



CEM'S

セムズ

C

Cement/Concrete/Construction

E

Environment/Engineering

M

Materials/Mining

太平洋セメント株式会社 セムズ No.107 2026年1月発行/セムズ編集委員会

事務局 太平洋セメント株式会社 総務部広報グループ
〒112-8503 東京都文京区小石川1-1-1 文京ガーデン ゲートタワー

■宛名・宛先の変更、またはCEM'Sへの、ご意見ご質問等がございましたら下記までお知らせください。
FAX:03-5801-0365
E-mail: cems@taiheiyo-cement.co.jp



このパンフレットは「植物油インキ」を使用し、
「環境保護印刷」で作成され、自然に配慮しております。



000-0000

TAIHEIYO CEMENT

CEM'S

No.107 | Jan.2026

TECHNICAL INFORMATION

CONTENTS

●人口減少地域の持続可能性とレジリエンス

大阪大学 名誉教授 大阪大学 工学研究科・先進的学際研究機構・国際機構 各招へい教授…堤 研二

●成瀬ダムにおける施工合理化・技術開発について

鹿島建設株式会社 東北支店秋田営業所成瀬ダム堤体打設JV事務所長…小倉 精太

「CEM'S質問箱」第69回

●XRD/リートベルト法(その2)

●セメントキルンにおける都市ガス/アンモニア混焼特性の評価

太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループ…下田 翔

太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループ…黒岩 勇

太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループ…北澤 健資

太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループリーダー…寺崎 淳一

●リフリート工法/永年の実績から見える鉄筋コンクリート構造物の未来

リフリート工業会 本部事務局…中條 史峯

カーボンニュートラルに向けた石灰石の混合材利用技術 その6

●人工炭酸カルシウム

太平洋セメント株式会社 GX推進部カーボンニュートラル技術開発グループ企画管理チーム…山崎 里沙

太平洋セメント株式会社 GX推進部カーボンニュートラル技術開発グループ企画管理チームリーダー…星野 清一

●「太平洋セメントグループの防災・復興技術パンフレット」発行

～激甚災害に対する備えと早期復旧・復興のための商材・工法のご提案～

人口減少地域の持続可能性とレジリエンス

大阪大学 名誉教授 堤 研二
大阪大学 工学研究科・先導的学際研究機構・国際機構 各招へい教授

はじめに

日本が人口減少の問題に直面していることは、周知のことと思います。この人口減少という状況は、高度経済成長期にはすでに一部の地域では明らかになっていました。過疎地域がその典型的な例です。今回は、まず、過疎地域のお話から入りたいと思います。過疎地域の状況を知することは、人口減少社会における課題解決の糸口を探ることに繋がるからです。

図-1は、日本の過疎地域を示したものです。過疎地域は過疎法によって、主として人口・財政力の項目をもとに市町村単位を原則として指定されるものです（平成の市町村合併の前の自治体区分で指定されている事例もあります）。現在の日本の過疎地域の面積は国土の63%を超えています。それらの地域は山村・離島・半島や、被災地・豪雪地帯、林業地帯や炭鉱などのあった鉱山業の衰退地域などを含みます。かつては、大阪府と神奈川県には過疎地域がありませんでしたが、2010年代以降になるとこの2府県も例外ではなくなりました。私がかつて居住していた島根県の場合には、全市町村に過疎地域が含まれていますが、最後まで過疎地域が無かった神奈川県も、2045年頃には過疎県である島根県の現在と同じような高齢化の状況となります(図-2)。

一口に過疎地域と言っても、種々の状況がありますが、東日本よりも西日本の過疎地域の状況が深刻であったことが知られています。日本はフォッサ・マグナ(糸魚川-静岡構造線)という大断層によってまずは西南日本と東北日本に分かれ、さらに前者は中央構造線(メジアン・ライン)という、もう一つの大断層によって、太平洋側の外帯とその反対側の内帯



図-1 日本の過疎地域(2021年時点、堤作成)

(瀬戸内海側～日本海側)に分けられます。なかでも地形が急峻で風水害・土砂災害を被りやすく、平家の落人伝説が多く分布するのが西南日本外帯の山間地域で、九州南東部・四国南部が含まれ、過疎の状況が最も深刻なエリアとなっています。次いで、豪雪地帯を抱え、かつ農業では一期作が主体であって、かつてのたたら製鉄(木炭と砂鉄から日本刀の原料となる鋼などを生産)や木炭産業が衰退した

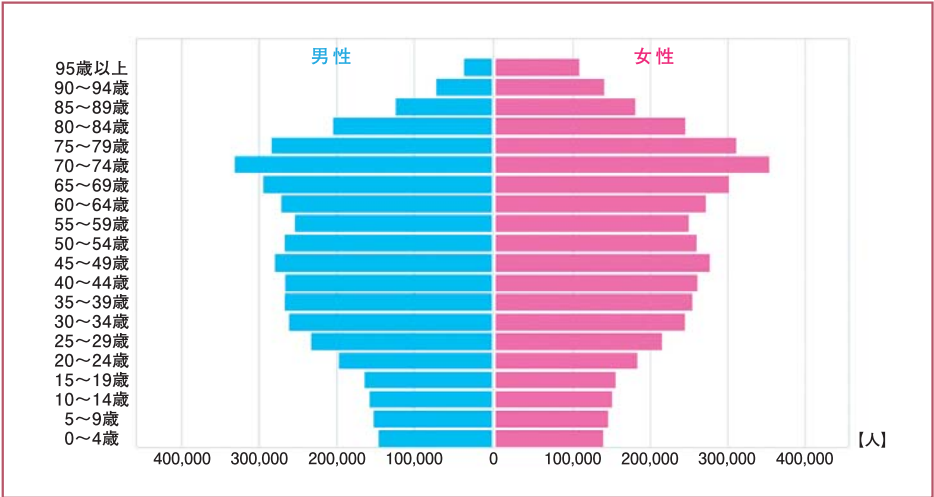


図-2 神奈川県の人口構造(2045年の推計)
(2020年「国勢調査」データによる。総務省「統計ダッシュボード」により堤作成)

中国山地もシビアな過疎を経験してきた地域です。

人口減少地域の持続可能性を維持することの意義

日本全体が人口減少モードに入り、首都圏でさえも例外でなくなりつつある現在、地域での生活や産業をいかに持続させるのが大きな課題となっています。そして、それに関わる対策を考えると、数十年前から人口減少を経験してきた過疎地域の状況やその変遷の諸事例から学ぶことには意義があるわけです。

目下、「国土強靱化」や「レジリエンス(回復力・復元力)」といった言葉をよく耳にするようになっていますが、これらは防災面に限らず、国や社会・地域の持続可能性を高めるためのものとして位置付けられます。人口の少ない地域での産業や生活の維持は、環境面でも経済面・政治面でも大きな機能を担います。例えば、山間地域で人口がどんどん減少するとどうなるか、考えてみてください。田畑は荒れて、人里での獣害が増えるでしょう。伐採された後の森林に植林がなされなかったら、土砂

災害の危険性が増します。多くの所有者の所在が不明であるような森林では、台風による風倒木被害の際に復旧が遅れた事例もあります。水源の森が荒廃すれば、水資源の損壊で困るのは下流の都市住民も含む流域圏の住民全体です。農産物・林産物の供給量が減り、それらの価格が上昇することも考えられます。無人の国境離島の場合、他国による占拠を容易にしまい、国際的な問題になっている事例も、私たちは知っています。ですから、山間地域や離島など、人が住むことによって、その地域だけでなく、広く国全体にも関わる機能が担われていて、防災・減災にも役立っていると考えられるのです。農山村のコミュニティでは、都市では見られないような濃密な人間関係があったりしますが、時としてそれらは「ソーシャル・キャピタル(社会関係資本)」と見なされ、例えば、災害時の集団での避難行動などに反映します。しかし、人口減少と高齢化により、コミュニティにおけるソーシャル・キャピタルも弱体化します。地域のソーシャル・キャピタルの衰弱は都市部においても見られるものですが、このあたりにはDXによる支援が、ある程度は可能な面もあると思われます。

人口減少と地域の機能

人口減少地域の調査に際して、私はミュンヘン学派ドイツ社会地理学の提示した概念である「基礎生存諸機能」を援用してきました。この機能は、建築家ル=コルビュジェらによる著名な『アテネ憲章』などをもとに考案されたもので、①居住する、②労働する、③財やサービスの供給・提供を受ける、④教育を受ける、⑤保養する、⑥交通に関与する、⑦共同社会で生活する、の七つであり、各々の機能に、その機能発揮の場である住宅、職場、商店・役所、学校、病院・福祉施設・リゾート施設、交通ネットワーク、公共建築物・公共施設などが対応します。私の場合、この七つの機能に「防災・減災」の機能を加えて、地域での実態調査や地域問題の解決策の検討をしています。要約的に言え

項 目	内 容 例
① 地域インフラの持続的支援	・長寿命化コンクリートおよびリサイクル材の開発と活用 ・各地域の自治体・建設会社との連携によるメンテナンス支援
② 地域経済への貢献	・雇用創出 ・地元調達 ・廃棄物の受け入れとリサイクル処理 ・従業員世帯による経済効果 ・社会貢献活動：工場の多用途利用提供、防災訓練支援、空き施設の活用など
③ 防災・減災への取り組み	・高耐久性コンクリートなどの強靱なインフラ材の開発と提供 ・事前復興計画・復興準備計画をふまえたBCP(事業継続計画)の策定 ・上記BCPに則した製造・供給体制の構築 ・防災・減災活動への参加 ・防災拠点の提供 ・産業事故・産業災害の防止
④ 環境への配慮	・CO ₂ 排出削減、排気の無害化 ・エネルギー効率の向上 ・採掘現場での環境負荷軽減、生物多様性の保全 ・資源循環、副産物利用 ・空気・土壌の汚染防止・浄化 ・高次のISO取得、SDGs・ESG関連施策の積極的な実施

ば、これらの諸機能をベースに地域の持続可能性を考えるのであり、災害の折にはこれらの諸機能を早急に復旧するなどの構想が事前に必要であることになります。

人口減少とセメント業界の使命

防災・減災に繋がる地域計画を考えますと、災害時にはどのようにすれば地域の機能を毀損せずに維持することができるのか、予め想定される事態のケースをもとにモジュール的に対策を考えておくことが必要ですが、地域だけに限らず、人・組織・社会全体などの種々のスケール・レベルで勘案しておくべきことだと考えられます。これが、会社組織の場合、BCP(Business Continuity Plan; 事業継続計画)に反映されるべきことになります。そこでは、事前復興・復興準備も視野に入れておかれるべきです。

セメント業界を想定してこの問題を考えてみましょう。人口減少時代には、住居需要が少なくなりますが、インフラの維持はある程度の水準を保たねばならない一方で、とくに公共インフラの維持コストの増大と更新の遅れが生じる可能性が高まります。こうした中で、インフラの長寿命化と維持管理技術のいっそうの合理化や、コンパクトで強靱なインフラの整備が求められるようになるのではないのでしょうか。しかも環境にも配慮しないといけません。したがって、具体的にセメント業界に期待される役割は、①地域インフラの持続的支援、②地域経済への貢献、③事前復興・復興

準備を予め含む防災・減災への取り組み、④環境への配慮、の4点に絞られるものと思われます(表-1)。

おわりに

日本における人口減少の問題は、重大な地域課題を私たちに突き付けていますが、それは地域や会社をリセットして再設計する契機でもあります。そうした中でセメント業界を含む各製造業の関係者は、近い将来に向けて会社としての存在意義と社会的責任を再確認することが強く求められています。人口減少による需要減少や、環境負荷の益々の削減の必要性、資源枯渇に備えた新事業への展開計画については、早めに策定作業に入らないといけません。日本は災害大国ですが、レジリエンスと持続可能性を基軸としながら「社会・地域とともに歩む」企業活動を通じて、防災・減災・事前復興に資する活動を展開できうる、誇り高い業界になれるし、そうなることが期待されているのがセメント業界であると言えます。



つつみ けんじ

【著者略歴】
1960年福岡県生まれ。1986年九州大学文学研究科修士課程修了。同年より国立佐世保工業高等専門学校勤務。その後、島根大学法文学部を経て、大阪大学に勤務。同大学教授・総長補佐(財務担当)を経て、名誉教授。
現在は、大阪大学工学研究科・先導的学際研究機構・国際機構3部署の各招へい教授、博士(文学)。専門は社会経済地理学。

成瀬ダムにおける 施工合理化・技術開発について

鹿島建設株式会社 東北支店秋田営業所成瀬ダム堤体打設JV事務所長 小倉 精太

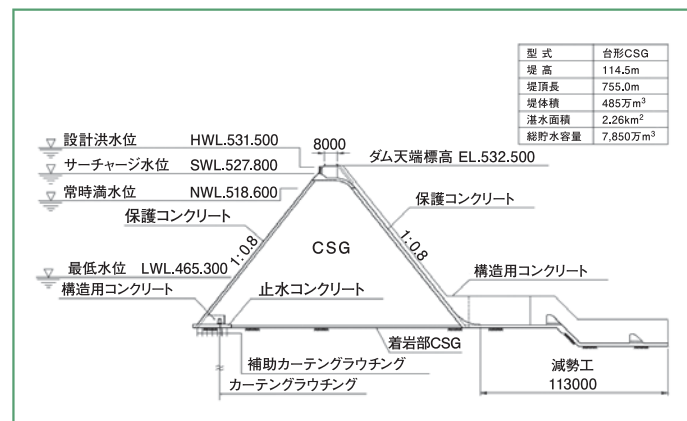


図-1 成瀬ダム断面図



図-2 成瀬ダム全景 2025(令和7)年6月下旬

1.はじめに

成瀬ダムは秋田県雄物川水系成瀬川に建設中の洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい用水の補給、水道用水の供給、発電による電力供給の5つの機能を果たす多目的ダムである。台形CSGダムは、現場周辺の土砂などにセメントと水を混合したCSGにより構築する設計・材料・施工の合理化を目的とした新しい構造型式である。同型式のダムとして全国で5番目に着工された当ダムは、高さ114.5m、堤頂長755m、堤体積485万m³と日本最大である(図-1)。

ダム本体工事は、2018(平成30)年9月に着工し、2019(令和元)年10月から止水コンクリート、2020(令和2)年6月からCSGの打設をそれぞれ開始し、2024(令和6)年11月下旬にCSGの打設が完了し、打設累計で約482万m³に達している(図-2)。2025(令和7)年度は、堤頂部(0.75m×2LF=1.5m)と減勢工等のコンクリート打設を行った。

