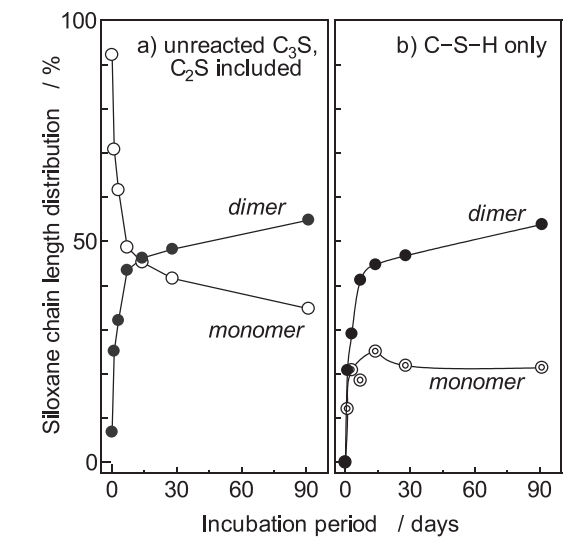


図 4 水和OPCのシロキサン鎖長分布の経時変化

〔 a) 未反応エーライト・ビーライト由来成分を含む場合，
b) 水和により生成したC-S-H由来成分のみ 〕

モノマー」(水和初期に生成するC-S-H)が混在したものであり，分析の性質上TMS法ではこれらを区別できない。ただし，水和試料のXRD分析の情報等からエーライトおよびビーライトの未反応量を算出し，TMS法により検出されたモノマー量全体から未水和分を差し引くことで，水和により生じたC-S-H中のモノマーおよび二量体(ダイマー)「のみ」の生成傾向を検討することも可能で(図 4b)¹³⁾，その補正後の結果から，水和モノマーの生成挙動(一旦初期に多く生成するが，しばらくすると減少に転じる傾向¹³⁾)と同様の傾向を確認することも可能である。また図 4 に示されるように，セメント水和物が構成するシロキサン鎖長分布はモノマーとダイマーでそのほとんど(水和が進行しても約8割以上)を占めている。より長期材齢の試料を分析してもその傾向は変わらず，長期化(材齢)とともにセメント水和物中のシロキサン鎖が無限に重合(ポリマー化)するとは考えにくい。セメントの場合，その化学組成は他の材料に比べ極めて「Ca過多」であることから，低CaO/SiO₂比のC-S-H(すなわち鎖長が極めて短いシロキサンオリゴマー)しか生成し得ないと予想できる。

5-2. 高炉水砕スラグ(BFS)

BFSは「潜在水硬性」を有することから，セメントと

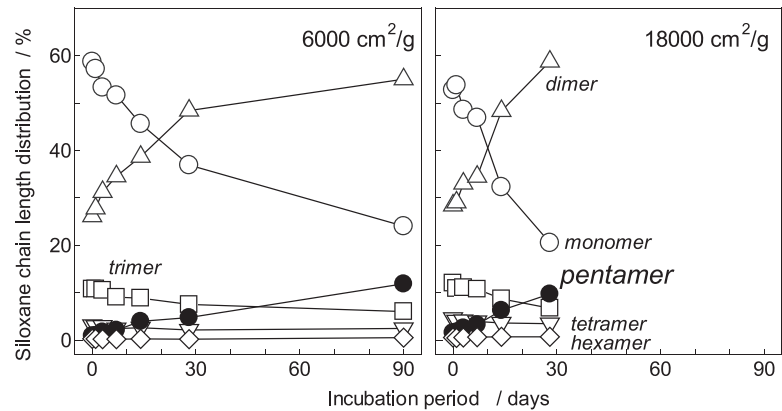


図5 水和したBFS微粉末のシロキサン鎖長分布の経時変化

同様にそのシリケート構造のTMS法による分析が可能である。著者らは飽和水酸化カルシウム水溶液中にBFS微粉末を分散・攪拌することで刺激を行った「アルカリ刺激スラグ」の水和挙動をTMS法で確認している¹⁴⁾。この結果の一部を図5に示す。OPCに比べると未水和の状態でもモノマーから六量体までの幅広いケイ酸アニオン分布構造を取っていることが分かるが(図3)、OPCと同様、水和の進行とともにシロキサン鎖が長鎖化する傾向を確認できる。また粒度の細かいBFS微粉末の方が早く反応する傾向にある点や、セメントと同様の二量体の増加とともに、五量体の増加傾向も確認しており、水硬性材料の水和に伴うケイ酸アニオンの水和挙動(形態変化)で一般的に知られている“3N-1則(n=2, 5, 8, 11…量体が多く生成)”による傾向も改めて詳細に確認することができた。

この分析例では(前項のOPCのケースのように)BFSの未反応量についての補正を実施(削除)していないため、シロキサンオリゴマー全体(含・水和/未水和)の挙動しか分からないが、やはり水和の進行と共にシロキサン鎖が無限にポリマー化する傾向にあるとは考えづらい。

5-3. フライアッシュ

BFSと共にセメント用の混和材料として知られているフライアッシュ(FA)は代表的な「ボゾラン材料」であり、材齢初期には水和反応は全く起こらない。ガラス状の“非晶質のランダム長鎖”のケイ酸構造で、このような材

料はそのままTMS化を試みても誘導体化反応を受けず、ほぼ未反応分として残存する(TMS化の対象外)。GLCクロマトグラムを見ても、痕跡程度のモノマーやダイマーがcaろうじて確認できる程度である(図3)。

ただし、FAは「ボゾラン活性」を有することから、中長期的にボゾラン反応が生じた場合に、ランダム長鎖のシリケートの部分的な切断によりケイ酸アニオンが細孔溶液中に溶出する。溶出したケイ酸イオンはC-S-Hとなり、オリゴマーサイズのシリケートとして検出される。著者らは水酸化カルシウムとFAの1:1(質量比)からなるFAペースト(W/P=0.5)を加熱養生したペースト試料の分析を実施しているが¹⁴⁾、OPCやBFSの水和反応の際のシロキサン鎖長分布の傾向と異なり、ペンタマーの増加傾向などが確認できなかったことから、OPCやBFSのような水硬性材料とボゾラン材料(FAなど)ではケイ酸アニオンの生成挙動が異なることが示唆された¹⁵⁾。

5-4. その他の材料

著者らの最近の研究報告として、TMS法を用いた石炭ガス化スラグ(CGS)のケイ酸構造についての分析例を紹介する¹⁶⁾。本スラグは次世代の石炭火力(石炭ガス化複合発電:IGCC)の試験炉より副産されたスラグで、将来的にはFAに代わる副産物となる可能性もあり、その基礎的な化学性状の検討用として提供いただいたものである。当初はFAと同様のシリケート形状(代表的なボゾラン材料と同様のランダム長鎖)を構成

しているものとして分析を実施したが、実際に調べてみると炭種(原料炭の起源)により異なるシリケート構造を有するスラグが副産されることが分かった。主にCaO/SiO₂比によるところが大きいものと推察されたが、BFS様のシロキサンオリゴマーの集合体として分析されたCGSがある一方で、FAのようにほぼTMS誘導体化を受けないCGSも存在した。同じガス化炉より副産されているに関わらず、これほどシリケート構造が大きく異なるスラグが生じるのは珍しいケースなのではないかと思うが、このような分析を比較的容易に実施可能な点もTMS法の利点の一つといえる。

6. TMS法の今後の展開

本稿では、著者らの分析結果を中心にセメント関連(周辺)材料におけるTMS法によるケイ酸アニオンの分析例を紹介した。

無機材料あるいはセメント・コンクリート材料の研究者からすれば若干煩雑に思える誘導体化等の前処理過程が必須であるものの、現在の主流である固体NMR法(²⁹Si-NMR)に比較して、低コスト(導入装置的にも1サンプルあたりの分析に要する時間的にも)での適用が可能であり、固体NMRの利用に制限がある場合などはなおさら、シリケート構造に関する情報を補完できる点からも、ご興味があれば是非導入をお勧めする次第である。

以上、セメント・コンクリート系材料を取り扱う研究者の皆様に限らず、様々なケイ酸塩を取り扱う多くの研究者の皆様にも少しでもご参考になるようであれば幸いです。

【参考文献】

- 1) 安江任, 荒井康夫／トリメチルシリル化法によるケイ酸塩中のケイ酸イオンの形態分析, J.Soc.Inorg.Mater., Japan(石膏と石灰), No.211, pp.385～395, 1987
- 2) Charles W. Lentz / Silicate minerals as sources of trimethylsilyl silicates and silicate structure analysis of sodium silicate solutions, Inorg. Chem., 3, pp.574～579, 1964
- 3) J.Götz, C.R.Masson, Trimethylsilyl derivatives for the study of silicate structures. Part I.A direct method of trimethylsilylation, J. Chem.Soc.A, pp.2683～2686, 1970
- 4) J.Götz, C.R.Masson / Trimethylsilyl derivatives for the study of silicate structures. Part II.Orthosilicate, pyrosilicate, and ring structures, J.Chem.Soc.A, pp.686～688, 1971
- 5) F.D.Tamás, A.K.Sarker, D.M.Roy / Effect of Variables Upon the Silylation Products of Hydrated Cements, Hungarian J.Industr. Chem., 5, pp.115～124, 1977
- 6) 中村良三, 杉ノ原幸夫／珪酸陰イオンを解析するための改良トリメチルシリル化法, 日本金属学会誌, 44, pp.352～358, 1980
- 7) 大楠弘, 益田穰司, 脇田満信, 杉ノ原幸夫／改良トリメチルシリル化法による珪酸陰イオン解析に関する基礎研究, 日本金属学会誌, 45, pp.915～922, 1981
- 8) 大楠弘, 竹下信治, 溝口数一, 杉ノ原幸夫／改良トリメチルシリル化法による鉛珪酸塩化合物中の珪酸陰イオンの形態解析, 日本金属学会誌, 47, pp.956～963, 1983
- 9) H.Uchikawa, R.Furuta / Hydration of C3S-Pozzolana Paste Estimated by Trimethylsilylation, Cem.Concr.Res., 11, pp.65～78, 1981
- 10) A.Bentur and J.F.Young, Simplified Method for Determining the Polysilicate Content in Cementitious Pastes Using Trimethylsilyl Derivatives, Cem.Concr.Res., 11, pp.287～290, 1981
- 11) 小泉公志郎, 梅村靖弘, 露木尚光／水和セメントのケイ酸構造に及ぼす重金属酸化物の影響, セメント・コンクリート論文集, 59, pp.2～7, 2005
- 12) 小泉公志郎, 佐藤正己, 梅村靖弘, 露木尚光／熟履歴を与えたフライアッシュセメントのケイ酸構造, セメント・コンクリート論文集, 67, pp.2～9, 2013
- 13) F.Bellmann, D.Damidot, B.Möser, J.Skibsted, Improved evidence for the existence of an intermediate phase during hydration of tricalcium silicate, Cem. Concr. Res., 40, pp.875～884, 2010
- 14) 小泉公志郎, 露木尚光／高炉水砕スラグ微粉末のケイ酸構造に及ぼす炭酸化的影響, セメント・コンクリート論文集, 56, pp.58～63, 2002
- 15) K.Koizumi, M.Sato, Y.Umemura / Comparison of silicate structures of various industrial wastes evaluated by hydration reactivity and pozzolanic activity, Proc. 15th ICC, Paper ID 405, 2019
- 16) 小泉公志郎, 石川嘉崇／石炭ガス化スラグのケイ酸塩構造, セメント・コンクリート論文集, 76, pp.521～527, 2022
- 17) 小泉公志郎／トリメチルシリル誘導体化法によるケイ酸アニオンの分析, J.Soc.Inorg.Mater., Japan, 28, pp.423～429, 2021

セメント規格がわかる本

2015年3月20日にJIS R 5201およびJIS R 5203が改正されたことに伴い、これら試験方法規格に関する「セメント規格がわかる本」を改訂しました。今回の規格改正において変更や追加された点について詳しく解説するとともに、試験を行う上で不可欠な知識やノウハウを理解しやすい内容となっています。

JIS R 5203：2015「セメントの水和熱測定方法（溶解熱方法）」編 A4版・60ページ・3740円（税込）・送料実費	JIS R 5201：2015「セメントの物理試験方法」編 A4版・135ページ・5500円（税込）・送料実費
---	--

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



炭酸化したスラッジ再生セメントによる カーボンネガティブ結合材の開発

Development of a carbon negative binder produced by carbonating sludge recycle cement

大川 憲 青木 真一 佐久間 誉義 宮田 夏侑 橋本 雄太
閑田 徹志 百瀬 晴基 巴 史郎 杉本 裕紀 馬場 勇介

1. はじめに

現在、脱炭素に向けた動きは世界的に加速しており、2021年11月時点で154か国・1地域が「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、わが国も同様に各分野でCO₂排出削減に向けた動きが本格化している。セメント分野では、廃コンクリートや一般焼却灰などカルシウムを含有する多様な廃棄物等から酸化カルシウム(CaO)を抽出し、セメント製造時に発生する排ガスから分離されたCO₂と再結合させることで、人工石灰石を生成する技術開発やCO₂を吸収しコンクリートに固定化させることができるCO₂吸収・硬化セメントの開発が進められている¹⁾。コンクリート分野では、コンクリート工場の排

ガスから回収した炭酸ガスとコンクリート廃材のカルシウムによって製造した炭酸カルシウム微粉末を用いたコンクリートの開発²⁾や高濃度のCO₂による炭酸化養生でCO₂を吸い込みカーボンネガティブとなる環境配慮型コンクリートが開発され、コンクリート製品での実用化も進んでいる³⁾。

また、近年、産業廃棄物処分場の建設が一層厳しくなる中、最終処分場の残余容量が減少傾向にあることから、レディーミクストコンクリート(以下、生コンと称す)業界でも廃棄物削減とリサイクル促進は喫緊の課題である。生コン業界の廃棄物として大きな課題となるのが、残コンクリート・戻りコンクリート(以下、戻りコンと称す)問題である。全国生コンクリート工業組合連合

おおかわ けん
OHKAWA Ken
三和石産(株)
取締役テストング事業部長
博士(工学)

あおき しんいち
AOKI Shinichi
同上
取締役生産統括部長

さくま たかのり
SAKUMA Takanori
同上
テストング事業部
技術部長

みやた なつゆき
MIYATA Natsuyuki
同上
テストング事業部
副主任

はしもと ゆうた
HASHIMOTO Yuta
三和石産(株)
テストング事業部

かんだ てつし
KANDA Tetsushi
鹿島建設(株)
技術研究所
副所長 Ph.D

ももせ はるき
MOMOSE Haruki
同上
技術研究所 建築生産グループ
上席研究員 博士(工学)

ともえ しろう
TOMOE Shirou
鹿島建設(株)
技術研究所 建築生産グループ
上席研究員

すぎもと ひろき
SUGIMOTO Hiroki
同上
副主任研究員

ばば ゆうすけ
BABA Yusuke
東海大学
建築都市学部 土木工学科
特任准教授 博士(工学)



図1 再生セメントと再生セメント(C)の製造工程およびCO₂排出原単位

会技術委員会によると、2023年度における国内の生コン出荷量が約7,018万m³であるのに対し、戻りコンの発生率は約2.1%と報告され、この発生率は2006年度の同報告に比べ増加している⁴⁾。この戻りコンの有効利用について、JIS A 5308ではスラッジ水や回収骨材として利用できるルールがあるにもかかわらず、普及が進んでいないのが現状である。

著者らはこれらの課題を同時に解決するため、戻りコン起源のスラッジについて、コンクリート製造からスラッジ処理完了までの時間を短縮することで、未水和セメント分を多く残し水和活性を高めたことを特徴とする結合材のスラッジ再生セメント(以下、再生セメント(記号: SRy)と称す)を開発した。この再生セメントは戻りコンを有効利用できるだけでなく、CO₂排出原単位が95.8kg-CO₂/tであり普通ポルトランドセメント(以下、OPCと称す)と比較し、およそ1/8程度のCO₂排出原単位である⁵⁾。

一方、2022年1月に鹿島建設、デンカ、竹中工務店を幹事会社とするコンソーシアムが提案した、「革新的カーボンネガティブ(CN)コンクリートの材料・施工技术及び品質評価技術の開発」が国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のグリーンイノベーション基金事業に採択された。本稿では、コンクリートにおけるCO₂削減・固定量最大化を目指し、①セメントを産業副産物などで置換する技術、②骨材や粉体にCO₂を固定化した材料(CCU材料)技術、③コンクリートにCO₂を固定させる技術の3つをそれぞれ

に高度化させながら、地産地消やコスト成立性を踏まえつつ有機的に組み合わせて、カーボンニュートラルではなく、カーボンネガティブ、すなわちCO₂排出量ゼロ以下となるコンクリートを全国的に社会実装することを目的としている⁶⁾。同事業は、最長で2030年まで続く研究開発である。長期に渡る壮大な技術開発を推進するために、鹿島建設、デンカ、竹中工務店が幹事企業となり、44企業、11研究機関の全55団体からなる大型コンソーシアム「CUCO」を結成し、その中で著者らは、再生セメントの環境性能をさらに高めたCO₂排出量がマイナスとなるカーボンネガティブ結合材として、炭酸化した再生セメント(以下、再生セメント(C)(記号: SRy(C))と称す)の研究開発を行っている。

2. 再生セメントの概要

2-1. 再生セメントの製造方法

再生セメントの製造工程を図1(青枠内)に示す。図より、再生セメントは①～④の工程により製造され、戻りコンから骨材を洗浄分級し、残ったスラッジ水を脱水後、破碎攪拌翼付きスラッジ乾燥機(乾燥温度120～130℃)を用いて含水率が1～2%程度となるまで破碎乾燥処理して製造したものである。この処理を戻りコンが発生した当日に行うことで、未水和セメントの含有率を高くすることができ、OPCの6～8割程度の強度発現性を有する⁵⁾。

表 1 再生セメントの品質規格

品 種	スラッジ [*] 再生セメント-L	スラッジ [*] 再生セメント-M	スラッジ [*] 再生セメント-H
比表面積 (cm ² /g)	5000～ 8000以下	8000超～ 10000以下	10000超
強度発現性 (普通セメントとの強度比)	0.6～0.8 程度	0.4～0.6 程度	0.3～0.4 程度
CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	95.8 (普通ポルトランドセメントの1/8程度)		
主な用途	生コン,PCコン	—	
	セメント系固化材		—
	地盤改良材・プレミックスモルタル等		

表 2 使用材料

項目	品名	記号	密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g	備考
結合材	再生セメント-L	SRy(C)-L0	2.96	5290	炭酸化前
	再生セメント(C)-L	SRy(C)-L3-24	※図2,3の試験結果参照		炭酸化後
	再生セメント-M	SRy(C)-M0	2.59	6790	炭酸化前
	再生セメント(C)-M	SRy(C)-M3-24	※図2,3の試験結果参照		炭酸化後
	再生セメント-H	SRy(C)-H0	2.51	10360	炭酸化前
	再生セメント(C)-H	SRy(C)-H3-24	※図2,3の試験結果参照		炭酸化後
細骨材	セメント強さ用標準砂	S	2.64	—	—
水	水道水	W	—		—
化学混和剤	高性能AE減水剤	SP	—		—

2-2. 再生セメントの品質規格

再生セメントの品質規格を表1に示す。表1より、再生セメントの品質管理は比表面積により行っており、比表面積ごとに5000～8000cm²/g以下はスラッジ再生セメント-L(以下、SRy-Lと称す)、8000超～10000cm²/g以下はスラッジ再生セメント-M(以下、SRy-Mと称す)、10000cm²/gを超えるものはスラッジ再生セメント-H(以下、SRy-Hと称す)にグレード分けを行い、これらの品質に適した用途で使用している。

3. 炭酸化した再生セメントの基礎検討

3-1. 実験の目的

炭酸化前の異なる比表面積の再生セメントを用い炭酸化後の再生セメント(C)の炭酸化養生時間の影響を明らかにすることを目的とし、再生セメント(C)の基礎物性およびモルタルによるフレッシュ性状および圧縮強度について検討した。

3-2. 実験概要

使用材料を表2に示す。炭酸化前の再生セメントは比表面積5,290cm²/g(以下、SRy(C)-L0と称す)、比表面積6,790cm²/g(以下、SRy(C)-M0と称す)および比表面積10,360cm²/g(以下、SRy(C)-H0と称す)の計3種類を用いた。炭酸化養生は高濃度炭酸化槽を用い、温度50℃、湿度50%、CO₂濃度80%で槽内に各再生セメントを厚さ3mm以下でバットへ均等に広げ静置し、所定の炭酸化時間まで養生した。炭酸化時間は0、3、6、12、18、24hの6水準とし、炭酸化養生後に基礎物性試験を実施し、CO₂固定量を算出した。なお、記号のL、M、Hの後の数字は炭酸化養生時間である。これらを炭酸化したSRy(C)は炭酸化養生時間ごとにそれぞれSRy(C)-L0～L24、SRy(C)-M0～M24、SRy(C)-H0～H24と示した。モルタルの配合条件は、セメントの物理試験(JIS R 5201)の強さ試験に準拠し、W/SRy(C)=50%、S/SRy(C)=3.0とした。

