

近赤外分光法による コンクリート性状評価に関する 基礎的検討

太平洋セメント株式会社 研究開発本部新規技術研究所建設マテリアルグループ 関根 麻里子
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海外技術グループ 星 健太
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海外技術グループリーダー 森 寛晃

1. はじめに

電磁波は波長によってさまざまな種類があり(図-1)、その特性に応じて、医療や通信、自動運転技術など多岐にわたる分野で適用されている。コンクリート分野では、電磁波を用いた非破壊試験技術として、X線等によるコンクリート内部を可視化する技術や電磁波レーダによる鉄筋探査などが挙げられる。コンクリートの機器分析でも電磁波は活用されており、その多くは赤外線以上の波長帯を活用した分光分析である。例えば、X線を用いる粉末X線回折、蛍光X線分析、赤外線を用いる赤外分光分析、紫外線を用いる紫外分光分析などが一般に用いられている。これらの手法では、現場で採取した試料を試験室で調整して分析が行われており、現場でコンクリートの分析ができる手法は少ない。このような状況の中、サンプリング

不要で、非破壊的に短時間で分析ができる近赤外分光法が注目され、コンクリート診断技術への適用が検討されてきた¹⁾²⁾。さらに、ここ数年で近赤外分光計の小型・低コスト化が進んでおり³⁾、現場適用への後押しとなっている。ただし、これらの検討の多くは硬化・供用後のコンクリート劣化を対象としたものであり、フレッシュ時のコンクリートの性状評価に関する検討はほぼみられない。

コンクリートの施工では、目視や時間、温度をもとにした工事担当者や職人の経験や勘に頼る部分が多いのが実情である。近赤外分光計を用いてコンクリートの硬化過程を適切に評価できれば、コンクリートの上面仕上げの実施可否の判断や、コンクリートの打ち重ね時間間隔の制約に縛られない施工が可能となり、生産性向上に有益であると考えられる。本報では、近赤外分光のフレッシュ時のコンクリート性状評価への適用に向け、セメントペーストおよびモルタルによる基礎的な検討の実施内容を紹介する。

2. 近赤外分光法のセメントペーストおよびモルタル計測への適用

2-1 近赤外分光法概要

近赤外分光法は近赤外線領域(800～2,500nm)のスペクトルに基づく非破壊分析手法⁴⁾である。これまでに水酸化カルシウム(以下、CH)などの吸収ピークを利用した劣化診断技術への適用が検討されている¹⁾など。近赤外線はエネルギーの低い電磁波であるため、同一試料で繰り返し分析ができること、試料

調製が不要でin-situ(あるがまま)分析ができること、1測定が数秒で終わることなどの利点があり、果実や生体などの分析に多く用いられている。また、赤外分光法で用いる中・遠赤外線領域(2,500nm～100μm)と比較して、近赤外線域での水の吸収強度は約1/1,000と極めて弱く、水を含む試料を希釈せずに分析できる。従って、水を多く含む凝結・硬化過程のコンクリートの分析にも適しているといえる。

2-2 実験概要

表-1に示すセメントペースト(水準名: 35-P、55-P)およびモルタル(水準名: 35-M、55-M)の近赤外線スペクトルを測定した。測定には、写真-1に示す近赤外分光計(Inno-Spectra社製、波長域: 900～1,700nm、分解能: 2.6nm、光源: ハロゲンランプ、測定面積: 約φ8mm)を使用した。型枠の側面に開口部(約φ1cm)を設け、カバーガラス(厚さ: 約0.15mm)を介して試料に近赤外光を照射し、反射強度を近赤外分光計にて測定した。試料と標準白板(ラブスフェア社製)の反射強度から、ランベルト・ベール



写真-1 近赤外線スペクトルの測定の様子

表-1 本実験の配合

水準名	W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m ³)			Ad (C×%)
			W	C	S	
35-P	35	—	525	1500	—	—
55-P	55		635	1155		
35-M	35	1.8	252	719	1262	0.25
55-M	55	2.8	262	475	1324	0.15