当ダムでは、堤体打設開始からこれまで、省人化・省力化や生産性向上を図るため、さまざまな合理化施工や新技術活用に取り組んだ。また、技術開発のみならず、環境に配慮した取り組みも行った。

2.CSG製造・出荷管理システム

成瀬ダムのCSGは、段丘堆積物と赤滝原石山破碎材の2種類の材料を段丘

堆積物の種類による重量比率に従いブレンドし、セメント、水を加えて混合し製造した。特に大量のセメントの安定供給には多台数の確保と運行管理システム

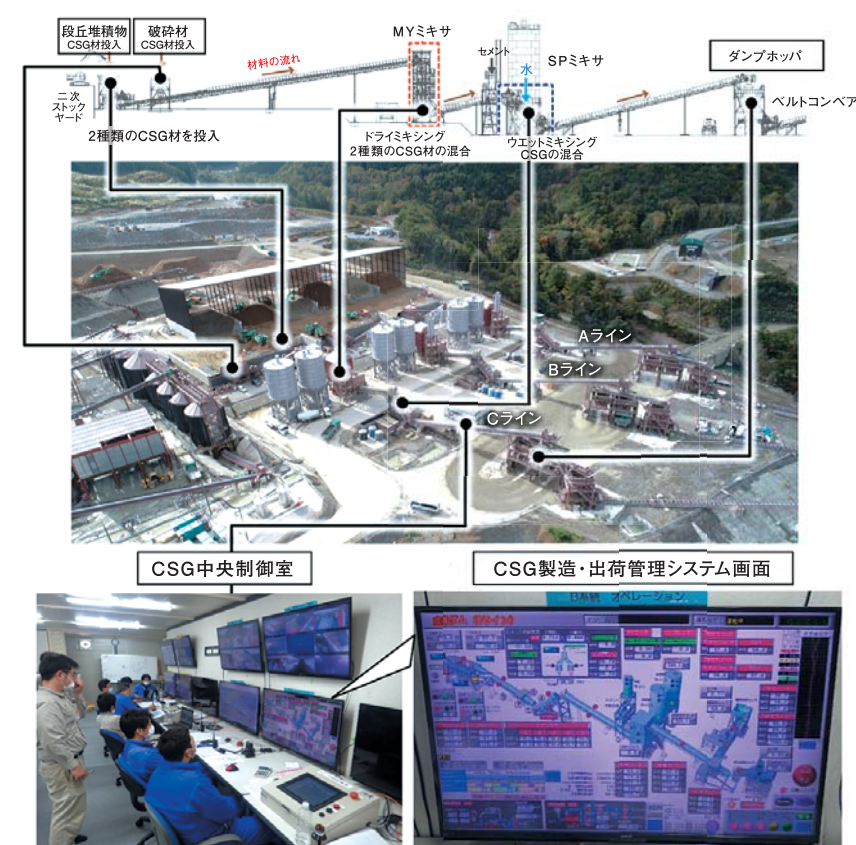


図-3 CSG製造・出荷システム

による安全管理を実施した。

CSGの製造は、製造能力の高い連続練りミキサとしてMYミキサとSPミキサを使用し、CSG中央制御室で一括管理、多種類の配合種類を区別しながら、最大3ラインで行った。従来のCSG打設は、CSG製造設備のオペレータと現場にいる打設担当者が、無線等で製造指示や打設状況の連絡を取り合っていた。当現場では、これらを合理化するために「CSG製造・出荷管理システム」を構築(図-3)、設備の完全自動化と次世代建設生産システムA4CSEL(クワッドアクセル)との連携を実現し、無線連絡ではなくデジタルデータで一括集中管理を実施した。

CSG打設・次世代建設生産システムA4CSEL®(クワッドアクセル)

堤体のCSG打設作業では、現場の省人化、生産性向上、品質安定化、安全性向上を目的とし、A4CSELを運用し施工合理化に取り組んだ。A4CSELは、少人数で複数の自動化建設機械を制御し、安全に施工することで、これまで作業員の経験や勘、職人技に依存してきた定性的な建設現場の作業を定量的なシステムに変換したものである。最適化された施工計画・作業方法をデータ化し、それらの作業データを基に複数の自動化機械を自律的に連携させることで極めて効率の高い施工を可能とする。A4CSELは、自動化された重機とそれらを効率的に稼働させるために必要な施工計画システム、施工管制システム、建機自動運転システムの3つのシステムで構成されており、これらを自動化施工システムと定義している(図-4)。

成瀬ダムのCSG打設は、製造から転圧完了までを6時間以内とし、施工時間を考慮した区画割により施工管理を実施した。区画割は、CSGの供給能力や打設能力に応じて最大となるように算定され、最大14台(ブルドーザ3台、振動ローラ4台、ダンプ7台)の機械を現場内の管制室から3人のITパイロットが指令を送り自動自律運転を実施、重機運転手8割省人化と重機災害ゼロを実現した(図-5)。

CSG打設1リフト当たりの自動化施工率(自動化施工面積/リフト面積)を最大で98%まで上昇させ、2023(令和5)年5月に月間最大打設量28.1万m³を達成、大量高速施工と昼夜・長時間の規定通りの施工による品質確保を実現した。さらに、A4CSEL導入により重機の走行距離が

有人運転と比較して大幅に削減され、CSG打設作業1m³当たりの燃料使用量で約40～50%削減、CO₂排出量を大きく抑制、環境負荷低減を実現した。

A4CSELでは、さらなる省人化や生産性向上を目指し、遠隔集中管制システムを開発した。2021(令和3)年度には、集中

管制室(東京都)と3カ所の現場を光回線で結び、各現場での自動運転および遠隔操作を1カ所の集中管制によって作業を行った(図-6)。また、2023・2024(令和5・6)年度には自動振動ローラ、自動ブルドーザの自動運転および遠隔操作による作業の本格運用を実施した。

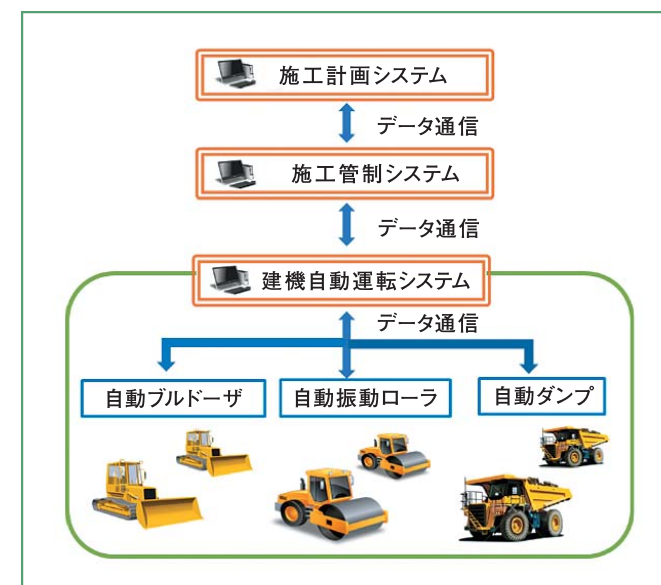


図-4 自動化施工システム



図-5 A4CSELの運用状況

4.CSG品質管理合理化

4-1 従来の品質管理

(1)CSG材の品質管理

CSG材の品質管理は、CSG材の粒度とCSGの単位水量が設計された範囲「ひし形」(図-7)に収まっていることを確認する目的で実施している。CSG材は、ダムサイト近傍で採取される砂礫材料を粒度調整なしでそのまま用いる

ため、品質の変動は避けられない。この変動を把握するため、CSGの製造中は従来法によりCSG材の粒度と表面水量の測定が行われる。従来法とは、比較的短時間で結果が得られる湿潤・水洗い法による粒度試験、電子レンジ法などによる含水率試験などが該当する。従来法による試験頻度は、施工初期で1時間に1回、通常期では2時間に1回であり、この結果に



図-6 遠隔集中管制による施工

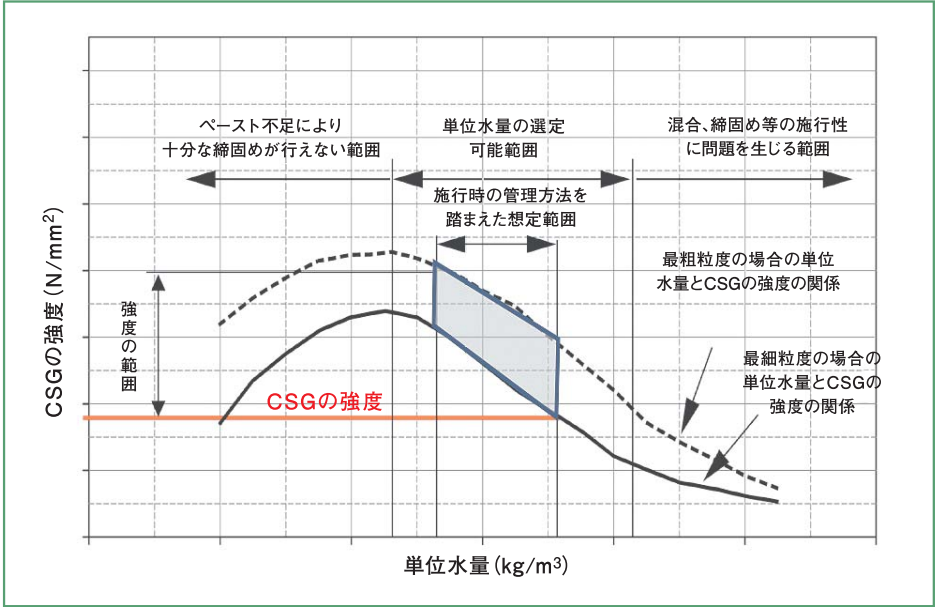


図-7 CSGの強度の範囲「ひし形」理論

基づいてCSG製造時の給水量を調整している。

(2)CSGの品質管理

CSGの品質管理では、CSG製造プラントにおける計量管理(CSG材の質量、給水量、セメント量)と振動ローラの転圧回数管理(締固めエネルギー管理)が行われる。これらの管理を補足するため、打設されたCSGの現場密度の変動傾向とCSGの強度の変動傾向を監視する。現場密度の測定は、砂置換法が基本であるが、RI法との相関性が確認できた時点でRI法に移行する。RI法によるCSGの現場密度試験は施工日ごとに3点以上で行う必要があり、砂置換法と比べて短時間ではあるものの、3名の試験員を従事させる必要があった。

4-2 合理化したCSGの品質管理

(1)表面水量全量管理システム

表面水量全量管理システム(以下、本システム)は、CSG製造プラントにおいて、材料を搬送するベルトコンベア上にAI画像粒度モニタリングと近赤外線水分計を設置し、2種類のCSG材の粒度と表面水量を約3秒に1回の頻度で測定することで、使用材料全量のデータを取得している。本システムにより、粒度や表面水量の測定値をグラフ化してこれらの変動傾向も可視化し、さらに、CSG製造・出荷管理システムを連動させ、CSG製造時の給水量を自動制御するようにした。

2024(令和6)年4月から本システムを従来法の代替としてCSG材の品質管理に採用した(図-8)。本システムを導入することにより、従来の試験室運用(昼夜24時間体制)に要した14~15名の試験員を本システムの採用により監視員2名に削減し、約9割の省力化を実現した。

(2)現場密度の面的測定システム

2024(令和6)年4月からCSG締固め管理にGeo-DX Compaction(以下、本システム)を導入し、CSG現場密度の面的測定を行った。本システムは密度の増大に伴い比抵抗(電気抵抗)が小さくな

	従来法		表面水量全量管理システム	
項目	粒度試験:水洗い法 人力でふるい分け、各粒径毎に計量	含水率試験:電子レンジ法 各粒径毎に電子レンジで加熱	粒度試験:AI画像粒度モニタリング	含水率試験:近赤外線水分計
試験状況	CSG試験室		現場でのAI画像粒度モニタリングと近赤外線水分計の設置状況	
作業人員	昼夜を問わず、7~8名の試験員(昼夜で14~15名)		昼夜1名ずつの監視員(昼夜で2名)	
試験時間	約1時間/回(材料採取~試験~配合計算)		3秒/回 試験結果をリアルタイムに把握できる	
測定材料	代表的なCSG材を目視判断で採取し、試験を実施 粒度試験:約40kg 含水率試験:約500g		ベルトコンベア上を流れるすべての材料の粒度と含水率を測定	
測定頻度	1時間または2時間に1回 55tダンプ約4~8台に1回		3秒に1回(1200個/時間) 採用値:15分間の移動平均(300個) 55tダンプ約1~2台に1回	

図-8 従来法と表面水量全量管理システムの比較

	従来法の現場密度試験		現場密度の面的測定システム (Geo-DX Compaction)	
項目	砂置換法	RI法	現場密度の面的測定システム	
試験状況	現場での砂置換法とRI法の試験状況		現場での面的測定システムの設置状況	
作業人員	RI法:3名(昼夜で6名) 砂置換法とRI法:7~8名(昼夜で14~15名)		昼夜1名ずつの牽引機の運転員(昼夜で2名)	
試験時間 測定頻度	RI法のみ:3点/時間、砂置換法:3点/2時間 RI法:3点/日、砂置換法:3点/週		1秒/回(4000~5000m²/時間) リアルタイムかつ面的に現場密度を把握できる。	
測定材料	1日に施工した膨大なCSGを対象に、3点のみで試験を実施。		1日に施工したすべてのCSGを対象として現場密度を測定可能。	
測定深度	30cm		75cm(電極間隔を調整することで深度を変更可能) 電極間隔:狭 電極間隔:広	

図-9 従来法の現場密度試験と現場密度の面的測定システムの比較

る性質を利用している。事前に比抵抗と現場密度の関係(検量線)を取得し、本システムの精度検証を実施している。計測方法は、計測装置を四輪バギーによって2~3km/hの速度で牽引しながら、CSG打設後の転圧面全域を走査して

CSGの現場密度の面的測定を行う。計測装置は、CSGの1リフト(75cm)の平均的な密度を測定できるように電極間隔を調整しており、測定結果は計測用PCボックス内のモニターにリアルタイムに表示される。従来現場密度試験と本システムの

