

論文 吹付けコンクリート中の急結剤濃度に関する研究

荒木 昭俊*1・安藤 慎一郎*2・西村 次男*3・魚本 健人*4

要旨: 4種類の急結剤(粉体系2種類、液体系2種類)を使用した吹付けコンクリート中の急結剤の濃度と分散状態を電子線プローブマイクロアナライザー(EPMA)を用いた表面分析で評価した。各種急結剤の添加率を変化させることで算出した急結剤濃度と急結剤添加率の関係には高い相関が認められ、急結剤の種類によらず吹付けコンクリート中の急結剤添加率を推定できた。また、吹付けコンクリート中の分散状態を評価した結果、粉体系急結剤に比べ液体系急結剤の方が均一な分散性を示した。

キーワード: 吹付けコンクリート, 急結剤, 濃度, 分散, EPMA

1. はじめに

吹付けコンクリートは地山の崩落を早期に防止するための一次ライニング材として使用されている。しかし、圧縮空気を用いてコンクリートを吹き飛ばし、その過程において急結剤を合流混合させて施工することから、打設コンクリートに比べて得られる構造物の品質にばらつきが生じる。その品質のばらつきに大きく影響する要因の1つは、コンクリートの配合条件や吹付け条件の変動によって生じる不連続なコンクリート(粘性の大きいコンクリートを圧送したり、圧縮空気の流量や圧力が不適切な場合に起こり、ノズル先端から連続的に吐出されていないコンクリート)が吐出されることにある。このような状況で施工された吹付けコンクリートでは、急結剤が一定に添加されず高濃度で局在化する部分が発生し、リバウンド、硬化した吹付けコンクリート中の空隙、及び強度等の性状に大きく作用するものと考えられる。これまでに、カルシウムアルミネート系粉体急結剤を使用した吹付けコンクリート中の急結剤濃度を推定する手段を検討した結果、EPMAを用いてコンクリート表面の面分析を行うことで急結剤濃

度を推定できることを明らかにした¹⁾。そして、不連続なコンクリートで施工した吹付けコンクリートでは、高濃度で急結剤が局在化している部分があることを見出した²⁾。

本研究では、各種急結剤を用いた吹付けコンクリートへのEPMAによる評価方法の適用性と急結剤の分散性について検討した。

2. 実験概要

2.1 標準供試体の作製

標準供試体はEPMAにより急結剤濃度を算出し、吹付けコンクリート中の急結剤添加率を定量的に推定するために作製した硬化モルタルである。

(1) 使用材料

細骨材は新潟県姫川産川砂(密度 2.62g/cm^3)を使用した。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)を使用した。急結剤はカルシウムアルミネート系粉体急結剤(P1)、カルシウムサルフォアルミネート系粉体急結剤(P2)、水溶性アルミニウム化合物系液体急結剤(L1)、アルミン酸塩系液体急結剤(L2)を使用した。尚、L1はアルカリフリー急結剤である。凝結遅

*1 電気化学工業株式会社 青海工場 セメント特殊混和材研究所 工修(正会員)

*2 株式会社竹中土木 技術本部技術部 (正会員)

*3 東京大学生産技術研究所 (正会員)

*4 東京大学国際・産学共同研究センター 工博(正会員)

表-1 モルタル配合

急結剤の種類	W/C (%)	単位置量(kg/m ³)			急結剤 (C×%)	遅延剤 (C×%)
		W	C	S		
未添加					0	0
P1	50	255	510	1529	5	0.1
					10	0.3
					20	0.5
					5	0.1
P2	50	255	510	1529	10	0.3
					20	0.5
					30	0.6
					2	0
L1	50	255	510	1529	10	0.1
					20	0.3
					2	0.1
					5	0.3
L2	50	255	510	1529	10	0.3
					20	0.5

高性能AE減水剤は(C×0.5%)