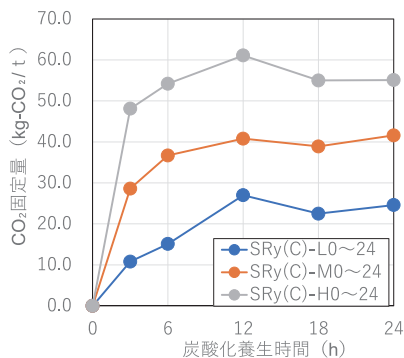


図2 炭酸化時間とCO₂固定量

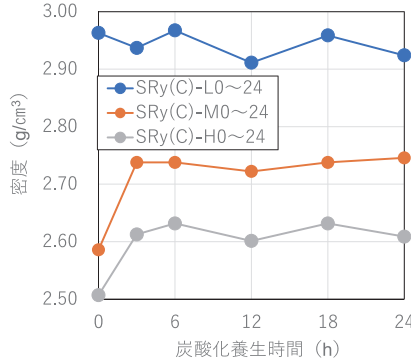


図3 炭酸化時間と密度

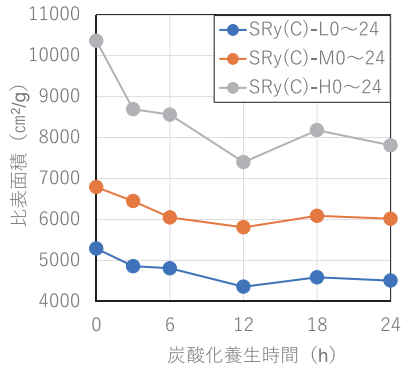


図4 炭酸化時間と比表面積

3-3. 試験方法

SRy(C)の基礎物性試験は、セメントの物理試験方法(JIS R 5201)に準拠し密度試験、比表面積試験を実施した。CO₂固定量の試験は、示差熱-熱重量同時測定装置(リガク社製、Thermo plus EVO2 TG-DTA8122)を使用した。窒素雰囲気下(流量100ml/min)にて昇温速度20℃/minで1,000℃まで昇温した。測定により得られたTG-DTA曲線の550～900℃に表れる質量減少量がCaCO₃由来の脱炭酸であると考え、この温度範囲における炭酸化前後のSRy(C)の質量減少量の差をCO₂固定量とした。

各種モルタルのフレッシュ性状はモルタルフロー(JIS R 5201)、圧縮強度はセメントの物理試験方法(JIS R 5201)の強さ試験に準拠した。炭酸化前の各SRy(C)-0配合の目標フロー値が160mm程度となるようにそれぞれ化学混和剤の添加率を調整した。なお、各SRy(C)配合(L、M、H)はそれぞれ同一添加率とした。一方でSRy(C)-Hは同一添加率では、炭酸化後の

SRy(C)を用いたモルタルの流動性が大きく材料分離し供試体作製が困難であると判断し、強度試験は実施しなかった。SRy(C)-L0～L24およびSRy(C)-M0～M24は材齢1日で脱型後、試験材齢まで20±3℃で水中養生し、材齢28日で圧縮強度試験を行った。

4. 実験結果および考察

4-1. 再生セメント(C)の基礎物性およびCO₂固定量

炭酸化養生時間とCO₂固定量、密度、比表面積の関係を図2～4に示す。図2よりCO₂固定量は炭酸化養生時間が長くなるほど大きくなり、炭酸化前の比表面積が大きいSRy(C)-HでCO₂固定量が最も大きくなった。図3より、SRy(C)-L0～24の密度は炭酸化養生時間にかかわらず同程度であったが、SRy(C)-M0～24およびSRy(C)-H0～24の密度は炭酸化養生時間3hで大きくなり、その後変化は見られなかった。図4より、全てのSRy(C)で炭酸化養生時間が長くなるほど、比表面積が小さくなる傾向となり、炭酸化前の比表面積が大きいSRy(C)-Hでは最大2,960cm²/g低下した。これらは、炭酸化前の比表面積が大きいSRy(C)-H0ほど、水和生成物凝集体が多く含まれていることが影響していると考えられ、その凝集した水和生成物とCO₂が反応し、炭酸カルシウムなどが結晶化することで水和生成物中の空隙を充填したことが、CO₂固定量、密度および比表面積に影響したものと考えられる。

CO₂固定量と炭酸化後のSRy(C)の各比表面積

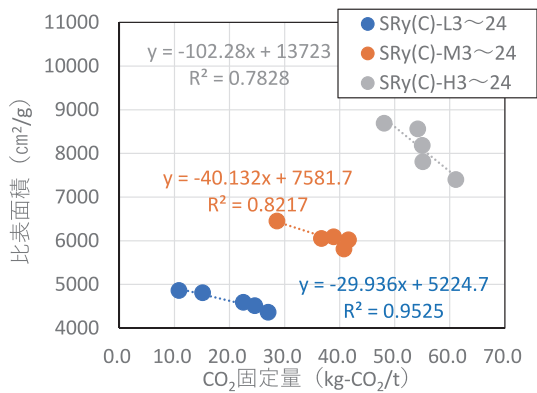


図5 CO₂固定量と各比表面積

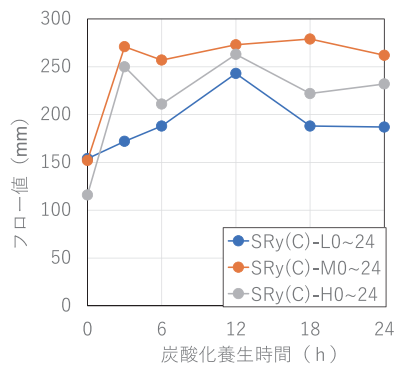


図7 炭酸養生時間とフロー値

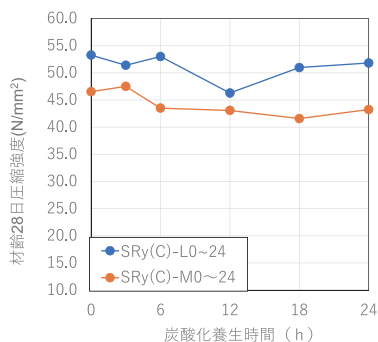


図9 炭酸養生時間と圧縮強度

(L, M, H)の関係を図5に示す。図5より, SRy (C) の各比表面積 (L, M, H) の近似直線は相関係数が大きく, CO₂固定量が大きくなるほど, 比表面積は小さくなった。また近似直線の傾きはSRy (C) -Hが一番大きくなった。炭酸化前後の比表面積の差とCO₂固定量の関係を図6に示す。図6より, 全てのSRy (C) において炭酸化前後の比表面積の変化量が大いほどCO₂固定量は大きくなり, 相関関係が見られた。このことから, SRy (C) のCO₂固定量は, 比表面積の大小にかかわらず, SRyの実製造時の品質管理項目である比表面

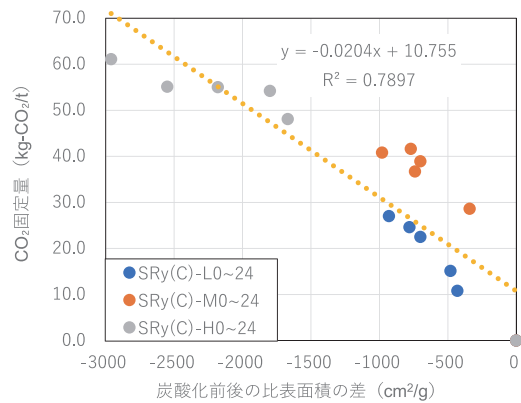


図6 炭酸化前後の比表面積の差とCO₂固定量

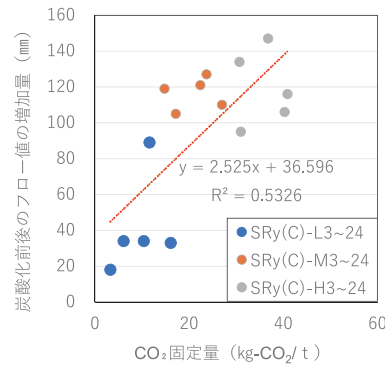


図8 CO₂固定量と炭酸化前後のフロー値の増加量

積の変化量から管理できる可能性が示唆された。

4-2. モルタルのフレッシュ性状

各SRy (C)を用いたモルタルでの, 炭酸養生時間とモルタルフロー値の関係を図7に示す。図7より, 炭酸化することですべてのSRy (C) のフロー値が大きくなり流動性が向上した。各SRy (C) のフロー値の増加量の最大値 (SRy (C) -L : 89mm, SRy (C) -M : 127mm, SRy (C) -H : 147mm)を見ると水和生成物の量が多いと思われる炭酸化前の比表面積が大きいSRyほど炭酸化によるフロー値の増加量が大きくなる傾向であった。また, SRy (C) -MおよびHでは炭酸化時間3hで大幅に流動性が改善する結果となった。各SRy (C) のCO₂固定量と炭酸化前後のフロー値の増加量の関係を図8に示す。図8より, すべてのSRy (C) でCO₂固定量が大きくなるとフロー値が大きくなる傾向であることが明らかとなった。これらはSRy (C) に含まれる水和生成物中の水酸化カルシウムが炭酸化す

ることにより水和生成物の空隙が充填されたことが影響したものと考えられる。

4-3. モルタルの圧縮強度試験結果

炭酸養生時間と材齢28日の圧縮強度試験結果の関係を図9に示す。なお, SRy (C) -Hは材料分離が激しく供試体が作製できなかった。図9より, SRy (C) -Lでは炭酸養生時間が強度に与える大きな影響は見られずSRy (C) -Mでは, SRy (C) -M0とSRy (C) -M3の圧縮強度が同程度であったが, それ以外では炭酸化時間が長い程圧縮強度がわずかに小さくなる傾向となった。

5. まとめ

本稿の範囲において, 下記の結論が得られた。

- 1) 炭酸養生時間が長くなるほど, CO₂固定量が大きくなり, 炭酸化前の比表面積が大きいSRy (C) -HでCO₂固定量が最も大きくなった。
- 2) 炭酸養生時間が長くなるほど, SRy (C) の密度が大きく, 比表面積が小さくなった。
- 3) SRy (C) のCO₂固定量は, SRyの実製造時の品質管理項目である比表面積の変化量から管理できる可能性が示唆された。
- 4) 全てのSRy (C) において, それらを用いたモルタルのフロー値は大きくなり, 流動性が向上した。
- 5) フロー値の増加量は炭酸化前の比表面積が大きいSRyほど大きくなった。
- 6) SRy (C) -Mでは炭酸養生時間が長いほど, 圧縮強度がわずかに小さくなる傾向であった。

6. おわりに

本稿では, 戻りコンから製造した再生セメントを炭酸化し, さらなる環境性能を高めたカーボンネガティブ結合材を開発するための基礎検討について紹介した。ここで紹介した炭酸化した再生セメントの基礎検討に関

しては, 今後さらに実験データを積み重ね, 社会実装を目指していく計画である。また2050年カーボンニュートラルの実現に向け, セメント・コンクリート分野のCO₂削減へ貢献する一つの技術として紹介した。また既存技術である再生セメントは, 戻りコンからの産業廃棄物削減とCO₂削減の2つの課題について同時に解決する取組と考えられ, 今後さらなる普及に役立てれば幸いである。

【謝辞】本稿は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP21014)を受け, 革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発で得られた成果を活用したものである。

【参考文献】

- 1) 橋本真幸, 小林和揮, 扇嘉史, 細川佳史 / CO₂吸収・硬化セメント「カーボフィックス®セメント」の開発, セメント・コンクリート, No.906, pp.10~16, 2022.8
- 2) 渡邊賢三, 坂井吾郎, 坂田昇, 八木利之 / 炭酸カルシウム微粉末を用いた高流動コンクリートによる省人化とCO₂削減を両立する技術に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.1216~1221, 2022.7
- 3) 取達剛, 関健吾, 渡邊賢三, 坂井吾郎 / 炭酸養生によるCO₂吸収型カーボンネガティブコンクリートの開発と今後の展開, コンクリート工学, Vol.59, No.9, pp.813~818, 2021.9
- 4) 全国生コンクリート工業組合連合会技術委員会 / 生コンクリートスラジの実態に関する調査報告書Ⅲ, 2020.3
- 5) 大川憲, 青木真一, 関田徹志, 笠井哲郎 / レディーミストコンクリート工場の戻りコンクリートから製造した乾燥スラジ微粉末の諸特性とCO₂排出原単位, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1372~1377, 2020.7
- 6) 取達剛, 森泰一郎, 小島正朗 / 革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び品質評価技術の開発状況 2023, コンクリート工学, Vol.62, No.4, pp.300~307, 2024.4

*

*

*

信州佐久水紀行

加藤 敏明

年を重ねるとふるさとが一層なつかしくなるといわれるが、私もその例に漏れない。そこで私のふるさとである信州佐久を紹介したい。長野県東部に位置する佐久盆地（佐久平）は、北に浅間山、南は八ヶ岳連峰に囲まれ、中央を千曲川が流れている。年配の方には「佐久鯉」の地域でわかってもらうことも多かったが、最近では駅伝などで有名な「佐久長聖高校」のほうを通りがよいだろう。

私が紹介したいふるさととは、佐久の南部で千曲川の源流域、南佐久郡である。この地域は自然豊かな高原地帯であるとともに特殊な地質を有している。南佐久の谷あいを通れる千曲川の西側は中央地溝帯（フォッサマグナ）に沿った火山帯になっており、火山堆積物で覆われている。この八千穂高原には日本一と言われる美しい白樺の群生林が200ha、50万本の規模で植生している。また、千曲川の東側は、関東山地の一部、秩父古生層があり、中生代（ジュラ紀～白亜紀）の地層も入り組んできている。この地域は地質時代は海であり、様々な化石を産出する。私も中学生の時に30mほどの崖をよじ登り、白亜紀のアンモナイトや

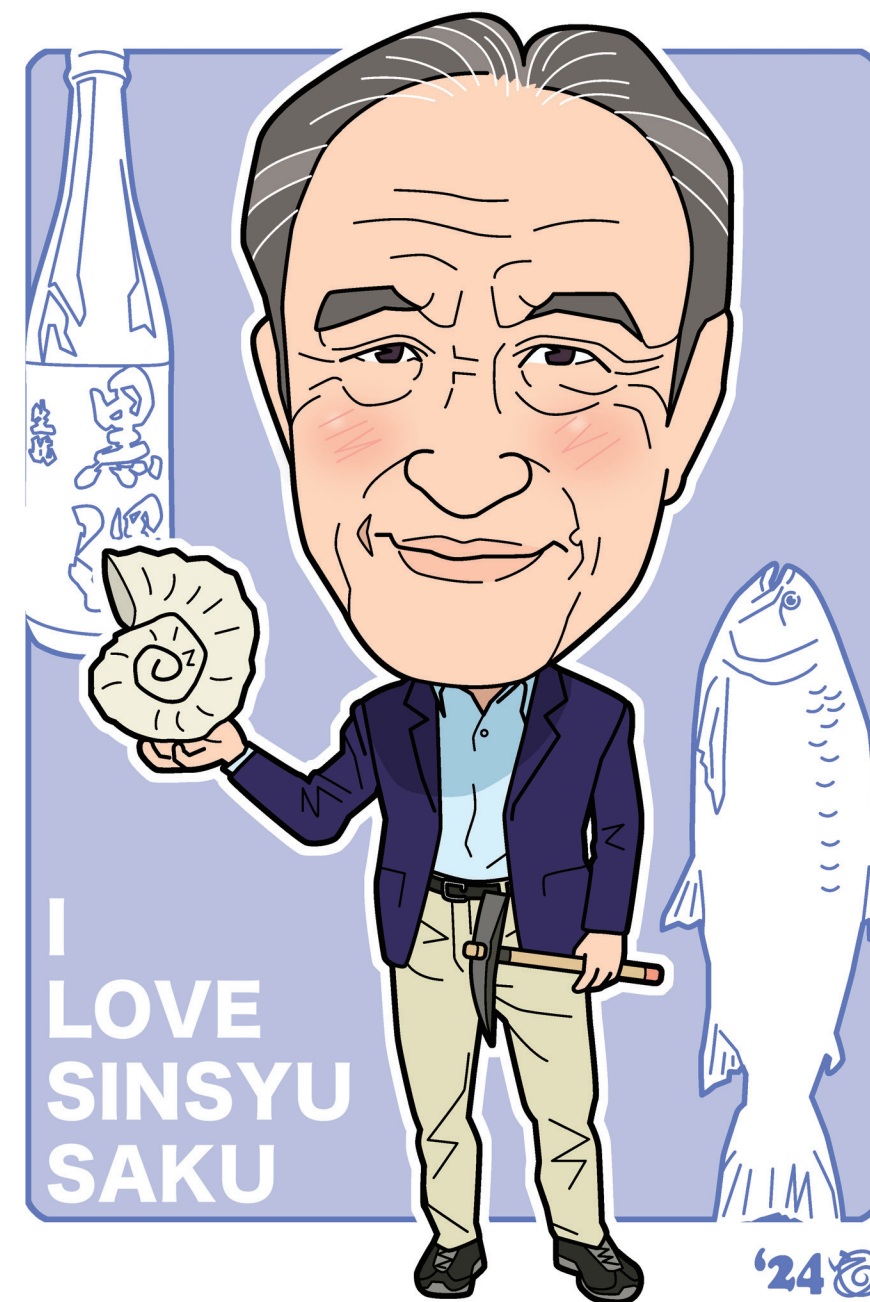
三角貝、ウニなどの化石を夢中で採取したものだ。

さて本題に入ろう。千曲川源流域の南佐久では八ヶ岳山麓からの湧き水や東部秩父山地からの沢水が超軟水である。通常1リットル当たりのミネラル量が100mg程度以下を軟水と称しているが、この南佐久のミネラル量は、その半分以上である。なので、これを水源としている水道水がすごくおいしい。佐久地方は、高原野菜、果物、花きの一大産地であるが、米作りも盛んだ。最近では米農家の技術革新により、品評会で入賞する米も増えている。まろやかな水とおいしい米とくれば、日本酒である。千曲川最上流にある「黒澤酒造」は、八ヶ岳の伏流水と地元の米ですっきりとした味の銘酒を醸造している。なお、佐久地域には千曲川沿いに多くの酒蔵所があり、若手蔵元が提唱する「SAKU13青葉会」を立ち上げ、それぞれ特徴のあるおいしい酒を提供している。日本酒党を自認する私は、田舎に帰省する度、友人とおいしい酒を飲み交わしている。

佐久といえば前出の佐久鯉が有名で、その養殖は江戸天明年間に始まったと聞く。これも

清流千曲川の恵みであるが、ここでは一層清冽な千曲川源流域で養殖される「信州サーモン」を紹介したい。もともと千曲川上流地域では、ニジマスやイワナ、ヤマメの養殖が行われてきた。信州サーモンとは、長野県水産試験場が10年ほどの歳月をかけて開発した養殖品種で、平成16年に水産庁の承認をえた。もとはニジマスとブラウントラウトを交配したマス類であるが、サーモン同様の銀色の表面と紅色の身を持つことから信州サーモンと名付けられている。高校同窓のS君は、千曲川上流域の佐久穂町で家業の養殖業を継いで40年になるが、開発当初から20年ほど餌や水質の試行錯誤を繰り返し、最近では軽井沢や首都圏のレストランでおいしい信州サーモンを提供できるようになったと自信をのぞかせている。

千曲川に沿うようにJR小海線が走っている。鉄道ファンならずとも小海線が日本一標高の高い野辺山駅がある高原鉄道として広く知られていると思う。以前から気になっていたのが、小海線には「海」のついた駅が多いということだ。南から「佐久海ノ口」、「海尻」、「小海」そして私の実家の最寄り駅「海瀬」である。まさか地質時代にこの辺りが海であったことが理由ではあるまいと思い、少し調べてみた。有力な説は、八ヶ岳の噴火による溶岩で千曲川などがせき止められ、いくつもの「湖」ができた。標高2000mにある紅葉の名所「白駒の池」もその一つだ。古来、「湖」は「うみ」と呼ばれることもあったので、地名に「海」がついたとのことである。南