比較を図-9に示す。従来の現場密度試験で要した3名の試験員(RI法実施時)を、本システムでは計測装置を牽引するバギーの運転者1名に削減し、CSGの締固め品質管理業務の約7割の省力化を実現した。

5.環境に配慮した取り組み事例

5-1 ECMコンクリート

ECMコンクリートとは、高炉スラグ微粉末を大量に使用した環境負荷低減型コンクリートのことであり、NEDO「グリーンイノベーション基金事業／CO₂を用いたコンクリート等製造技術開発」プロジェクトの「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」にて取り組み、適用範囲の拡大とCO₂削減・固定量の最大化を目的に技術開発を行っているものである。その事業の中で、環境配慮型コンクリートについて早期普及を目指し、成瀬ダム堤体コンクリートの一部に適用することとした。ECMコンクリートの特徴は、図-10に示す通りである。

ECMコンクリートに用いたセメントは、神奈川県にあるセメント工場で300トン製造し、現場の打設は2024(令和6)年9月2日より開始、堤体および造成岩盤に1,526m³打設した。

5-2 フライアッシュCSG

石炭火力発電所から発生するフライアッシュは、再生資源として有効利用が進まず、その多くは産業廃棄物として処理されている。この状況を踏まえ、成瀬ダムがある秋田県の方針として、コンクリート製品に対しフライアッシュの有効活用が推進されている。また、国土交通省の「環境物品等の調達を推進を図るための方針」においてもフライアッシュの活用について、「フライアッシュセメントについては、供給状況に地域格差があることに留意しつつ、ダム本土工などのマスコンクリートで、早期強度を必要としない場合に、その使用を推進する。」としている。

- 【特徴】・コンクリートのCO₂排出量を6～7割削減(普通コンクリート比)
- ・高炉セメントB種と同程度の強度発現性
 - ・遮塩性、耐酸性・耐硫酸塩性の向上、ASR(アルカリシリカ反応)の抑制
 - ・フレッシュ時においてECMコンクリートは材料分離抵抗性と施工性に優れる
 - ・低発熱性のため、温度ひび割れ抵抗性に優れる
 - ・普通コンクリートと同レベルの材料コスト

図-10 ECMコンクリートの特徴

フライアッシュのさらなる活用に向けて成瀬ダムでは、ダムコンクリートに使用しているJIS規格のⅡ種品ではなく、現状産業廃棄物として処理されているJIS規格外品を対象とし、室内試験で事前確認の上、CSGを打設する最終2リフトは150LFと151LF(EL529.5～531.0m)で行い、2024(令和6)年11月8日より開始したフライアッシュCSGの打設量は7,250m³で、規格外フライアッシュの使用量は435トンであった(図-11)。

フライアッシュCSGは粉体量の増加により材料分離抵抗性の向上に寄与するとともに、セメントの一部をフライアッシュに置き換えることで水和熱の低減のほか、アルカリ骨材反応の抑制にも効果がある。さらには、産業廃棄物の有効利用による環境面の効果、公共工事を行う事業発注者だけでなく、フライアッシュ排出事業者のコスト縮減にも寄与する。



図-11 フライアッシュCSG打設状況

6.おわりに

成瀬ダム堤体打設工事は、2018(平成30)年より着手し、国内最大規模の台形CSGダムとして各方面から注目される中、自動化施工などの施工の合理化、環境への取り組みを実施した。これらの取り組みが今後のダム建設の参考になれば幸いである。これから試験湛水に向け工事はまだ続くが、引き続き安全、環境、品質などに留意しながら、無事完成できるように努力していきたい。



第69回

XRD/リートベルト法(その2)

セメント産業では、さまざまな廃棄物・副産物を原燃料として積極的に活用し、サーキュラーエコノミーの実現に貢献しています。さらに最近では、カーボンニュートラルの観点から、石灰石や副産物である高炉スラグ・フライアッシュなどを用いた混合セメントの活用が検討されつつあります¹⁾。

原燃料や混合材が多様化していく中で、当社では最新の分析技術を工場へ導入し、厳密な品質管理体制のもと品質の安定したセメントを製造・供給しています。本稿では、当社が活用するセメントの高精度品質管理技術の一つである、X線回折(XRD)/リートベルト法について、既報(CEM'S質問箱第30回)²⁾を踏まえ、最近の事例を交えて解説します。

Q1

XRD/リートベルト法とは何ですか。また、セメント・コンクリート分野においてXRD/リートベルト法はどのように活用されていますか?

A1

XRD/リートベルト法とは、X線と原子の相互作用により得られる回折パターンを利用して結晶構造を解析するための手法であり、解析対象が複数の結晶相から構成される場合は、それらの定量も可能です。セメント・コンクリート分野では主に定量分析の手法として活用されています。

解説

リートベルト(Rietveld)法は、1969年にHugo Rietveldが粉末中性子回折の解析のために考案した手法です³⁾。現在では中性子回折だけでなく、X線回折(XRD)にも応用されています。セメント・コンクリート分野では、XRD測定で得られた回折パターンをリートベルト法で解析する、XRD/リートベルト法がよく用いられていますので、その手法について解説します。

まず、XRDについて説明します。結晶性の物質(結晶相)に対して入射角を変化させながらX線を照射すると、回折現象により特定の角度でピークを持つ回折パターンが得られます。この回折

パターンは、原子の周期的な配列や種類などによって変化し、結晶相ごとに固有の特徴を示すため、定性分析に利用されています。そして、リートベルト法とは、回折パターンに影響するさまざまな因子を考慮して理論回折パターンを計算し、実測値との違い(残差)が最小となるよう最小二乗法で精密化することで、原子・分子レベルの情報を得る手法です(図-1)。さらに、複数の結晶相を含む試料にも適用可能であり、各結晶相の質量分率に関わる因子も精密化されるため、結晶相の定量分析も行うことができます。XRD/リートベルト法によってさまざまな情報が得られますが、セメント・コンクリート分野では、主に試料の構成相、特にクリンカー、セメントを構成する結晶相の量(鉱物組成)を定量する手法として用いられています。

クリンカー、セメントの鉱物組成は、セメントの品質と密接に関係しているため、鉱物組成を推定または定量することは、セメントの品質を管理する上で極めて重

要です⁴⁾。クリンカー、セメントの鉱物組成を推定または定量する方法として、①試料の化学組成をもとに計算式から求める方法、②顕微鏡を用いたポイントカウント法、③XRD/リートベルト法がよく用いられています。

①についてはBogue式が代表的なものであり、ポルトランドセメントの規格であるJIS R 5210でも使用されています⁴⁾。本手法は、試料調整を含め短時間かつ簡易に行えるため広く普及し、活用されています。ただし、本手法は一定の前提条件をもとに鉱物組成を化学組成から「間接的」に求めるため、その前提条件の妥当性が問題となる場合があります。条件を乱す要因として、クリンカー中の微量元素の存在や焼成温度・冷却速度などの焼成条件の影響が考えられており、計算式から推定した鉱物組成と実際に生成される鉱物組成にはズレが生じるため、品質管理の場面では鉱物組成を「直接的」に定量する手法も必要となります。

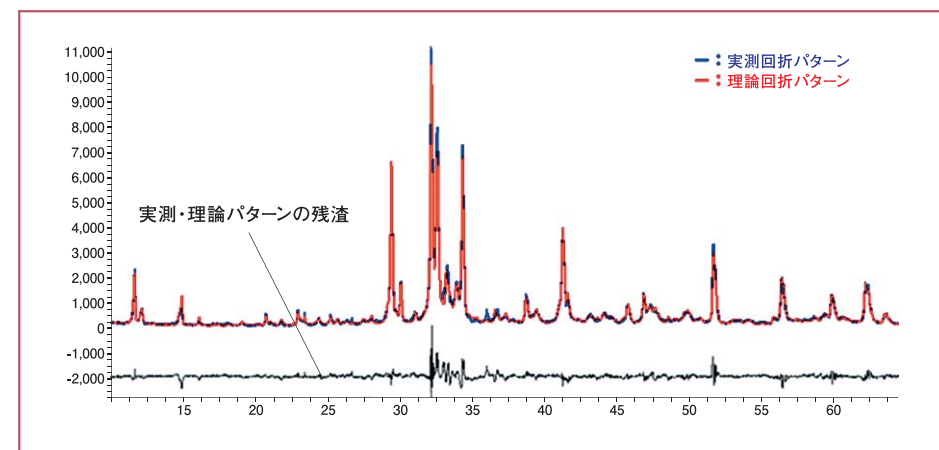


図-1 XRD/リートベルト法によるセメント解析例

おぐら・せいた

【著者略歴】

1996年 鹿島建設入社
早池峰ダム・花巻空港・青森空港・胆沢ダム・大分川ダム・小石原川ダム・馬見原発電所土木施設更新を経て、2022年より現職に至る

これに対して、②のポイントカウント法は、鉱物組成の直接定量が可能な手法です。本手法は、クリンカーなどを樹脂に含侵して表面研磨した試料を観察し、ある観察点(ポイント)にある鉱物を計数(カウント)し、観察視野を変えて計数することを繰り返して、存在比率を求めます。定量精度を確保するためには、より多くの視野を観察することが望ましく、米国規格(ASTM C1356)では1試料につき3,000～4,000点⁵⁾のポイントの計数が必要と規定されます。ポイントカウント法は、定量に際しての前提条件が不要なため、一定の信頼がある手法です⁴⁾が、熟練の技術者であっても観察には1日程度時間がかかることから、工程管理には不向きであると言えます。

一方で、③のXRD/リートベルト法は試料の回折パターンから鉱物量を直接的に定量する手法でありながら、試料調整を含めて通常数十分程度と短時間で行え、定量精度も高いため、工程管理に適用可能です。当社では、XRD/リートベルトを含めたさまざまな自動分析システムを工場へ導入しており、製造したセメント・クリンカーの特性値(キャラクター)を高頻度で分析し、モニタリングすることで安定品質のセメントを製造しています⁶⁾(図-2)。また、オンラインで分析されたデータは、AIを活用した品質予測システムである、TQPS[®](太平洋品質予測システム)で活用しています。これにより材齢判明前にセメントの物性の予測と、各キャラクターの物性への影響度を定量的に把握することが可能となり、迅速かつ効率的な品質管理を実現しています⁷⁾。



図-2 太平洋セメント工場のオンライン分析システム⁶⁾

Q2

XRD/リートベルト法では、結晶性を持たない、非晶質相の定量分析も可能でしょうか？

A2

XRD/リートベルト法と他の解析手法を組み合わせることで可能です。近年では結晶性を持たない非晶質相の定量手法としてさまざまな手法が提案されています。

解説

XRD/リートベルト法では、定量対象は結晶構造が既知である結晶相である必要があり、明確な結晶構造を有しない非晶質相を定量することは原則できません。結晶性を持たない、非晶質物質の場合は、明確な回折ピークを示さず、ハローと呼ばれる幅広で強度の低いパターンとなるためです。しかし、他の方法と組み合わせれば非晶質相の定量分析が可能となります。

以下に、XRD/リートベルト法と組み合わせる代表的な非晶質相の定量手法について解説します。

(1)内部標準法

内部標準法とは、試料に標準物質を既知量添加・混合して定量分析を行い、標準物質の添加量と定量値の差をもとに非晶質相量を定量する方法です。XRD/リートベルト法では、予め設定した鉱物相のみが定量対象であり、解析結果では、各鉱物相の合計が100%となるよう計算されます。そのため、非晶質相を含む試料では、標準物質の定量値は非晶質相を無視した値であるため実際の添加量よりも過大評価されます。したがって、標準物

質の定量値を実際の添加量へ補正して得られる各鉱物相の合計は100%よりも小さくなり、その差分が非晶質相量として間接的に定量されます(図-3)。内部標準法は、後述する標準物質を必要としない手法に対して、実際の分析試料と標準物質を混合して測定を行うため、より汎用性が高く、研究分野によっては非常に有効な非晶質相の定量手法として活用されています。

(2)PONKCS法

内部標準法に対して、標準物質を用いない定量手法としては、RIR法、PONKCS法などが知られています。本稿では、これらのうちPONKCS法について説明します。

PONKCS法とは、Partially Or Not Known Crystal Structure 法の略であり、結晶構造を持たない非晶質相に対して、疑似的な結晶構造を割り当てることで定量を行う手法です。リートベルト法では、結晶構造から計算される理論パターンを事前に用意する必要がありますが、非晶質相は一定の結晶構造を持ちません。そこで、その非晶質相に仮の構造モデルを実験的に設定し、結晶相に非晶質相を加えてプロファイルフィッティングを行うことで、非晶質相を含めた構成相の定量分析が可能となります⁸⁾(図-4)。

Q3

非晶質相の定量手法は、セメント・コンクリート分野においてどのように活用されていますか？

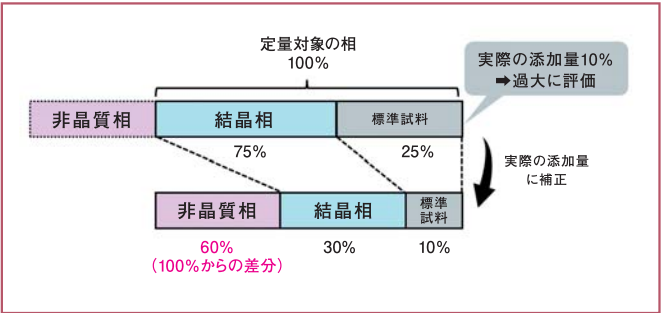


図-3 内部標準法による定量分析の例

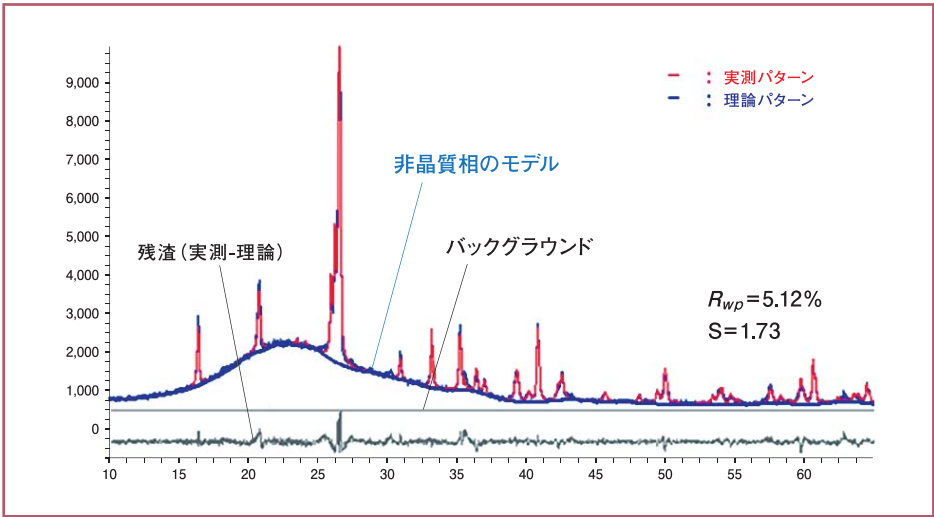


図-4 非晶質相を含む試料のPONKCS法によるフィッティング結果

A3

セメント鉱物の水和反応の解析や混合セメントの工程管理など、研究用途から製造現場に至るまで幅広く活用されています。当社では実際に、混合セメントの工程管理に活用しています。