延剤は、練混ぜ時間を確保することで急結剤を均一に分散させるために市販のクエン酸を使用した。高性能 AE 減水剤はモルタルの流動性を確保するためにポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。

(2) 配合

モルタルの配合を表-1 に示す。モルタルはすべて 1 : 3 モルタル (セメント : 細骨材=1 : 3) とした。

(3) 練混ぜ及び養生方法

モルタルの練混ぜは十分な急結剤の分散及び型枠に充填できる作業時間を確保するために以下のように行った。粉体系急結剤を使用する時は表面水 4.1% の砂に、予め急結剤を所定量混合したセメントを加え、モルタルミキサーで 30 秒空練りし、高性能 AE 減水剤及び凝結遅延剤を溶解させた水を加え 60 秒間練混ぜた。液体系急結剤を使用する時は、セメントを加え 30 秒空練りし、高性能 AE 減水剤及び凝結遅延剤を溶解させた水を加え 60 秒間練混ぜた後、液体急結剤を加えてさらに 60 秒間練混ぜた。いずれも練混ぜ量は 1 リットルとし、4×4×16cm の三連型枠に流し込み成型した。1 日後脱型して温度 20℃、湿度 60% の恒温恒湿室で気中養生した。

(4) EPMA 測定用供試体の作製

材齢 28 日後、上記(3)で得られた供試体を、厚さ 1cm になるようにコンクリートカッターで切断した。得られた縦 4cm×横 4cm×厚さ 1cm

表-2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位置量(kg/m ³)			
		C	W	S	G
45.6	58.2	450	205	960	703

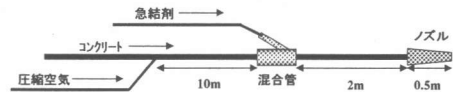
スラブ: 21±2.5cm

空気量: 2.0±1.5%

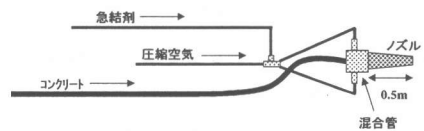
表-3 実験要因

No.	急結剤の種類	添加率 (C×%)
1	P1	0
2		3.5
3		5.0
4		6.5
5	P2	0
6		7.0
7		10.0
8		13.0
9	L1	0
10		6.3
11		9.0
12		11.7
13	L2	0
14		5.0

(P1, P2を添加する場合)



(L1を添加する場合)



(L2を添加する場合)

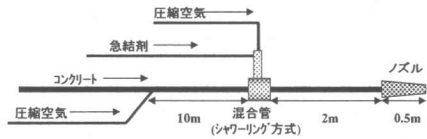


図-1 急結剤混合方式

の供試体の測定面を鏡面研磨後カーボン蒸着して EPMA 測定に使用した。

2.2 吹付け実験

(1) 吹付けコンクリートの採取

評価に使用した吹付けコンクリートは、縦 60cm×横 60cm×厚さ 25cm の木製箱型枠に採取した。コンクリートの製造に使用した材料は、セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材

は千葉県君津産山砂(密度 2.62g/cm^3), 粗骨材は東京都八王子産 6 号碎石(密度 2.68g/cm^3), 流動性の調整にポリグリコールエステル系高性能 AE 減水剤, 空気量の調整に消泡剤, 急結剤は 2.1 (1)に記載した材料を使用した。コンクリートの練混ぜは 0.5m^3 二軸強制練りミキサーで行った。コンクリートの基本配合を表-2 に示す。実験要因は急結剤の種類とし表-3 に示すように添加率を変動させて吹付けコンクリートを採取した。吹付け条件は, コンクリート吐出量が $8\text{m}^3/\text{hr}$, 吹付け圧力, 圧縮空気の流量は最適と考えられる条件に設定した。吹付け機はピストンポンプ方式を採用し, 内径 65mm の配管でコンクリートを圧送した。各急結剤の合流混合方式を図-1 に示す。P1, P2 及び L2 を添加する時は, ピストンポンプのコンクリート吐出口と混合管までの圧送距離を 26m (ポンプ圧送区間 16m, 空気搬送区間 10m) とし, L2 を添加する時の混合管は, シャワー状に急結剤が添加されるように孔を設けた二重管構造の混合管である。L1 を添加する時は, ピストンポンプのコンクリート吐出口と混合管までのポンプ圧送距離を 26m とし, ノズル手前に L2 と同様な二重管構造の混合管を接続した。