佐久地方では、苗字にも「新海」や「新津」がある。「君の名は。」のアニメ監督「新海 誠」氏は、南佐久郡小海町の出身で、小海線沿線には、「新海三社神社」があり、建立が平安時代以前にさか上るというこの古刹は、「君の名は。」の神社のモデルと言われている。旅に出る際、ぜひ南佐久も検討していただければ幸いである。

[かとう としあき／大林道路(株)]

技師長 博士(工学)]

イラスト・タイトル 宮島幸次

第73回セメント安全衛生大会を開催

セメント協会は6月6日～7日の2日間、東京証券会館ホール(東京都中央区)で164名が参加し、「第73回セメント安全衛生大会」を開催した。

大会初日、冒頭挨拶に立った諸橋央典会長は、令和6年能登半島地震によりお亡くなりになられた方々に謹んで哀悼の意を表すと共に、被災された皆様の安全と被災地の一日も早い復興、そして被災された皆様の生活が1日も早く平穏に復することをお祈り申し上げると述べた上で、本大会が回を重ねるごとに充実した内容となり、業界の安全衛生レベルの向上に大いに役立ってきたものと自負している。これもひとえに、諸先輩や皆様が日常生活、あるいは企業の生産活動を支える上で、安全衛生がいかに重要であるかを繰り返し訴え続けてきた成果である、と語った。

また、セメント業界の労働災害について、2023年度は工場従業員、協力会社あわせて20件発生した。災害での罹災者数20名のうち15名は協力会社の方々に、この内1名の方が誠に残念ながら死亡災害となり、仲間の尊い命が失われたことは痛恨の極みであり、今後も労働災害ゼロを目指し、協力会社



会場の様子

も含めた総合的な安全対策を一層推進する必要があると考えている、と総括した。

続いて、小野恭一安全衛生対策委員長による2023年度委員会活動報告およびセメント業界の安全衛生概況の報告の後、来賓の小沼宏治厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課長と竹越徹中央労働災害防止協会理事長より祝辞をいただいた。その後、2023年度安全・衛生優良事業場の表彰式を執り行った。

安全部門では大賞が、UBE三菱セメント(株)宇部セメント工場の1工場、優秀賞が、UBE三菱セメント(株)伊佐セメント工場の1工場、優良賞が、(株)トクヤマ南陽工場、琉球セメント(株)屋部工場、UBE三菱セメント(株)苅田セメント工場、日立セメ



諸橋央典
会長



小野恭一
安全衛生対策委員長



小沼宏治
厚生労働省労働基準局
安全衛生部安全課長



竹越徹
中央労働災害防止協会
理事長



宮崎武志
衛生部会長



特別講演
中村早岐子氏



表彰式



UBE三菱セメント(株)宇部セメント工場
村山亮一工場長による謝辞

ント(株)日立工場、日鉄セメント(株)室蘭工場、苅田セメント(株)苅田工場、太平洋セメント(株)藤原工場、麻生セメント(株)田川工場、の8工場が受賞した。

衛生部門では大賞が日立セメント(株)日立工場の1工場、優秀賞が、(株)デイ・シイ川崎工場の1工場、優良賞が東ソー(株)南陽工場、(株)トクヤマ南陽工場、敦賀セメント(株)敦賀工場、UBE三菱セメント(株)岩手工場の4工場が受賞した。各工場の代表者に諸橋央典会長から表彰状が手渡され、

受賞者代表のUBE三菱セメント(株)宇部セメント工場の村山亮一工場長が謝辞を述べた。

式の締めくくりには「たゆまぬ努力と挑戦で、実行しよう、安全・安心・快適作業!」をスローガンとする大会宣言が宮崎武志衛生部会長より発表され、満場の拍手を得て承認された。

続いて行われた第2部では、オフィスファイン合同会社代表 中村早岐子氏を講師に招き「ほめるコミュニケーションが生む職場の活力とモチベーション」と題して特別講演が行われた。第3部では交流会として立食形式の懇親会を開催し、親交を深めた。

翌2日目は第4部として衛生部会4件、安全部会4件の研究発表が行われた。セメント産業の安全衛生向上のため日頃研究された成果が発表され活発な質疑応答があり、大会は成功裡に終了した。

なお、会場ロビーでは(公社)日本保安用品協会の協力により、墜落制止用器具(安全帯)、CO₂濃度測定器、耳栓、ヘルメット、熱中症予防対策用品、VR等の展示が両日ともに行われ好評を博した。

韓国セメント産業のカーボンニュートラルの 現況と今後の方案

Carbon neutral status and future plans of Korea Cement Industry

李 昌起 金 義哲 安 台浩

1. はじめに

韓国セメント産業の国内生産量は2022年度基準で5,106万t、世界13位(日本は2022年度基準で5,300万t、世界12位)であり、このうち韓国国内向けの出荷量は4,965万tである。また、セメントの半製品であるクリンカーを含め、現在264万t(世界16位)を輸出している。

韓国セメントメーカーは、クリンカー / OPCを製造する7社と、スラグセメント製品に加工して販売する10社余りの企業で構成(このうち7社が約90%販売)されている。セメント産業の売上高は5.3兆ウォン(コンクリート産業は20兆ウォン)であり(22年基準 セメント7社の売上高:52,533億ウォン)、韓国製造業総生産額の0.6%、非金属鉱物の13.5%を占めている。

韓国セメント産業は図1で示すように代表的なエネ

ルギー多消費業種の一つで、多数の企業が温室ガス排出権取引制度(ETS)、または温室ガス・エネルギー目標管理制度を導入する対象企業である。セメント産業は図2のようにエネルギー集約型産業で、化石燃料への依存度が高く、製造工程に関する排出の割合(60%)が高いため、温室ガス削減の余力が非常に制限的なのが実情である。

韓国セメント産業の2022年度基準による温室効果ガス排出量は3,800万tで、産業部門総発生量の9.9%、温室ガス総発生量の5.5%を占めるほどの温室ガス多排出業種である。したがって、韓国政府の目標である2030年のNDC履行と2050カーボンニュートラル達成のためには、低炭素セメント技術の開発と国際水準に適合する製品の標準化の方策を急務として取り組む必要がある。

韓国は2023年7月から、産業通商資源部(日本の経済産業省と同一機関)主導による産業技術革新産業の一つとして、政府と民間の協力に基づくカーボンニュートラルへのグリーン転換を促進するため、カーボンニュートラル産業革新技術開発事業を開始した。期間は段階別に事業区分されているが、基本的には2030年までに韓国NDC目標を達成するため、温室ガスの多排出業種(鉄鋼、石油化学・精油、セメント、半導体・ディスプレイ)を中心に、多くのカーボンニュートラル研究開発を進めている。

本稿では、セメント分野の韓国型カーボンニュートラル

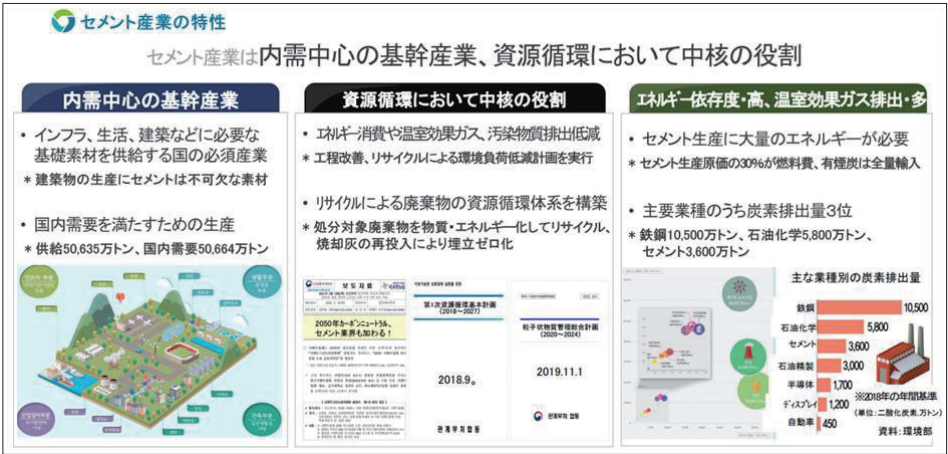


図1 韓国セメント産業の特性(内需中心、資源循環、温室ガス排出業種)¹⁾



図2 韓国セメント産業の温室ガス排出特性¹⁾

の研究の概念を簡略的に紹介することとし、7.5年という長期間の技術開発計画と、セメント段階での基盤研究を基礎とした今後の方案、さらに新しいセメント産業の未来教育と専門人材養成の必要性について紹介する。

2. 韓国政府のカーボンニュートラル政策

韓国政府は2009年に、国内二酸化炭素排出目標値(BAU比)を、2020年までに30%削減すると国際社会に約束し、炭素削減について議論を重ねている。しかしその後政権交代により、その重要性について多少変動があり、実際のところ2010年度の韓国温室ガス排出量は前年より10%以上跳ね上がり、6億5千万tを越え、2018年までその上昇傾向が持続的に続いた。

そこで2020年に、韓国政府は図3に示す「2050炭

素中立」を宣言し、2020年12月30日には関係省庁合同で樹立した「2050長期低炭素発電戦略(LDS)」を国連気候変動協約に提出し、韓国の本格的なカーボンニュートラル政策が始まった。その後、炭素を画期的に低減できるカーボンニュートラル革新技術を確保するため、科学技術情報通信部は「カーボンニュートラル10大革新技術開発方向」報告書を発表した。

韓国では、世界で14番目に「2050カーボンニュートラル」のビジョンと履行体系を法制化し、「2050カーボンニュートラル」のシナリオおよび「2030NDC」の上方目標を設定するなど、非常に急速な産業の変革が始まっている。各産業界ではカーボンニュートラル実現のためのR&D課題開発、関連セミナーおよび討論会、フォーラムを開催し、カーボンニュートラル社会への転換を準備している。



イ チャンギ / LEE Chang-Guy
韓国セメント新素材研究組合
理事長



キム ウイチョル / KIM Eui-Chul
同上
本部長



アン テホ / AHN Tae-Ho
(株)SILKROAD C&T
技術研究所 常務取締役 博士(工学)

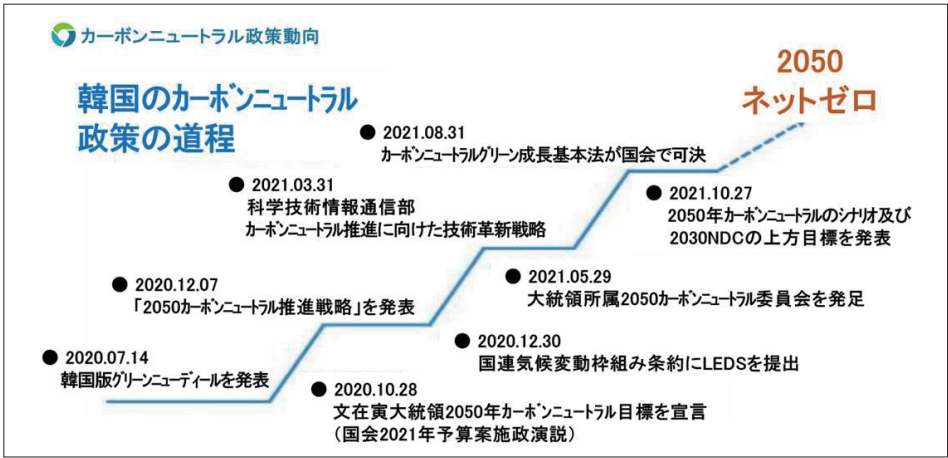


図3 韓国政府のカーボンニュートラル政策動向²⁾

3. 韓国セメント産業のカーボンニュートラル政策

セメントは石灰石の焼成工程が基本工程であるため、必然的にCO₂を発生させる材料である。韓国の場合、ポルトランドセメント1t製造時に830kgのCO₂を排出し、2019年度基準のCO₂排出量は約39百万tに達した。このようにセメント産業は鉄鋼、石油化学とともに代表的な炭素多排出業種であるため、炭素排出量を低減させる強い圧力を受ける産業である。

しかし、韓国のセメント産業はこれまで炭素排出量の低減のために多くの努力をしてきたことはあまり知られていない。混合セメントの使用量は19%の水準にとどまっているが、建設産業で最も主力として使用するOPCの混合材含有量を増加させたため、セメントの炭素排出量は非常に低い。現在、韓国セメントの平均炭素排出係数は0.77で、欧州の平均値である0.75とほぼ同水準である。これは、これまでにセメント産業が、気候変化防止のための努力を熱心に続けてきたことを示す指標である。しかし、科学技術情報通信部が発刊した「カーボンニュートラル10大革新技術開発方向」の報告書では、依然としてセメントを鉄鋼とともに炭素排出量が多い革新産業に分類しており、今後も持続的に炭素排出量を低減しなければならない環境に置かれている。

一方、2022年10月に韓国関係省庁合同で発刊した

「2050カーボンニュートラルシナリオ案」によると、セメント業界の革新削減手段として、燃料転換と原料転換を挙げている。燃料転換の場合、固体化石燃料である有煙炭を廃合性樹脂60%、水素熱源（バイオマス連動）40%に完全代替するという計画で、原料転換は、石灰石原料を製鋼スラグ、廃コンクリート微粉などの非炭酸塩で約12%代替し、混合材の比重を現在の10%から20%まで拡大するという概念である。このシナリオによれば、2050年には政府の目標である排出量の約53%削減が達成される見込みである。また、自発的な温室ガス削減目標であるNDC（Nationally Determined Contribution）の上方修正案を見ると、2018年基準で2030年の温室ガス削減量は12%に設定され、廃合成樹脂燃料代替36%、石灰石原料代替2%、混合材比重15%拡大を通じて目標を達成する計画である。

このような政府の政策を推進するために、産業通商資源部では、産業部門炭素中立R&D企画総括委員会を構成し、鉄鋼、石油化学、セメントなど13業種に計6兆7000億ウォン規模の国家研究開発事業予備妥当性調査企画案を用意した。このうちセメント分野では、9つの戦略課題に計9,300億ウォンの研究予算を投入する超大型プロジェクトを企画している。現在、政府課題で提案されたセメント産業のカーボンニュートラル革新技術の内容は、①原料代替および転換技術、②低炭素新熱源活用工程効率向上技術、③工程発生CO₂捕集および再資源化技術、で図4のよう

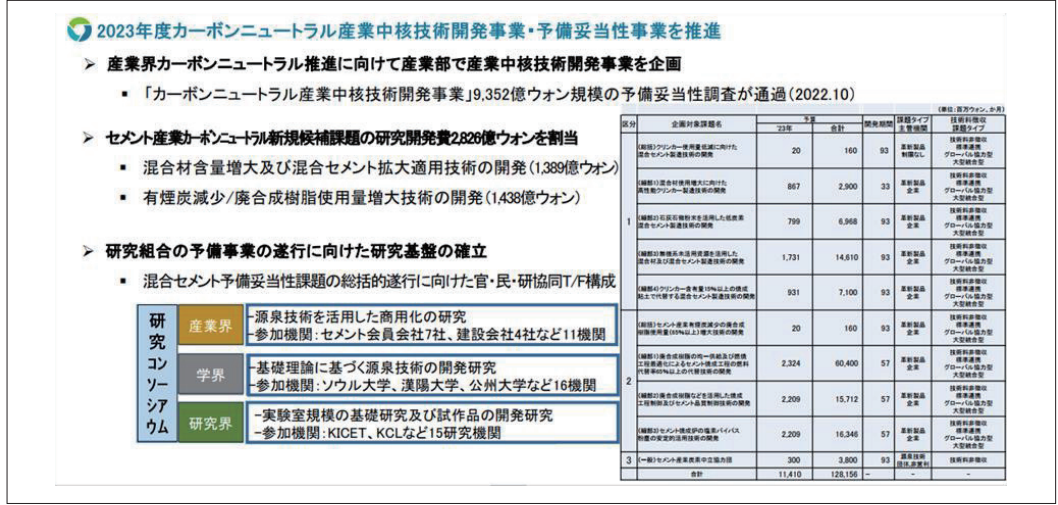


図4 2023年度韓国セメント産業カーボンニュートラル産業革新技術開発事業推進内容¹⁾

に大部分の戦略課題が2030年までの実証化を目標としており、この超大型プロジェクトが成功すれば、セメント産業でのカーボンニュートラル技術は一定軌道に乗ることができるのではないかと期待している。

4. 韓国カーボンニュートラル産業革新技術開発事業動向³⁾

韓国政府の進めるカーボンニュートラル革新技術では大きく二つの戦略課題があり、1) 混合材含有量の増大および混合セメント拡大適用技術、2) 有煙炭燃料代替技術の開発、に分けられる。

特に、コンクリート分野と関係のある戦略課題1)は、更に4つの具体的な課題に分類される。

1つ目は混合材増大用の高性能クリンカ開発、2つ目は石灰石微粉末活用による低炭素混合セメントの開発、3つ目は無機系未活用資源を活用した混合材及び混合セメントの開発、4つ目はクリンカ含量を15%以上焼成粘土に代替する混合セメント製造技術の開発である。

分類された各課題の研究期間は、1段階として2.5年、2段階で3年、3段階で2年の計7.5年の研究期間で構成されており、2段階時点で別途の実証化事業が進行される予定である。各課題は産学官の研究チームで構成されており、コンクリートの耐久性まで長期間検討し、標準化・実用化段階まで進めるようにプログ

ラムされている。

(1) 1つ目の課題は、ポルトランドセメントクリンカで圧縮強度に寄与する化学成分 Alite (3CaO・SiO₂ (C₃S) が主成分)の含量を60%以上で製造する技術を開発することである。混合セメントで母体クリンカの圧縮強度を高めれば、結果的に混合材含量を大きく高めることができるためである。結果的にセメントの生産に必要なクリンカの含有量を減らすことができ、温室ガスの排出量を減らすことができるようになる。

(2) 2つ目の課題は、海外（ヨーロッパ、米国など）で標準化されている石灰石微粉末混合セメントを開発し標準案を提案するものである。韓国の場合、混合セメントとして、高炉スラグセメント、フライアッシュセメント、ポゾランセメントの3つの混合セメントが標準化されているが、天然資源が豊富な石灰石を用いた混合セメントは日本と同様にまだ標準化されていないのが実情である。本研究では、現在の韓国ポルトランドセメントと類似した性能の石灰石混合セメントを開発し、標準化（KS制定および改正）できる十分なデータを確保することを目標としている。細部的には石灰石微粉末の評価基準の構築、石灰石混合セメントの生産、品質管理、コンクリート配合技術開発の他に経済性とCO₂排出低減による環境性評価までの範囲を考えている。

(3) 3つ目の課題は最も挑戦的な内容となっており、新しい混合材を発掘し、既存の混合材と組み合わせた多

品質項目			単位	韓国 KS 1種	米国 ASTM Type I	日本 JIS 1種	欧州 EN197 CEM I
				普通セメント	普通セメント	普通セメント	42.5N
物理的性質	空気量		%	-	12 以下	-	-
	粉末度		cm ² /g	2800 以上	2800 以上	2500 以上	-
	凝結	超結	min.	45 以上	45 以上	60 以上	60 以上
		終結	min.	375 以下	375 以下	600 以下	-
	安定性	リシャトリエ	min			10 以下	10 以下
		Autoclave	%	0.80 以下	0.80 以下		
	圧縮強度	2日	N/mm ²	-	-	-	10.0 以上
		3日	N/mm ²	12.7 以上	12.0 以上	12.5 以上	-
		7日	N/mm ²	19.6 以上	19.0 以上	22.5 以上	-
		28日	N/mm ²	42.5 以上	28.0 以上	42.5 以上	42.5 以上
化学成分	強熱減量		%	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	5.0 以下
	三酸化硫黄		%	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	4.0 以下
	酸化マグネシウム		%	5.0 以下	6.0 以下	5.0 以下	-
	塩化物イオン		%	-	-	0.02 以下	0.1 以下
	全アルカリ	一般型	%	-	-	0.75 以下	-
	Na ₂ O eq.	低アルカリ型	%	0.6 以下	0.60 以下	0.60 以下	0.60 以下

表1 韓国, 欧州連合, 米国, 日本 ポルトランドセメント規格の比較⁴⁾

成分系混合セメントを開発し、標準化できるようにデータを確保することである。カーボンニュートラル目標の実現のために混合セメントの必要性は高まっているが、既存の混合材である高炉スラグやフライアッシュは、発生先である製鉄産業と発電産業のカーボンニュートラル実現のために、工程やエネルギー源が転換される傾向にあり発生量の減少が全世界的に予測されている。これにより代替混合材(ASCM, Alternative Supplementary Cementitious Materials)を探す努力がなされており、現在ヨーロッパの場合には廃コンクリート粉末、米国の場合には廃ガラス粉末が代替混合材として標準化される動きがある。本課題では、韓国の実情に適した代替混合材を選定して評価する基準を確立し、これによって様々な種類の材料を探すことを目標としている。