解説

前項で紹介した非晶質相の定量手法は、セメント・コンクリート分野において、研究用途から工場での品質管理まで幅広く活用されています。

まずは、当社の工場における活用事例を紹介します。当社工場では、混合セメントの混合材比率を、定量供給機の計量値で管理していますが、設備に不具合が発生した場合に混合材比率の異常を速やかに検出できるよう、実際に製造された混合セメントの混合材比率を、PONKCS/リートベルト法などによりクロスチェックしています。図-5に、混合材として使用される高炉スラグに対する、定量結果の一例⁹⁾を示します。図から、混合材が5～50%の範囲において、平均二乗誤差(RMSE)1%程度と、高精度に定量が可能であることが分かります。実製造の場面においては、高炉スラグなどの副産物は成分や粉末度などが一定でなく、測定精度への影響も懸念されますが、本手法は実測の回折パターンから

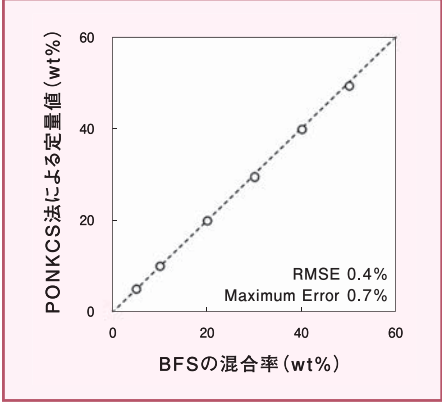


図-5 PONKCS法による混合セメント中の高炉スラグ(BFS)定量精度⁹⁾

直接定量を行うため、定量結果への影響は小さいことも確認されています⁹⁾。当社では、混合材の受入元の変更など特性の変化が予想される場合には、解析条件の見直しを都度行うことで定量精度の維持に努めています。

次に、研究用途での活用事例を紹介します。近年では、それぞれの特性を生かすために複数の混合材を使用した多成分系の混合セメントも多く研究されています。図-6は高炉スラグ、石炭灰の2種類をセメントに混合した混合セメントに対する定量結果です。本結果では、単一の混合材を用いた場合に比べてピークの重なりが増えるため定量誤差は大きくなりますが、それでも各混合材の混合率を2～3%程度の誤差で定量可能であることが示されました⁹⁾。このような定量手法は、これまでは定量の難しかった非晶質相を含む混合セメントの相組成を正確に把握することができるため、品質管理

の面でも非常に有効です。
A1で解説したTQPS[®]について、現在は、今後のさらなる混合セメント活用に向け、PONKCS/リートベルト法などのデータを活用することで、混合セメントへの適用範囲拡大に向けた取り組みも進めています。

太平洋セメント株式会社研究開発本部セメント・コンクリート研究所セメント化学グループ 金田 涼

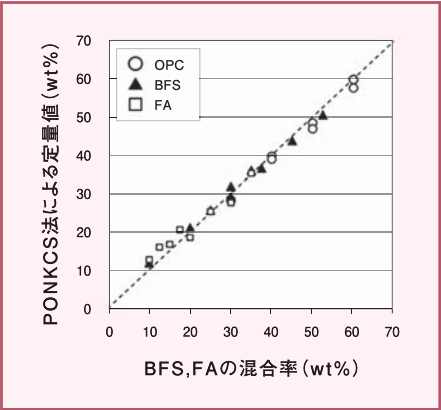


図-6 PONKCS法による混合セメント中の高炉スラグ(BFS)、石炭灰(FA)の定量精度⁹⁾

【参考文献】

- 1) 社団法人セメント協会：“混合材活用へ向けた短中期的な取組み”，社団法人セメント協会重工業研究会との定例懇談会(2025)，発表資料，https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/251023_03.pdf，(参照2025/11/14)
- 2) 黒川大亮：XRD/リートベルト法，CEM'S(44)号，p.16-19，(2010)
- 3) 中井泉，泉富士夫：粉末X線解析の実際第2版，朝倉書店，(2009)
- 4) 社団法人セメント協会：セメント化学専門委員会報告C-12，測定方法の違いによるクリンカー鉱物量の差異の検討，(2008)
- 5) ASTM C1356：Standard test method for Quantitative Determination of Phase in Portland Cement Clinker by Microscopical Point-Count Procedure，(2024)
- 6) 太平洋セメント(株)：“XRD/リートベルト法による高精度品質管理システム”，<https://www.taiheiyo-cement.co.jp/rd/rietveld/measure/index.html>，(参照2025/11/14)
- 7) 太平洋セメント(株)：“太平洋セメント品質予測システム(TQPS[®])”<https://www.taiheiyo-cement.co.jp/rd/tqps/index.html>，(参照2025/11/14)
- 8) 葛巻貴大：粉末X線回折法基礎講座第5回定量分析，リガクジャーナル，53(2)，(2022)
- 9) 引田友幸，他：非晶質混合材を含むセメントの鉱物定量におけるX線回折/PONKCS法の適用，太平洋セメント研究報告，第172号，(2017)

セメントキルンにおける 都市ガス／アンモニア混焼特性の評価

太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループ 下田 翔
太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループ 黒岩 勇
太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループ 北澤 健資
太平洋セメント株式会社 研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループリーダー 寺崎 淳一

1. はじめに

セメント産業におけるCO₂排出削減の主要課題の一つは、クリンカー焼成工程で使用される熱エネルギー源の転換である。従来、石炭や重油といった化石エネルギー源が主流であったが、近年では天然ガスや合成メタン(e-メタン)、さらにはアンモニア(NH₃)や水素(H₂)など、低炭素・カーボンフリーなガスエネルギー源の活用が目ざされている。

これらガスエネルギー源の導入は、供給インフラの整備状況や工場立地条件、周辺産業との連携方針、コストなどの要因に左右されることが想定されるため、いずれの選択肢にも対応可能なガス焼成技術の確立が求められている。

そこで当社では「カーボンニュートラル戦略2050」に基づき、エネルギー起源CO₂削減を目的としたガス焼成技術の開発を段階的に進めている。著者らはこれまでに、実機キルンバーナを模したテストバーナおよび小型セメントキルン(以下、テストキルン)を用いて都市ガス専焼条件における燃焼特性を評価し、ガスや一次空気の投入方法といったバーナ条件の調整により、従来燃料と同等の温度分布およびクリンカー焼成が可能であることを確認してきた¹⁾²⁾。

さらに、アンモニアを混合した都市ガスの混焼試験を実施し、燃焼挙動および

排ガス特性を詳細に評価した³⁾。その結果、アンモニアとの混焼条件下では都市ガス専焼時と同一の燃焼調整手法では十分な改善効果が得られず、一方で酸素富化の適用がアンモニア燃焼の安定化およびNO_xの過剰生成抑制に一定の効果を有することを確認した。

本稿では、これら一連のガス焼成技術検討の一環として、都市ガス・アンモニア混焼条件下における燃焼挙動およびクリンカー焼成試験の結果を一例として紹介する。

2. アンモニアの燃焼特性

表-1に代表的なガスエネルギー源の特性を示す。アンモニアは、燃焼時にCO₂を排出しないカーボンフリー燃料として注目されている。一方で、メタンや水素と比較すると着火温度が高く、燃焼速度が低く、可燃範囲も狭いといった特徴を有する⁴⁾。そのため燃焼反応が進行しにくく、燃焼が不安定となりやすい。また、燃料中に窒素を含むことから、燃焼過

表-1 代表的なガスエネルギー源の特性⁴⁾

項目	単位	メタン(CH ₄)	アンモニア(NH ₃)	水素(H ₂)
低位発熱量	MJ/Nm ³ (MJ/kg)	35.8(50.2)	14.1(18.6)	10.8(120.4)
最低自着火温度	℃	537	651	500
最大燃焼速度	m/s	0.37	0.07	2.91
理論断熱火炎温度	℃	1970	1750	2120
燃料中窒素分(Fuel NO _x 源)	—	無し	有り	無し

程でFuel-NO_x(燃料由来 NO_x)が多く生成する傾向がある。

このように、アンモニアはCO₂を排出しないという利点を持ちながらも、低い燃焼性とNO_x増加という二つの問題点がある。セメントキルンのように高温かつ大規模な連続燃焼を行う装置では、燃焼の安定化とNO_x低減、さらに焼成中の熱履歴を適正に維持することが不可欠である。したがって、アンモニアの燃焼特性を十分に理解した上で、燃焼場の設計および制御を行うことが、実用化に向けた重要な課題となる。

3. 試験設備と試験方法

3-1 テストキルン

当社では、天然ガスをはじめとするガスエネルギーの燃焼特性の把握および焼成技術の開発に向けて、テストキルンを活用した焼成試験を実施している。テストキルンの概略を図-1に示す。

キルンは直径450mm、長さ8,340mmの円筒形であり、内部には複数の熱電

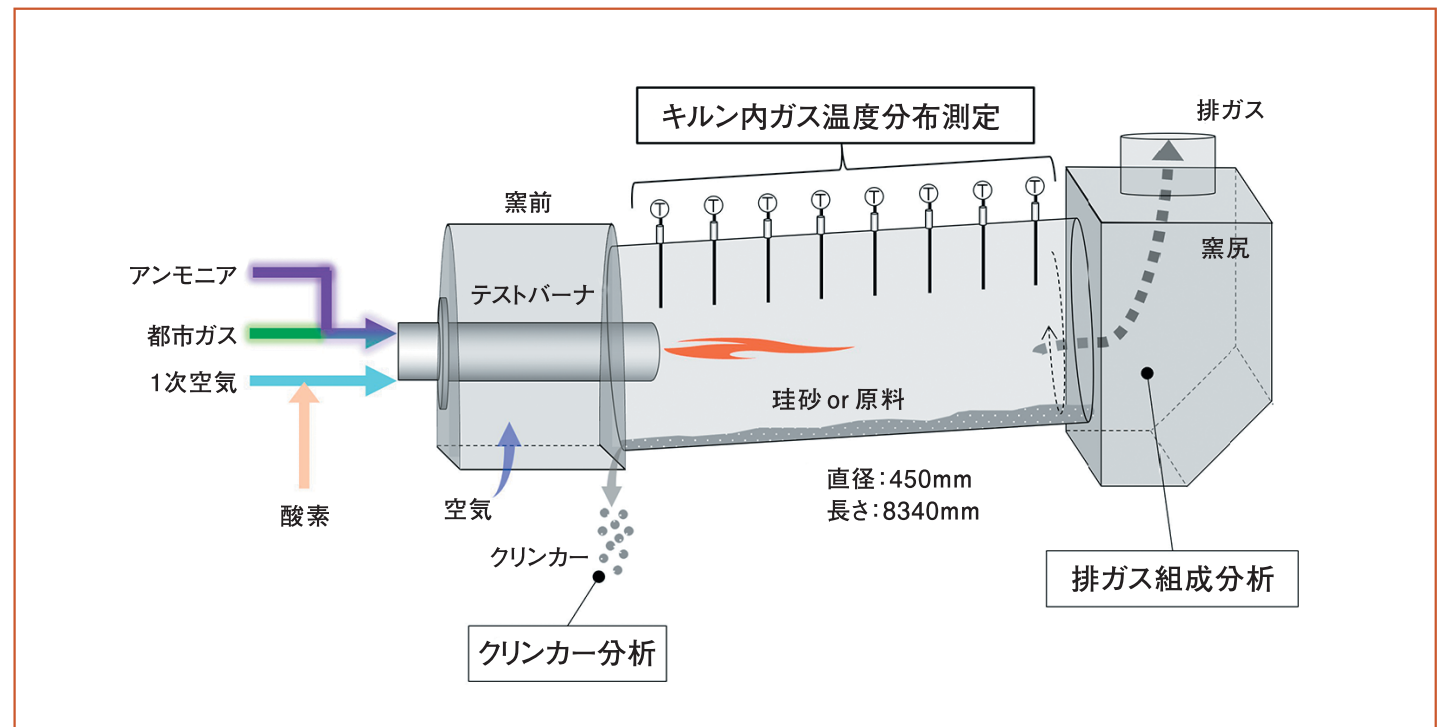


図-1 試験設備の概略図

対を設置してあり、ガス温度分布を連続的に計測可能である。本試験では約360kW相当の都市ガス13Aとアンモニア、ならびにその燃焼用空気を投入し、キルン内ガス温度分布およびキルン後段(以下、窯尻)の排ガス組成(O₂、CO、CO₂、NO_x)を測定した。試験に用いた都市ガス13Aの組成および低位発熱量を表-2に示す。

焼成試験には、石灰石、珪石、酸化鉄、アルミナ等を、普通ポルトランドセメントクリンカーの組成に相当するよう(HM=2.09、SM=2.48、IM=1.78)に混合・粉砕・造粒した原料サンプルを使用した。

表-2 試験で使用了都市ガス13Aのガス組成とアンモニアとの比較

項目		単位	都市ガス 13A	アンモニア
ガス成分	メタン (CH ₄)	vol%	88.8	—
	エタン (C ₂ H ₆)	vol%	6.88	—
	プロパン (C ₃ H ₈)	vol%	3.09	—
	ブタン (C ₄ H ₁₀)	vol%	1.17	—
	アンモニア (NH ₃)	vol%	0	100
低位発熱量		kJ/Nm ³	40.439	14144

表-3 試験水準

水準名	混焼率 [%LHV]		1次空気中酸素濃度 [vol%]
	都市ガス13A	アンモニア	
100NG	100	0	21
30NH ₃	70	30	21
30NH ₃ -O ₂	70	30	30

