

吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (6)

— EPMA を用いた吹付けコンクリート中における急結剤の濃度分布 (その 1) —

Properties of shotcrete (6)

— Evaluation of Concentration of Accelerating agent in shotcrete using EPMA. —

荒木 昭 俊*・田 沢 雄 二 郎*・西 村 次 男*・魚 本 健 人*

Akitoshi, ARAKI, Yujiro TAZAWA, Tsugio NISHIMURA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

吹付けコンクリートの特徴は、コンクリートを圧縮空気で吹き飛ばし施工するのでリバウンドが必ず発生すること、急結剤を用いて初期に強度発現を促進させることである。このような施工形態であることから、得られる硬化コンクリートの品質にばらつきが大きく、吹付けコンクリートを永久構造物として位置付けるには信頼性に欠けるのが現状である。具体的には、コンクリートのフレッシュ性状、吹付け条件、それらに由来する施工性、急結剤との混合性、環境条件、人為的要因等多くの品質変動をもたらす因子が複雑に関与している。これまで、吹付けコンクリートに関する基礎的研究として、吹付け施工におけるリバウンドに関する解析的アプローチ^{1), 2)}や、コンクリートの配合条件が変化した場合の吹付け特性に関する実験的アプローチ^{3), 4)}を試みることで、吹付けコンクリートに関する基礎データを収集してきた。

本研究では、吹付けコンクリートの品質に大きく影響を及ぼす一要因と考えられる急結剤の混合性に着目した。吹付け施工における急結剤の添加方法は、空気搬送されてくるコンクリートに Y 字管を介して空気搬送される急結剤を粉体混合するのが一般的である。従って、配管内を流動するコンクリートの状態により急結剤の混合性が大きく影響されると考えられ、実際の吹付けコンクリート中の添加率や混合性を定量的に検討した例はない。よって、EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) を適用することで定量化の可能性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、研究用の普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、富士川産川砂 (密度 2.63 g/cm^3 , 粗粒率

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

2.99) をベースに市原産山砂 (密度 2.57 g/cm^3 , 粗粒率 2.32) で 15 vol % 置換したものを使用した。粗骨材は、両神産 6 号砕石 (最大寸法 13 mm, 密度 2.72 g/cm^3 , 粗粒率 6.56) を用いた。スランプ調整にポリエチレングリコール系高性能減水剤、空気量調整に非イオン系消泡剤を使用した。急結剤は、カルシウムアルミネート系急結剤を使用した。

2.2 吹付けコンクリート配合

Table 1 に吹付けコンクリート配合を示す。単位セメント量 360 kg/m^3 , 水セメント比 58.6%, 細骨材率 62% とし、急結剤添加率を 3 水準 (4%, 7%, 10%) とした。また、全ての配合においてスランプを $17 \pm 2 \text{ cm}$, 空気量を $2.0 \pm 1.0\%$ に統一した。

2.3 吹付け条件

Table 2 に吹付け条件を示す。吹付け条件は全ての配合において一定とした。

2.4 吹付け方法

吹付け方法は湿式吹付け方法を採用し、練り上がったコンクリートを吹付け機 (アリバー 280, 空気搬送方式) に投入後空気搬送し、配管途中に設けた Y 字管の一方から急結剤添加機 (ナトムクリート PAC-150) より空気搬送されてくる粉体急結剤を合流混合させ、吹付けコンクリートとして吹付けた。吹付け実験は、幅 9 m, 高さ 4.5 m の模擬トンネル内で実施した。

2.5 EPMA 測定

2.5.1 供試体の作成と測定条件

供試体の作成は、JSCE-F 561 に準じ採取したコンクリートブロック (横 60 cm, 縦 60 cm, 厚さ約 25 cm) から $\phi 10 \text{ cm}$ のコアドリルで吹付け面からコアを抜き取り、深さ方向に横 8 cm, 縦 6 cm, 厚さ 1 cm 程度になるように 3 等分しそれぞれ EPMA で測定した。測定条件は、加速電圧 15 kv, 電流 $5 \times 10^{-8} \text{ A}$, 電子ビーム径 $50 \mu\text{m}$ ϕ とし、測定元素はアルミニウムとカルシウムである。

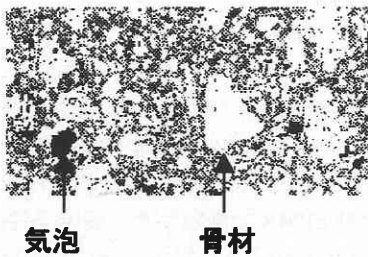
Table 1 Mix proportion of shotcrete

Slump (cm)	Air content (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit content(kg/m ³)				AA (C × %)
				Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	
17±2	2.0±1.0	58.6	62	211	360	1065	677	4
								7
								10