(4) 4つ目の課題は、天然資源である粘土を焼成した焼成粘土を混合材として開発し、混合セメント化する技術開発である。粘土鉱物は、フライアッシュの主成分であるシリカとアルミナの層の間に水が存在する形で、焼成によってこの層間水を除去すれば、焼成粘土という人工ポズランが生成され、これを混合材として活用することができる。この課題ではセメント工場の近くで適切な粘土質原料を探し、これを焼成する最適の工程開発が重要となる。

ここでは主に、戦略課題¹⁾分野における混合材について説明した。プロジェクトは評価基準の確立から、セメント・コンクリートの物性、耐久性の検証、標準化案の提案、および経済性とCO₂発生量の低減による環境性評価まで、網羅的に実施することを目指している。そのため、長期間にわたり多くの関連機関が参加することになり、連携を深めながら実行していく予定である。

5. 低炭素セメント技術の標準化に関する国際動向

世界で初めて排出権取引制を始めた欧州連合は、セメント規格において低炭素セメントを製造できるようにすべての物質を網羅し、多様な種類の混合材を使用できるよう道を開いていた。**表1**は主要国の普通ポルトランドセメントに対する規格を比較して示したものであり、強度はすべてのセメント品質のベースとなる基準として非常に重要である。韓国のKS標準の強度規格は、欧州連合および米国などの主要国セメントと比較して相対的に高い水準を要求している。

また、韓国セメント産業が欧州連合や米国のようにカーボンニュートラルに寄与するためには、多様な形態の混合セメントが使用できる環境を作られなければなら



図5 代替原料及び燃料による低炭素セメントの認証及び標準化方策⁵⁾



図6 韓国のセメントコンクリートの専門人材養成プログラム

ない。また、環境保全のためにリサイクル廃棄物資源を積極的に活用して天然鉱物を代替すれば、温室ガスの削減とともに韓国資源循環社会の構築にも寄与できると見ている。このような側面から高炉スラグ、フライアッシュ、ポズラン、石灰石微粉末に限定された混合材関連KS標準を多様な無機物質を活用できる方向で標準の改正が必要である。また、新規混合セメントを早急に開発して混合セメント使用量を拡大する一方、多様な種類の混合材を混ぜて使用できるように3成分系複合セメント(Ternary Composite Cement)に対する標準規格の制定が必要である(図5)。

これに伴い、韓国セメント業界は「グローバル環境規制対応のための炭素排出量算定標準基盤造成」のため、2023年8月「セメント製品炭素排出量算定国際標準協議体」を構成し発足式を行い、ガイドライン開発など具体的な方案導出に乗り出した。

6. 韓国のカーボンニュートラルセメント産業人材養成方案

韓国と日本のセメント産業は、20～40代の従業員の

持続的な減少で、産業の高齢化が進行している傾向がある。最近、大学の専攻科目ではセメント分野を扱う基礎素材や材料工学の課程は減少し、新素材中心に新規人材が構成され、またセメント材料専攻者よりは土木、建築分野での専攻者への流入が多くなっている傾向がある。このような状況でセメント産業に勤めている在職者への再教育を行う場合、費用負担、生産支障、職務関連教育不足などが原因で、次世代の人材育成が行き届いていないのが実情である。その理由の一つは、セメント産業が鉄鋼、石油化学に比べて売上規模、および従業員数が相対的に少なく、政府の政策支援が限られているという現実も挙げられる。

最近では、セメント産業の「2050カーボンニュートラル」の実現により中長期的に産業体系の急激な変化が予想され、新規機材の構築、および人材開発のための教育プログラムが切実に必要になった。特に、拠点大学と連携した炭素中立特化教育プログラムを通じて、在学生に対するセメント知識の教育、および在職者の再教育を通じて、カーボンニュートラルオーダーメイド型産業人材を養成する必要がある(図6)。

2022年4月、韓国セメント新素材研究組合は、韓



写真1 韓国セメント協会・韓国セメント新素材研究組合主管のセメント業界在職者の教育プログラム(カーボンニュートラル技術)

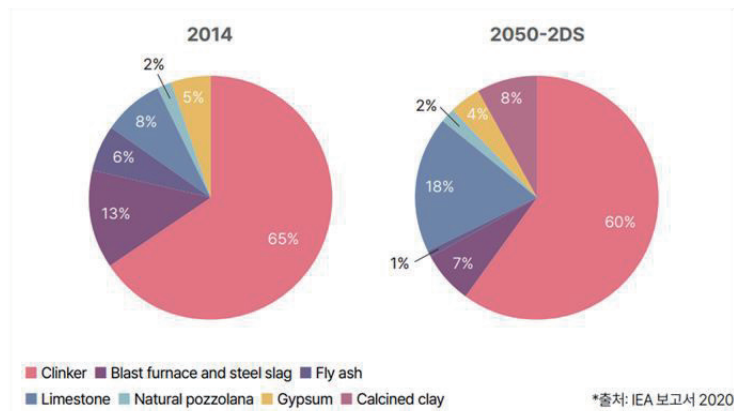


図7 2050年セメント製品の鉱物組成変化^(6,7)

国セメント協会付設研究所を始め、各セメント会社、生コン業界、建設業界、韓国セラミック学会、政府出資研究所の後援を基盤に政府カーボンニュートラル政策に対応するために設立された。本組合は、政府のカーボンニュートラルセメント関連の研究遂行、およびセメント分野の専門人材養成教育プログラムを大学と共同で進め、産学官の協業を通じてセメント分野の教育を新たに準備している。このような教育課程は大きく3つに分けられており、内容は次の通りである。

- (1) 理論教育: 在職者、予備就業者および学生を対象に大学内に構築された装備の体系的な理論教育、および実習教育を通じて産業界が要求する実務型人材育成
- (2) 実習教育: 個別企業または同種企業を対象に、機材の基本原理解および応用試料前処理、分析法、結果解釈などに対する理論教育と機材を活用して、実習を並行する業者で機材活用現場の困難を解決
- (3) 特化教育: カーボンニュートラル各分野別実習

中心の試験、分析専門教育
このような教育は、10年間で年間120人、計1200人のカーボンニュートラル専門人材を養成できるものと期待しており、約500人の研究エンジニアも養成できるものと期待している(写真1)。

7. まとめ

韓国セメント産業は1960年代以後、経済発展とともに国家の基幹産業として中核的役割を果たしており、代表的な内需産業で、エネルギー多排出産業でもあった。炭素排出量が韓国産業界では鉄鋼、石油化学に次いで、3位を占めるほど温室ガスの多排出産業である。しかし、セメントは住宅、ビル、道路、発電所など国民の生活に必ず求められる社会基盤環境を造成する必須建設資材である。

韓国セメント業界は、2015年に韓国内排出権取引制が施行されたことにより、多方面にわたり温室ガス削

減のために研究開発と設備投資に注力しているが、既存製品を低炭素製品として製造、および流通するためには、新開発された低炭素セメント製品に対するKS基準の作成が必須となる。

欧州はすでにEN-197-5:2021などで最近焼成粘土などを含む多様な混合材の使用許容範囲を大幅に拡大し、混合セメントに関する規定を改正した。IEA報告書は図7に示すように、2050年にはセメント鉱物造成がクリンカ使用を最小化し、低炭素化原料に代替されるとの展望がある。これに対し、韓国は混合材および混合セメントKS標準を含めた別途の規定変化がなく、低炭素製品の開発および活性化が困難な状況である。

したがって、韓国の大部分のセメント会社が参加しているカーボンニュートラル政府の革新事業開発に合わせて、セメント製品に対するKS標準再改正を急がなければならない。NDC及び2050カーボンニュートラル目標達成のためには、①普通ポルトランドセメント(KSL 5201)の混合材の種類および含量(石灰石微粉末5%+高炉スラグ微粉末又はフライアッシュ中5%)関連改正、②新規混合材及び混合セメント関連第改正、③生コンクリート(KSF4009)の塩化物関連改正、が必須である。

最後に、セメント産業の持続的な発展を可能とする

ためには、廃資源リサイクル、新素材分野などで長期的な事業プランを立て、未来成長のための事業基盤を構築する必要がある。さらに、セメント学問の教育と産学官が共同活用できる産業技術基盤(機材、施設)の構築を通じ、第4次産業革命による勤労者の力量強化、国家資格および専門資格制度の新設、改善時の迅速な反映プロセスの構築を準備する必要がある。

【参考文献】

- 1) E.C. Kim / “Carbon neutral trends and collaboration plans for Korea-Japan-China cement industries” The 1st Japan-Korea Cement and Concrete Industry Carbon Neutral Symposium (1st CCCN 2023), Kyoto University Tokyo office, Tokyo, Japan, 2023. 11
- 2) J.M. Kim, E.C. Kim, S.C. Shin / “Domestic Status of Cement-Concrete Carbon Neutrality” Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 34(1), pp.58~65, 2022. 01
- 3) W. K. Kim, “Industry insights – Research Trends of Carbon Neutrality for Korea Ministry of Trade, Industry and Energy in the Cement Sector” Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol. 35(4), pp.40~41, 2023. 07
- 4) T.H. Ahn / “Research Trend & Standard of Portland Limestone Cement”, The 1st Japan-Korea Cement and Concrete Industry Carbon Neutral Symposium (1st CCCN 2023), Kyoto University Tokyo office, Tokyo, Japan, 2023. 11
- 5) E.C. Kim / “Standard Trends of Low Carbon Cement Technologies” Materials, Parts, Equipment Standard Trend Report, No.3., pp.02~17, 2023
- 6) IEA / Technology Roadmap, Low-Carbon Transition in the Cement Industry, 2018
- 7) IEA / Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector, 2021

英文パンフレット

“CEMENT IN JAPAN 2024”をお頒けします

セメント協会は海外向けにわが国セメント産業をダイジェストしたパンフレットを発行しました(A4版・16ページ)。需要と供給・分野別販売先・輸出と輸入・物流関連・建設投資状況・エネルギー・世界のセメント情報などを図表で紹介。海外の方に日本のセメント産業を理解いただくためのツールとしてご活用下さい。

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

【主な内容】
1.JCA MEMBER COMPANIES 2.DEMAND AND SUPPLY 3.CEMENT SALES BY CUSTOMER 4.IMPORT AND EXPORT 5.CEMENT DELIVERY FLOW 6.CONSTRUCTION INVESTMENT 7.ENERGY CONSUMPTION, RAW MATERIALS 8.CEMENT PLANTS LOCATION



既存地下躯体の耐用年数 評価取得による再利用 ～五反田JPビルディング～

Reuse of the Existing Underground Structures by obtaining Service Life Evaluation
～GOTANDA-JP-Building～

酒井 正樹 岸 浩行 三好 夏恵 城戸 隆宏

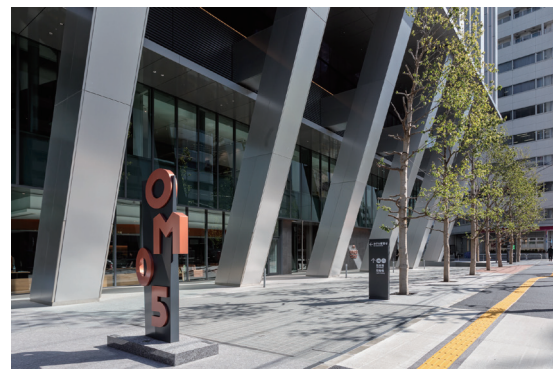
1. はじめに

2023年12月に竣工した、五反田JPビルディング(写真1)は「TOKYO, NEXT CREATION」をコンセプトに様々な事業者と連携し、各用途が融合した多様な出会いと交流、新しい価値創造を促す次世代の町の拠点を目指した、高層の複合ビルである。既存建物「旧ゆうほうと」の地下躯体を空間および構造体として最大限活用し、ストック型社会の実現と共に、建物の解体や新築に伴う廃棄物削減、周辺環境への配慮、CO₂排出の大幅な抑制などによりSDGsに貢献することが建築的なテーマとなっている。

本稿では、建物概要および既存建物の地下躯体の



【全景写真】撮影クドウフォト



【フロントテラス】撮影クドウフォト

写真1 五反田JPビルディングの外観

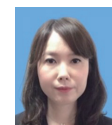
再利用において、RC造建築物の耐久性に基づく耐用年数評価を実施した事例について報告する¹⁾。



さかい まさき / SAKAI Masaki
(株)大林組
技術研究所 生産技術研究部
主任研究員 博士(工学)



きし ひろゆき / KISHI Hiroyuki
同上
設計本部構造設計部
上級主席技師



みよし なつえ / MIYOSHI Natsue
同上
設計本部構造設計部
課長



きど たかひろ / KIDO Takahiro
日本郵政建築(株)
技術統括本部 建築技術部
グループリーダー

表1 建築概要

建物名称	五反田 JP ビルディング
所在地	東京都品川区西五反田 8-4-13
事業主	日本郵政不動産株式会社
基本設計	日本郵政株式会社一級建築士事務所 (設計監修)
実施設計	株式会社大林組一級建築士事務所
施工者	株式会社大林組
規模	地上 20 階, 地下 3 階, 塔屋 2 階
敷地面積	約 6,700m ²
建築面積	約 4,700m ²
延床面積	約 69,000m ²
高さ	約 97m
用途	事務所, ホテル, 商業施設, シェアオフィス, ホール, 駐車場等
竣工	2023 年 12 月

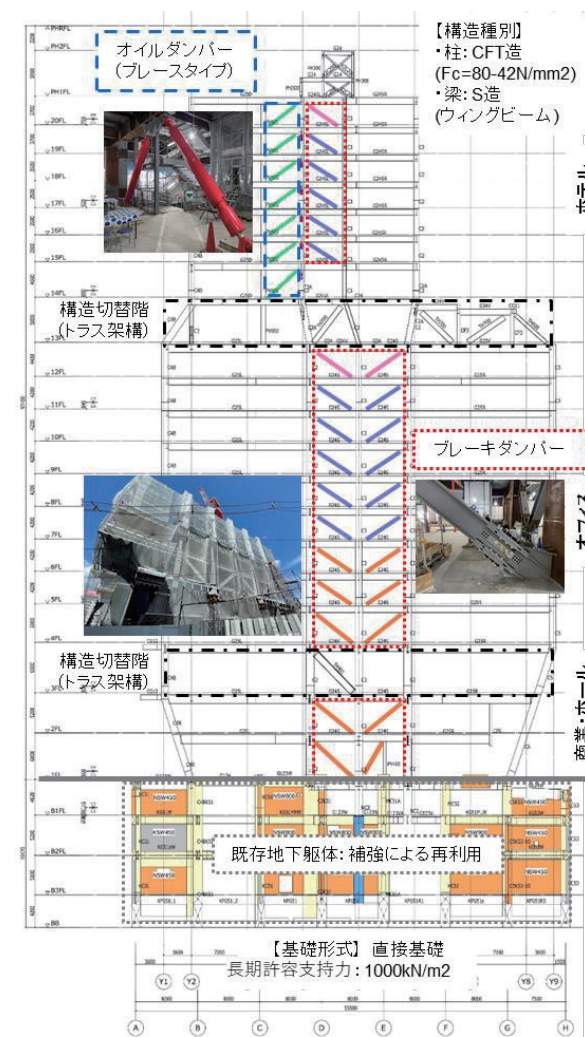


図1 構造軸組図

2. 建物概要

2-1. 建築概要

建築概要を表1に示す。本建物は地上20階、地下3階、基準階約1,000坪のオフィスを中心とした、大

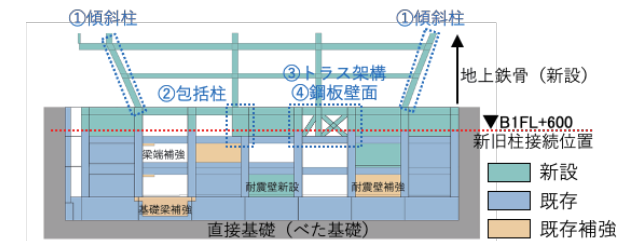


図2 既存地下躯体と地上躯体の接合の概念図

規模複合施設である。建設地はJR五反田駅から近く、東急池上線の大崎広小路駅に隣接しており、利便性が高い立地条件にある。新幹線、リニア中央新幹線の主要ターミナルである品川駅からも近い。高層階にはホテル(OMO5東京五反田by星野リゾート)を誘致し、中層階にオフィス、1～3階は五反田の核となる活動拠点として、品川区が運営する多目的ホール(CITYHALL&GALLERY GOTANDA)、スタートアップ企業の活動を支援するシェアオフィス(co-lab 五反田 with JPRE)により構成されている。市街地総合設計制度を活用し、既存建物に比べて床面積で約1.4倍、高さで約1.6倍の超高層建物とした計画としている。

2-2. 構造概要

構造的な特徴は、既存建物の「旧ゆうほうと」の地下1階床以深の既存地下躯体を、空間および構造体として最大限活用する計画としたことである²⁾。

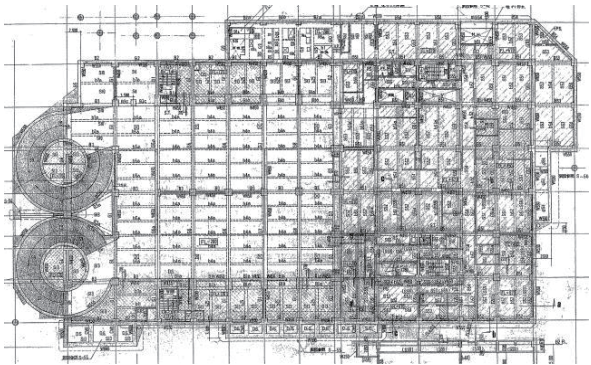
構造軸組図を図1に、既存地下躯体と地上躯体の接合に関する概念図を図2に示す。

既存躯体への地震力を小さくするため、上部架構にはオイルダンパーと摩擦ダンパー(ブレーキダンパー)による制震構造を採用した。オフィスからホテルに用途が変わる13階にトラス架構を設け、構造切替階として力を伝達させると同時に地震時の曲げ変形を抑制している。

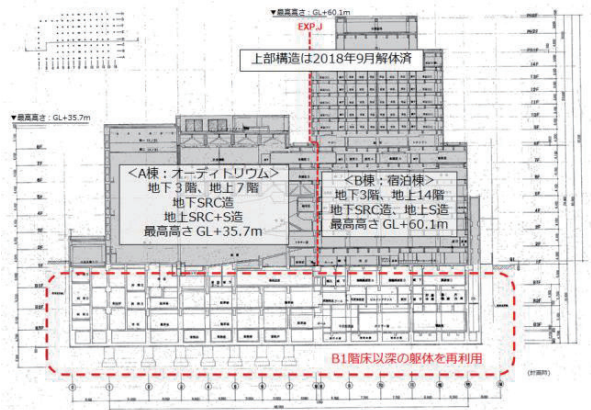
既存建物と新築建物は用途を異にしているため柱スパンが整合しない。そのため主に低層階の外周柱は短手方向の既存通り芯に合わせるように1FLを基点として傾斜させた。内部の柱は1階まで鉛直に下ろし、車路の関係で柱を延長できない箇所は地下1階に鋼板

表2 再利用する既存地下躯体の概要

項目	概要
竣工年月	1982 年 1 月
調査時築年数	38 年
階数	地下 3 階
構造形式	鉄骨鉄筋コンクリート造
用途	トレーニングジム, 事務室, 機械室, 駐車場, 電気室等
コンクリート仕様	設計基準強度 240kg/cm ²



(a) 既存図 B2階伏図



(b) 既存図 断面図

図3 再利用する既存地下躯体の伏図と断面図

壁やトラス架構を設けて応力伝達を行っている。

既存建物に比べて床面積で約1.4倍、高さで約1.6倍の超高層建物を上部に増築することから、建物重量は平均して約1.4倍増となる。地下躯体はこれらの重量に対して十分な余裕を確保して耐えられるように、耐震壁を設けてルート1相当の壁量を確保した。これらの壁は、建屋重量の増加に対する柱梁の補強や、新設柱と既存柱の偏心による応力伝達に利用している。地下部分は駐車場が主要な用途であるため、耐震壁の確保が比較的容易にできた。

基礎は1FL-20m付近にあるN値50以上の非常に硬い土丹層を支持地盤(長期支持力：1000kN/m²以上)



写真2 再利用する既存地下躯体の内観(補修前)