(2) EPMA 測定用供試体の作製

箱型枠に採取したコンクリートブロックから吹付け面に対して垂直方向に $\phi 7.5\text{cm}$ の円柱状供試体(長さ: 約 25cm)を抜き取り, コンクリートカッターで 3 等分に切断する。次に, 縦 $4\text{cm} \times$ 横 $8\text{cm} \times$ 厚さ 1cm 程度になるようにそれぞれ成型し, 測定面を鏡面研磨後カーボン蒸着して EPMA 測定に使用した。

2.3 EPMA 測定

測定装置は日本電子社製 JCSA-733 型を使用した。測定条件は, 加速電圧: 15KV , 加速電流: $5 \times 10^{-8}\text{A}$, 電子ビーム径: $50\mu\text{m}$ とした。測定元素はアルミニウムとカルシウムとした。これらの X 線強度は, データ処理プログラムによって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。)によるマッピング画像

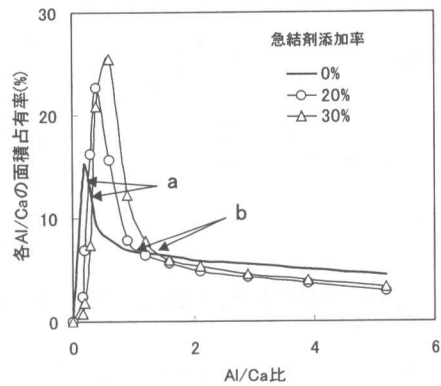


図-2 P2 を添加した標準供試体の Al/Ca 比分布曲線

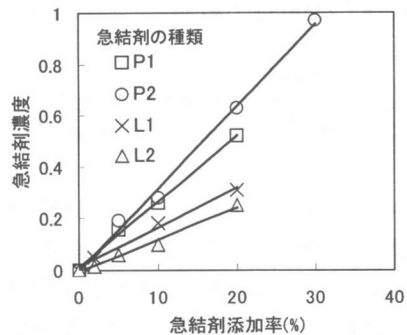


図-3 急結剤添加率と急結剤濃度の関係

に変換した。

3. 結果と考察

3.1 各種急結剤に対する EPMA の適用性

EPMA 測定で得られるマッピング画像は Al/Ca 比の相違によって色別された画像であり, 各 Al/Ca 比毎の面積占有率を求めることで図-2 に示すような分布曲線が得られる。急結剤を添加しないモルタルの分布曲線に比べ急結剤を添加したモルタルは, 添加率の増加に伴い分布曲線が高い Al/Ca 比側へシフトしていることが確認できる。つまり, 急結剤にはアルミニウムがセメントより豊富に含有ことから, 添加率の増加で高い Al/Ca 比側の面積占有率が増加するためである。従って, 式(1)によって算出される値

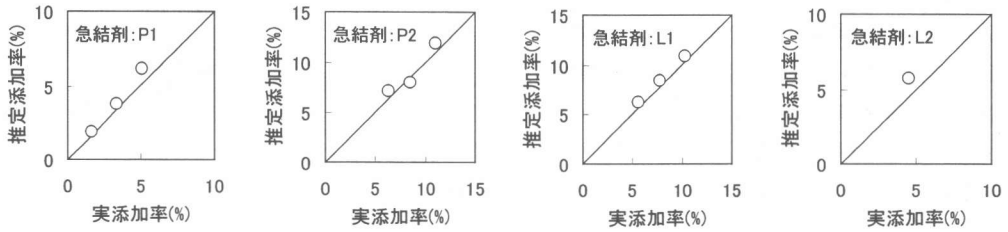


図-4 各急結剤を添加した吹付けコンクリートの実添加率と推定添加率の関係

が急結剤濃度に相当する。(図-2 中の a 及び b は、急結剤を添加しないモルタルと急結剤を添加したモルタルの分布曲線が交差する交点である。)