の法則に従い、吸光度を算出した⁴⁾。

セメントペーストについては、コンダクションカロリメータを用いて水和発熱測定を行った。また、材齢4、8、12、24、72時間にセメントペーストをアセトンに浸漬して水和停止し、TG-DTA(昇温速度: 10℃/分)でCH生成量を求めた。モルタルは JIS A 1147(コンクリートの凝結時間試験方法)に準じて、凝結時間を測定した。

3. セメントペーストの吸光度スペクトルの特徴

55-Pから取得した吸光度スペクトルと、その2次微分スペクトルについて図-2に示す。近赤外分光法の特徴として、X線回折や赤外分光法等でのスペクトルにみられるような鋭敏なピークを得ることは難しく、ピーク形状は一般に幅広となる。また、複数の幅広な吸収ピーク同士が重畳すること多い⁴⁾。本検討においても図-2のように幅広な吸収ピークがみられ、CHや水などの複数成分の吸収ピークが重なり合ってスペクトルが形成されたものと推察される。そこで、スペクトルに含まれる吸収ピークを強調するためのデータ処理である2次微分処理を行った。図より、2次微分スペクトルでは、

1,412nmでのCHによる吸収ピークに加え、1,390nmに明確な吸収ピークがみられ、これらは経時的に増大していた。Gastaldi et al.はC-S-Hの吸収波長域を1,370～1,429nmと報告しており⁵⁾、本検討における1,390nmを中心とした吸収ピークもC-S-H由来するものと推察される。

4. 近赤外分光法によるセメント水和物検出の妥当性

近赤外分光法によるセメント水和物検出の妥当性を確認することを目的に、セメントの初期水和反応性の評価に用いられている水和発熱およびCH生成量と、1,412nmでのCHによる吸収ピークとの対応について、セメントペーストを用いて確認した(図-3)。水和反応過程におけるCHの析出が発熱を伴う⁶⁾ことに基くと、積算発熱量と1,412nm

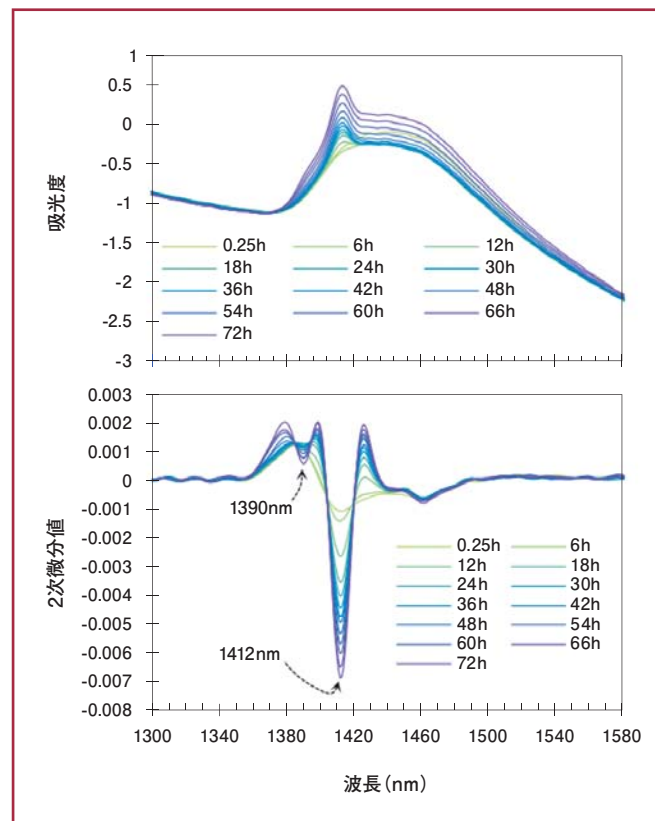


図-2 吸光度スペクトル(上)と2次微分スペクトル(下)