3-2 テストバーナ

試験で使用したバーナは多重管構造であり、複数の円環状のガス流路と、その内外に配置された燃焼用空気(以下、一次空気)流路から構成される。各流路はそれぞれ独立にガスおよび空気の供給量を調整でき、旋回角度や先端流速の変更が可能な仕様である。各円環状流路には等間隔のスリット状噴出口を設けており、ガスは旋回を付与された状態でキルン内に投入される。本試験では、都市ガス13Aおよび、都市ガス13Aとアンモニアをあらかじめ混合した混合ガスを、同一のガス流路から供給する方式を採用した。

3-3 試験方法

試験水準を表-3に示す。当社では、都市ガス専焼条件において、従来燃料である重油と同等のクリンカー焼成が可能であることを既往試験で確認している²⁾。そこで本試験では、都市ガス専焼条件で確立した

バーナ設定を都市ガス・アンモニア混焼条件にも適用し、アンモニア混焼がクリンカー焼成に及ぼす影響を評価した。

まず、都市ガス専焼においてクリンカー中の遊離酸化カルシウム(f.CaO)量が1wt%となる条件を基準条件(100NG)として設定した。次に、都市ガスにアンモニアを低位発熱量(LHV)ベースで30%混合した混合ガスを用いた水準(30NH₃)を設定した。いずれの水準もガスは同一の流路から供給し、バーナ先端からの噴出速度(以下、先端流速)が同等となるようにバーナ先端断面積を調整した。具体的には、アンモニアは体積当たりの発熱量が都市ガスよりも小さいため、混焼時には混合ガスの体積流量が増加し、結果として先端流速が上昇する。このため、都市ガス専焼時と同等の流速条件を維持するためにバーナ先端断面積を拡大して流速を調整した。

さらに、アンモニア混焼時に一次空気中の酸素濃度を21%から30%に上昇させた酸素富化水準(30NH₃-O₂)を加え、酸素富化によるクリンカー焼成へ影響を評価した。

総投入熱量は全水準で一定とし、燃焼用空気には圧縮空気を使用した。

酸素富化条件では、圧縮空气中に純酸素を添加して一次空気の酸素濃度を調整した。各試験では、キルン内温度が安定した後にデータを取得し、窯尻排ガス中のO₂濃度が約2%となるようにキルン内の通風量を調整した。

3-4 クリンカー評価方法

焼成したクリンカーサンプルはディスク型振動ミルで粉碎し、f.CaOおよび鉱物組成の定量を実施した。f.CaO量の測定はセメント協会標準試験方法 JCAS I-01:1997に準拠した。鉱物組成の定量は、X線回折(XRD)-Rietveld法により行った。X線回折装置は Bruker AXS 社製 D8-Advance A25型を用い管球はCuK α とし、管電圧40kV、管電流40mA、測定範囲10～65°(2 θ)、ステップ幅0.0234°、スキャンスピード0.13°/sの条件で行った。XRD-Rietveld解析におけるソフトには同社のTOPAS5を使用した。定量対象鉱物は、エーライト(C₃S)、ビーライト(C₂S)、アルミネート(C₃A)、フェライト(C₄AF)、ペリクレス(MgO)、およびライム(CaO)とした。

また採取したクリンカーに排脱二水石膏を添加し、セメント中のSO₃含有量が2wt%となるよう調整した。これをバッチ式チューブミルで混合・粉碎し、ブレーン比表面積が3,100±50cm²/gとなるまで粉碎してセメントを試製した。試製したセメントについては、JIS R 5201:2015に準拠して供試体を作製し、材齢3日、7日および28日における圧縮強さを測定した。

4. 結果と考察

4-1 キルン内ガス温度分布

図-2に各水準のキルン内ガス温度分布を示す。都市ガス専焼(100NG)では、バーナ近傍でピーク温度が約1,400℃に達し、その後は下流に向けて緩やかに低下する温度分布を示した。

アンモニア混焼水準(30NH₃)では、ピーク温度が約1,350℃へと低下し、キルン中程から後段にかけての温度が相対的に低く推移した。これはアンモ

ニアの燃焼速度が低く、火炎温度が低いことに加え、可燃範囲が狭いことに起因して燃焼反応が十分に進行しなかったためと考えられる。

一方、酸素富化を適用した水準(30NH₃-O₂)では、キルン全域で温度が上昇し、ピーク温度は都市ガス専焼と同等以上となった。この要因としては既往の報告³⁾でも言及している通り、酸素富化によって燃焼に寄与しない窒素による持ち去り熱が削減され、火炎

温度が上昇したことが考えられる。その結果、アンモニアの燃焼速度および可燃範囲が拡大し、燃焼が促進されたと考えられる。

4-2 窯尻排ガス組成

図-3に各水準における窯尻排ガス組成を示す。NH₃混焼によりCO₂濃度が低下する一方、NO_x濃度は増加した。都市ガス専焼(100NG)ではNO_x濃度は約200ppmであったのに対し、アンモ

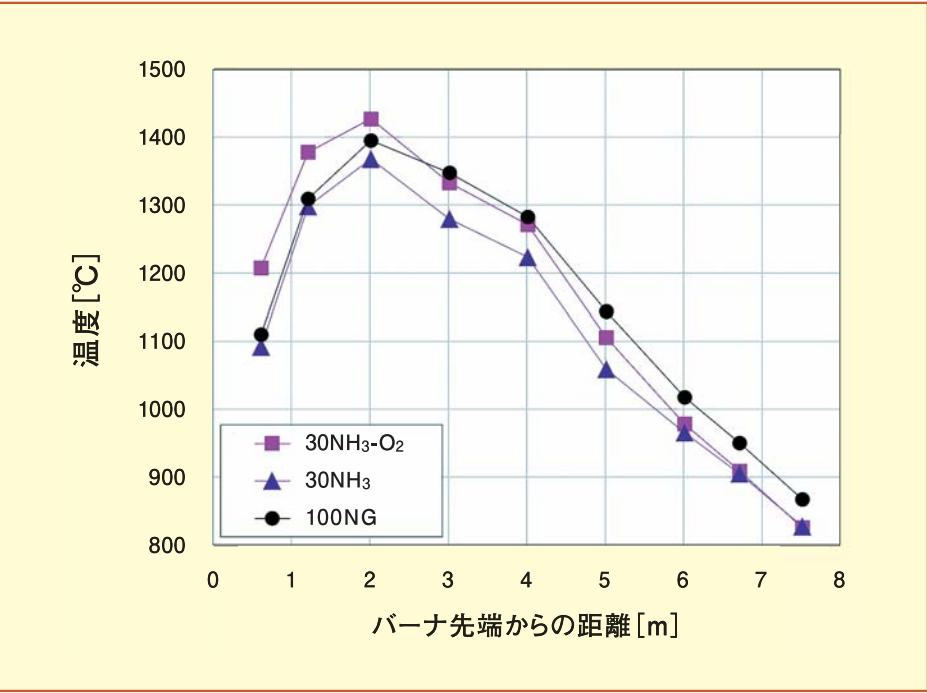


図-2 キルン内温度分布

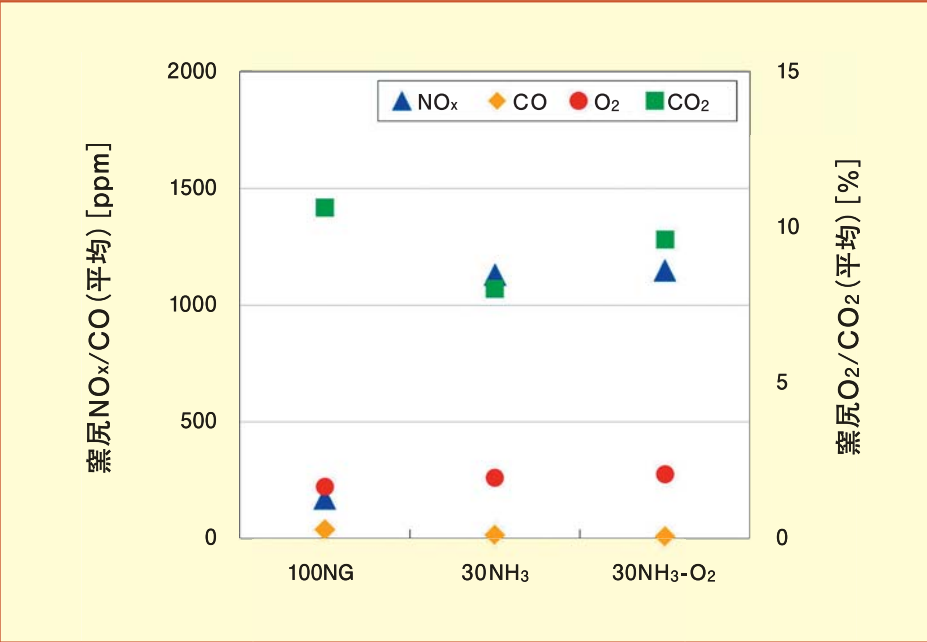


図-3 窯尻排ガス組成

水準名	f.CaO [wt%]	鉱物組成 [wt%]				圧縮強度 (N/mm ²)		
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	3日	7日	28日
100NG	1.0	56.0	25.2	9.3	8.4	23.1	37.0	55.7
30NH ₃	1.5	50.3	29.0	9.8	8.8	21.8	34.2	52.9
30NH ₃ -O ₂	0.6	58.2	22.5	8.6	10.1	24.3	40.6	60.9
JIS 規格						12.5 以上	22.5 以上	42.5 以上

ニア30%混焼水準(30NH₃)では1,000ppm以上へと大幅に増加した。これは、アンモニア中の窒素分が燃焼過程で酸化して生成するFuel-NOに起因するものである。

一方、酸素富化を適用した水準(30NH₃-O₂)では、キルン全域の温度が上昇したにもかかわらず、NO_xの過度な増加は確認されず、窯尻NO_x濃度は30NH₃と同等程度に留まった。この要因として、酸素富化によって1次空気中の窒素濃度が低減したことによる燃焼空気中の窒素起因のNO_x低減と、温度上昇によるThermal NO_xの増加が相殺されたことが考えられる

以上の結果から、アンモニア混焼ではキルン内温度の低下とNO_xの増加が問題となる一方、アンモニア混焼における酸素富化の適用がNH₃燃焼促進とNO_x過上昇の抑制に有効な手段であることを確認した。

4-3 クリンカーサンプルの評価結果

各水準で得られたクリンカーサンプルの評価結果を表-4に示す。いずれの水準もJIS規格を満足する圧縮強度を得ることができた。しかしながら、アンモニア混焼水準(30NH₃)では、基準とする都市ガス専焼(100NG)水準と比較するとf.CaOが高く、C₃S含有量が減少し、C₂Sが増加した。これはアンモニア混焼によってキルン内温度が低下し、高温域での反応時間が短くなったことが要因と考えられる。その結果、圧縮強度は都市ガス専焼に比べて若干低下した。

一方、酸素富化を併用した水準(30NH₃-O₂)では、f.CaOが0.6wt%まで低下し、鉱物組成は100NGと同等となった。これにより、圧縮強度も都市

ガス専焼と同等の値を示した。これは酸素富化によってアンモニアの燃焼が促進され、キルン内温度が上昇した結果、クリンカー焼成反応が十分に進行したためと考えられる。

以上の結果から、アンモニア混焼では酸素富化を併用することで焼成反応が促進され、都市ガス専焼と同等のクリンカー品質および圧縮強度が得られることが明らかとなった。

5. まとめ

本試験では、テストキルンを用いて都市ガスおよびアンモニアの混焼特性を評価し、さらに酸素富化との併用による燃焼特性の改善効果とクリンカー品質への影響を検討した。その結果、アンモニア混焼単独では燃焼温度の低下およびNO_xの増加傾向が見られ、クリンカーの焼成度も低下する傾向が確認された。一方、酸素富化を併用することで燃焼が促進され、キルン内温度が上昇した結果、クリンカー焼成に必要な十分な温度分布を確保でき、クリンカー品質および圧縮強度が都市ガス専焼時と同等に回復することを明らかにした。

本研究で得られた成果は、ガス焼成技術の確立に向けた取り組みの一環であり、テストキルンを活用した燃焼挙動の把握およびクリンカー評価に関する重要な基礎データを提供するものである。今後は、これらの成果を基盤として、さらなる燃焼最適化の検討を推進するとともに、水素を対象とした焼成技術の研究にも展開し、焼成技術の汎用性拡大と高度化を図っていく予定である。

【参考文献】

- 1) 下田翔・北澤健介・寺崎淳一：セメント製造プロセスのカーボンニュートラル化に向けたガス焼成技術の検討, CEM'S No.99 (2024)
- 2) 黒岩勇・下田翔・北澤健資・寺崎淳一：セメントキルンにおけるガス焼成技術の検討, 第78回セメント技術大会講演要旨, 1207 (2024)
- 3) 下田翔・黒岩勇・北澤健資・寺崎淳一：セメントキルンにおける都市ガス/アンモニア混焼特性の評価, 第62回燃焼シンポジウム要旨, B223 (2024)
- 4) 小林秀昭・早川晃弘：カーボンフリーアンモニア燃焼, 日本燃焼学会誌, 第58巻183号, 2016, p.41-48



しもだ・しょう

【著者略歴】

2020年 太平洋セメント株式会社入社
現 在 太平洋セメント株式会社研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループ



くろいわ・いさむ

【著者略歴】

2022年 太平洋セメント株式会社入社
現 在 太平洋セメント株式会社研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループ



きたざわ・けんすけ

【著者略歴】

2006年 太平洋セメント株式会社入社
現 在 太平洋セメント株式会社研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループ



てらさき・じゅんいち

【著者略歴】

1994年 日本セメント株式会社
(現 太平洋セメント株式会社) 入社
現 在 同社研究開発本部セメント・コンクリート研究所プロセス技術グループリーダー

リフリート工法／永年の実績から見える鉄筋コンクリート構造物の未来

リフリート工業会 本部事務局 中條 史峯

1. はじめに

近年頻発する激甚災害の経験を踏まえると、レジリエントな国土の構築に向けた施策の具体化と着実な推進が求められます。リフリート工業会は、インフラ構造物の長寿命化を通じて「未来に向けた持続可能な社会の実現」を目指しており、その核となるのが鉄筋コンクリート構造物の高耐久補修工法である「リフリート工法」です。リフリート工法は、1976年の旧都庁第二庁舎改修工事で初めて採用されて以来、約50年で累計2万件を超える採用実績を有します。

