

論文 吹付けコンクリート中の急結剤濃度分布

荒木昭俊*¹・石関嘉一*²・西村次男*³・魚本健人*⁴

要旨 : EPMA を使用して吹付けコンクリート中の急結剤濃度分布及び急結剤添加率を定量することを目的に検討した。その結果, 均一に急結剤を混合したモルタル供試体を作製し, 急結剤添加率と急結剤濃度の関係を明らかにすることで, より定量的に吹付けコンクリート中の急結剤添加率を推定することが可能である。また, コンクリートの吐出性能が急結剤濃度分布の変動に大きく寄与し, 配管の脈動状態が悪くなる吹付け条件での施工は, 高濃度で急結剤が局在化する領域が吹付けコンクリート中に発生することが認められた。

キーワード: 吹付けコンクリート, 急結剤, EPMA, 濃度, 変動係数

1. はじめに

吹付けコンクリートの特徴は, 急結剤を合流混合させてコンクリートを圧縮空気吹き飛ばす施工形態のため, コンクリートの配合や材料条件, システム設定条件, 及び環境条件の影響を敏感に受けやすく, リバウンド, 粉塵, コンクリートの圧送性といった施工性や硬化体品質に大きな影響を及ぼすと考えられる。当研究室では, 経験的な知見を数値化し, より理論的に吹付けメカニズムを解明することを目的に種々実験的及び解析的検討を進めている。¹⁾ その結果, コンクリート配合や施工条件が敏感にコンクリートの吐出状態の変化に反映され, 硬化体品質に影響を及ぼしていることがわかった。コンクリートの吐出性能が変化すれば, 定量的なコンクリートの輸送がなされないことから, コンクリートと急結剤の混合性に変化が生じる。従って, 急結剤添加量が硬化コンクリート中でばらつき, 耐久性や強度特性に影響を与えている可能性があり, 吹付けコンクリート中の急結剤分布を定量的に把握することが重要と考えられる。

これまで, EPMA を用いた急結剤濃度の推定方法及びその分布状態を評価できることを報告している。²⁾ そこで, 本研究ではより定量的に急結剤濃度と急結剤添加率の関係を明確にし, 吹付け条件を変動させたときの吹付けコンクリートの急結剤濃度分布を評価することを目的に検討した。

2. 実験概要

2.1 モルタル供試体

モルタル供試体は, EPMA により吹付けコンクリート中の急結剤添加率を定量的に評価するために作製した標準供試体である。

(1) 使用材料

砂は, 富士川産川砂 (比重 $2.63\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率 2.99) を使用した。セメントは太平洋セメント社 (旧日本セメント社) 製普通ポルトランドセメント (密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 、研究用) を使用した。急結剤は, 電気化学工業社製カルシウムアルミネート系急結剤を使用した。凝結遅延剤は練混ぜ時間及び流し込み時間を確保するために市販のクエン酸を使用した。高性能減水剤は

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

*2 (株) 熊谷組 技術研究所 建設材料グループ

*3 東京大学 生産技術研究所技術官 (正会員)

*4 東京大学 国際・産学共同研究センター教授 工博 (正会員)

表-1 モルタル配合

W/C (%)	単位量(kg/m ³)			急結剤 (C×%)	遅延剤 (C×%)	SP (C×%)
	W	C	S			
50	256	511	1533	0	0	0.5
				5	0.1	
				10	0.3	
				20	1	

砂は、表面水率を3.8%に調整し使用した。
SPは高性能減水剤

モルタルの流動性を確保するためにエヌエムピー社製ポリカルボン酸系高性能減水剤を使用した。

(2) モルタル配合

モルタル配合を表-1 に示す。モルタルはすべて 1/3 モルタルとし、練混ぜ直後のモルタルフローは 200~300mm に調整した。

(3) 練混ぜ方法

モルタルの練混ぜは、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。表面水 3.8%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、高性能減水剤、凝結遅延剤を溶解させた水を加え所定時間練混ぜた。練混ぜ量は 1 リットルとした。得られたモルタルを φ5×10cm の型枠に流し込み成形した。

(4) EPMA 用供試体の作製

(3) で得られた供試体を材齢 28 日後に、厚さ 1cm×縦 8cm×横 4cm にコンクリートカッターで成形し、測定面を研磨後カーボン蒸着して EPMA 測定に使用した。

2.2 吹付けコンクリート

本論文で評価した実験要因と水準を表-2 に示す。実験要因は、コンクリートの吐出性能が変化すると考えられる圧送圧力、急結剤添加位置、及び CON 吐出量を選定した。ここでの圧送圧力とは、コンクリートを空気搬送するときの圧縮空気の圧力、急結剤添加位置とは、Y 字管とノズル先端までの長さ、CON 吐出量とは、吹付け機で設定するコンクリートの吐出量である。吹付け実験は空気圧送方式の吹付け機 (アパー 280) に練混ぜたコンクリートを投入圧送

表-2 実験要因と水準

実験要因	実験水準
圧送圧力	0.3MPa
	0.4MPa
	0.5MPa
急結剤添加位置	1.6m
	2.6m
	4.6m
CON吐出量	4m ³ /hr
	8m ³ /hr
	10m ³ /hr
: 基準条件	