(CHによる吸収のピーク強度)における2次微分値の増加傾向は対応するものと予想される。両者の対応関係を図-3により確認すると、水セメント比によらず、積算発熱量と2次微分値の増加傾向はおおむね対応していた。積算発熱量は、材齢6時間以降に増加が急激となり、材齢24時間まで増加傾向にあった。同様に2次微分値も、材齢6時間以降に増加が急激となり、材齢12～18時間以降は増加が緩慢になる傾向がみられた。CH生成量に着目すると、水準間の差は測定材齢によらず小さいが、2次

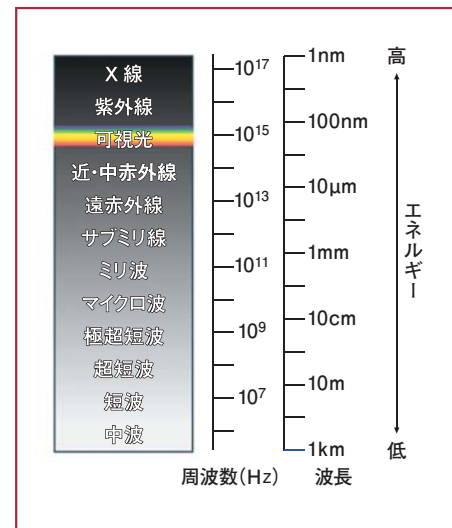


図-1 電磁波の種類

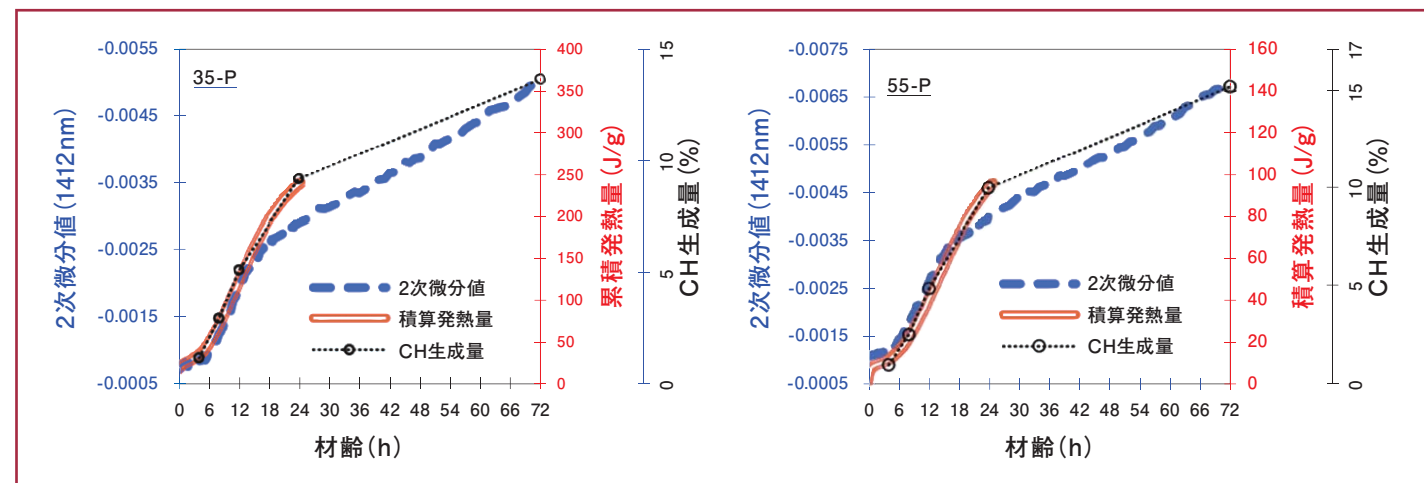


図-3 累積水和発熱量およびCH生成量と2次微分値の比較

環境配慮型急結剤「ビスコショット」の開発について

太平洋マテリアル株式会社 開発研究所土木・混和材料グループ主任研究員 羽根井 誉久
太平洋マテリアル株式会社 開発研究所副所長兼同研究所土木・混和材料グループ主席 杉山 彰徳
花王株式会社 テクノケミカル研究所 谷本 理勇
太平洋マテリアル株式会社 営業本部土木資材営業部副部長 井上 哲