とした直接基礎(べた基礎)である。基礎梁は耐震壁を設けて補強し、車路の範囲はピット部分の空間を利用してマットスラブ状に補強した。地盤の支持力に余裕があったため、高層化により接地圧が増加しても長期許容支持力の1/3程度に納めることができた。

3. 再利用した既存建物の地下躯体の概要

3-1. 既存地下躯体の概要

再利用する既存地下躯体の概要を表2、既存図の伏図と断面図を図3、内観(補修前)を写真2に示す。

既存建物は地下3階、地上はエキスパンションジョイントで分離した7階建のオーデトリウム部分(A棟)と14階建の宿泊施設および会議施設(B棟)であり、地下では一体構造となっていた。X・Y方向ともに十分な耐震壁が配置され剛性の高い架構となっている。

3-2. 既存地下躯体の確認項目

竣工から約40年経過した現在において、経年劣化が懸念されるコンクリートと鉄筋は、既存図に記載があった(コンクリート：240kg/cm²、鉄筋：SD30)。

日本建築防災協会の既存鉄筋コンクリート造建築物の

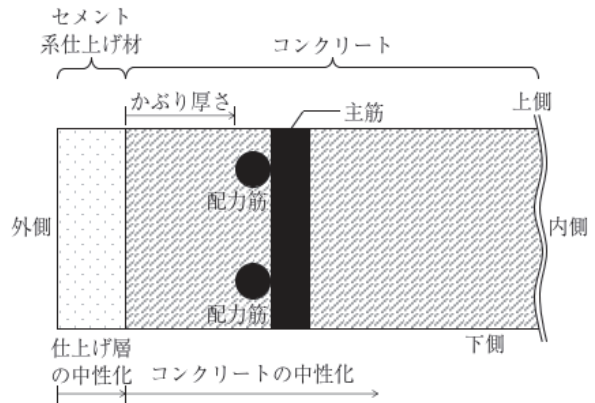


図4 仕上げ材のある壁の断面図の一例

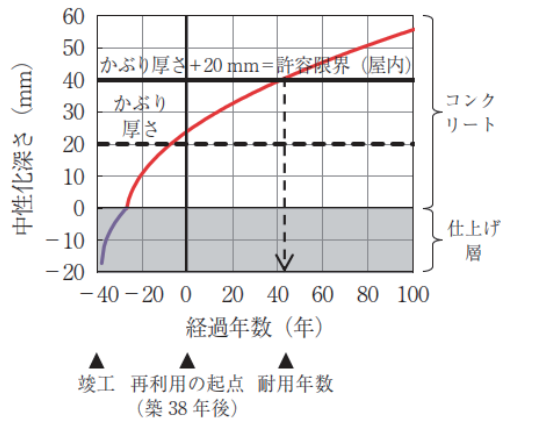


図5 竣工からの中性化の進行予測の一例(床スラブ)

耐震診断基準・改修設計指針・同解説に準拠して、部材の位置・寸法、配筋状況、かぶり厚さおよび圧縮強度を調査し、既存図面との整合をおおむね確認した。

本稿の主題とした再利用する既存地下躯体の耐用年数評価については、(一財)日本建築センターによる、鉄筋コンクリート造建築物の耐用年数評価の審査を受けた。なお、この評価は、コンクリートのかぶり厚さ、中性化深さ、含水率、鉄筋の腐食状況などの測定結果に基づいて、耐用年数を算定するものである。耐用年数評価の対象は、外周壁、内壁および床スラブとした。

3-3. かぶり厚さおよび中性化深さの調査結果

外周壁、内壁、床のそれぞれに対して、各階ごとに鉄筋のかぶり厚さおよびコンクリートの中性化深さの調査を行った。かぶり厚さは非破壊試験により測定した。外周壁は躯体表面にほとんど仕上げ材が施されておらず、かぶり厚さの平均値は79.6mmであった。

表3 仕上げ材の条件と中性化速度係数の算定結果

部材	仕上げ材		コンクリートの中性化速度係数
	種類	厚さ	
地下外周壁	貧調合モルタル	0.2mm	4.63mm/√年
地下内壁	貧調合モルタル	20.6mm	4.77 mm/√年
地下床	貧調合モルタル	17.1mm	5.22 mm/√年

耐用年数の算定に用いるかぶり厚さは、ばらつきを考慮して49.8mmとした。内壁および床では、図4に示すように躯体表面にセメント系仕上げ材の貧調合モルタルが施されていた。内壁のかぶり厚さは30～162mm、床のかぶり厚さは28～188mmとばらつきが大きかったため、耐用年数の算定に用いるかぶり厚さは、安全側として建築基準法上の最小かぶり厚さである30mm、20mmと設定した。

コンクリートの中性化深さは、湿式コア供試体により測定した。調査時点におけるコンクリートの中性化深さの平均値は、外周壁では17.9mm、内壁では9.8mm、床では18.4mmであった。

4. 既存地下躯体の耐用年数評価

4-1. 中性化の進行に基づいた耐用年数評価

既存地下躯体について、竣工からの中性化の進行予測を行い、中性化深さが許容限界に到達するまでの期間を耐用年数として算定した。仕上げ材の条件と中性化速度係数の算定結果を表3に示す。中性化の進行速度は、調査時点(築年数38年)における中性化深さの実測値に基づいて、中性化の進行が経過材齢の平方根に比例するものとして算定した。なお、中性化速度係数は、中性化深さの実測値のばらつきを考慮して、安全側となるように設定している。また、セメント系の仕上げ材がある場合には、表3に示す仕上げ層の厚さが全て中性化した後にコンクリートの中性化が開始するものとした。

竣工からの中性化の進行予測の一例(床スラブ)を図5に、中性化の進行に基づいた再利用後の耐用年

表4 中性化の進行に基づいた再利用後の耐用年数

部材	環境	かぶり厚さ	許容限界	耐用年数
外周壁	屋外	49.8mm	49.8mm	78年
内壁	屋内	30mm	50mm [*]	89年
床	屋内	20mm	40mm [*]	42年

※屋内環境は、かぶり厚さ+20mmを許容限界とした

表5 含水率の測定結果と腐食環境の判定結果

部材	含水率(%) (10mm以深)	含水率(%) (かぶり位置)	腐食環境 の判定	耐用 年数
外周壁	3.3～4.9 4.2～4.6 4.0～6.3 3.5～6.0	4.8 4.5 6.0 6.0	腐食環境	78年
内壁	2.4～2.9 2.6～4.7	2.6 －	非腐食環境	算定せず
床	2.1～4.0 2.7～4.7	2.1 2.7	非腐食環境	算定せず

※非腐食環境は、耐用年数の評定対象としない

数を表4に示す。図の横軸は、既存地下躯体の再利用の起点である築38年後を0にとり、再利用後の経過年数を示した。図の縦軸は、コンクリートの表層を0にとり、仕上げ層における中性化の進行を負の領域に示した。屋内環境にある内壁と床は、中性化深さがかぶり厚さより20mm奥まで到達した時点が中性化深さの許容限界とし、再利用後の耐用年数は89年、42年と算定された。屋外環境にある外周壁は、中性化深さがかぶり厚さに到達した時点が中性化深さの許容限界とし、再利用後の耐用年数は78年と算定された。以上より、中性化の進行に基づいた、再利用後の既存地下躯体全体の耐用年数は、最も短期間となった地下床で定められる42年と評価された。

4-2. 腐食環境・非腐食環境(中性化後の鉄筋腐食速度)を考慮した耐用年数評価

日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS5鉄筋コンクリート工事³⁾では、外部からの水分供給がない環境(非腐食環境)では、鉄筋位置まで中性化が進行しても、鉄筋腐食は進みにくいことから、中性化に基づいた耐久設計は不要とされている。そこで、既存地下躯体の含水率を測定し、腐食環境・非腐食環境の判定を行った。

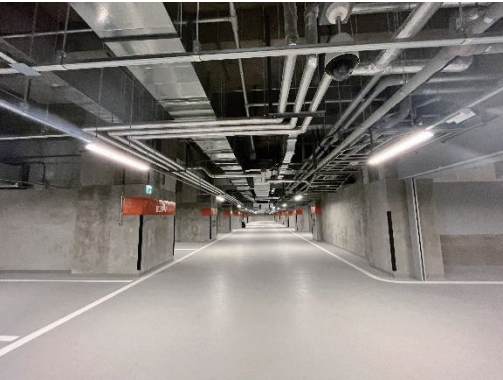
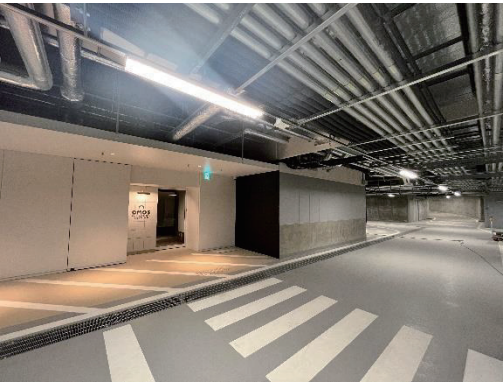


写真3 再利用後の既存地下躯体(屋内駐車場)

含水率の測定結果と腐食環境の判定結果を表5に示す。屋内環境にある内壁と床では、かぶり厚さ位置の含水率は2.1～2.7%と低いことから、JASS 5の非腐食環境に相当するものと判断され、耐用年数の評価対象からは除外した(日本建築センター評価事項)。これにより、既存地下躯体全体の耐用年数の最大値は、屋外環境(腐食環境)にある外周壁で算定された78年と評価され、発注者の要求する供用期間を満足することを確認した。

5. 耐久設計および維持管理計画の実施

再利用する既存地下躯体の耐用年数評価を算定した結果、外周壁で定められる78年と評価された。この評価結果は、発注者の要求する耐用年数を満足した。ただし、ここで算定された耐用年数は、内壁および床は非腐食環境にあることから耐久設計を不要としたことに基づいているため、これらの部材は将来的に非腐食環境(外部からの水分供給がない状況)が継続されることが前提となる。なお、既存の柱の全数に対

して鉄筋かぶり厚さ調査を行い、不足する部分には補修を行った。

再利用後の既存地下躯体を写真3に示す。再利用する既存地下躯体は、外気に接する機会や水分供給が少ないとみなされる屋内駐車場を主な用途として利用する計画であるため、大規模な用途変更がない限り、今後も非腐食環境が維持できるものと判断された。その上で、将来的な維持管理計画として、建物所有者による定期点検を竣工後5年、10年、以降10年ごとに実施し、地下内壁および地下床について乾燥状態が保持されていることの確認を管理項目として定めた。

6. おわりに

五反田JPビルディングでは、既存建物の地下躯体

を再利用するに当たって、RC造建築物の耐久性に基づく耐用年数評価を実施した。その結果、腐食環境・非腐食環境(中性化後の鉄筋腐食速度)を考慮して耐用年数評価を行うことで、発注者の要求耐用年数を満足した先駆的な事例となった。

既存の建築ストックの有効利用は、SDGsの推進や2050年カーボンニュートラルの実現に向けて有益である。本稿が参考となり、既存躯体の再利用という選択肢が増えてくれれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 三好夏恵他／五反田計画(仮称)における部分的に中性化した既存地下躯体の再利用、コンクリート工学, pp.848～853, 2023.9
- 2) 城戸隆宏他／五反田JPビルディング、鉄構技術, pp.28～41, 2024.2
- 3) 日本建築学会／建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2022.11

お知らせ

2024年度 第2回中核人材育成セミナー
埼玉におけるインフラの予防保全

現在、わが国では、社会インフラの老朽化が社会問題となっています。構造物をより長く安全に使えるようにするには、多くの技術者の様々な観点からの分析や研究が必要となります。本セミナーでは、これらの課題を皆様と一緒に考えながら少しでも解決に導くきっかけにできればと考えています。

3回目の開催となる講師には、さいたま市議(政)・川越市(官)・デンカ(産)・大学教授(学)の政産官学からの幅広い視点でインフラ老朽化や維持管理に関する現状や最新技術を紹介していただきます。

講師：横関 康祐(東洋大学理工学部都市環境デザイン学科 教授)
金井 康博(さいたま市議会議員)
榎本 正行(川越市建設部道路街路課 副課長)
栖原 健太郎(デンカ(株)インフラソリューション研究部 グループリーダー)／以上敬称略

日時：2024年8月28日(水) 14:00～17:15(終了後懇親会有り)
会場：東洋大学川越キャンパス(埼玉県川越市)またはGoogle Meet(オンライン配信)
受講料：無料
申込締切：8月20日(火)
申込方法：東洋大学産学共同教育センターのHPから申込み(<https://forms.gle/Mqekjf4EJ19jkniv>)
問合せ：東洋大学産学共同教育センター(e-mail:tpec@toyo.jp)

コンクリート藻場増殖礁技術とブルーカーボン

Sustainable Seaweed Area Growth: The Role of Concrete Reefs and Blue Carbon

久恒 成史

1. はじめに

近年ブルーカーボンという言葉が広く使われるようになり、藻場がCO₂を吸収・固定化する機能が注目されている。ブルーカーボンとは、陸域生物により吸収・貯留される炭素であるグリーンカーボンに対して、海洋生物の作用により、大気中から海中へ吸収された二酸化炭素由来の炭素のことで、国連環境計画（UNEP）の報告書において、2009年10月に命名され、吸収源対策の新しい選択肢として提示された。

最近ではジャパンプルーエコノミー技術研究組合（JB E）により、ブルーカーボンクレジット認証制度（Jブルークレジット®）が整備され、クレジット取引事例が拡大、企業や団体のカーボンオフセット手段として普及しつつある。

注目度が高まっている藻場であるが、日本近海では磯焼けにより次第に失われつつある。藻場は、魚やイカの産卵場、稚稚子魚の隠れ場や生育場、アワビ・サザエといった磯根資源の餌場となるなど、海洋生物を支える重要な場所である。

当社では以前から磯焼けが生じた場所に「コンクリート藻場増殖礁」を設置し、藻場を再生させる事業を進めており、これまでに長崎県を中心に全国で4,000基

表1 海藻藻場の級数係数
（年間の単位面積当たりの炭素増加量）の推定結果¹⁾

	アラメ場	ガラモ場	コンブ場
吸収係数・平均値 (t-CO ₂ /ha/年)	4.2	2.7	10.3

余り設置してきた。当社の藻場礁は苗床方式と呼ばれ、海藻を一定程度まで中間育成したのちに食害に合わないようネット付きのコンクリート藻場増殖礁の中に設置するものであり、すでに20年以上にわたる実績がある。

これまでの磯焼け対策は、自然環境の回復が主眼となっていたが、近年注目されているブルーカーボン分野にも貢献できる技術と考えている。当社が長年蓄積してきた藻場を再生、維持、拡大するコンクリート藻場礁技術について紹介する。

2. 藻場が持つ機能と課題

2-1. 藻場のCO₂吸収

藻場のCO₂吸収量は、吸収係数（年間の単位面積当たりの炭素増加量）によって推定される。代表的な海藻藻場の吸収係数の推定結果を表1に示す。

ここから、長崎県をはじめ多くの地域で増殖に取り組んでいるアラメ場は、1haあたり1年間で平均4.2tのCO₂吸収が期待できることが分かる。

単位が1年当たりとなっているように、この機能は、



写真1 豊かなアラメ場
〔(株)ベントス 南里海見氏撮影〕

表3 2021年度のJブルークレジット®の取引概要²⁾

譲渡総額	64.5t-CO ₂
購入総額(税抜き)	4,696,641円
平均単価(税抜き)	72,816円/t-CO ₂



写真3 海草を食べる魚たち
〔左：アイゴ 中：ノリスズミ 右：ブダイ／長崎大学 山口敦子准教授提供〕

翌年も藻場が維持されていれば同様の吸収が期待できる一方、藻場が消失してしまえば、その年は吸収されないこととなる(写真1)。

2-2. カーボンクレジット取引

JBEによるJブルークレジット®の認証実績を表2に示す。年々増加傾向であることが分かる。

JBEが公開した2021年度のJブルークレジット®取引概要を表3に示す。

前述のアラメ場の吸収係数の推定結果に平均単価を掛けると、アラメ場1haに創出が期待できる標準的なクレジット金額が試算できる。

$$72,816 \text{ 円/t-CO}_2 \times 4.2 \text{ t-CO}_2/\text{ha/年} = 305,827 \text{ 円/ha/年}$$

2-3. その他の機能と課題

はじめに述べた通り、藻場は産卵場、隠れ場や生

表2 Jブルークレジット®の認証実績²⁾

年度	認証サイト	認証量(t-CO ₂)
2020	1	22.8
2021	2	80.4
2022	21	3,733.1

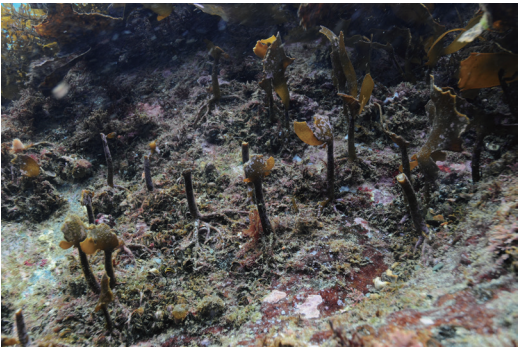


写真2 魚類の食害にあったアラメ
〔(有)崎陽潜水 兵頭真氏撮影〕

育場、磯根資源の餌場といった水産資源形成の源泉である。もともとあったこの機能に、近年ブルーカーボンで注目されるようになった環境的側面からの価値が追加で付与されたと言える。

共通するのは、いずれの機能の発揮にも毎年の藻場の維持が前提となる点である。藻場の維持における最大の課題が磯焼けである。

3. 磯焼けの原因と対策手段

藻場が消失してしまい、焼け野原のような状態になった状態が磯焼けで、進行すればエサも住みかも無くなり、その海から魚などの海の生き物もいなくなってしまうため、海の砂漠化とも言われる(写真2)。磯焼けの代表的な原因のひとつで九州から太平洋沿岸の広い地域で問題になっているのが、海藻を食べるアイゴ、イスズミ等の藻食性魚類と言われる魚(写真3)やウニ



ひさつね しげふみ / HISATSUNE Shigefumi
住友大阪セメント(株)
福岡支店 建材グループ
サブグループリーダー

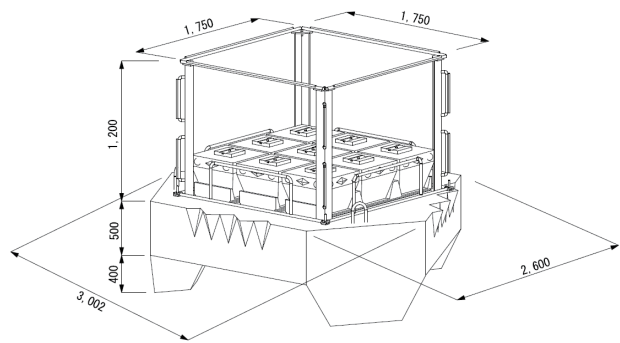


図1 k-hatリーフβ型



写真4 食害防止用ネット（ssβネットZタイプ）

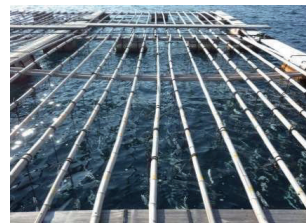
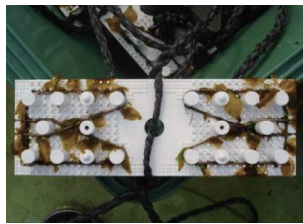


写真5 中間育成工程

〔左：種糸巻きされた専用藻場プレート 中：筏への垂下 右：中間育成中のアラメ類〕

が海藻を食べ尽くしてしまうことである³⁾。これは近年の地球温暖化の影響と関連するとも言われている。

海水温の上昇により、藻食性魚類やウニの活動が活発になり摂餌量が増えるほか、低水温期間が短くなり、摂餌期間が長くなるためである。また、海藻種によっては、冬場の海水温が以前ほど下がらない影響により大きく育ちづらくなり、小さいうちに食べ尽くされるなど、いくつもの悪影響との関連が懸念されている。

海藻を食べ尽くされた磯焼け海域には、海藻のタネとなる遊走子や幼胚を供給する母藻が無いため、再び海藻が生え、藻場を形成することは極めて困難となる。

藻場の再生をうながす磯焼け対策手段の1つが、海藻のタネを供給する藻場増殖礁、いわゆる核藻場の設置である。

4. 具体的な手段と効果

4-1. K-hatリーフβ型

2000年に食害防止用ネット付きのコンクリート藻場増殖礁を当社が初めて実海域に設置し、その後いくつもの改良を加えた代表的なコンクリート藻場増殖礁を図1に示す。

コンクリート製の台座の上にウニや巻貝が這い上がらないためのコンクリート製ブロックを配置、この上面に海藻が着生しているプレートが設置される。この海藻は食害防止ネットにより保護され、ネット内で成長、十分に成熟したのち、遊走子を排出、これがコンクリート藻場増殖礁周辺に供給され、発芽、生育し、無くなった藻場を回復する仕組みである。