個人邸から庁舎・学校・病院などの公共施設、さらには橋梁・トンネル・水路・港湾施設など幅広いインフラに適用され、代々木体育館（東京都）、日本武道館（東京都）、首里城（沖縄県）、熊本城（熊本県）など全国的に著名な物件でも採用されています。

当工業会では、多数の採用事例に基づき「適用後、複数年を経過した物件」の追跡調査を継続的に実施し、適用後20年、30年を経ても健全性を保持している事例を確認しています。これらの確かな実績は、補修計画段階にあるインフラ構造物についても「補修後の将来像」を高い確度で予測しうることを示しています。永年の実績に裏づけられた施工技術を誇るリフリート工法とリフリート工業会施工部会会員は、社会が求めるインフラの健全な未来を支える重要な役割の一端を担うことができると考えます。

2. リフリート工法とは

2-1 工法名の由来

「コンクリートをリフレッシュする技術」と

いう発想から、RefreshとConcreteの頭文字を組み合わせた「Refrete」をカタカナ表記したもので、故・岸谷孝一東京大学名誉教授に命名いただきました。工法開発に着手した1973(昭和48)年は建設ラッシュの時代で、第一次オイルショックが起り、本州と九州を結ぶ関門橋が開通した年でもあります。そのような時代に「コンクリートを補修する」技術に挑戦したことは、2025年の現況を踏まえれば「未来を見据えた挑戦」であったと言えます。

2-2 リフリート工法の特長

リフリート工法は、鉄筋コンクリート構造物に発生した劣化部を修復する補修工法であり、「劣化の進行状態」「劣化要因」「補修目的」に応じて柔軟に対処できる、経済的かつ合理的な工法です。リフリート工業会施工部会会員による適切な施工を前提に、次の特長を有します。

- ①各種指針に示される要求性能を満足する専用関連材料の組み合わせにより、経年劣化・中性化・塩害・凍害などの劣化症状への対策や予防保全に対応可能。
- ②部分断面修復に伴うマクロセル腐食の抑制効果が確認されており、ミニマム

コストでの補修が期待できる。

- ③適用後の構造物に対する追跡調査記録が蓄積され、長期的な健全性の確認実績がある。

2-3 リフリート工法の仕様

本工法には、調査結果に基づき選定する次の2つの基本仕様があります(図-1)。

(1)RF仕様(経年劣化・中性化対策、凍害・火害後の修復等)

最も基本的な仕様です。劣化部除去後のコンクリート表面に、けい酸リチウム系含浸材「RF-100」を塗布し表面を緻密化・強化するとともにアルカリ性を付与し、その後、露出鉄筋の防錆処理、断面修復、表面被覆等を行います。経年劣化・中性化に加え、凍害・火害後の欠損補修にも適用します。

(2)DS仕様(塩害・複合劣化対策、予防保全)

RF-100塗布後、塩害対策として亜硝酸リチウム系塗布型防錆材「DS-400」を追加塗布し、表層コンクリートの改質を図った上で、露出鉄筋の防錆処理、断面修復、表面被覆等を行います。

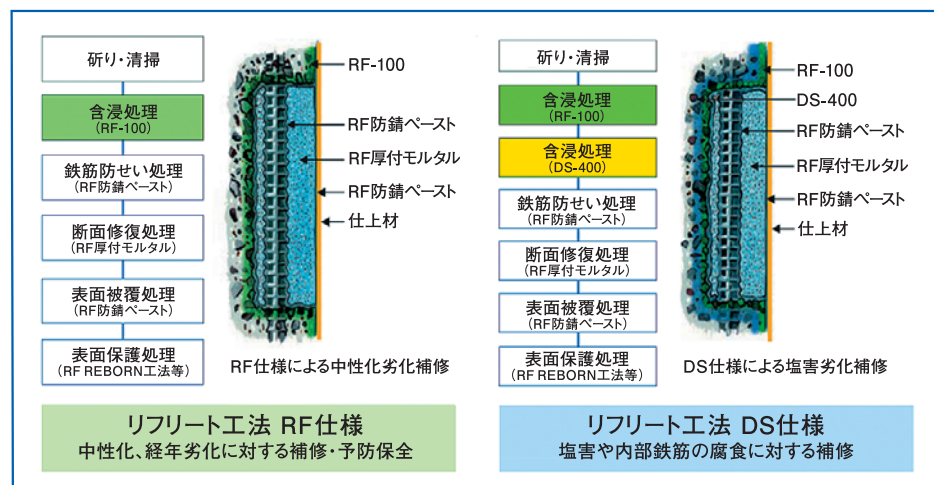
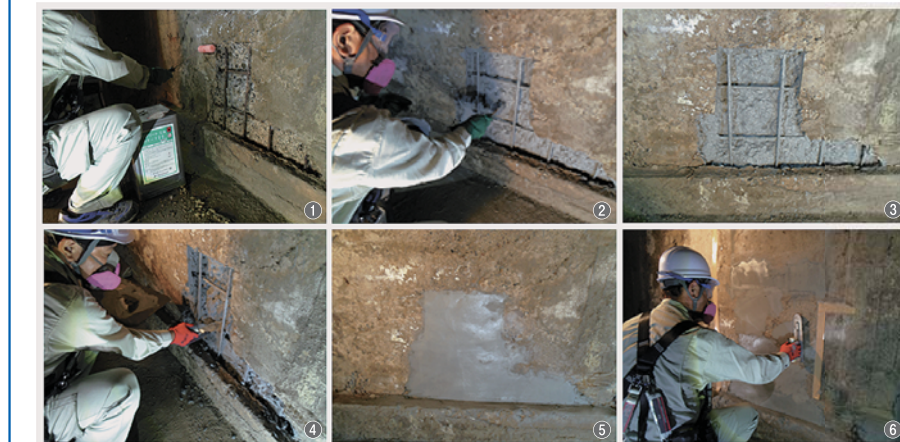


図-1 リフリート工法の施工概念図



① 含浸処理 RF-100塗布 ② 鉄筋防錆処理 RF防錆ペーストの塗布 ③ 鉄筋防錆処理完了
④ 断面修復処理 RF厚付モルタルの充てん ⑤ 断面修復処理完了 ⑥ 表面被覆処理 RF防錆ペーストの塗布

図-2 リフリート工法の標準的な施工手順の例

2-4 標準的な施工手順例

リフリート工法(RF仕様)の標準的な施工手順例を図-2に示します。実施工では、各工程の養生期間、他工種との調整、現場条件等を踏まえ、計画的に工程を進めます。

2-5 基本使用材料

リフリート工法で使用する主な材料は次の通りです。

(1)RF-100

けい酸リチウムを主成分とする含浸材。コンクリート表面に塗布・含浸させることで、表面強度の向上とアルカリ性の付与を図ります。

(2)DS-400

亜硝酸リチウムを主成分とする含浸材。塗布・含浸により、表層から亜硝酸イオンを浸透・拡散させ、鉄筋腐食抑制雰囲気強化します。

RF-100、DS-400はいずれもコンクリートの現状性能を改質する「化学的」補修を目的とします。

(3)RF防錆ペースト

防錆材入りポリマーセメントペースト。鉄筋防錆材や表面被覆材として用い、鉄筋の腐食進行や有害因子の浸入を抑制します。

(4)RF厚付モルタル

左官工法で施工する防錆材入りポリマーセメントモルタル。追い掛け塗りでもダレにくく、厚付けが可能です。

RF防錆ペースト、RF厚付モルタルなどの「防錆材入りポリマーセメント系材料」は、損傷部の修復や予防保全を通じ、防錆材による腐食抑制機能を付与しつつ「物理的」補修を行うものです。

近年では基本材料に加え、水性無機高分子塗料で表面保護を行う「RF REBORN工法」を予防保全として適用する事例、太平洋マテリアル(株)製のポリマーセメント系無収縮グラウト材「太平洋プレユーロックスDXP」を断面修復材として適用する事例、太平洋セメント(株)製「RFID腐食環境検知システム」の設置し構造物の維持管理へ活用する事例があります。

3. リフリート工業会とは

リフリート工業会は1981年に設立され、コンクリートの中性化・塩害等による劣化、または劣化のおそれがある鉄筋コンクリート構造物の補修・改修・予防保全を目的に開発された「リフリート工法」および関連材料・工法の普及を通じ、補修・改修のリニューアル業界の健全な発展を促進し、建設業界ひいては社会全般に貢献することを目的としています。

会員は全国約300社の補修・改修専門業者からなる「施工部会会員」と、太平洋マテリアル(株)、日産化学(株)、太平洋セメント(株)の「材料部会会員」で構成されます。主な活動は、CPD・CPDS講習会の開催、展示会出展、業界紙への広告掲載などの工法普及活動に加え、施工管理士講習会や技術研修会の開催等の人材育成です。

リフリート工法が約半世紀にわたり採用され続けている背景には、良質な製品を確実な技術で施工してきた蓄積があります。工業会では資格制度として「施工管理士制度」を設けており、実施工者への指導育成を担う人材に対し、太平洋マテリアル(株)の講習会受講を経て資格証を発行、以後5年ごとの更新により「技術の継承」と「技術者の育成」を継続しています。これにより、リフリート工法の施工精度は高い水準で維持されていると考えます。

一方、人材の不足や労働環境改善は、今後の建設業界における解決すべき問題と言えます。工業会は問題の解決に向け、太平洋マテリアル(株)が進める効率化・省力化・機械化を目指した「新たな一材型ポリマーセメントモルタル」による大断面修復技術を活用した「リフリート工法のブラッシュアップ」に向けた試験施工を、施工部会会員と連携して実施し、実用化に向けた取り組みを推進しています。

4. 最後に

リフリート工法、リフリート工業会ならびに会員各社は、工法開発着手から今日に至るまで、常に未来を見据えた活動を展開してきました。これからも、鉄筋コンクリート構造物の未来のために、維持管理に関する工法・技術の開発・改良・普及に取り組んでまいります。

なかじょう・しほう

【著者略歴】
1991年 日本セメント株式会社
(現 太平洋セメント株式会社)入社
現在 太平洋マテリアル株式会社(リフリート工業会本部事務局)

カーボンニュートラルに向けた
石灰石の混合材利用技術 **その6**

人工炭酸カルシウム

太平洋セメント株式会社 GX推進部カーボンニュートラル技術開発グループ企画管理チーム **山崎 里沙**
太平洋セメント株式会社 GX推進部カーボンニュートラル技術開発グループ企画管理チームリーダー **星野 清一**

1. はじめに

地球温暖化の進行を背景に、カーボンニュートラル実現に向けた取り組みが急務となる中、二酸化炭素(CO₂)の有効利用(CCU)技術の一つとして鉱物炭酸塩化技術の研究開発が進められている。中でも間接炭酸塩化技術は、廃コンクリートやコンクリートスラッジなどの産業廃棄物・副産物に含まれるカルシウム(Ca)を抽出し、そのCaにCO₂を固定化すると同時に、人工的に炭酸カルシウムを合成する技術であり、資源循環とCO₂の固定化を両立する技術として注目されている。また、得られた炭酸カルシウムについては、石灰石微粉末を代替する材料として、セメント・コンクリート用混合材への応用を目指した研究開発も行われている。

本稿では、まず前半で炭酸塩化技術や、これによって合成された炭酸カルシウムのセメント・コンクリート用混合材としての検討状況などについて概説した後、後半では当社におけるこれらの取り組みについて紹介する。

なお、炭酸塩化技術によって得られた炭酸カルシウムは、現在、「人工炭酸カルシウム」や「合成炭酸カルシウム」、「人工石灰石」、「CCU材料」などいくつかの呼び方がされているが、本稿では「人工炭酸カルシウム」と称す。

2. 炭酸塩化技術について

炭酸塩化技術は、天然の鉱物や産業廃棄物・副産物に含まれるCaやマグネシウムとCO₂とを反応させて、炭酸カルシウムや炭酸マグネシウムといった炭酸塩化物の形でCO₂を固定化する技術である。このうち、特にセメント・コンクリート産業や資源循環の観点からは、前者の産業廃棄物・副産物に含まれるCaに着目した炭酸塩化技術が重要であることから、以降ではこれに焦点を当てて示す。

炭酸塩化技術は主に直接炭酸塩化法と間接炭酸塩化法の2種類が挙げられる。各プロセスの概要を図-1に示す。本稿では、対象とする産業廃棄物・副産物は、廃コンクリートやコンクリートスラッジなどのセメント系材料や、鉄鋼スラグなどのスラグ類、石炭灰や都市ごみ焼却灰などの灰類を想定しており、これらは以下Ca源と称す。

直接炭酸塩化法は、Ca源とCO₂を直接的に反応させる手法であり、Ca源の粒子周囲の水分にCO₂が溶解し、Ca

と反応することにより炭酸塩化が行われる¹⁾。そのため、ある程度加湿された環境下での炭酸塩化²⁾や、水を含んだ状態または水に浸漬した状態で炭酸塩化する方法³⁾が取られている。直接炭酸塩化法は、1段階で反応が行われるためプロセスとしては比較的シンプルではあるが、Ca源中に炭酸カルシウムが生成されるため、基本的に生成物はCa源と炭酸カルシウムの混合物となる。

一方、間接炭酸塩化法は、反応液や水を用いてCa源から一度Caを抽出する。その後、ろ過などによって残渣と反応液を分け、その反応液中のCaに対してCO₂もしくは炭酸イオンを含む溶液を反応させて炭酸カルシウムを生成させる。直接炭酸塩化法に比べて反応工程は多くなるが、炭酸カルシウムを単一物質として得られる利点がある。例えば、水を使ってコンクリートスラッジに含まれるCaを抽出する方法が提案されている⁴⁾。この方法では、Ca抽出後の液相と残渣を固液分離した後に、液相に対してCO₂を通気させて人工炭酸カルシウムを生成させる。