$$C_{AA} = \int_a^b f(AA) - \int_a^b f(B) \quad (1)$$

C_{AA} :急結剤濃度

$f(AA)$:急結剤添加モルタルの分布関数

$f(B)$:急結剤未添加モルタルの分布関数

以上のような算出方法によって、各急結剤を用いた標準供試体について急結剤濃度を求め添加率との関係を図-3 に示した。4 種類の急結剤共に急結剤添加率と急結剤濃度の関係には高い相関が認められた。急結剤の種類で比較すると、 $P2 > P1 > L1 > L2$ の順に増加傾向が大きくなっている。これは、各急結剤中のアルミニウム含有量の多い順を示唆するものである。また、液体急結剤 (L1, L2) は粉体急結剤 (P1, P2) に比べ増加傾向に差が認められる。液体急結剤の場合、水に有効な急結成分を溶解させたものを添加するため、吹付けコンクリートに固定化されるアルミニウムの量は、同じ添加率でも粉体急結剤に比べ少なくなるためである。以上のことより、急結剤添加率と急結剤濃度は高い相関関係が認められ、急結剤の種類によらず EPMA によって急結剤添加率を推定することが可能である。

3.2 吹付けコンクリート中の急結剤添加率の推定

3.1 の標準供試体を用いて求めた急結剤添加率と急結剤濃度の関係より、実際に吹付けて採

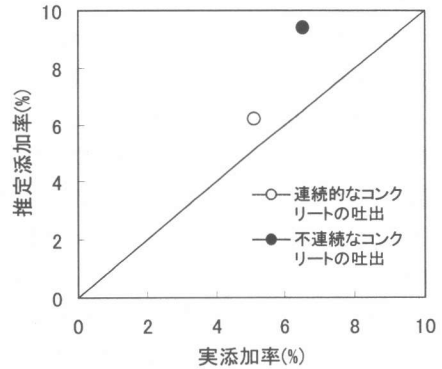


図-5 コンクリートの吐出状態が推定添加率に与える影響

取したコンクリート中の急結剤添加率を推定した。推定した急結剤添加率は、吹付け面に対して垂直方向(深さ方向)にコアリングして得られた EPMA 測定用供試体(上部、中部、下部)の算出した急結剤濃度から推定した平均添加率である。結果を図-4 に示す。いずれの急結剤を使用したときも急結剤添加機の質量減少量から算出した実添加率より、推定添加率の方が若干高い値を示しているが概ね一致している。コンクリートとの混合性が悪ければ、急結剤のみが空气中に飛散する割合が多くなり、吹付けコンクリート中の急結剤添加率は実添加率よりも小さくなると考えられる。図-4 に示す結果から、そのような傾向が確認されなかったことは、極端に悪い混合状態の吹付けではなかったと推察される。若干高い推定添加率を示したことについて考察すると、図-5 は、吹付け圧力を低下させて不連続なコンクリートの吐出状態とそうで

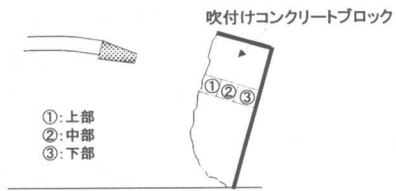
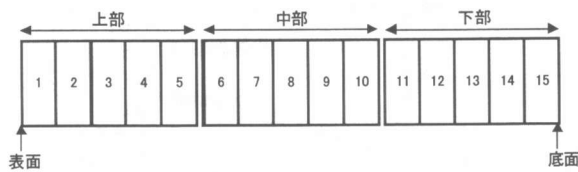