4-2. 食害防止用ネット

海藻のタネを供給する海藻が魚に食べられるのを防ぐために設置する(写真4)。

・ネットの目開き

小さいほど魚の侵入を防ぐ効果が高いが、汚れが付着しやすくなる。ちょうど良い目開きを設定する必要がある、当社の実験では50mm角が最も良い結果が得られている。

・汚れない工夫

汚れが付着すると、太陽光が遮られて海藻に届かなくなり、海藻の生育に悪影響が出る。適正な目開きのネットとするほかに、ネットには汚れが付きづらい工夫をすることが必要である。

表面をシリコンで防汚処理すること、しなやかな材



写真6 専用藻場プレート「ジーマプレート」で中間育成工程を経た設置直前のアラメ類

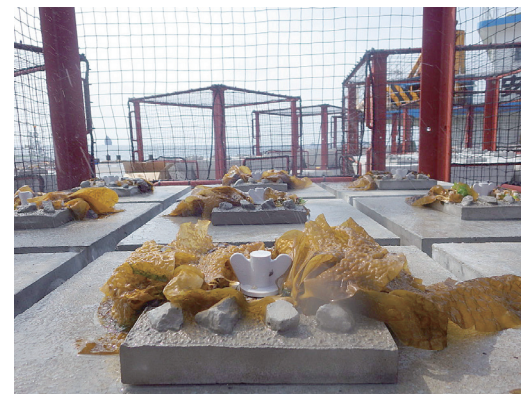


写真7 モルタル製プレート「藻場増殖プレートタイプ1HB」に設置された沈設直前の状況

質のネットとすることでネット自体が揺動し、汚れが自然と落ちる設計とすることなどが有効である。

・留め付け

ネットに固定後は外れないこと、必要な際には開閉もしくは交換できることが求められ、これらに配慮した留め付け方法でなければならない。インシュロック®での留め付けが簡便かつ確実に望ましく、当社ではさらに留め付けに個人差が出ない工夫、インシュロック®が抜け外れることなく本来の破断強度まで強度発現できる工夫を施している。

4-3. 設置する海藻

藻場増殖礁に設置する海藻は、中間育成段階を経て数～数十cm程度とし、その後の安定した成長が見込める大きさにまで成長させたものを用いる。

・中間育成

海藻をタネの状態からある程度の大きさまで大きくする工程のこと。海藻のタネが付いた種糸を用い、それ



写真8 沈設作業中のコンクリート藻場増殖礁

をかけ回しやすく設計された専用プレートに巻き付けたのち、海中に2か月程度垂下し、上記の大きさまで成長させる(写真5,6)。

・専用藻場プレート

①種糸をゆるみなく、簡単・確実に固定できること、②芽から成長する各段階で海藻が固着しやすい大中小の大きさの異なる凸形状を有すること、③中間育成の過程で付く汚れを落とす作業をしやすいため軽量であること、の3つの機能が求められる。我々は、樹脂成形によりプレートを製造し、これらの機能を満たすとともに、大量に安価に製造することを可能にした。なお、ここで用いられる樹脂は、炭酸カルシウム等天然由来の素材を半分以上含有する環境に配慮した独自設計の専用材料である。

藻場増殖礁への設置は、表面に石模様を転写したモルタル製のプレートとセットで行う。こうすることにより、大きく成長した海藻が数年間しっかり固着することができる(写真7,8)。

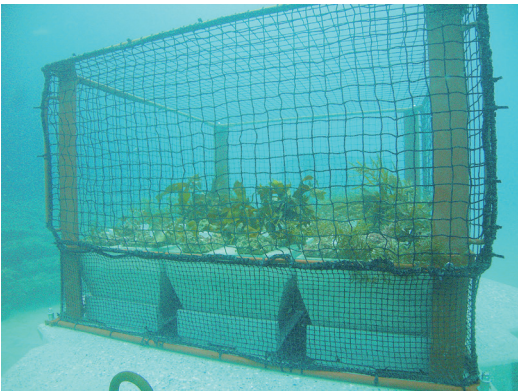


写真9 沈設直後のコンクリート藻場増殖礁



写真10 コンクリート藻場増殖礁内で成長したアラメ類(沈設後6ヵ月)



写真11 藻場が再生した事例(長崎県壱岐市)

5. 藻場礁設置後の状況と効果の一例

5-1. 藻場の再生

沈設されたコンクリート藻場増殖礁内で海藻は成長し、早ければ設置の翌秋より、海藻のタネを藻場礁周辺に放出する。これにより、周辺エリアでは、翌春には海藻の芽が出て、順調に成長すれば、夏には藻場を形成するに至る。

海藻の新芽は、調査により藻場礁から25m離れた場所でも確認されたが、発現のおよそ85%は周辺およそ半径10mのエリアであることが、調査で確認されている⁴⁾。

藻場再生のカギは、コンクリート藻場増殖周辺に芽吹いた新芽をいかに順調に成長させるかであり、藻場増殖礁周辺の海藻の成長過程で、前述の藻食性魚類の食害やウニから海藻を守ることが肝要となっている(写真9～11)。

5-2. 藻場増殖礁が生み出すクレジット的価値

順調に藻場が再生したときの、コンクリート藻場増殖礁1基が創出するクレジット金額を試算する。

藻場再生面積(半径10mエリアとして)：

0.0314ha

藻場増殖礁1基が吸収するCO₂量：

4.2t-CO₂/ha/年×0.0314ha

=0.132t-CO₂/基/年(アラメ場、平均値)

藻場増殖礁1基が創出するクレジット金額：

72,816円/t-CO₂×0.132t-CO₂/基/年

=9,602円/基/年(アラメ場、平均値)

大事なのは、藻場が翌年以降も維持できれば毎年この金額でのクレジット販売が期待できることであり、さらには、再生した藻場がより拡大することで、販売金

額の増大が期待できることである。藻場を再生させるのが最初のゴールだが、さらに維持・拡大する取り組みを継続することが重要となる。

6. さいごに

藻場は海のゆりかごとも言われ、海洋生物を支える重要な場所であることが認識されている。ただ、イセエビやアワビの増殖と異なり、それが増えることが漁業者の収入増加にすぐにはつながらないため、藻場増殖にかける費用や人的資源は限定的であった。

ブルーカーボンの認知拡大によって、藻場にはCO₂を吸収・固定化する機能があること、カーボンニュートラル実現の有効な手段であること、藻場を定量的に管理すればカーボンクレジット取引により資金が得られることが知られるようになった。

クレジット取引によって得られた資金が藻場の維持、再生、拡大に活用され、カーボンニュートラル実現に

【参考文献】

- 1) 桑江朝比呂, 吉田吾郎, 堀正和, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 岡田知也, 梅澤有, 佐々木淳／浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.75, No.1, pp.10～20, 2019
- 2) 国土交通省ウェブサイトより, ジャパンブルーエコノミー技術研究組合作成資料
https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001589204.pdf
- 3) 鈴木裕明, 坪田見誠／藻場再生への挑戦-長崎県沿岸海域を中心とした海藻付きコンクリートブロックを用いた藻場造成の取組み, セメント・コンクリート, No744, pp.20～26, 2009
- 4) 住友大阪セメント(株)K-hatリーフβ型カタログより, 平成17・18年(一社)水産土木建設技術センター長崎支社委託調査結果
- 5) 長崎県水産部／長崎県における磯焼け対策ガイドライン(平成30年度改定版), 2018. 5
- 6) 鈴木裕明, 川畑三彦, 坪田見誠, 近藤啓一, 内田佳孝, 松尾照久, 山仲洋紀／魚類の食害防止ネットを用いた核藻場造成実証実験について(その4), 平成21年度日本水産工学会学術講演会論文集, pp.1～4, 2009. 5
- 7) 鈴木裕明, 川畑三彦, 園部幸治, 小島一, 犬東敬史／海藻着生プレートと食害防止ネットを用いた対馬市豆蔵海域における核藻場造成について(その2), 平成21年度日本水産工学会学術講演会論文集, pp.5～8, 2009. 5

パンフレット・セメントの底力 セメントはわが国の防災インフラ整備を支えています

セメント協会は未曾有の被害をもたらした東日本大震災をはじめ、頻発するゲリラ豪雨や竜巻などの自然災害の脅威から、国民の命や生活を守るために必要な措置を施すことが何よりも重要な課題と捉え、防災インフラ整備の重要性を訴えるパンフレット(A4判・16ページ)を作成しました。様々な自然災害時に対し、強固な躯体を持つコンクリート構造物やセメント系固化材が果たした役割や有用性を、①豪雨・渇水に備えるセメント、②津波・高潮に備えるセメント、③土砂災害に備えるセメント、④災害復旧・復興を支えるセメントの項目にわけ、各種の事例を写真と図版でわかりやすく解説しています。このパンフレットにより人々の命や暮らしを守るセメント・コンクリートの力、これから必要となる公共事業についてご理解いただき、より一層安全への意識を高めるための一助としていただきたく作成しました。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。

一般社団法人セメント協会 広報部門 FAX 03-5540-6181



トンネル覆工コンクリートの 全自動打設システムによる施工実績

Development of automatic casting system for secondary tunnel lining concrete and construction record

松本 修治 手塚 康成 坂井 吾郎

1. はじめに

近年、建設業界における作業員不足の問題を解決するために、専門スキルの低い作業員が施工に携わっても品質を確保しつつ、少人数で効率的に施工ができる技術が求められている。筆者らは、その技術の一つとして、山岳トンネルにおける二次覆工コンクリートの全自動打設システム(以降、トンネル覆工コンクリートの全自動打設システムと記す)を開発した。本稿では、中流動覆工コンクリートおよび高流動覆工コンクリート¹⁾(以降、中・高流動覆工コンクリートと記す)を用いたトンネル覆工コンクリートの全自動打設システムによる施工実績について紹介する。

2. 全自動打設システムの概要

現在のトンネル覆工コンクリートの施工では、棒状パイプレタによる締固め作業や配管の切替えに伴う配管内部に残留したコンクリートの廃棄および清掃作業を、狭隘な移動式型枠内でおおむね5～6名の作業員によって行っている。全自動打設システムは、これらの作業を不要にできる画期的な工法である(図1)。本システムは、新しい打設配管装置(回転式打設口)、コンクリートポンプ2台を連携させた打設制御装置、型枠パイプレタ完全自動制御装置および各種制御システムを備えた移動式型枠で構成され、覆工コンクリートの圧送、打設口の切替え、型枠パイプレタの稼働などの一連の作業を自動で行うものである。以降に、本システムを構成する各技術および装置について述べる。

2-1. 中・高流動覆工コンクリートの技術

中流動覆工コンクリートは軽微な締固めで充填でき、高流動覆工コンクリートは締固めを不要とするもので、いずれも図2に示すように位置づけられる流動性の高いコンクリートである。

技術的課題は、所定の流動性を確保した上で、ブリーディングや材料分離を抑制することに加え、覆工コンクリート特有の課題として、可使時間の確保とごく初期の材齢における強度発現性を両立することである。これらを同時に実現するため、新規の増粘剤含有高

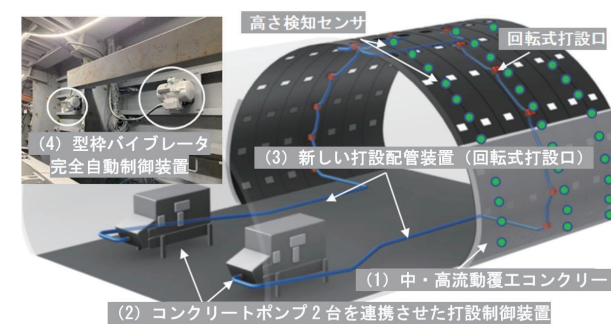


図1 トンネル覆工コンクリートの全自動打設システム

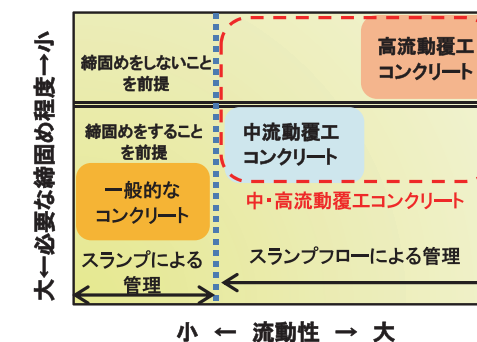


図2 中・高流動覆工コンクリートの位置づけ

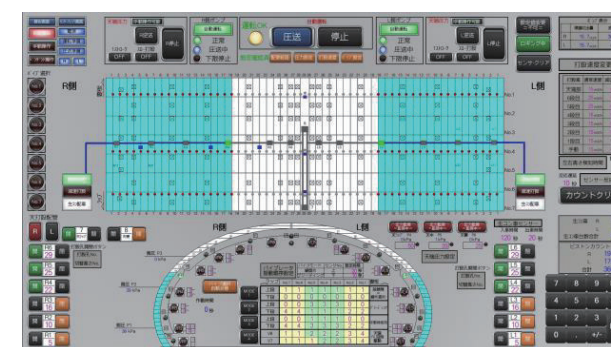


図3 打設制御装置のシステム画面

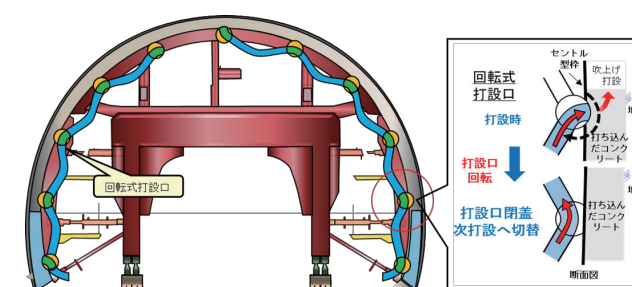


図4 新しい打設配管装置

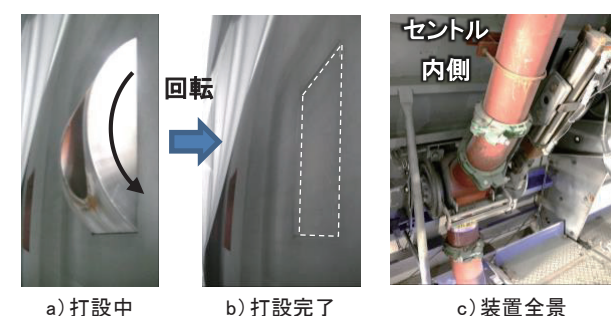


写真1 回転式打設口

性能 AE減水剤²⁾を開発した。この混和剤を用いることで、ブリーディング量を一般的なスランプ15cm程度の覆工コンクリートの半分程度にまで低減しつつ、中・高流動覆工コンクリートの適切な流動性の確保が可能となる。また、一般的な覆工コンクリートと同様に、材齢18時間で脱型に必要な強度を確保できる。

2-2. 打設制御装置

大断面トンネルの覆工における大量かつ高速打設に対応するため、コンクリートポンプ(以下、ポンプと記す)

を左右に1台ずつ、計2台配置させている。一般的に中・高流動覆工コンクリートは普通コンクリートに比べて流動性が高く型枠に作用する圧力が大きくなるため、左右の打上がり高さを均等にして打ち込むことが重要な管理項目となる。そこで、型枠表面に設置した複数の高さ検知センサでコンクリートの打上がり高さを検知し、図3に示す各ポンプの吐出量を自動で調整し、左右の打上がり高さを制御することができる装置を開発した。なお、システム画面には、トンネル覆工断面と移動式型枠の展開図を表示させており、打設を開始すると打設の進捗に合わせて完了箇所を青色に順次表示することで打設状況が見える化している。

2-3. 打設配管装置

新しく開発した打設配管装置は、図4に示す打設口、配管および移動式型枠が一体になったもので、写真1に示す回転式打設口を有するものである。圧送配管は、左右で独立しており、それぞれに回転式打設

まつもと しゅうじ / MATSUMOTO Shuji
鹿島建設(株)
技術研究所 土木材料グループ
主任研究員

てづか やすなり / TEZUKA Yasunari
同上
土木管理本部 土木工務部 トンネルグループ
専任部長

さかい ごろう / SAKAI Goro
同上
技術研究所 主席研究員
博士(工学)

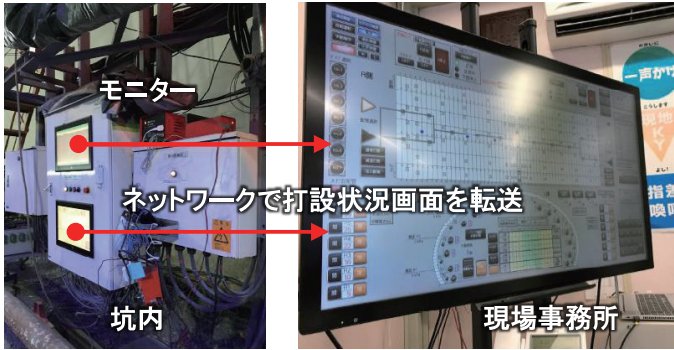


写真2 打設状況の共有化

口が連続的に接続されている。回転式打設口は、前述した打設制御装置と連動しており、打込み時には打設口が型枠内部に突出し、打設口の高さ位置より上に圧送圧で吹上げて打込み（以降、吹上げ打設と記す）を行い、当該打設口の打込み完了を検知すると、回転して型枠表面で接続口の蓋が閉まる。それと同時に、次の打設口への配管ルートが形成される構造となっている。これらにより、次の打設口への切替えが容易かつ即座に完了させることができる。また、配管ルート内に残留するコンクリートの発生を防ぎ、打設中における人力による回収や配管清掃が不要となる。

2-4. 型枠パイプレータの完全自動制御装置

従来の中流動覆工コンクリートの締固めは、型枠パイプレータで行われ、人が操作盤を用いて手動で制御している。そこで、型枠パイプレータを自動制御する装置を開発し、スプリングライン（以降、SLと称する）下部や箱抜き箇所以外は、人による操作を不要とした。本装置は、稼働のタイミングや振動時間をパターン化して事前に設定することにより、前述の打設制御装置と連動して、コンクリートの打上がり高さに応じて自動で型枠パイプレータを稼働・停止させることができる。

2-5. データのロギングと情報の共有

写真2に示す情報の共有装置により、打設履歴データを記憶媒体に自動で記録し、打設状況の画面をネットワークで配信することができる。これにより、遠隔地での打設監視や遠隔臨場が可能で、覆工コンクリートの

仕上がり改善活動等にも活用できる。

3. 全自動打設システムの施工実績

3-1. 概要

新名神高速道路宇治田原トンネル西工事に全自動打設システムを導入した。導入現場は、3車線道路の大断面トンネル（内空幅約15m、内空高約9m）である。施工開始時から中流動覆工コンクリートを用いた全自動打設システムによる施工を行っており、スランプ15cm程度のコンクリートを人力で打込み、締固めを行う従来工法と比べ、生産性の向上が確認された。そこで、更なる生産性向上策の効果を検証するため、高流動覆工コンクリート²⁾を用いた全自動打設システムによる施工を一部区間で行った。

一般的な道路トンネルでは、非常用電話機などを設置するスペースとして、トンネル延長50～200mごとに箱抜きを設ける必要があり、本トンネルにも、大型の箱抜きが存在する。箱抜き箇所では、中流動覆工コンクリートは棒状パイプレータによる人力での締固めや型枠パイプレータの手動操作が必要となっている。そこで、箱抜き箇所における締固め作業が不要であること、すなわち完全な自動打設を検証するために、更なる生産性向上策として高流動覆工コンクリートを導入した。以降、中流動覆工コンクリートの施工実績と比較して述べる。

3-2. 中・高流動覆工コンクリートの配合

表1に中・高流動覆工コンクリートの配合を示す。同

表1 中・高流動覆工コンクリートの配合

種類	SF (mm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Gvol (L/m ³)	単位量 (kg/m ³)					PP Vol. %
						W	C	S	G	VSP	
中流動覆工 コンクリート	425± 75	4.5	47.3	52.0	336	175	370	857	894	5.18	0.3
高流動覆工 コンクリート	600± 50	4.5	41.7	50.0	323	175	420	836	872	6.30	0.3