AA: Accelerating agent

2.5.2 急結剤濃度及び混合状態の評価方法

EPMA 測定では、硬化コンクリートに電子線を照射したときに発生する元素特有の X 線を検出することで元素分析が可能であることと、元素の X 線強度の強弱は元素濃度と相関があり、カラーマッピング画像として元素濃度分布を映し出すことが可能である。本実験に使用した急結剤はアルミニウムが豊富な物質で構成されていることから、急結剤がコンクリートに混合されると、そうでないコンクリートに比べアルミニウムの X 線強度が強くなる。但し骨材及びセメント中にもアルミニウムが存在することから、単純にアルミニウムのマッピング画像で比較することは困難である。そこで、骨材中にカルシウムがほとんど含有しないことに着目し、アルミニウムとカルシウムの X 線強度比（以下 Al/Ca 比と述べる）でマッピングすることで骨材部分はカルシウムとアルミニウムの X 線強度差が非常に大きいことから極端に高い Al/Ca 比となり、この領域を白色に指定すればセメント水和物中における各 Al/Ca 比の大小により色別されたカラーマッピング画像を出力することができる。よって、画像処理により Al/Ca 比別に面積を測定し、各面積割合を求めれば、ある面領域における Al/Ca 比占有割合を求めることが可能である。すなわち、Al/Ca 比が大きい程急結剤濃度が高いことを意味し、面領域における Al/Ca 比のばらつきを求めれば急結剤の混合状態を評価することができる。scheme. 1 に Al/Ca 比でマッピングすることで骨材部分が白色になった画像を示す。尚、濃黒色部分は大きな気泡である。それ以



Scheme 1 Mapping picture of Al/Ca

Table 2 Shotcreting condition

	Shotcreting conditions
Nozzle work	Manual operation (without using robot)
Rate of concrete	4m ³ /hr
Air pressure for pipe line(concrete)	0.39~0.44MPa
Air pressure for pipe line(accelerating agent)	0.44~0.49MPa
Mixing position of accelerating agent	3.1m from outlet nozzle
Diameter of pipe	50mm
Total length of pipe	23.6m