図-6 分散性の評価方法（供試体面の分割領域と吹付け方向）

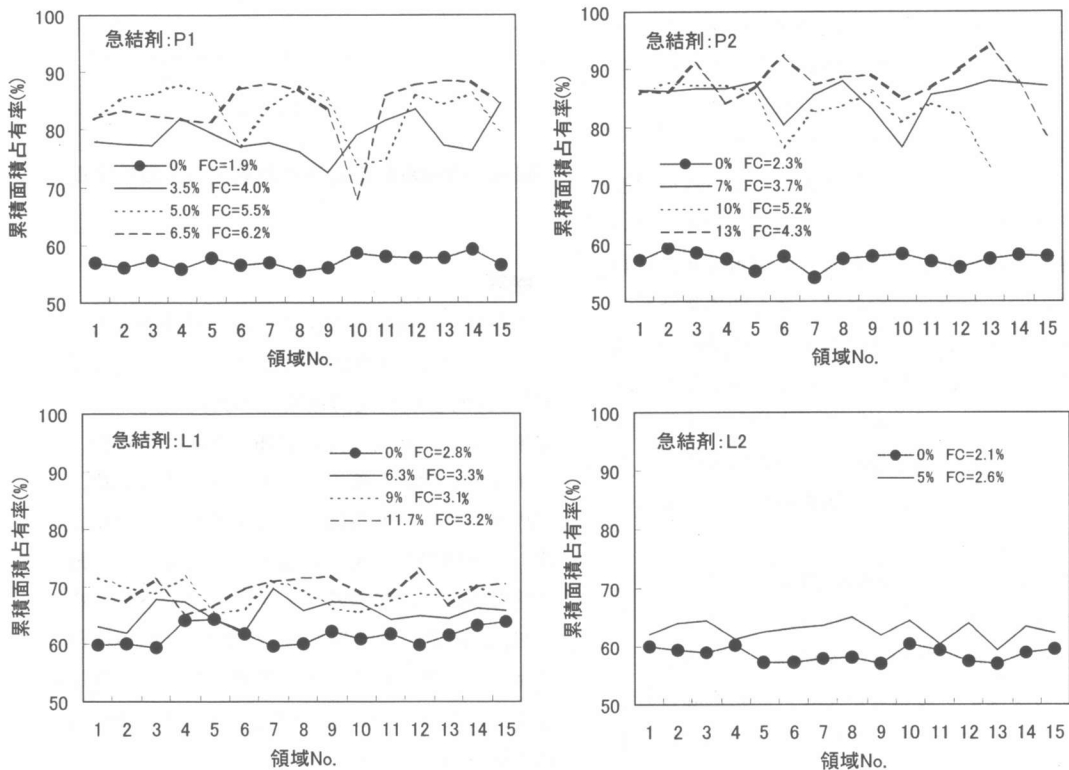


図-7 各急結剤を添加した吹付けコンクリート中の分散状態

ない吐出状態で吹付けて得られた供試体の実添加率と推定添加率の関係を比較したものである。不連続なコンクリートでは、急結剤濃度が部分的に高濃度で局在化するために平均化されて算出される推定添加率は高い値を示している。これは、高濃度で局在化した領域が多くなるほど実添加率に対する推定添加率は大きく算出される可能性が高くなるからである。従って、本実験では、最適な吹付け条件（吹付け圧力、圧縮空気の流量）を選定して実施したが、完全に連続した状態でコンクリートは圧送されていない

ことを示唆するものである。

3.3 急結剤の分散性

我々は、不連続なコンクリートの吐出で施工された吹付けコンクリート中では急結剤が高濃度で局在化することを既に見出している。本研究では、連続的なコンクリートの吐出で施工された吹付けコンクリートを前提に、粉体急結剤と液体急結剤の分散性の違いを評価することを試みた。分散性の評価方法は、図-6に示すように深さ方向に3等分された供試体面（上部、中部、下部）をそれぞれ5分割し、全部で15領域