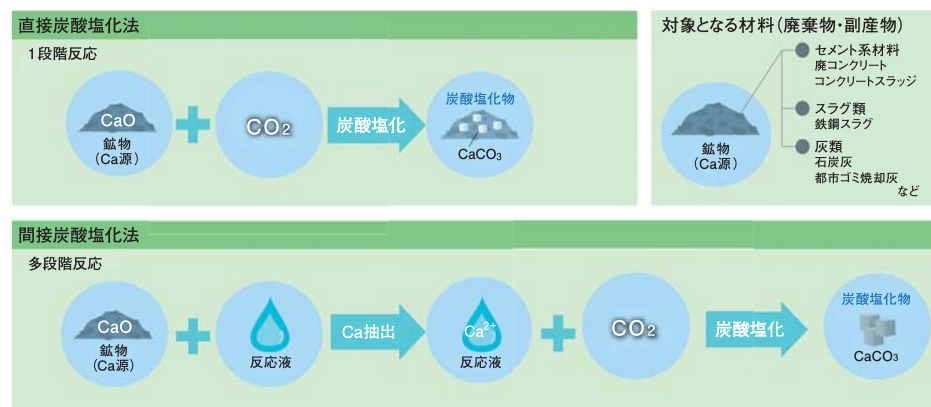


図-1 炭酸塩化技術の概要

他にも塩酸や硝酸水素アンモニウムなどの強酸を用いて、Ca源中のCaを効率的に抽出して、人工炭酸カルシウムを生成させる方法が提案されている。Cleitonらは、廃コンクリート中のCaを塩酸で抽出した溶液に対し、あらかじめ水酸化ナトリウムを用いてCO₂を回収した炭酸ナトリウム溶液を反応させることで、人工炭酸カルシウムを生成する手法を報告している⁵⁾。また人工炭酸カルシウムを分離した後の反応液は、電気透析によって塩酸と水酸化ナトリウムに分離することで反応液の循環利用を図る方法も提案されている⁶⁾。

また、他にはpHスイング法と呼ばれる方法がある。この方法はCa抽出反応と炭酸塩化反応を通して、pHが各反応での適切な値に変化することが特徴である。例えば反応液に、塩化アンモニウム溶液を用いると、Ca源中からCaが抽出されるとともに、pHが上昇する。その後、固液分離後の反応液とCO₂との反応により人工炭酸カルシウムが生成され、その際pHは低下することから、反応液を再度循環利用することができる⁷⁾。

3. 人工炭酸カルシウムについて

人工炭酸カルシウムは、前章で述べた間接炭酸塩化法などによって化学的に生成された炭酸カルシウムである。粒径の分布としては比較的均一である一方で、反応温度や、反応液のCa濃度などの合成条件によって粒径や粒子の形状が変化することも報告されている⁸⁾。また密度は、2.4~2.7g/cm³とする報告が多く見られる。純度については、間接炭酸塩化法における反応液の除去状態や不純物の除去操作、出発材料となるCa源の種類などによって違いが生じることが考えられる。純度の観点からは、間接炭酸塩化法のプロセスにおいて、必要に応じてpHの調整などを行い、不要な成分を除去することも必要になる⁹⁾。これらの要因によって人工炭酸カルシウムの純度にはばらつきが生じ、おおよそ75~98%の範囲で報告されている例が多く見られる。

4. 人工炭酸カルシウムの混合材としての利用

セメント・コンクリート用混合材として、石灰石微粉末は古くから利用されてきており、またそのための指針案などもこれまで提案されてきている¹⁰⁾¹¹⁾。石灰石微粉末は、セメント・コンクリートの流動性や材料分離抵抗性の改善、組織の緻密化などの特性に寄与するとされている。昨今ではCO₂削減の観点から、石灰石微粉末の代替として人工炭酸カルシウムのセメント・コンクリート用混合材としての利用に向けた研究が行われている。

人工炭酸カルシウムを使用したモルタルやコンクリートの強度については、セメントに対して内割りか、または外割りかの混合方法によってその傾向が異なる。例えば、細骨材に置換し、セメントの外割りで混合した場合には、人工炭酸カルシウムの混合率の増加とともに、ある一定の混合率までは強度は増加するとする例¹²⁾が多く見られる。一方で、セメントに対して内割で置換した場合には、5%程度の少量の置換率では、人工炭酸カルシウム無置換のセメントと強度は同程度となり、またそれよりも置換率が多い場合には、置換率とともに強度は低下する傾向にあるとする例が多く見られる。また、高炉セメントに人工炭酸カルシウムを混合したモルタルでは、石灰石微粉末に比べて、材齢初期の強さが高くなったとする¹³⁾報告もある。

流動性については、人工炭酸カルシウムをセメントに内割りで置換した場合には、置換率の増加に従って低下するとあるとされている。人工炭酸カルシウムをセメントに対して外割りで混合した場合にも、傾向として

は同様に、流動性が低下し、また粘性が増加¹²⁾する例が多く見られている。ただし、流動性の低下は、減水剤の添加量の調整によって改善できるとの見解も示されている。流動性の低下については、人工炭酸カルシウムは粒子径が比較的均一であることや、もしくは凹凸のある粒子形状によって粉体の充填性が低下することによる¹⁴⁾と考察されている。

他にも、人工炭酸カルシウムを5~10%混合したコンクリートを対象に、凍結融解抵抗性や中性化、塩分浸透性などの特性は、普通コンクリートとほぼ同等であるとする報告¹⁴⁾など、耐久性の観点からも広く検討が行われている。

5. 当社における間接炭酸塩化技術と人工炭酸カルシウムに関する検討

5-1 間接炭酸塩化法による人工炭酸カルシウムの合成

当社では、(公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)との共同研究として、pHスイング法を用いた間接炭酸塩化技術の検討を行っている¹⁵⁾¹⁶⁾。図-2に本技術の概要を示す。本技術は、2章で概説したように、強酸と弱塩基を混合した溶液を反応液として用いることで、Ca源に含まれるCaを選択的に抽出し、その後、反応液中に抽出されたCaとCO₂とを反応させることで、CO₂を固定化すると同時に、高純度な人工炭酸カルシウムを得ることに特徴がある。また反応液のpHがそれぞれの反応に適した値に変化するため、反応液やプロセスの循環が可能であることも特徴の一つである。ここでは、Ca源には廃コンクリートの微粉分を想定し、

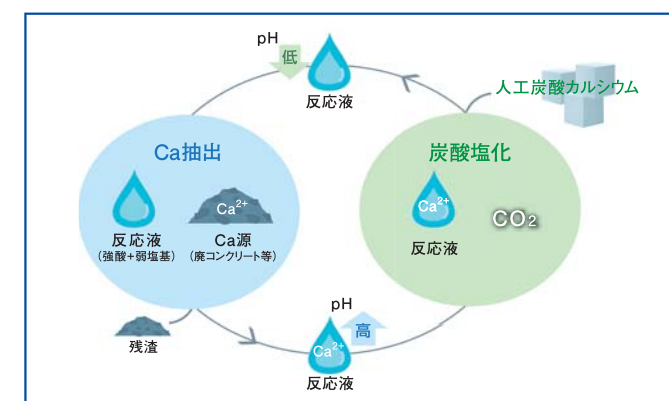


図-2 pHスイング法を用いた間接炭酸塩化技術

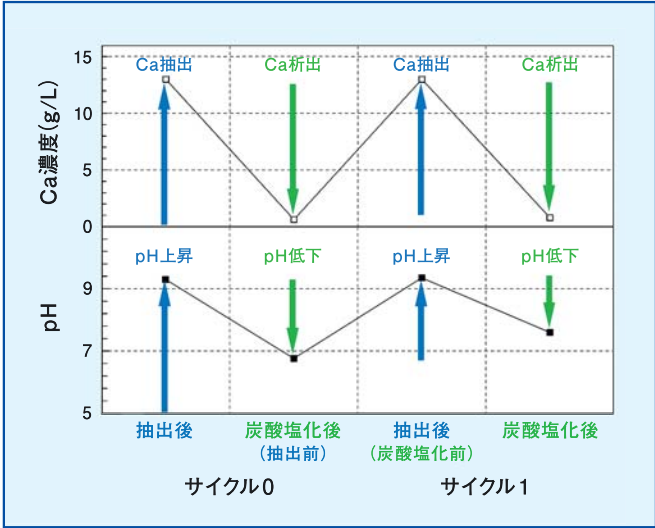


図-3 反応液中のCa濃度とpHの変化

普通セメントモルタルを粉砕した試料を、反応液にはジエタノールアミンと塩酸をモル比1:1で混合した溶液を使用して検討した。モルタル粉末中のCaと、反応液中のClの割合がモル比で1:2となるようにそれらを混合し、15分間攪拌することでCaを抽出した後、吸引ろ過により反応液と残渣を分離した。得られた反応液にCO₂を通気することで、反応液中に炭酸カルシウムを生成させ、これを固液分離することで人工炭酸カルシウムを得た。分離した反応液は再度、抽出用の反応液として循環利用した。本検討では、Caの抽出から炭酸塩化までの手順をサイクル0とし、その後サイクル1までの手順を繰り返した。

この操作により得られた反応液中のCa濃度とpHの変化を図-3に示す。抽出後には、モルタル粉末中からCaが抽出されることにより、反応液中のCa濃度が上昇するとともに、pHも上昇している。その後、抽出後から炭酸塩化後にかけては、反応液中のCaがCO₂と反応し、人工

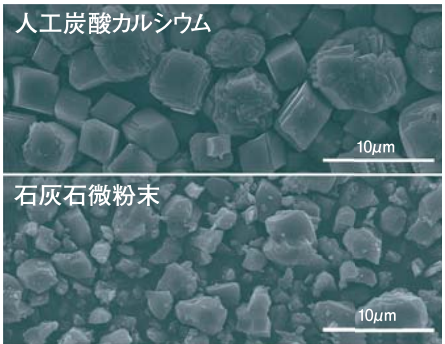


図-4 人工炭酸カルシウムと石灰石微粉末の電子顕微鏡画像

炭酸カルシウムとして析出することで、Ca濃度が低下するとともにpHも低下していることが示されている。また本技術では、Ca抽出と炭酸塩化が繰り返されることが示されている。本結果をもとに、抽出前後のCa濃度差と、モルタル粉末中のCa含有量から、別途Caの抽出率を求めた

ところ、モルタル粉末中に含まれるCaの57%が抽出されていることが示されている。また、抽出されたCaの99%は、炭酸塩化のプロセスで人工炭酸カルシウムとして析出し、採取できることも示されている。

サイクル1で生成した人工炭酸カルシウムの電子顕微鏡画像を図-4に示す。本図には参考として、市販の石灰石微粉末の画像も併せて示す。本プロセスで生成した人工炭酸カルシウムは、X線回折分析により、鉱物相としてはほぼカルサイトであることを確認している。ここで得られた人工炭酸カルシウムは、石灰石微粉末に比べて大きな粒子が均一に生成しているように見て取れたが、特に粒度については炭酸塩化のプロセスにおける種々の条件によって変わることは予想される。

5-2 人工炭酸カルシウムを混合したセメントの強さ発現性

ここでは、人工炭酸カルシウムをセメント・コンクリート用混合材として用いた時の強さ発現性を検討するため、前節と同様のプロセスで合成した人工炭酸カルシウム、および比較用として石灰石微粉末を混合したセメントの強さを評価した例を示す。

本検討に用いた人工炭酸カルシウムと石灰石微粉末の特性を表-1に示す。pHスイング法を用いた間接炭酸塩化技術によって得られた人工炭酸カルシ

ウムの密度は2.70g/cm³であり、石灰石微粉末と近いものである。また、プレーン比表面積は2,470cm²/gであり、石灰石微粉末の4,690cm²/gと比べると粒度としては粗いものとなっている。圧縮強さの測定は、少量混合成分を含まない研究用普通ポルトランドセメントに対して人工炭酸カルシウム(C)および石灰石微粉末(L)を内割りで8～30%混合したモルタルについて行った。セメントの配合や圧縮強さの測定は、JIS R5201「セメントの物理試験方法」に準じている。

人工炭酸カルシウムを15%混合したセメントについて、材齢によるモルタル圧縮強さの変化を図-5に示す。人工炭酸カルシウムを混合したセメント(N85+C15)の圧縮強さは、石灰石微粉末を混合した場合(N85+L15)と比較して、材齢3日から28日までおおよそ同様の強さ発現性を示すことが確認された。また普通ポルトランドセメント(N100)と比較して、材齢3日、7日、28日で圧縮強さがそれぞれ13.2%、5.6%、10.9%低下することが示された。今回の結果の範囲では、材齢7日における強さの低下が小さいものとなっていた。

人工炭酸カルシウムを混合したセメントについて、材齢28日における人工炭酸カルシウムの混合率とモルタル圧縮強さ比(N100の圧縮強さを1として規格化)の関係を図-6に示す。本結果では、人工炭酸カルシウムの混合率が小さいほど、圧縮強さ比の低下の程度が小さいことが示された。また、人工炭酸カルシウムを混合したセメントでは、おおよそ石灰石微粉末を混合したセメントと近い強さ発現性が得られることが確認されている。なお、人工炭酸カルシウムを混合したセメントでは、石灰石微粉末に比べて圧縮強さ比はわずかに小さくなっている傾向も見られるが、これは今回の評価に用いた人工炭酸カルシウムのプレーン比表面積が

表-1 人工炭酸カルシウムと石灰石微粉末の特性		
特性	人工炭酸カルシウム	石灰石微粉末
密度(g/cm ³)	2.70	2.72
プレーン比表面積(cm ² /g)	2,470	4,690

石灰石微粉末より小さいことが影響している可能性も考えられる。

人工炭酸カルシウムはCa源の種類や合成の方法、条件などによって特性が大きく異なることも考えられるため、今後もさらに幅広いデータの蓄積と検討は必要と思われるが、今回得られた結果の範囲では、前述の通り人工炭酸カルシウムがモルタルの圧縮強さに与える影響は石灰石微粉末とおおよそ同様のものとなっていた。