W:地下水、C:普通ポルトランドセメント 密度 3.16 g/cm³、S:砕砂・海砂の混合砂 表乾密度 2.58g/cm³、G:砕石 2005 表乾密度 2.66g/cm³、VSP：特殊高性能 AE 減水剤、PP:ポリプロピレン繊維 密度 0.91 g/cm³ 繊維長 47mm、SF:スランプフロー

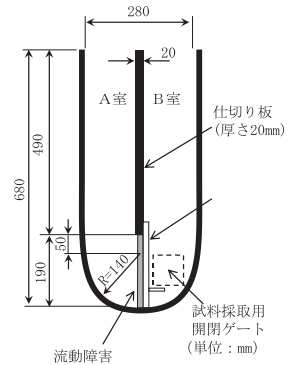


図5 U形充填性試験容器

工事における中流動覆工コンクリートは、剥落防止を目的とした繊維（ポリプロピレン製、長さ47mm）を混入する仕様で、目標スランプフローを425±75mm、目標空気量を4.5±1.5%としている。これに対し、高流動覆工コンクリートは、同じ繊維を混入する仕様で、スランプフローを600±50mm、空気量を4.5±1.5%とした。高流動覆工コンクリートは、中流動覆工コンクリートよりも流動性を高めるために、さらに高い材料分離抵抗性を確保する必要があった。そこで、土木学会「高流動コンクリートの配合設計・施工指針」³⁾（以降、高流動指針と称する）を参考にすると、繊維に対する材料分離抵抗性を確保するうえでも、単位セメント量が450kg/m³以上になることが想定された。ここで、前述した覆工コンクリートの施工条件に適するように開発した増粘剤含有高性能 AE 減水剤の増粘効果によって想定よりも30 kg/m³少ない420kg/m³で材料分離抵抗性を確保することができた。自己充填性のランクの設定は、高流動指針に則った場合、本工事の覆工厚500mm、単鉄筋（主筋 D19@300mm、配力筋 D16@200mm）の条件から、ランク3に相当する。これは、図5に示すU形容器を用いた高流動コンクリートの充填試験方法（案）（以降、U形充填性試験と記す）

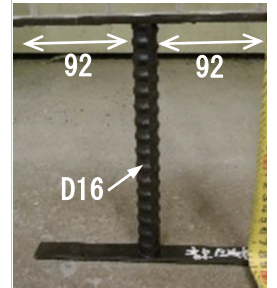


写真3 U形充填性試験の流動障害R2.75

では流動障害なしでの評価となる。ただし、繊維を混入することから、鉄筋と繊維の干渉による充填性の低下を考慮し、本トンネルの配筋条件を模擬した新たな充填性の指標とした鉄筋あき92mmのランク2.75を考案し、写真3に示す障害R2.75を配したU形充填性試験で評価するものとした。

3-3. 打設計画

一般的な覆工コンクリートの打込み実績である時間当りの打上がり速度1.5～2.0m/h程度となるように、打込み速度は、ポンプ1台当たり15～25m³/hに設定した。また、高流動覆工コンクリートは締固めが不要であるものの、天端の美観向上を目的として、あらかじめ天端の型枠にトンネル軸方向1.5m、周方向1m程度の間隔で全28台設置した型枠パイプレータを、打込み完了後に自動制御で合計20秒間稼働させた。

3-4. 打設結果

中・高流動コンクリートのスランプフローおよび空気量は、安定しており、全てのコンクリートが目標とするフレッシュ性状に対する管理範囲内に収められた。

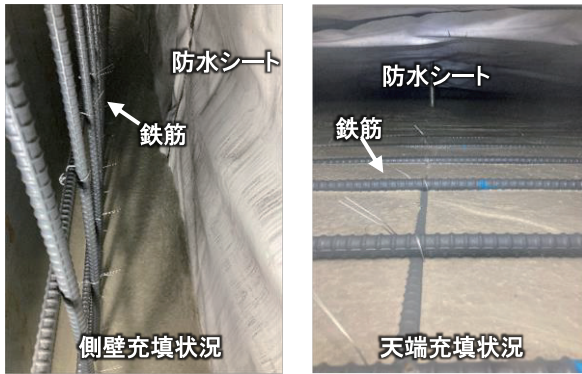


写真4 コンクリートの充填状況

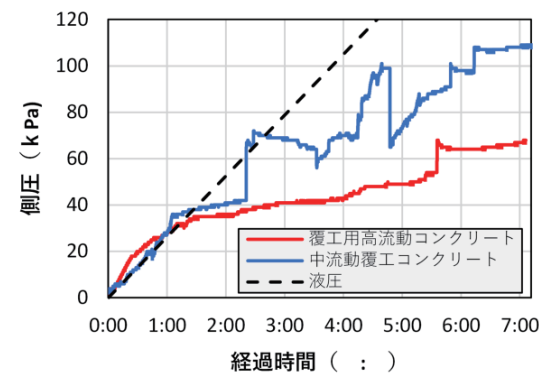


図6 覆工コンクリートの側圧



写真5 高流動覆工コンクリートの仕上がり

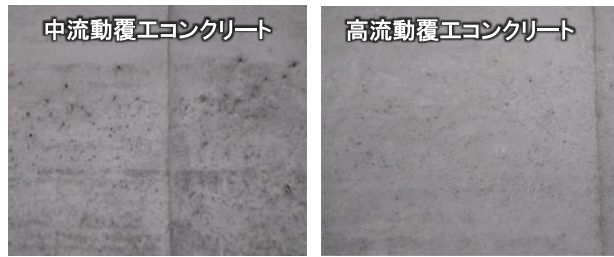


写真6 表面気泡の比較例

写真4に高流動覆工コンクリートの充填状況を示す。材料分離することなく妻板まで流動し、人力による流動補助を一切必要とせず隅々までほぼ水平に充填されていく状況が確認された。

図6に覆工コンクリートの側圧を示す。中流動覆工コンクリートと高流動覆工コンクリートの側圧実績に加え、比較としてトンネルの内空高さ9mにおける液圧を破線で示した。いずれも打上がり開始から1時間程度までは液圧になっているものの、2時間以降の時点では液圧以下に減少した。しかし、中流動覆工コンクリートの側圧は、変動が大きく、瞬間的に液圧相当に上昇する時点が存在している。これは、型枠パイプレータの稼働等により、中流動覆工コンクリートが瞬間的に液状化しているためと考えられる。一方、高流動覆工コンクリートは、変動が小さく最大68 kPaと想定より小さい結果であった。これは、型枠パイプレータによる振動を与えないことが影響したものと考えられる。

写真5に高流動覆工コンクリートの仕上がりを示す。

全区画において、SL下部に発生しやすい表面気泡や天端部に発生しやすいコンクリートの流動跡などは少なく綺麗な仕上がりとなった。表面気泡の減少は、吹上げ打設を行ったことで、打込み時のエントラップトエアが低減されるとともに、できる限り連続的に打込んでいることの効果によるものと考えられた。また、天端部の流動跡の低減は、天端部全面が平坦に打ち上がるため、吹上げ口の圧力が上がらず分離しにくくなったためと考えられる。

写真6にSL下部における表面気泡の比較を示す。中流動覆工コンクリートに比べ高流動覆工コンクリートは、表面気泡が少なくなった。これは、高流動覆工コンクリートは、中流動覆工コンクリートより充填性が優れること、SL下部では型枠パイプレータを稼働させないことで、コンクリート内部の気泡が表面に誘導され合泡することもなく型枠表面に気泡が残存しにくかったためと考えられる。特に、SL下部では断面形状がオーバーハングしているため、気泡が抜けにくく表面にとどまりや



写真7 箱抜き箇所における高流動覆工コンクリートの充填状況

すく、表面気泡の差が顕著に表れたものと考えられる。

写真7に箱抜き箇所における覆工用高流動コンクリートの充填状況を示す。中流動覆工コンクリートにおいて、全自動打設を実現する上で課題であった箱抜き箇所においても、高流動覆工コンクリートを用いることで、締固め作業の必要はなく、隅々まで充填されることが確認された。

4. おわりに

実現場に中流動覆工コンクリートと高流動覆工コンクリートを用いた全自動打設システムを初導入し、その効果を検証した。全ての装置がトラブルなく順調に稼働することができた。また、いずれのコンクリートでも、全自動打設システムを用いることで、ポンプ操作員を含めた打設人員を9名から3名に低減し、特に、狭隘な作業環境下での人力作業を完全に排除でき、省力化および省人化を実現できた。さらに、高流動覆工コンクリートを用いることで、中流動覆工コンクリートを用いた区間で

は必要であった箱抜き箇所などにおける棒状パイプレータを使った人力による締固め作業も不要とした。その他、打設履歴は記憶媒体に記録されるため、脱型後の表面の仕上がりとの関連付け、現場での覆工コンクリートの品質向上に向けたPDCA活動を容易にした。一方で、打設状況をネットワーク配信しており、遠隔地での打設監視としても活用している。これらのことから、本全自動打設システムの有効性を確認できた。今後、他のトンネル工事でも中流動覆工コンクリートおよび高流動覆工コンクリートを用いた本全自動打設システムの導入を推進し、さらなる合理化施工を検証していく。

【参考文献】

- 1) 松本修治, 佐藤崇洋, 坂井吾郎, 手塚康成, 青柳隆浩, 西岡和則／山岳トンネルにおける覆工用高流動コンクリートの適用実績, トンネル工学報告集, 第27巻, I-17, 2017.11
- 2) 作榮二郎, 亀島健太, 松本修治, 坂井吾郎／ブリーディング低減成分を含有した増粘剤一液型高性能AE減水剤を使用した覆工用高流動コンクリートの基本特性, 第75回年次学術講演会, V-434, 土木学会, 2020
- 3) 土木学会／高流動コンクリートの配合設計・施工指針, 2012.6

お知らせ

複写についてお願い

セメント協会は下記協会に複写に関する権利委託をしております。本誌に掲載された著作物を複写したい方は、同協会より許諾を受けて複写して下さい。ただし(公社)日本複製権センター(同協会より権利を再委託)と包括複写許諾契約を締結されている企業の社員による社内利用目的の複写はその必要はありません(社外頒布用の複写は許諾が必要です)。なお、著作物の転載・翻訳などの複写以外の許諾は、直接セメント協会広報部門(☎03-5540-6175/出版担当)へご連絡下さい。

連絡先：(一社)学術著作権協会 ☎170-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル
TEL 03-3475-5618 FAX 03-3475-5619 E-mail : info@jaacc.jp

第52回(2024年度)セメント協会論文賞の 選考経過と推薦理由

セメント協会論文賞選考委員会 委員長 三五 弘之



セメント協会論文賞選考委員会は、2023年12月から2024年2月にかけて3回の委員会を開催し、論文賞の選考を行いました。

本選考委員会は、「セメント・コンクリート論文集」Vol.76(2022年度)およびVol.77(2023年度)に掲載された論文のうち、すでに受賞した論文を除いた140編の中から、学術的・実用的価値が高く、かつ独創的・先端的研究であると認められた3件を論文賞候補としてセメント協会に推薦いたしましたところ、2024年3月に開催した理事会で承認され、第52回セメント協会論文賞が授与されることになりました。

論文賞の表彰式は本年5月15～17日にかけて赤坂インターシティ AIRで開催された第78回セメント技術大会の2日目席上にて、不死原会長から受賞者各位に賞状および賞牌が授与されました(本誌No.929、2024年7月号、p.36)。

受賞論文3件の題目と推薦理由を紹介します。なお、本選考委員会は以下に示す15名で構成されています。

セメント協会論文賞選考委員会(敬称略)

委員長	三五 弘之	日本大学			
副委員長	河合 研至	広島大学	委 員	山田 義智	琉球大学
委 員	福田功一郎	名古屋工業大学	委 員	小山 明男	明治大学
委 員	新 大軌	島根大学	委 員	檀 康弘	日鉄高炉セメント(株)
委 員	宮澤 伸吾	足利大学	委 員	平尾 宙	太平洋セメント(株)
委 員	久田 真	東北大学	委 員	板谷 裕輝	住友大阪セメント(株)
委 員	小林 孝一	岐阜大学	委 員	石田 剛朗	UBE三菱セメント(株)
委 員	野口 貴文	東京大学			
委 員	濱 幸雄	室蘭工業大学			

β -C₂S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

太平洋セメント(株)／扇 嘉史 太平洋セメント(株)／細川 佳史

コンクリートに二酸化炭素(CO₂)を固定化させながら強度を発現させる「CO₂吸収・硬化セメント」や、廃コンクリート等にCO₂を固定化させ、建設資材等へ利用する技術が近年数多く開発されています。これらの養生に、セメント工場等から回収された高濃度のCO₂ガスを活用した場合、炭酸化処理の効率化等が期待されますが、そのCO₂固定化機構の検討は十分ではありませんでした。また、炭酸化処理されたコンクリートでは、その加熱過程で炭酸カルシウムよりも低温度で脱炭酸する現象が報告されていますが、その原因として固定化されたCO₂の状態や安定性に係る現象の挙動解析が求められていました。

本研究では、CO₂吸収・硬化セメントの主要鉱物である β -C₂Sおよび廃コンクリートを含めた硬化コンクリート中の主要鉱物であるC-A-S-Hを研究の対象とし、高濃度CO₂による炭酸化の過程および加熱脱炭酸過程における挙動を多角的に分析することで、各主要鉱物のCO₂固定化機構を解析しています。

β -C₂Sについては、炭酸化によって、カルサイト、アラゴナイトおよびCaOを少量含んだシリカゲルの三相が生成すること、またこれらを加熱すると炭酸カルシウム中のCO₂の約20%は400～600℃付近の低温領域で脱炭酸することを明らかにしました。著者らは、シリカゲルが共存する場合に炭酸カルシウムの脱炭酸が低温領域で生じることを別途明らかにしており、炭酸化過程の β -C₂S中にはシリカゲルが共存していることから同様な現象を起こしたと結論付けました。

C-A-S-Hについては、乾式処理における炭酸化で



扇氏



細川氏

は、バテライト、アラゴナイト、カルサイトおよびシリカゲルが生成してそれらが微細に混在していること、また炭酸化過程の β -C₂Sと同様に低温領域での脱炭酸が顕著であることを明らかにしました。一方、湿式処理におけるC-A-S-Hの炭酸化では、カルサイトとシリカゲルのみが生成しその組織構造も両者が明瞭に分離して存在すること、また低温領域での脱炭酸が生じないことを明らかにしました。

本研究の成果と既往の知見に基づいた考察から、炭酸カルシウムが低温領域で脱炭酸する要因としては、炭酸カルシウムとしてバテライトとアラゴナイトが生成していること、共存するシリカゲル中のCaO濃度が低いこと、および共存する炭酸カルシウムとシリカゲルの接触が多いことなどの3つの要件が必要であると結論づけました。

以上のように、本研究では炭酸化したコンクリートが低温領域で脱炭酸する現象を解析しています。また、今後の関連する試験方法や規格などを検討する上での知見も与えており、カーボンニュートラルの実現に資する重要な情報を提供している点も高く評価できます。

よって本論文はセメント協会論文賞に該当すると判断いたしました。

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

金沢大学大学院／大山 和哉
金沢大学／田邊 駿

鉄建建設(株)／上原 典香
金沢大学／五十嵐 心一

コンクリートの劣化機構の一つである凍害の発生と進行は、コンクリートの気泡組織に大きく依存することが知られていますが、著者らは気泡の保護領域を評価するために、ディリクレ分割を用いて気泡分布の特性を数学的に表現するモデルを提案し、気泡の分布や保護領域に焦点を当てたシミュレーションを通じて、凍害抵抗性に対する理論的な考察を提供しています。

本研究では、気泡分布の画像解析データに対して理論的で丁寧な考察が提供されており、画像解析技術の気泡組織評価への応用に関する貴重な知見を得ています。その理論の展開に当たっては、海外の関連研究を幅広くレビューし、研究の位置付けに関する十分な調査と主要な既往研究との比較が行われているため、得られた成果には高い信頼性と妥当性があります。また、気泡組織の三次元分布の評価方法において、既存の研究成果を活用しつつ独自の手法を提案している点が学術的に高く価値されます。さらに、気泡と高吸水性ポリマーによる耐凍害性の改善効果を比較して高吸水性ポリマーの凍害抵抗性の改善機構が気泡導入とは異なることを解析的に示唆したうえで、実務で利用可能なスプレッドシートレベルの数値計算で詳細な三次元分布が得られることを示し、これらの成果には実用的な価値が認められます。

以上のように、本研究では経験則的に導かれた仕様による評価が行われていた凍害抵抗性の検討に対して理論的な根拠を構築し、材料や配合に依存せず、早期の材齢での凍害抵抗性の判定が可能になることを示しました。ここで得られた凍害抵抗性における気泡



大山氏



上原氏



田邊氏



五十嵐氏

の影響についての成果は、凍害防止における適切な配合設計や施工方法および混和剤の開発に繋がることで期待されます。

よって本論文はセメント協会論文賞に該当すると判断いたしました。

*

*

*

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

琉球大学／東舟道 裕亮
琉球大学／山田 義智

琉球大学／比嘉 龍一
(株)フローリック／平野 修也

近年、コンクリート工事の合理化の観点からその使用が期待されている高流動コンクリートは、使用材料の品質や調合により流動性が変化しやすく、特に低粉体系の高流動コンクリートにおいては材料分離が懸念されています。また、高流動コンクリートを使用する工事をより効率的に行うために、部材への充填性を数値解析等で評価する手法の開発が求められており、そのためには高流動コンクリートの流動性をレオロジーに基づいて定量的に評価することが必要です。

本論文では、高流動コンクリートの材料分離判定とレオロジー定数の予測を使用材料や調合等を基に行う手法を提案しており、これらの判定手法や予測手法には多くの分野で適用事例が報告されている機械学習が利用されています。

具体的には、材料分離の判定は使用材料や調合を特徴量(説明変数)とし、Random ForestやLightGBMを機械学習器として目視材料分離判定を行う手法を開発しています。さらに、機械学習で得られた重要度の高い特徴量を用いて、統計的手法の一種であるLogistic Regressionの分析結果から、目視材料分離判定の確率的な予測式を提案しています。

また、レオロジー定数の予測については、骨材化モデル粘度式を利用する手法を提案しています。骨材化モデル粘度式は、余剰ペースト膜厚理論と同様にコンクリートを粗骨材とモルタルからなる二相材料と考え、作用するせん断応力によってはモルタルが粗骨材と同様に流動に寄与しないものとみなす骨材化係数を導入し、ロスコ式を応用・発展させたものです。なお、骨



東舟道氏



比嘉氏



山田氏



平野氏

材化係数は、モルタルフロー試験で得られる結果と使用材料や調合を特徴量として機械学習で決定されます。

高流動コンクリートの目視材料分離判定を使用材料や調合から機械学習で予測する手法は判定精度が高く、提案された目視材料分離判定の確率的な予測式は判定精度こそ機械学習に劣りますが、ブラックボックスである機械学習器に対して実用性に優れ、調合設計に利用しやすい利点があります。また、機械学習を援用した骨材化モデル粘度式でレオロジー定数を予測する手法は、予測精度が高く、高流動コンクリートの流動特性を物理的に表しています。したがって、本論文で提案される機械学習を援用した種々の手法は、高流動コンクリートの調合や施工の省力化と合理化を推進するための重要な技術であると評価されます。

よって本論文はセメント協会論文賞に該当すると判断いたしました。

論文賞を受賞して

太平洋セメント(株) 扇 嘉史

太平洋セメント(株) 細川 佳史

このたびは、「 β -C₂S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」に対し、大変栄誉あるセメント協会論文賞を賜りましたこと、誠に光栄に存じます。本論文をご推薦いただきましたセメント協会論文賞選考委員会の委員の皆様、(一社)セメント協会の関係者の皆様に深く感謝申し上げます。また、本研究を遂行するに当たり多くの方々にご協力、ご助言いただきました。この場をお借りして深く御礼申し上げます。

近年、セメント・コンクリート分野におけるCO₂削減対策として、セメントやセメントペーストの炭酸化を利用した、CO₂固定化技術が数多く開発されています。具体的には、CO₂を吸収して硬化するセメント「CO₂吸収・硬化セメント」に関する技術、廃コンクリートへCO₂を固定化させ建設資材やセメント混合材へ利用する技術等があります。CO₂源としてセメント工場等から回収された高濃度CO₂ガスを活用することが想定されますが、そのCO₂固定化機構に関する検討は十分ではありませんでした。

上述したCO₂固定化技術が普及する上で、CO₂がどのような相として固定化されるか等の情報は重要と考えられます。そこで、本研究では、CO₂吸収・硬化セメントの主要鉱物である β -C₂Sおよび廃コンクリートを含めた硬化コンクリート中の主要鉱物であるC-A-S-Hを研究の対象とし、高濃度CO₂によって炭酸化させ、生成物を多角的に分析することで各鉱物のCO₂固定化機構を検討しました。