について Al/Ca 比分布曲線を描き、図-2 で示したように急結剤未添加コンクリートと急結剤添加コンクリートの分布曲線の交点 a~b までの累積面積占有率で評価した。図-7 には、急結剤未添加コンクリートと急結剤を添加した吹付けコンクリートの累積面積占有率を深さ方向で評価した結果を示す。図中には、各添加率における累積面積占有率のばらつきを変動係数(FC)で示した。これら 4 種類の急結剤を使用した吹付けコンクリートの変動係数は、急結剤を添加しないベースコンクリートのそれよりも大きく、アルミニウム含有量にばらつきが生じていることを示し、ばらつきの程度によって急結剤濃度が不均一化していることを示唆している。図-8 には、各急結剤添加率と累積面積占有率の変動係数の関係を示し、粉体急結剤と液体急結剤の分散性を評価した。その結果、粉体急結剤に比べ液体急結剤の変動係数が小さくなることを確認できる。従って、本研究で実施した吹付け条件においては、液体急結剤の方が吹付けコンクリート中で均一な分散状態を形成していると考えられる。

以上のことから、EPMA はアルミニウムを含有する急結剤を使用した吹付けコンクリート中の急結剤濃度及び分散性を粉体及び液体急結剤によらず推定することができ、急結剤混合方法や吹付け条件の適切な選定を行うための評価手段として有用である。

4. まとめ

(1) 4 種類の急結剤を用いて EPMA の適用性を評価した結果、いずれの急結剤に対しても急結剤濃度と急結剤添加率の関係には高い相関が認められた。従って、アルミニウムを含有する急結剤を使用した吹付けモルタルやコンクリートであれば、EPMA によって急結剤添加率の推定が可能である。

(2) 粉体急結剤と液体急結剤の吹付けコンクリート中での分散性を評価した結果、液体急結剤を使用した方が均一な分散性を示した。

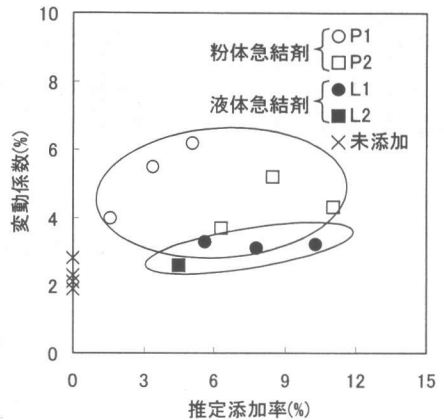


図-8 粉体急結剤と液体急結剤の分散性比較

謝辞

本研究は、東京大学国際・産学共同研究センターにおける「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とした民間企業との共同研究による成果であり、共同研究に参加した(株)青木建設、(株)ポゾリス物産、(株)エムエムビー、(株)大林組、鹿島建設(株)、(株)熊谷組、佐藤工業(株)、清水建設(株)、大成建設(株)、東急建設(株)、戸田建設(株)、飛島建設(株)、西松建設(株)、太平洋セメント(株)、(株)間組、前田建設工業(株)の方々、東京大学 魚本研究室の受託研究員の方々、協力会社として参加して頂いた富士物産(株)、(株)北川鉄工所、(株)東京測器研究所、(株)ブリジストンの方々、元芝浦工業大学卒論生の方々、実験や EPMA 測定に御協力して頂いた電気化学工業(株)の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 荒木昭俊, 田沢雄二郎, 西村次男, 魚本健人: EPMA を用いた吹付けコンクリート中の急結剤濃度分布の評価, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.248-255, 1998
- 2) 荒木昭俊, 石関嘉一, 西村次男, 魚本健人: 吹付けコンクリート中の急結剤濃度分布, コンクリート工学年次論文集, Vol.2, No.2, pp.1381-1386, 1999