し、配管途中に設けた Y 字管の一方から急結剤を合流混合させ吹付けた。

2.3 EPMA 測定

(1) 供試体の作製

箱型枠 (縦 60cm×横 60cm×厚さ 25cm) に採取したコンクリートブロックから φ10×約 25cm の円柱供試体を抜き取り、約縦 25cm×横 4cm×厚さ 1cm の板状になるように成形し、深さ方向に約横 8cm×縦 4cm×厚さ 1cm になるように切断した。それらの測定面を研磨後、カーボン蒸着を行い測定に使用した。

(2) 測定条件

測定装置は、日本電子社製 (JCXA-733 型) を用いた。測定条件は、加速電圧 15kv、加速電流 5×10⁻⁸A、電子ビーム径 50 μm φ とした。測定元素はアルミニウムとカルシウムとし、マッピング範囲は、縦 3cm×横 7cm 程度とした。

(3) データ解析方法

EPMA で測定したカルシウムとアルミニウムのマッピング画像をデンカマッピングデータ処理プログラム (EPMAWIN VER.3) で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に変換し、その画像について、面積率算出プログラムを用いて各強度比毎に色別された領域の面積率を求めることで評価した。

3. 結果と考察

3.1 Al/Ca 比による濃度分布

Al/Ca 比のマッピングによる急結剤濃度の評価は、アルミニウムを豊富に含む急結剤がセメントに混合されるとアルミニウムを含む水合生

成物が固定化されアルミニウムの X 線強度が強くなる。従って、急結剤添加率が増加すれば高い Al/Ca 比を示す面積率が增加することに着目している。図-1 に急結剤未添加モルタルと急結剤添加モルタルの各 Al/Ca 比が占める面積率を求め分布曲線として示した。これら分布曲線の特徴は、急結剤未添加モルタルの場合、Al/Ca 比が 0.75 で最大値を示し、急結剤添加モルタルでは、分布曲線の幅が広がり、Al/Ca 比の最大値が 0.75 以上へシフトし、高い Al/Ca 比の面積率が增加する傾向が認められる。よって、急結剤が混入されるとアルミニウム濃度が増加したことを示唆しており、図中に示す a~b の Al/Ca 比範囲で急結剤未添加モルタル及び急結剤添加モルタル分布曲線の積分値の差が急結剤濃度に相当すると考えられる。本論文では、急結剤未添加モルタル分布関数の積分値を 1 としたときの急結剤添加モルタル分布関数の積分値を求め式(1)で算出した。従って、求めた急結剤濃度と急結剤添加率の関係を把握すれば付着した吹付けコンクリート中の急結剤添加率を定量することが可能である。

ここに、

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

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

3.2 急結剤添加率の定量性

EPMA は面分析であるため、測定面に Al/Ca 比の分布曲線に大きなばらつきがあると定量誤差が大きくなる。従って、急結剤が均一に混合された標準供試体を作製する必要がある。本研究では、急結剤が均一に混合されるように練混ぜ時間と流動性を確保しているが、より定量性が高い急結剤添加率と急結剤濃度の関係を見出すために練混ぜ時間を変化させたときの均一性について検討した。図-2 には、練混ぜ時間を変化させたときの急結剤添加率と急結剤濃度のバラツキの関係を示した。ばらつきは、測定面

a:f(AA)とf(B)が交差するAl/Ca比
b:解析で最大となるAl/Ca比(6.5)

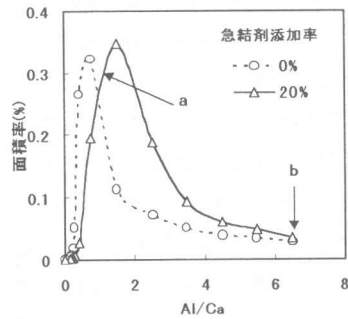


図-1 Al/Ca比の分布曲線

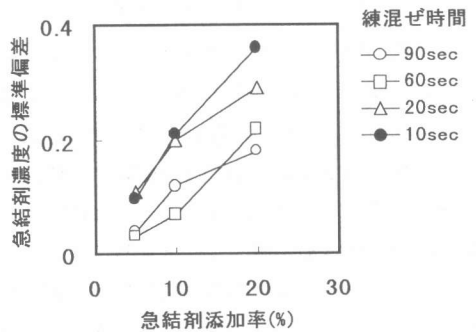


図-2 急結剤添加率と急結剤濃度の標準偏差の関係

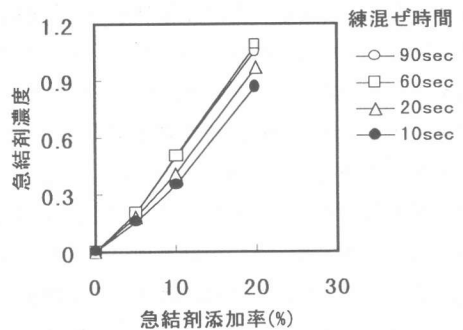


図-3 急結剤添加率と急結剤濃度の関係

(30mm×70mm) を 5 等分し、各領域の急結剤濃度を求め全体の標準偏差として示した。練混ぜ時間が長くなるとばらつきが小さくなり、また、急結剤添加率が高くなるほどばらつきが大きくなる傾向が認められた。これは、急結剤を混入したセメントを、表面水を含む砂で空練りする過程で、急結剤添加率が高いほど粒子表面部で水和反応が進行しやすいことから、空練

