

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

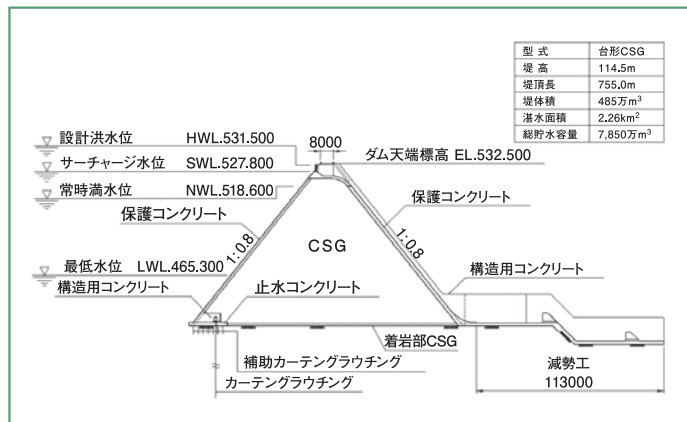


図-1 成瀬ダム断面図



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形式である。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砕材の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

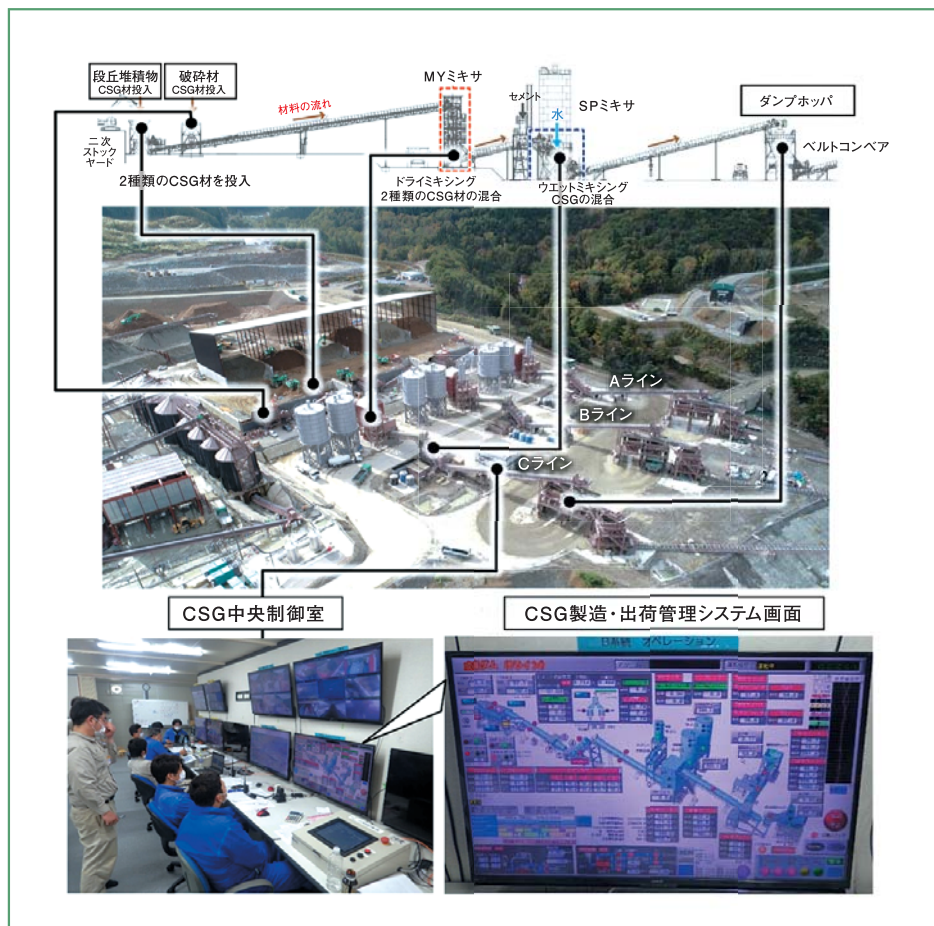


図-3 CSG製造・出荷システム

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。

3. 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。