1. はじめに

山岳トンネルの多くは一般的にNATM（New Austrian Tunneling Method）で施工される。この工法はトンネル掘削直後の内面崩落を防ぐために、ベースコンクリートに急結剤を添加した吹付けコンクリートによる覆工が行われる。

急結剤は大別して粉体系急結剤と液体系急結剤に分けられ、太平洋マテリアル(株)では粉体系急結剤「太平洋ショットマスター」シリーズを製造販売している。粉体系急結剤は従来からの技術であり秒レベルで強度発現を有し、著しく地山が悪い箇所や湧水箇所への吹き付けに有利とされているが、吹付けコンクリートの約3割がはね返り(リバウンド)として付着せずロスとなる他、粉じん発生量が多くなることが課題とされている。

一方、液体系急結剤は、極初期の反応が粉体系よりも高いことに加え硬化前の付着性が良く、粉じん抑制効果も高いことが特長であるが、硬化速度が緩い傾向にあり急結性や長期強度において粉体系よりも得られ難いことが知られている。

上述した通り、粉体系急結剤の課題とされているリバウンド、粉じん抑制についてこれまでに種々の検討がなされているが、花王(株)の特殊増粘技術を導入する

ことで液体急結剤並みの低リバウンド、低粉じん化を実現できる技術を構築することができた。

2. 「ビスコショット」の特長

トンネル工事において、吹付けコンクリートに求められる性能の一つに吹き付けたコンクリートのはね返り量低減がある。はね返り量は、コンクリートロスを見越したコンクリートの製造量や製造時間、さらには施工時間にも影響を及ぼすだけでなく、トンネル設備の稼働時間が延長することから環境への負荷も大きい。

このような課題を解消するため、はね返り量低減の方策として花王(株)製の特殊増粘技術を応用した環境配慮型急結剤「ビスコショット」を開発した。本製品は地山へ吹き付けられたコンクリートのダレやはね返りが極めて少なく、液体系急結剤を用いた吹付けコンクリートのような付着性が得られつつ、粉体系の特長でもある硬化発現も保持した急結剤である。

花王(株)の技術導入に当たり、従来の急結性、強度発現を低下させることがないよう急結剤の組成を再検討するとともに、ラボ試験、モックアップ試験、フィールド試験にて性能評価を実施することで

表-1 モルタル凝結試験結果

	急結剤添加率 (C×%)	プロクター貫入抵抗値 (N/mm ²)			
		30 秒	60 秒	90 秒	120 秒
ビスコショット	9	1.4	10.1	>16	
従来品	9	1.6	7.8	14.3	>16

課題を解消でき、性能を満足する製品「ビスコショット」を完成させた。特に本製品の特長であるはね返り量低減については、従来の粉体系急結剤と比べ3割程度の抑制効果が確認され、環境負荷低減効果も大きいことが示されている。

3. 性能評価試験

花王(株)製の特殊増粘剤を配合した新規急結剤には、初期から長期にかけての持続的な反応を有する粉体系急結剤の特長を保持しつつ、特殊増粘作用により急結剤がモルタル・コンクリートと接触した時点でダレやはね返りが低減できることを主眼に置いて開発を行った。表-1にモルタル凝結試験結果の一例を示す。

3-1 ラボ検討によるモルタル吹付け試験

急結剤の開発における手法は、プロクター貫入試験による急結性評価や圧縮強度による強度発現の確認を主としているが、今回の開発では、はね返り抑制機能を付与させることを主眼とした。急結剤配合の選定を目的に、小型吹付け装置にて実際に急結剤を添加したモルタルを吹き付けて最適配合の見極めを行った。写真-1に小型吹付け装置および付着状況を示す。