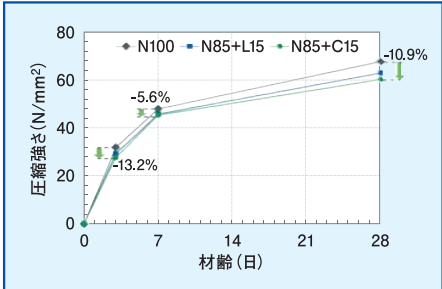


図-5 人工炭酸カルシウムを15%混合したセメントの材齢によるモルタル圧縮強さの変化

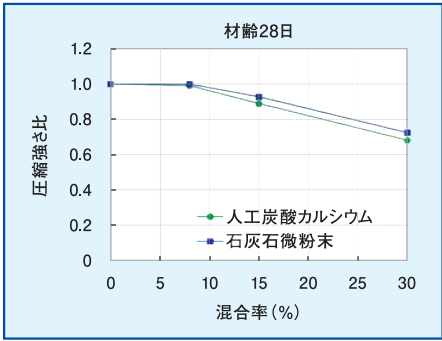


図-6 材齢28日における人工炭酸カルシウムの混合率とモルタル圧縮強さ比の関係

6. おわりに

人工炭酸カルシウムは、産業廃棄物・副産物由来のCaを利用してCO₂を固定化することが可能であり、本稿で説明してきた通りCO₂排出量の削減と資源循環を同時に果たせる材料である。昨今ではCO₂排出量を削減するセメント・コンクリート用混合材としての研究開発も進展しており、建設分野における脱炭素化の新たな選択肢として期待が高まっている。一方で、実用化に当たっては、建設材料としての人工炭酸カルシウムの特性や、混合材としての性能に関する知見はまだ十分とは言えず、制度面や規格面も含めてさらに検討していく必要があるものと思われる。今後も技術の確立に向け、研究が一層発展していくことが期待される。

謝辞

5章の「当社における間接炭酸塩化技術と人工炭酸カルシウムに関する検討」では、共同研究者として、公財)地球環境産業技術研究機構(RITE)の皆様より貴重な知見や技術的な支援をいただきました。記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 石田哲也ほか:物質移動則と化学平衡論に基づく空隙水のpH評価モデル, 土木学会論文集, Vol.648, pp.203-215, 2000
- 2) 葛岡雄飛ほか:加熱炭酸化処理による廃コンクリートへのCO₂固定化に及ぼす処理条件の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.78, pp.474-480, 2024
- 3) 石井祐輔ほか:CO₂有効利用技術を適用した材料を用いた低炭素型舗装の試験施工, 太平洋セメント研究報告, 第187号, pp.34-43, 2024
- 4) 佐々木猛ほか:コンクリートスラッジを用いた炭酸塩鉱物化およびその利活用～エコタンカル®, PAdeCS®～, アジア太平洋研究, 特別号, pp.49-59, 2022
- 5) Cleiton Kunzler et al.:CO₂ storage with indirect carbonation using industrial waste, Energy Procedia, Vol.4, pp.1010-1017, 2011
- 6) Hsing-Jung Ho et al.:Circular indirect carbonation of coal fly ash for carbon dioxide capture and utilization, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol.10, pp.1-14, 2022
- 7) Satoshi Kodama et al.:Development of a new pH-swing CO₂ mineralization process with a recyclable reaction solution, Energy, Vol.33, pp.776-784, 2008

- 8) M. de Beer et al.:Synthesis of high-purity precipitated calcium carbonate during the process of recovery of elemental sulphur from gypsum waste, Waste Management, Vol.46, pp.619-627, 2015
- 9) Amin Azdarpour et al.:A review on carbon dioxide mineral carbonation through pH-swing process, Chemical Engineering Journal, Vol.279, pp.615-630, 2015
- 10) 社団法人セメント協会:石灰石微粉末専門委員会報告書, 2001
- 11) コンクリート工学会:コンクリートにおける石灰石微粉末の実用性に関する研究委員会報告書, 2025
- 12) 田中寛人ほか:CCU粉体を混入した低炭素型のコンクリートの品質・施工性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1393-1398, 2024
- 13) 古川雄太ほか:軽質炭酸カルシウムおよび酸化カルシウムが高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートに及ぼす影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1375-1380, 2024
- 14) 梅津真見子ほか:廃石膏ボードを原料とした合成炭酸カルシウムを添加したコンクリートの基本的品質, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.91-96, 2024
- 15) 大西里沙ほか:pHスイングを利用したセメント系材料からのCa抽出・CO₂炭酸塩固定化に関する研究～反応液組成の影響～, 第150回無機マテリアル学会学術講演会講演要旨集, pp.13-14, 2025
- 16) 山崎里沙ほか:ジエタノールアミン系反応液を用いたpHスイング法によるCa抽出・CO₂炭酸塩固定化に関する研究, 第151回無機マテリアル学会学術講演会講演要旨集, pp.65-66, 2025



「太平洋セメントグループの 防災・復興技術パンフレット」発行

～激甚災害に対する備えと早期復旧・復興のための商材・工法のご提案～

1. はじめに

日本は、地震・台風・豪雨・津波など、さまざまな自然災害のリスクが極めて高い国です。近年、これらの災害が以前よりも頻繁に起こり、被害も大きくなる傾向が見られます。そのため、社会全体で防災や減災の取り組みを強化することがこれまで以上に重要になっています。こうした状況の中で、インフラ整備においても災害に強く、被害を受けても早期に復旧できる構造物をつくることが強く求められています。

太平洋セメントグループは長年にわたり、セメントやコンクリートを安定的に供給するとともに、高い耐久性を持つ材料や先進的な技術・製品を提供することで、社会基盤の整備に貢献してきました。これらはインフラ整備だけでなく、災害が発生した際の被災地における復旧・復興の場面でも有効に活用されています。

このたび、こうしたインフラ強靱化に資する材料や技術を体系化した「太平洋セメントグループの防災・復興技術パンフレット」を作成しました。本パンフレットでは、事前対策に資するもの、発災後の早期復旧を支えるもの、被災地の一日も早い再建とさらなる耐久性・安全性を向上させる復興技術と、各段階で活用できる製品・工法・技術を幅広く紹介しています。災害対応に携わる多くの関係者に、太平洋セメントグループの持つ商材・技術を知っていただくことを目指して作成しました。



パンフレット表紙

2. 概要

2-1 掲載内容

本パンフレットでは地震や風水害などの災害に対して、先に述べた3フェーズに商材を分類しています。これにより、災害対応の各段階で必要とされる技術を的確に把握することができ、目的に応じて必要な情報へすぐにアクセスできる構成としています。

・予防・減災

災害発生前に被害を可能な限り軽減することを目的とした、点検技術や補修・

補強に対する商材・工法を紹介しています。地盤や構造物の耐久性を高め地震・台風・洪水などによる被害を抑えることを目指すものに加え、火災やヒートアイランド対策に有効な商材も含まれます。

・復旧

災害発生後、被災したインフラや構造物を迅速に安全な状態または供用可能な状態に戻すことを目的に、早期に硬化する材料や低公害型のがれきの破碎剤といった迅速な機能回復を支える商材・工法を取り上げています。

・復興

被災地域の日も早い生活再建を支援するため、被災したインフラ・構造物の補修・補強を通じた耐久性や安全性を回復・向上させる技術に加え、災害により発生した災害廃棄物を回収してセメント原料に再資源化する取り組みなど、地域の早期復興に貢献する技術について紹介しています。

表-2 復旧・復興ページの対策技術一覧

- ・速硬型材料による補修／補強
- ・陥没箇所 の 充填
- ・がれき破碎／除去
- ・簡易施工
- ・災害廃棄物の資源化

2-2 掲載会社

本パンフレットには太平洋セメント(株)をはじめとして、グループ会社8社の商材・工法を掲載しています。

- ・株式会社エーアンドエーマテリアル
- ・小野田ケミコ株式会社
- ・クリオン株式会社

商品/工法など	商品概要	予防・減災					復旧	復興	提供会社	
		地震に備える	火災から守る	津波・高波に備える	水害に備える	事前に調査する	（ヒートアイランド対策）	早期復旧を支える		
セメント系覆材材（ジオセメントリース）	土に混合することにより、軟弱な地盤を強固にする地盤改良工事に用いられる材料。	●							●	太平洋セメント株式会社
超高強度繊維補強コンクリート（タタール）	高強度・高じん性・高耐久で、摩耗や衝撃に強い繊維補強コンクリート（UFCD）。	●		●						
災害廃棄物のセメント資源化	災害廃棄物をセメント原料として再資源化する技術。産業廃棄物処理の技術を活かし、被災地の早期復旧に貢献。								●	
トンネル耐火材（トンネルファイア）	トンネル火災に備える高耐熱耐火被覆材。軽便パネル工法により施工が容易。		●							A&M 株式会社エーアンドエーマテリアル
免震装置用耐火被覆システム（震炎火）	免震装置を守る耐火被覆システム。施工後も装着でき、点検しやすい構造。	●	●							
地盤改良工法	地盤条件や目的に応じて、多様な工法で最適な地盤改良工事を実施。	●		●	●				●	
移動式バッチャプラント（バッチャジエットミキサー）	独自の重量計量制御装置・水圧2輪駆動によりミキサーを駆動した移動式バッチャプラント。高品質なコンクリートを製造を実現。	●	●						●	ONODA CHEMICO 小野田ケミコ株式会社
経路導コンクリート（スーパーシグネットコンクリート）	透水性に優れ早期に供用可能。繊維補強・高流動にも対応。プレミクスタイプをラインアップ。	●						●		
ALCパネル（工場建設アンカーパネル）	取付け簡便・クレーンで工場等建設現場に迅速搬入したALCパネル。耐火性・施工性に優れ、工期の短縮が図れる。	●	●						●	C&on クリオン株式会社
ALCパネル（金物レス対応 インビジパネル）	取付け金物を見せない独自の取り付け方法で従来の耐風圧性能はそのままに、津波襲来時にはパネルが外れて構造躯体の負荷を軽減。		●	●					●	
空溜り材料（チヂリコキープ）	プレミクスタイプの軽量空溜り材。早期タイプや水中不凝固タイプがあり、用途に応じて最適な選択が可能。	●						●		chichicon 株式会社エーアンドエーマテリアル
推進工法用沈立杭（PMH工法）	立杭とマンホールを一工程で搬送し、工場の短縮が可能。仮設材の機能がなく、地盤に優しい工法。			●					●	
推進工法用押しキャスト支保組（バックロッキング工法）	推進コンクリートにより構築される推進工事の支保組を、プレキャスト化。工期短縮・省人化に貢献した工法。			●					●	T&C 株式会社エーアンドエーマテリアル
モニタリング（RFID建設管理技術（RFIDシグネス）※	ワイヤレスで簡単にコンクリート構造物の内部（ひび割れ・腐食電位）をセンシングできる基礎診断システム。					●				
構造物の調査・診断	コンクリート構造物の健全性評価のための視覚調査や材料試験・分析を行い、問題を把握。					●			●	T&C 株式会社エーアンドエーマテリアル
外壁タイルの打診点検（ウォールサーベシステム）	ウォールサーベシステムは、足場が不要なため、作業員の安全性が高く、かつ経済的に効率的な外壁タイルの打診点検が可能。					●				
放射線廃棄物処理	放射線廃棄物の処理・処分に関する調査・研究、および容器などの関連製品を提供。							●		TPC 太平洋プレコン工業株式会社
舗装ブロック（透水性ブロック）	多孔質素材の透水性舗装ブロック。雨水を土壌に浸し、雨水浸透の負担を軽減。			●					●	
舗装ブロック（保水性ブロック、透熱性ブロック）	保水性・透熱性に優れた舗装ブロック。路面温度の上昇を抑制。						●			T&C 株式会社エーアンドエーマテリアル
リサイクル材活用ブロック	舗装ブロックは瓦などの震災廃材を再利用可能。								●	
舗装ブロックのリユース	舗装ブロックは地震で壊れても再利用ができ、早期復旧が可能。							●		T&C 株式会社エーアンドエーマテリアル
復旧用モルタル（太平洋プレコンKFR）	鋼筋等を立て工法等の制振機構に使用する軽量タイプの復旧用モルタル。	●							●	
ひび割れ底塗り（太平洋ハイパーネット）	耐アルカリ性のガラス繊維ネット。高い付着性と付着性能によりひび割れを抑制。	●	●							T&C 株式会社エーアンドエーマテリアル
水害不浸透性コンクリート高圧密剤（太平洋エムコン）	水害不浸透性コンクリート高圧密剤。高圧密剤を注入し、ひび割れを抑制し、透水性を低下させる。用途に応じて最適な選択が可能。	●								
コンクリート用断熱材（太平洋ハイパーエクスパン）	コンクリートの収縮を低減し、ひび割れを抑制するコンクリート用断熱材。	●								T&C 株式会社エーアンドエーマテリアル
静電抑制剤（一般型）（太平洋プレコンスター）	静電抑制剤。一般型（太平洋プレコンスター）は、足場が不要なため、作業員の安全性が高く、かつ経済的に効率的な外壁タイルの打診点検が可能。	●						●		
復旧用モルタル（太平洋プレコンロックスーパー）	速硬化の復旧用モルタル。優れた流動性と充満性を有し、短時間で高い強度を発現。	●						●	●	T&C 株式会社エーアンドエーマテリアル
新築促進用ポリマーセメントモルタル（太平洋プレコンスーパー）	コンクリートと鋼筋の接着強度を向上。構造物の強度や求められる機能に応じて最適な選択が可能。	●						●	●	
地盤注入材（太平洋プレコンMFC）	経路導のセメントと、地盤への浸透性に優れる。無機質・無公害で安全な注入材。	●						●	●	T&C 株式会社エーアンドエーマテリアル

9

巻末には商材と適用箇所、提供会社の一覧表を掲載しています

10

対応できる総合的で柔軟な対応体制を整えていることがご理解いただける内容となっています。

さらには実際に製品・技術を活用する方々の声を反映した新たな技術開発にも引き続き取り組んでまいります。

3. 今後について

本パンフレットは各地の展示会等で配布しており、多くの方に太平洋セメントグループの防災・復興技術を知っていただく資料として活用しています。当社グループが有する多様な商材や技術が、民間企業や自治体など幅広い関係者に認知され、現場で活用されることで災害に強い社会の実現に貢献することを期待しています。

また、より多くの方に当社グループの技術を知っていただけるよう、当社ホームページでPDF版を公開しています。今後はスマートフォンやタブレットで閲覧・検索できるアプリの整備も進めていきます。

太平洋セメントグループでは今後もグループの総合力を発揮し、災害に強い社会の実現を目指して周知活動を続けていくとともに、施工実績の蓄積、

太平洋セメント株式会社 GX推進部



上記QRコードからパンフレットがダウンロードいただけます

3

誌面の一部

- ・株式会社太平洋コンサルタント
- ・太平洋プレコン工業株式会社
- ・太平洋マテリアル株式会社
- ・秩父コンクリート工業株式会社

各社が持つ独自の技術をグループとして連携することによって、さまざまな災害において予防・復旧・復興の各フェーズに