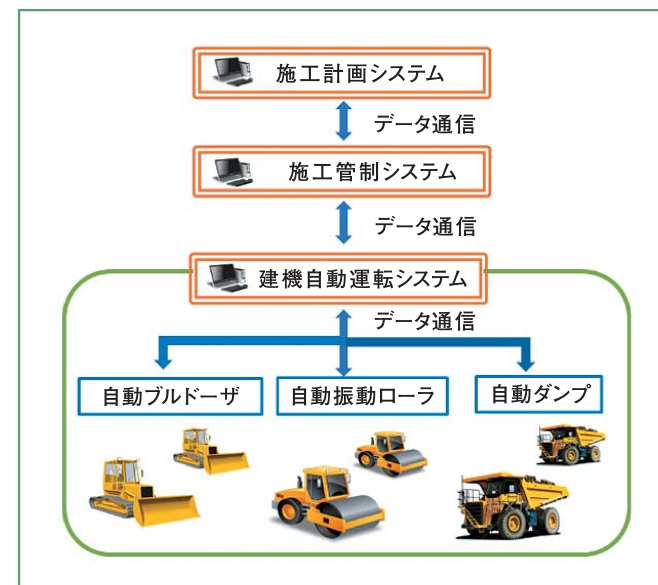


図-4 自動化施工システム



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

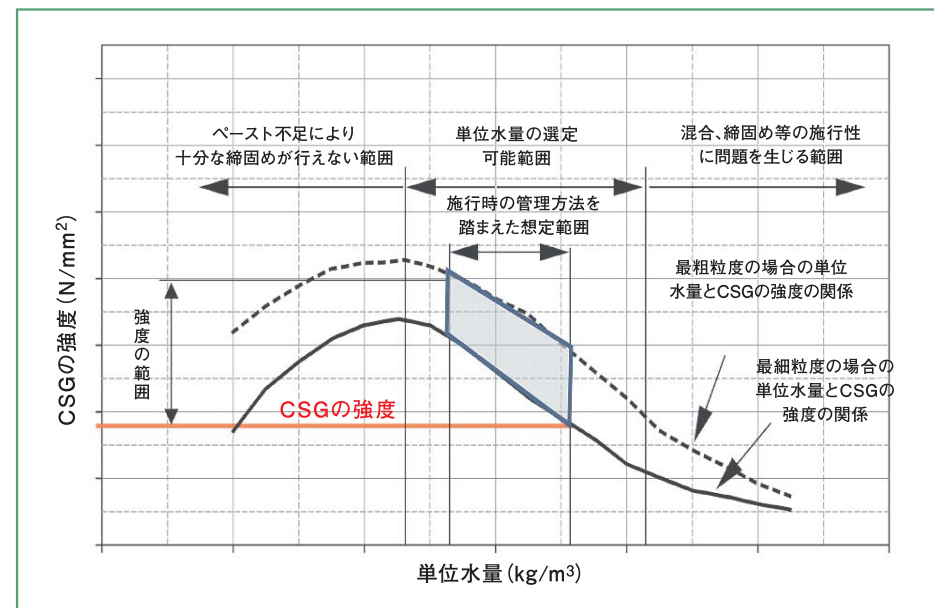


図-7 CSGの強度の範囲「ひし形」理論

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				
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			
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。従来の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の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。