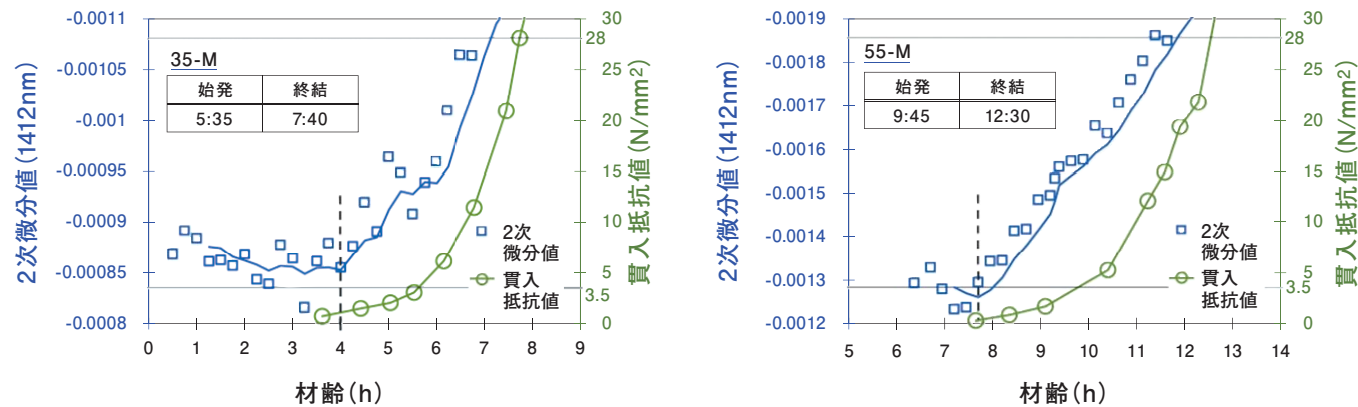


図-4 凝結試験結果および2次微分値(1412nm)の経時変化

微分値は35-Pよりも55-Pが大きい傾向であり、CH生成量と2次微分値の絶対値に有意な対応関係はみられない。一方、両水準でCH生成量および2次微分値の経時的な増加傾向は類似していた。この結果より、水和反応に伴いセメントペースト中に生成されたCHの増加傾向を近赤外分光法で捉えたことが示唆される。従って、本手法により検出したCHの増加傾向に基づき、コンクリートの凝結・硬化過程を評価できる可能性がある。

5. 近赤外分光法による凝結硬化過程の評価

近赤外分光法により検出したセメント水和物の増加傾向により、モルタルの凝結・硬化過程を捉えることができるかどうかを検討した。モルタルの凝結時間試験結果と併せて、1,412nmにおける2次微分値(CHによる吸収のピーク強度)の経時変化を図-4に示す。図内には2次微分値の4区間移動平均を青実線で併記しており、これに基づき2次微分値が増加トレンドとなった変化点を任意に読み取り、黒破線で示した。JISA 1147では、貫入抵抗値が3.5N/mm²および28.0N/mm²に達したときをそれぞれ凝結の始発時間および終結時間としている。図によれば、凝結は始発時間、終結時間ともに55-Mは35-Mより遅い。2次微分値は水準によりばらつきがみられるが、凝結始発の数時間前に増加に転じるか、もしくは増加割合が大きくなる傾向が確認できる。このことは、マトリクス中でのCHによ

る吸収の影響が急激に高まるタイミングを近赤外分光法により検知することで、その後に生じる凝結現象を予測できることを示すものと考えられる。

6. おわりに

近赤外分光法によりセメントの水和反応に伴うセメント水和物の生成を検知でき、これに基づきモルタルの凝結硬化過程を評価可能であることが示された。現場適用に向けては、供試体寸法が水和反応および凝結時間に与える影響やブリーディングによる吸光度スペクトルへの影響などを考慮する必要がある。コンクリート施工の生産性向上に貢献すべく、近赤外分光法による新たなコンクリート品質管理手法の確立を目指し検討していきたい。

【参考文献】

- 1) 松本義章, 上田隆雄, 山本晃臣: 近赤外分光によるASR劣化コンクリートの診断に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp. 1787-1792, 2011
- 2) 山本晃臣, 上田隆雄, 郡政人, 七澤章: 近赤外分光法による実構造物の塩害劣化診断方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp. 1744-1749, 2012
- 3) 大倉力: 日常生活に生きる近赤外分光技術, 応用物理, Vol.87, No.1, pp.6-10, 2018
- 4) 尾崎幸洋: 近赤外分光法, 講談社, 2022
- 5) D. Gastaldi et al.: Near-infrared spectroscopy investigation on the hydration degree of a cement paste, Journal of Materials Science, Vol.45, No.12, pp.3169-3174, 2010
- 6) 公益社団法人日本コンクリート工学会コンクリート基本技術調査委員会コンクリートEWG: 打ち込み上面の仕上げる要領, 公益社団法人日本コンクリート工学会, 2020