外の部分が水和物中において Al/Ca 比でカラーマッピングされている部分である。

3. 実験結果及び考察

急結剤添加率別に Al/Ca 比のマッピング処理を行い、各 Al/Ca 比が占有する割合を求め Fig. 2 に累積 Al/Ca 比占

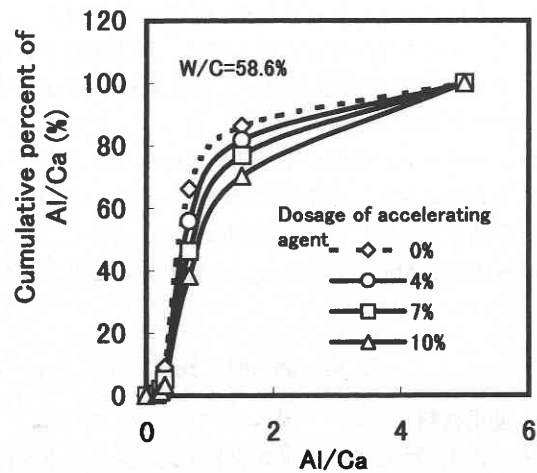


Fig. 1 Relationship between Al/Ca and cumulative percent of Al/Ca

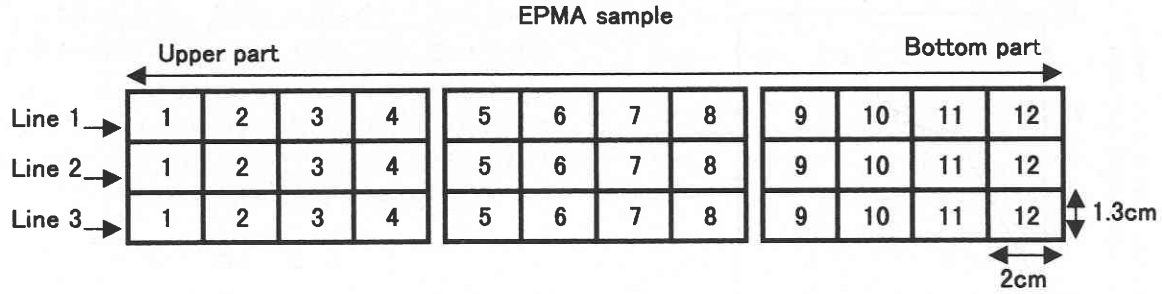


Fig. 2 Evaluation of dispersion on accelerating agent concentration

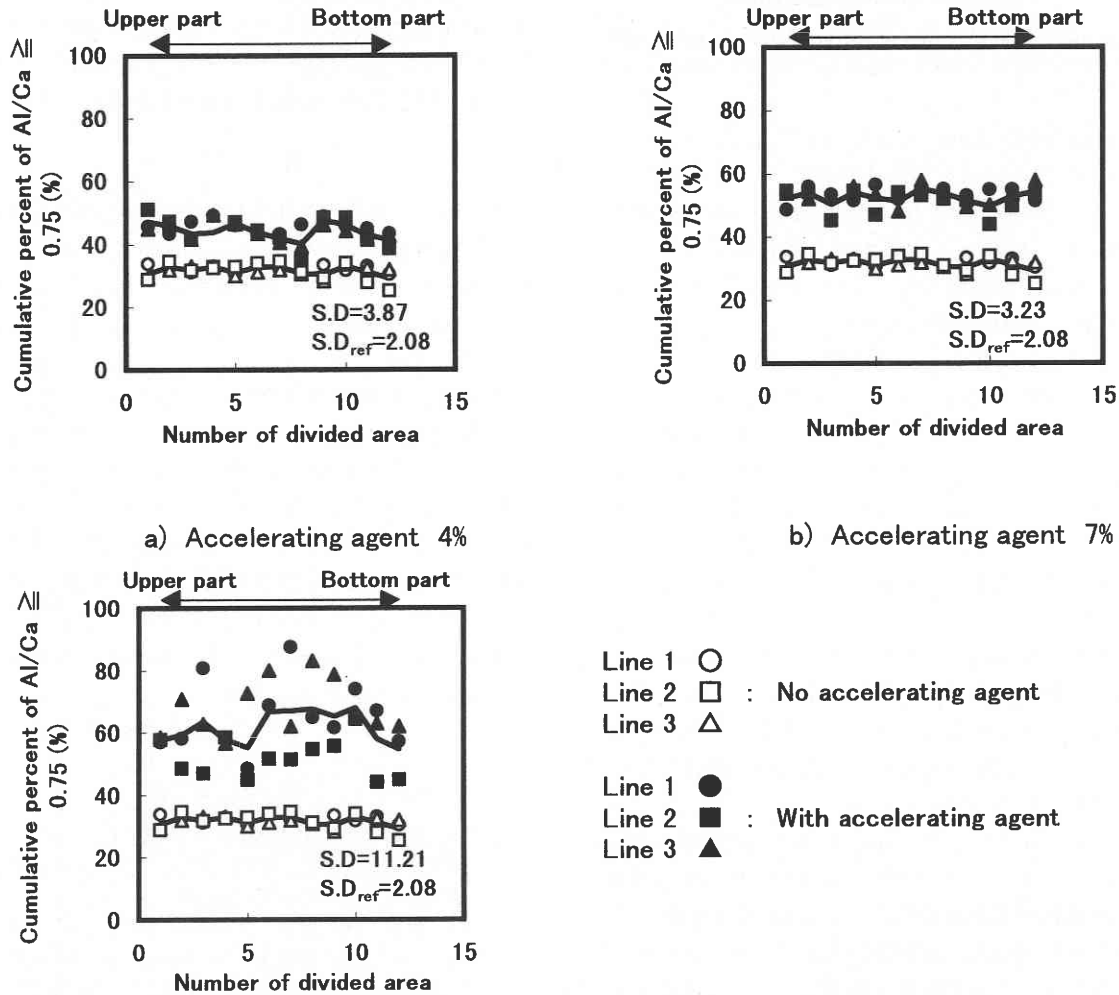


Fig. 3 Relationships between number of divided area and cumulative percent of Al/Ca ≥ 0.75

有割合曲線として示した。

Al/Ca 比が大きくなることはセメントに対する急結剤濃度が高くなることを意味し、急結剤添加率が増加すると急結剤未添加コンクリートに対し、低い累積 Al/Ca 比占有割合が小さくなることから、硬化コンクリート中における高い急結剤濃度領域が増加していることを示唆している。

また、急結剤は流動中のコンクリートに粉体混合されるが、Al/Ca 比の占有割合のばらつきを定量化すれば急結剤の分布状態を評価することができる。そこで、急結剤が添加されると未添加のコンクリートに比べ 0.75 以上の Al/Ca 比占有割合が増加している傾向が顕著に見られることから、Fig. 2 に示すように試料全体のマッピング画像を 36 分割

研究速報

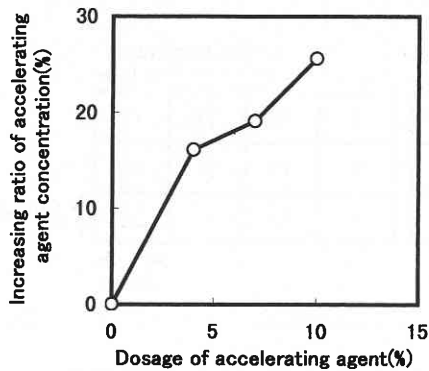


Fig. 4 Relationship between dosage of accelerating agent and increasing ratio of accelerating agent concentration