β -C₂SとC-A-S-Hは炭酸化すると、いずれも炭酸カ

ルシウムとシリカゲルを生じることがわかりました。炭酸カルシウムとして、カルサイトだけでなく、準安定相であるバテライトやアラゴナイトも炭酸化の条件等によっては生成することが確認できました。また、炭酸化した β -C₂SとC-A-S-Hともに、加熱を伴う分析(熱重量・示差熱分析等)を行うと、程度の差はありますが、その加熱過程で炭酸化カルシウムよりも低温度で脱炭酸する現象が生じました。これについて、炭酸カルシウムがシリカゲルと共存(接触)する場合に、炭酸カルシウムが低温領域で脱炭酸することを別途確認しており、炭酸化した β -C₂SやC-A-S-H中には両者が共存していることから、同様の現象が生じたと結論付けました。すなわち、本研究の範囲では、低温領域での脱炭酸は、炭酸カルシウムに由来するものであり、炭酸カルシウム以外の相へのCO₂固定化は否定されました。

さらに、各種分析を通して、炭酸カルシウムが低温領域で顕著に脱炭酸する要因について、炭酸カルシウムとしてバテライト等の準安定相が生成していること、共存するシリカゲル中のCaO濃度が低いこと、および共存する炭酸カルシウムとシリカゲルの接触の程度が大きいことの3つの要件が必要であると結論付けました。

本研究成果により、 β -C₂SおよびC-A-S-Hの炭酸化において、CO₂は炭酸カルシウムとして固定化されることが明確になりました。一度吸収されたCO₂は気中に放出されることなく、長期に渡り安定的に存在することが期待できます。

今後は本研究では対象としなかった、その他のセメント鉱物、水和物の炭酸化に着目した研究を行い、セメント・コンクリート分野でのカーボンニュートラルに貢献できるよう邁進する所存です。

(扇 嘉史)

金沢大学大学院 大山 和哉

金沢大学 上原 典香

金沢大学 田邊 駿

金沢大学 五十嵐 心一

このたび、総合題目「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」の論文に対して第52回セメント協会論文賞という栄えある賞を受賞し、至極光栄に存じます。審査いただいた論文賞選考委員会の皆様および関係各位に心より御礼申し上げます。

10年ほど前から、コンクリート中の気泡間距離の評価が目的ならば、単純に気泡を点で表して点過程の考え方を用いれば簡単であることを主張しておりました。その後、単に距離を求めるだけでなく凍害保護機構に関連付けるならば、セメントペーストは一番近い気泡により保護されると考えれば、各気泡点を最近傍点とする小領域を分割表示してくれるディリクレ(ポロノイ)分割という手段が使えるのではと思いつきました。しかし、大小様々な骨材粒子がランダムに存在している画像にて、その周囲のセメントペースト領域をモザイク状に分割し、個々の分割領域の面積を評価するところで行き詰まりました。そこで、面識もツテもないのですが、斯界の権威であるニュージーランドのオークランド大学統計学科のR.Turner教授に、相談のメールを送りました。2020年11月コロナ禍の初冬の頃です。すると、すぐに面白いテーマだと返事があり、プログラミングを含めた計算方法に関していろいろと助言をいただき、これが本研究のブレークスルーとなりました。その後、Turner教授からRのパッケージデータとして採用したいとの望外の提案もいただき、現在も我々の領域分割モデルは全世界でダウンロードできるように公開されています。

気泡による凍害からの保護範囲の評価を進めているうちに、2次元の領域面積に加えて3次元の体積計算

も行えるようになりました。そこで、これまでのディリクレタイル面積率と3次元の保護領域体積率を比較してみようと思い、評価対象に気泡の他に耐凍害性改善効果があるとされる高吸水性ポリマーを加えることにしました。すると、高吸水性ポリマーの残した空隙は大きくて個数が少なく、空隙間距離が離れているにもかかわらず耐凍害性の著しい改善が見られ、気泡と同様の耐凍害性改善機構ではうまく説明がつきませんでした。そこで、電子顕微鏡で気泡と高吸水性ポリマー粒子の残した空隙を観察したところ、ポリマー粒子の空隙には反応生成物の析出がいたるところで観察され、内部貯水を放出後に水分で満たされていた大きな空隙と元々空で表面被膜を持った気泡では、耐凍害性付与機構には本質的な相違があると納得した次第です。

本研究は、マルチスケールにおける粒子の空間分布が、コンクリートの物性を決定するような問題に対して、いろいろな応用が可能な手法を提示しています。現在、CO₂排出削減という喫緊の課題に対して、多様なコンクリートの開発が進められていますが、その開発の一助にもなりうるものと思います。本論文著者の学生諸君は社会へと巣立ち、指導教員も学窓を去る日が間近に迫っています。本研究がどなたかの興味を喚起して、小さな研究バトンとして渡るならば、研究者としてこの上ない喜びです。

(五十嵐 心一)

*

*

*

琉球大学	東舟道 裕亮
琉球大学	比嘉 龍一
琉球大学	山田 義智
(株)フローリック	平野 修也

このたびは、「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」に対して、第52回セメント協会論文賞という名誉ある賞を賜り、大変光栄に存じます。本論文をご推挙いただきましたセメント協会論文賞選考委員各位ならびに（一社）セメント協会の関係各位に心より御礼申し上げます。

本研究は、コンクリート工事の合理化の観点からその使用が期待されている高流動コンクリートについて、使用材料や調合情報などを基に機械学習を援用して目視材料分離の有無や流動性を表すレオロジー定数を予測する手法を検討したものです。

2022年に発表した論文「機械学習による高流動コンクリートの目視材料分離判定の試み」では、従来は実際にスランプフロー試験を行って評価するしかなかった高流動コンクリートの目視材料分離判定に対して、効率化・省力化を目的として、使用材料の物性やコンクリートの調合情報などの設計段階における情報を基に予測する手法の開発を試みました。予測法として、近年複雑な問題への適用例が多い機械学習を用いることで、高い判定精度が得られ、どの要因が目視材料分離に影響を与えているかを定量的に評価いたしました。

また、ブラックボックスである機械学習の代替として、本研究では実用性が高いロジスティック回帰分析による分離判定の定式化も行いました。その結果、提案する分離判定式による予測は良好な予測精度を有していることが確認されました。

一方、2023年に発表した論文「機械学習を援用した骨材化モデル粘度式による高流動コンクリートのレオロジー定数予測に関する基礎的研究」では、高流動コンクリートのレオロジー定数について、設計段階でも利

用可能な予測手法の開発を目的として、ロスコ式を応用・発展させた骨材化モデル粘度式を新たに提案し、その粘度式を用いてモルタルのレオロジー定数から高流動コンクリートのレオロジー定数を予測する手法を提案いたしました。なお、骨材化モデル粘度式では、コンクリートを粗骨材とモルタルの2相材料と考え、作用するせん断ひずみ速度によってはモルタルを流動に寄与しない粗骨材の一部とみなす骨材化係数を考慮しており、この値の予測に機械学習を適用しました。

本研究においては、使用材料や調合情報、モルタルの流動性などを特徴量とした機械学習により骨材化係数を非常に高い精度で予測することができ、さらに高流動コンクリートのレオロジー定数についても高い精度で予測できることを確認しました。

今後の展望としては、機械学習に使用するデータ数の増強や他の学習器による予測精度向上の検討が必要だと考えております。また、骨材化モデル粘度式については、セメントペーストからコンクリートまでの一貫的な予測手法の開発など、まだまだ検討すべき点があり、今後も研究を続けていく所存です。

本研究にて提案した予測手法が、高流動コンクリートの調合設計やコンクリート工事の合理化の一助となれば幸いです。

最後に、本研究の遂行にあたり秋山五郎様や清水寛太様をはじめとする(株)フローリックの皆様方、並びに琉球大学の崎原康平先生および大学院生、学部生および卒業生の皆様には多大なご協力を賜りました。また、2021年度科研費(基盤研究(C):課題番号21K04355、研究代表者：山田義智)の助成を受けました。ここに感謝の意を表します。

(東舟道 裕亮)

HOT NEWS

第78回セメント技術大会／優秀講演者決まる

セメント協会は、第78回セメント技術大会(2024年5月15～17日)で優秀な講演を行った17名の講演者を表彰した。2002年から行っている本表彰は、大会全体の活性化と若手研究者・技術者(35歳以下)の研究奨励を目的としており、①講演要旨の分かりやすさ、②プレゼン資料の表現、③発表の方法、④発表時間の分配の適切さ、⑤発表時間、⑥質問に対する回答の適切さ、⑦発表態度、⑧研究内容のレベル、について審査を行い、特に優秀と認められた講演者に対し授与している。今年度は選考対象106名のうち、表に示した17名を優秀講演者とし、表彰状と記念品を授与した。

講演番号	講演者 (敬称略)	所 属	講演題目
1102	鈴木 怜和	住友大阪セメント(株)	石膏転化プロセスによる人工石灰石を用いた試製セメントの水和評価
1105	大田 将巳	(株)トクヤマ	未利用 Ca 等廃棄物を利活用した CO ₂ 固定型混和材の設計開発（3）
1114	須山 裕介	UBE三菱セメント(株)	再生骨材の製造工程で生じた微粉による CO ₂ 固定に関する検討
1117	渡辺 泰樹	太平洋セメント(株)	炭酸化過程における β-C ₂ S 粒子の体積変化
1203	栗原 諒	東京大学大学院	¹ H-NMR relaxometry を用いた、乾燥状態にある合成 C-S-H の H ₂ O/SiO ₂ モル比に関する実験的検討
1206	関根 麻里子	太平洋セメント(株)	3D レーザースキャナを用いたロータリーキルン形状計測技術
1218	小池 賢太郎	海上・港湾・航空技術研究所	建設用 3D 材料押出プリンタで作製した積層体の積層界面における物質移動抵抗性に関する検討
1306	神村 幸弥	新潟大学大学院	液相中の C-(A)-S-H と N-A-S-H の相互作用：FTIR による定量的アプローチ
1319	長谷川 菜美	東京大学大学院	粉碎した粒状試料を用いた水蒸気脱着等温線によるセメントペースト硬化体の空隙構造に関する研究
2204	羽生 隼	群馬大学	火災時における若材齢高強度コンクリートの爆裂性状評価
2206	佐藤 光晟	新潟大学大学院	アロフェン置換処理を施した煅焼アロフェン型ジオポリマーの反応機構に関する検討
3107	多田 真人	太平洋セメント(株)	炭酸カルシウム硬化体の圧縮強度に及ぼす CaCO ₃ の多形および形態の影響
3116	浅野 洋斗	島根大学大学院	CO ₂ 固定型混和材を配合したセメントペーストの半乾式炭酸化挙動
3203	伊神 竜生	名古屋大学大学院	乾燥されたセメント硬化体の空隙構造をイソプロパノールを用いて取得する手法の検討
3207	佐伯 直彦	東京大学大学院	XRD 外部標準法による炭酸化したセメント硬化体中の鉱物組成の定量
3218	前田 拓海	デンカ(株)	エトリンガイト系膨張材を混和したコンクリートの遅れ膨張に関する検討
3318	後藤 壮	太平洋セメント(株)	コンクリート内部の湿気拡散係数に関する基礎的研究

お知らせ

第39回(2025年度)セメント協会研究奨励金テーマ募集のご案内

一般社団法人 セメント協会

一般社団法人セメント協会では、セメント化学・コンクリート化学分野の研究振興と若手および中堅の研究者育成のために、大学・工業高等専門学校研究者に対して研究助成を行っています。

本年度も下記の要領で研究奨励金のテーマ募集を行います。ご応募をお待ちしております。

- | | |
|---------|--|
| 1. 対 象 | セメント化学，コンクリート化学分野における研究(セメント系新材料，セメント系固化材，環境・リサイクルの関連研究を含む) |
| 2. 応募資格 | 日本の大学または工業高等専門学校に所属する研究者(大学院生を含む)
※ただし，前年度(2024年度)にセメント協会研究奨励金の交付を受けた方は応募できません。 |
| 3. 応募条件 | 研究成果については，セメント技術大会，セメント・コンクリート論文集において公表すること。 |
| 4. 助成金額 | 採用された研究1件につき原則として100万円 |
| 5. 応募方法 | セメント協会ホームページから研究奨励金申請書の様式(Word)をダウンロードし，研究奨励金申請書を作成して下さい。応募入力フォームより必要事項を記入し，研究奨励金申請書を添付して下さい。応募入力が完了しましたらご登録頂いたメールアドレスに入力情報が送信されますので内容をご確認下さい。 |

セメント協会ホームページ

<https://www.jcassoc.or.jp>

[トップページ]>[イベント・募集]>[募集/研究奨励金]

※ 一人で複数の応募はできません。

※ 必要事項を記入する際は日本語又は英語を用い，申請書の記入欄内に収めて下さい。

※ 審査条件を統一するため，研究奨励金申請書以外の添付資料は付けないで下さい。

6. 募集期間 2024年9月6日(金)～11月15日(金)必着

※ 期日を過ぎて到着したものは受け付けません。

7. 審査方法 セメント協会研究奨励金審査委員会により審査

8. 結果通知 2025年3月下旬 ※ 申請者へ結果を通知

9. 支 給 2025年4月以降 ※ 全額一括支給

10. 留意事項 ※ 当初の研究期間の終了後，遅滞なく全体の成果報告書を提出して頂きます。

※ 研究期間が1年を超えるときは，前年度成果の研究概要報告書(中間報告)を提出して頂きます。

※ 研究成果の公表に際して，当研究奨励金を受けて研究したことを付記願います。

11. 問合せ先 一般社団法人 セメント協会 研究所 技術情報グループ 研究奨励金 担当

〒114-0003 東京都北区豊島4丁目17番33号

TEL 03-3914-2692 E-mail jca_event@jcassoc.or.jp



再生細骨材を用いた超高性能コンクリートの耐硫酸塩性

Binbin Zhang, ほか

Advances in Cement Research

Vol.35 [4] 152～166 (2023)

解体したコンクリートを粉砕して製造される再生細骨材(RFA)は環境にやさしい材料として注目されているが，天然細骨材(NFA)に比べて密度が低く，吸水性が高いためRFAを使用していないコンクリートと比較して，細孔やマイクロクラックが多く，硫酸イオンが浸透しやすくなり耐硫酸塩性ととともにコンクリートのワーカビリティ，強度，耐久性が低下するという報告が挙げられている。また，優れた機械的特性と耐久性を持つ超高性能コンクリート(UHPC)のコスト削減のため，RFAを用いたUHPCの配合は人気のあるテーマになっているが，これまで耐硫酸塩性について報告はされていなかった。

本研究では，異なる量のRFAを用いたUHPCを硫酸塩溶液に浸漬して，硫酸イオン濃度，曲げ強度および圧縮強度への影響について調査した。

UHPCは高い緻密性を持つため，RFAを用いたUHPCの耐硫酸塩性は普通コンクリートよりも優れていた。また，RFAを用いたUHPCは硫酸塩環境下で水和物が石膏やエトリンガイトなどの膨潤物質に変化し，20nm以上の孔を充填し緻密化することが確認できた。圧縮強度は硫酸塩溶液浸漬期間が長いほど増加するが，180日を超えると過剰な石膏やエトリンガイトによる膨張応力や有害なクラックにより圧縮強度が低下する可能性があった。

同じ硫酸塩溶液浸漬時間でもRFA含有量が増加することで，RFA由来のITZ(骨材とペーストの間にある遷移帯)，細孔，マイクロクラックの増加により硫酸

イオンを吸収しやすく，圧縮強度は低下した。圧縮強度は主に生成される石膏とエトリンガイトによって緻密化されるUHPCの細孔構造に依存し，曲げ強度は主に鋼繊維とITZに依存していることが確認できた。

現在RFAは大量かつ安価であるため，将来的に再利用が求められるがRFAの持つ細孔構造や破砕値などを向上させることが現在の課題であると述べられている。

水蒸気・窒素吸脱着等温線を用いたSCMsがナノ細孔へ与える影響の解明および反応率の評価

Liming Huang, ほか

Cement and Concrete Research

164 論文 No.107042 (2023)

混合材の添加は，セメント硬化体の空隙構造を変化させ，物質移動抵抗性を向上されることは一般的に知られているが，その影響要因は明確となっていない。筆者らは，水蒸気・窒素吸脱着試験により，混合材の添加がセメント硬化体のナノ細孔に与える影響を調査し，混合材反応率の簡易的な評価手法の提案を行っている。

本論文では，スラグとフライアッシュをセメントに一部置換した水結合材比の異なるペーストを対象とし，水蒸気脱着等温線から細孔径分布を算出しており，空隙を毛細管空隙，粗大なゲル空隙(LGP)，インクボトル型のLGPおよび小さなゲル空隙，層間水の4つに分類している。分析の結果，混合材添加により毛細管空隙およびLGPの増加が確認され，この増加は低水結合材比で顕著であった。これは，クリンカの希釈効果によるものであると考えられた。また，インクボトル型空隙の増加も確認されており，混合材による空隙の微細化が示唆された。

各混合材の反応率は，水蒸気脱着試験から算出したC-S-H量と，平衡計算によるC-S-H量を用いて推定している。本手法による反応率は，精度検証用として測定したTGの結果とおおむね一致し，水蒸気脱着試験により混合材の反応率を評価できる可能性が示唆された。

水蒸気脱着試験により，混合材添加による空隙構造変化を捉えることができ，また平衡計算と組み合わせることで混合材の反応率を簡易的に評価できると考えられる。

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 技術部 技師長
彌永 育代	麻生セメント(株) 品質技術部 セメント・コンクリート技術センター サブリーダー
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
金澤 智彦	日鉄セメント(株) 技術本部 製品開発部 上席研究員
河村 直彦	(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会(ビーエス・コンストラクション(株))
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 構造研究室長
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
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
中村 明則	(株)トクヤマ セメント開発グループ 主席
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 上級主席技師
平野 修也	(株)フローリック 技術本部 コンクリート研究所 主席研究員
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
清田 正人	(一社)セメント協会 セメント系固硬化材普及専門委員会 委員長
宮脇 賢司	(一社)セメント協会 セメント系固硬化材技術専門委員会 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

- 火山ガラスの混和材利用 過去／現在／これから
- コンクリート構造物の維持管理に関する最新技術
- 高流動コンクリートを適用したPCa製品の外観と収縮および耐久性に関する検討
- 再生炭素繊維(rCF)のコンクリート分野への利用—サーキュラーエコノミーの推進に貢献する「リカボクリート®」工法—
- 解体されたポリプロピレン短繊維補強コンクリートの再利用の有効性
- 荷重分布型伸縮装置を設置したRC床版の耐疲労性および製作・施工技術
- 新東名高速道路 滝沢川橋(仮称)の施工
- 早期交通開放コンクリートを用いたスリップフォーム工法の検討
- セメント系材料吸収固定されたCO₂の定量手法確立への取り組みと今後の展開
- ずいそう(緒方英彦) ほか



信濃川発電所(千手発電所)老朽化設備取替に伴う水車発電機基礎コンクリート工事

セメント・コンクリート No.930 8月号
2024(令和6)年8月15日発行

定価1100円 本体1000円 ⑩

発行者 宮本 昭彦
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

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)
荻 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)

- 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



閲覧 無料

マルチデバイス対応
クラウド型で
専用ソフト不要



※画像はイメージです

好きな時にいつでも読める

月刊セメント・コンクリート 電子ブック版

2024年10月号 (No.932) よりスタート 毎月15日頃発行

ゲストとして電子ブック版を見る

電子ブック版 月刊セメント・コンクリート
※PC・モバイル端末共通 (ブラウザ)

<https://cemecon.actibookone.com/>


おすすめ 無料ユーザー登録をして電子ブック版を見る

無料ユーザー登録をすることで
印刷・PDFのダウンロードが可能になります。

<https://cemecon.actibookone.com/register/step01>


※サービス開始時期は告知日より前後する場合がございます。※本サービスの閲覧およびダウンロードのご利用には別途通信料がかかります。お客さまのご負担となります。※本サービスに関連するスマートフォンやタブレット、PCの操作や設定などに関するお問い合わせ・ご相談はお受けできません。※無料ユーザー登録の際にお預かりした個人情報は、セメント協会ホームページに示しておりますプライバシーポリシーに基づき厳正に管理いたします。※その他、月刊誌に関する詳細等はセメント協会ホームページをご覧ください。



一般社団法人セメント協会
JAPAN CEMENT ASSOCIATION



電子版に関する
お問い合わせ

一般社団法人セメント協会 広報部門 / 出版担当
TEL: 03-5540-6175