せきね・まりこ

【著者略歴】

2018年 太平洋セメント株式会社入社
現在 同社研究開発本部新規技術研究所建設マテリアルグループ

ほし・けんた

【著者略歴】

2020年 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海外技術グループ

もり・ひろあき

【著者略歴】

1997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海外技術グループリーダー



写真-1 小型吹付け装置および付着状況

表-2 吹付けコンクリート配合						
Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)			
			W	C	S	G
15	60	60	216	360	1014	702

3-2 屋外施設による実機吹付け試験

前述による配合選定を踏まえ、屋外施設でスケールアップによる実機モルタル試験を実施した。室内試験では再現できない吐出圧での吹き付けにおいて、吹付けモルタルの付着性、飛散具合、ダレ、はね返り性に加え、連続して吹き付けを行うことにより増粘作用による圧送過程時の配管への固結発生や圧送時の脈動有無などの施工性についても確認した。写真-2に実機モルタル吹付けの様子と付着状況を示す。本試験による評価においては従来品の急結剤と比べ、新規急結剤による効果としてダレ抑制効果と付着性の向上が確認でき、施工性においても従来急結剤と変わらないことが示された。

3-3 模擬トンネルによる実機吹付け試験

実規模レベルによる評価として、太平洋マテリアル(株)小野田工場敷地内にある



写真-2 実機モルタル吹付けの様子および付着状況



写真-3 模擬トンネル外観およびトンネル天端部吹付け状況

模擬トンネルにて実際に掘削工事にて用いられる吹付け機を使用し、一般的に用いられるコンクリートの仕様である単位セメント量：360kg/m³、水セメント比：60%を基本としたコンクリートによる吹き付けにおいて性能評価を行った。表-2に吹付けコンクリート配合を示す。また、環境温度の影響も把握するため、標準期、冬期、夏期とさまざまな温度条件下で実用化レベルに向けた評価を行い、付着性、施工性、強度発現性について把握した。

■実施項目

<STEP-1:リバウンド率測定(側壁部)>

はじめに15秒間1カ所へ吹付けコンクリートの付着性を確認した。その後、真下に落下した成分をダレ成分、壁面から遠方へはね返った成分をはね返り成分とし、ダレ・はね返り・付着量(率)を

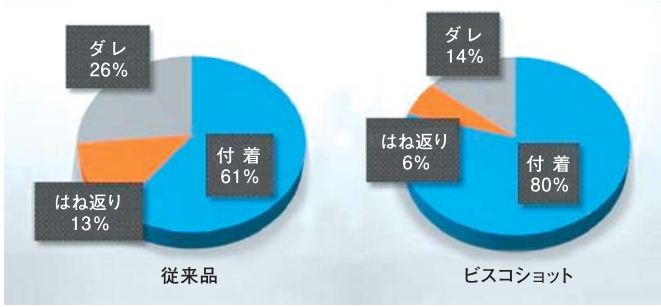


図-1 従来品およびビスコショットのダレ・はね返り・付着率

測定した。なお、測定後、圧縮強度試験に使用するプルアウト・コア供試体を採取した。

<STEP-2:湧水箇所への吹付け>

残りのコンクリートをパネル全域(10ℓ/minの湧水を模擬した湧水箇所)に1分間吹き付けて、付着性を確認した。

<STEP-3:リバウンド率測定(天端部)>

写真-3に模擬トンネル外観およびトンネル天端部吹付け状況を示す。模擬トンネルは幅員6m、高さ5m、半径3m、断面が約26m²、延長30mの仮設設備として設置したものであり、トンネルの天端部分に約1m³コンクリートを吹き付け、付着しなかった量をJSCE-F 563 に準じて次式から算出した。

$$Wr = \frac{W_2}{W_1} \times 100$$

Wr:リバウンド率(%)