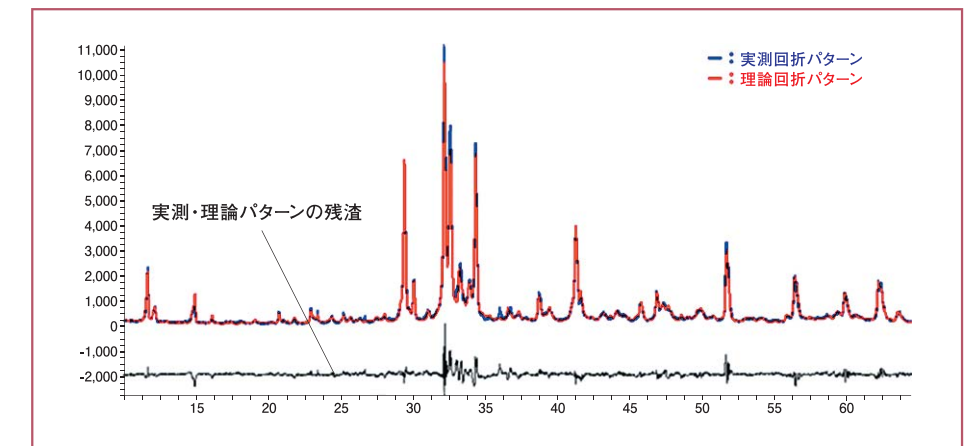


図-1 XRD/リートベルト法によるセメント解析例

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浸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、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て可能で、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

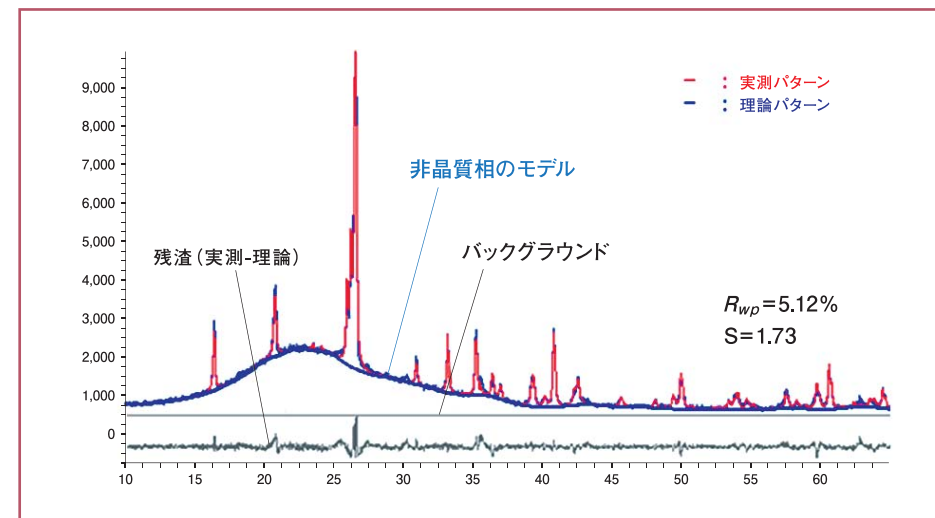


図-4 非晶質相を含む試料のPONKCS法によるフィッティング結果

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わかります。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

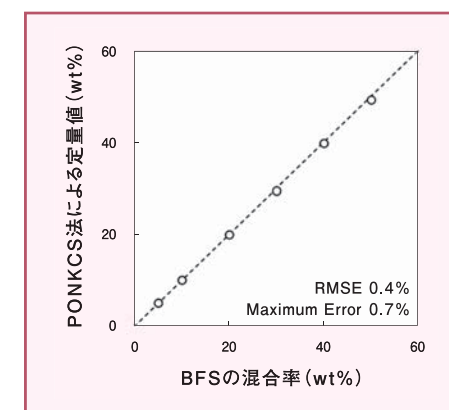


図-5 PONKCS法による混合セメント中の高炉スラグ(BFS)定量精度⁹⁾

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

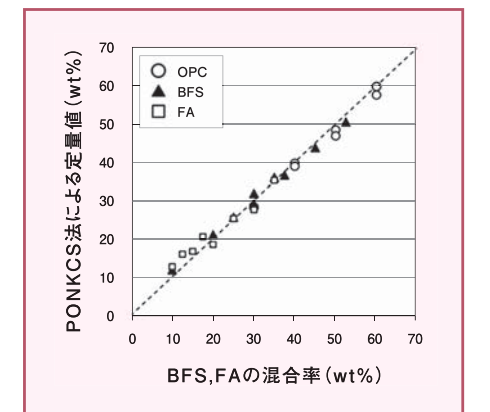


図-6 PONKCS法による混合セメント中の高炉スラグ(BFS)、石炭灰(FA)の定量精度⁹⁾

【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)