(深さ方向で12分割×3列)し、各領域でAl/Ca比が0.75以上となる占有割合のばらつきを評価した。その結果をFig. 3に示す。図中に、各急結剤添加率での標準偏差(S.D.)も示した。同様に、比較のために急結剤未添加コンクリートについても評価した。また、図中の実線は、1～12まで分割した領域における系列1～3の平均値を結んだものである。Fig. 3より、急結剤未添加のコンクリートに比較して急結剤添加率が4%、7%では、同程度のばらつきを示し、10%になると大きくばらつき、急結剤添加率が高くなると不均一化しやすいことを示唆している。これは、急結剤がコンクリートと合流する位置からノズル先端まで3.1mと短く、急結剤添加率が高くなると混合されない急結剤単体が吐出する割合が高くなる。従って、吹付け面に急結剤が混合したコンクリートが付着する一方で、急結剤単体が付着したりすることもあり、ノズルからの吐出状態の変動が影響していると考えられる。尚、深さ方向によるばらつきに顕著な差は認められなかった。これは、コンクリートが比較的連続的な流動状態を維持しながら吐出されていたためと考えられる。

Fig. 4は、Al/Ca比が0.75～5.0までの領域において、急結剤未添加コンクリートと比較して増加した累積Al/Ca比占有割合を急結剤濃度増加割合として急結剤添加機の急結剤減少量から算出した急結剤添加率とプロットしたものである。その結果、急結剤添加率が増加するとほぼ直線的に急結剤濃度の増加割合が大きくなっており、急結剤添加率と吹付けコンクリート中の急結剤濃度には相関性が認められる。よって、EPMAにより吹付けコンクリート中の急結剤濃度を把握することで実際の硬化コンクリート中の急結剤添加率を推定できる可能性が十分にあると考えられる。

標準試料として急結剤未添加モルタル又はコンクリートと同程度のばらつきを示す各添加率の急結剤添加コンクリ

ートを作成し、急結剤添加率とAl/Ca比の関係をより明確化すれば、実際に吹付けられたコンクリート中の急結剤添加率を推定することが可能と考えられる。また、吹付けコンクリート中の急結剤濃度のばらつきを定量化すれば、急結剤の混合状態が耐久性等の品質に与える影響を明らかにすることが可能と考えられる。

4. ま と め

本研究の結果、以下のことが明らかとなった。

EPMAを用いて吹付けコンクリートの面分析を行った結果、Al/Ca比によるマッピング処理を行うことで急結剤濃度及び分布状態を評価することができ、吹付けコンクリート中における急結剤添加率の推定が可能と考えられる。

謝 辞

本実験は、東京大学生産技術研究所における平成9年度『高品質吹付けコンクリートの開発』を目的とした共同研究による成果であり、共同研究員である(株)青木建設 酒井芳文氏、(株)大林組 田湯正孝氏、(株)熊谷組 岡田喬氏、佐藤工業(株) 伊東良浩氏、清水建設(株) 浅野篤氏、大成建設(株) 坂本淳氏、(株)竹中土木 安藤慎一郎氏、電気化学工業(株) 笹川幸男氏、飛鳥建設(株) 平間昭信氏、西松建設(株) 松井健一氏、(株)間 杉山律氏、前田建設工業(株) 赤坂雄司氏、協力会社として御協力頂いた富士物産(株) 阿部隆夫氏、(株)北川鉄工所 見浦光夫氏、吹付け実験に参加された多くの方々、また、EPMA測定に御協力して頂いた電気化学工業(株) 石橋孝氏、二階堂泰之氏、南雲敏朗氏、稲場徹氏に感謝の意を表します。

(1998年7月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 牧, 魚本: 吹付けコンクリートの施工シミュレーションに関する基礎的研究, 第51回土木学会年次学術講演概要集, 第5部門, pp. 480-481, 1996.9.
- 2) 牧, 魚本: 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究(2) ——個別要素法を用いた吹付け時のリバウンド推定の試み——, 生産研究, 第49巻7号, pp. 24-27, 1997.7.
- 3) 荒木, 平間, 伊東, 西村, 魚本: 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究(4) ——各種配合要因の変化が吹付けコンクリートのフレッシュ及びリバウンド特性に与える影響——, 生産研究, 第50巻4号, pp. 182-185, 1998.4.
- 4) 小林, 笹川, 酒井, 西村, 魚本: 吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究(5) ——各種配合要因の変化が強度特性及び空隙特性に及ぼす影響——, 生産研究, 第50巻5号, pp. 207-210, 1998.5.