W1:天端に吹き付けたコンクリート質量(kg)

W2:付着しなかったコンクリートの質量(kg)

■結果

<STEP-1:側壁部>

側壁への1点集中吹き付け(15秒間)で付着性を確認した結果、ビスコショットはダレが少なく、付着性は非常に良好であり、施工状況も従来の急結剤使用時同様に問題なく吹き付けられた。図-1に従来品およびビスコショットのダレ・はね返り・付着率を、写真-4に、従来品およびビスコショットの付着状況示す。ビスコショットは従来品と比較して、付着率が増大し、はね返りおよびダレが大きく低



写真-4 従来品およびビスコショットの付着状況

表-3 吹付けコンクリート圧縮強度試験結果					
	急結剤添加率 (C×%)	圧縮強度 (N/mm²)			
		3 時間	24 時間	7 日	28 日
ビスコショット	8.8	2.2	13.2	23.3	31.5
従来品	8.4	2.9	14.4	29.5	33.2

下していることが確認できた。表-3に吹付けコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。ビスコショットは従来品と比較し、同一急結剤添加率条件下で、初期から長期の材齢において、同様の強度発現性を示した。

<STEP-2:湧水箇所>

写真-5に従来品およびビスコショットの付着状況を示す。湧水箇所への吹き付けは、流量：10ℓ/min、吹付け時間：1分の条件で行った。ビスコショットは付着率が増加し、はね返りおよびダレの量が低減することを確認した。

<STEP-3:天端部>

図-2に従来品およびビスコショットのリバウンド低減率を示す。リバウンド低減率は従来品のリバウンド率を100%としたときのビスコショットのリバウンド率の比を求めたものである。前述した通り、従来品と比べ3割程度の抑制効果が確認された。

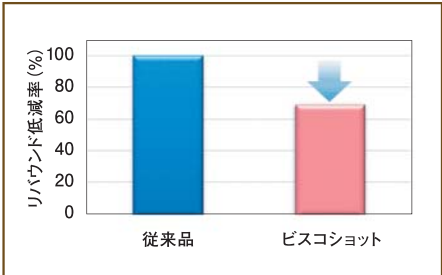


図-2 従来品およびビスコショットのリバウンド低減率

4. 環境影響評価

コンクリート使用量減少に伴うCO₂排出量の削減効果を比較するため、JCI環境影響評価ツールを用いて従来品とビスコショットの環境影響評価を行った。実際のトンネル現場の施工を考慮して、1回の吹付け施工で実施する吹付けコンクリート量の10m³を機能単位に設定し、はね返り率は図-2の結果を用いて算出した。

その結果、LIME3による環境影響評価では従来品に対してビスコショットの総合評価は12.3%減少、CO₂排出量では12.6%の削減効果が認められ、環境負荷低減に寄与することが確認された。

5. まとめ

「ビスコショット」を用いた吹付けコンクリートは以下に示すメリットが期待できる。

- ①リバウンド量低減による材料コストの節約
- ②産業廃棄物削減に伴うズリ出し作業の負担軽減
- ③付着性能の向上による施工時間短縮(トータルコストの削減)
- ④コンクリート使用量減少に伴うCO₂排出量の削減
- ⑤従来の急結剤と同様の扱いのため施工時に特殊な設備が不要

なお、「ビスコショット」は2024年11月1日より販売を開始し、現在、実現場で採用

されている。今後も実現場において各種データを採取し、環境負荷低減効果を検証していくとともに、新たな商材開発にも取り組む所存である。

はねい・たかひさ

【著者略歴】
1999年 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開発研究所土木・混和材料グループ主任研究員

すぎやま・あやのり

【著者略歴】
1993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開発研究所副所長兼同研究所土木・混和材料グループ主席

たにもと・りゅう

【著者略歴】
2014年 花王株式会社入社
現在 同社テクノケミカル研究所

いのうえ・さとる

【著者略歴】
1992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営業本部土木資材営業部副部長