り中に急結剤成分どおしの凝集体を形成しやすくなったことが原因と考えられる。図-3には、練混ぜ時間によるばらつきが、急結剤添加率と急結剤濃度の関係に及ぼす影響を示した。その結果、練混ぜ時間が10秒及び20秒のときは、同じ急結剤添加率でも急結剤濃度が小さくなる傾向を示した。これは、標準供試体中のペースト部分をすべて化学分析等でアルミニウム含有率を求めることができるとすれば、変動の大小に関わらず同じ濃度として算出される。しかし、表面分析では、ある面を分析するので供試体内の別領域にアルミニウム成分が局在化してしまえば誤差が生じる。吹付けコンクリートでは、セメントに対し急結剤添加率が少ないので急結剤の混合が均一に行われないとセメントに含有するアルミニウムに由来するAl/Ca比に依存する確率が高くなるので、ばらつきが大きいと急結剤濃度は小さめの値として求まる。従って、吹付けコンクリート中の急結剤添加率の定量性を向上させるためには、できるだけ均一に急結剤を混合した標準供試体を作製する必要がある。本論文では、ばらつきが小さかった練混ぜ時間を60秒としたときの急結剤添加率と急結剤濃度の関係を用いて、吹付けコンクリート中の急結剤添加率の定量化を試みた。表-3には、EPMAで定量する場合の急結剤濃度範囲が示す急結剤添加率の誤差をまとめた。その結果、急結剤添加率が増加するとその変動も増加する傾向が認められた。従って、高い急結剤添加率ほど定量性は低下する。概ね、急結剤濃度が0.1増加するのは急結剤添加率が約2%増加した場合である。

3.3 吹付けコンクリートの急結剤濃度分布

(1) 圧送圧力による影響

図-5は、図-1から明らかのように急結剤濃度が増加すると高いAl/Ca比の面積率が増加することから、Al/Ca比が1.5以降の累積面積率を図-4に示すように深さ方向に分割した各々の領域で求め、全体の変動係数で急結剤の混合状態の良否を評価した。従って、急結剤濃度の

表-3 急結剤濃度範囲と急結剤添加率

急結剤濃度範囲	急結剤添加率 (%)	急結剤濃度範囲	急結剤添加率 (%)
~0.1	~3.7	0.5~0.6	12.1±2.4
0.1~0.2	3.7±1.7	0.6~0.7	13.8±3.0
0.2~0.3	6.0±1.8	0.7~0.8	15.6±3.4
0.3~0.4	8.0±2.0	0.8~	15.6~
0.4~0.5	9.9±2.3		

変動係数と同様に、急結剤濃度のばらつきを表す指標である。図中の変動係数 β_{base} は急結剤未添加コンクリートの変動係数である。また、選択した領域の急結剤濃度のばらつきが標準供試体と同等になるように設定し、吹付けコンクリート面における急結剤添加率を定量しその分布を模式的に示した。また、ロードセルにより吹付けで消費した急結剤量を測定することで急結剤実添加率を算出した結果も示す。その結果、圧送圧力が0.30MPaのときに極端に累積面積率の変動係数が大きくなる傾向が認められた。また、急結剤添加率分布の図から、極端に高い添加率(15.6%~)を示す領域が脈状に存在する箇所が認められた。

(2) 急結剤添加位置による影響

図-6は、急結剤添加位置を変化させたときの結果である。急結剤添加位置が1mのときに極端に累積面積率の変動係数が大きくなる傾向が認められた。また、急結剤添加率分布の図からも1mのときに最も急結剤添加率の局在化傾向が強い。

(3) CON吐出量の影響

図-7は、CON吐出量を変化させたときの結果である。吹付け圧力及び急結剤添加位置を変化させたときより累積面積率の変動係数の変化が小さいが、CON吐出量が小さくなるとその変動係数がやや大きくなる傾向が認められた。また、急結剤添加率分布の図から、4m³/hrのときに極端に高い添加率(15.6%~)で局在化している領域が認められた。10m³/hrのときは9.9%添加領域の占める割合が多く、他の供試体より全体的に急結剤添加率が高くなっている。これは、急結剤実添加率が他より4%以上高く混入されていたことが原因と考えられる。

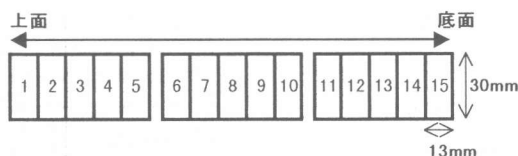


図-4 吹付けコンクリートにおける急結剤濃度分布を評価する方法

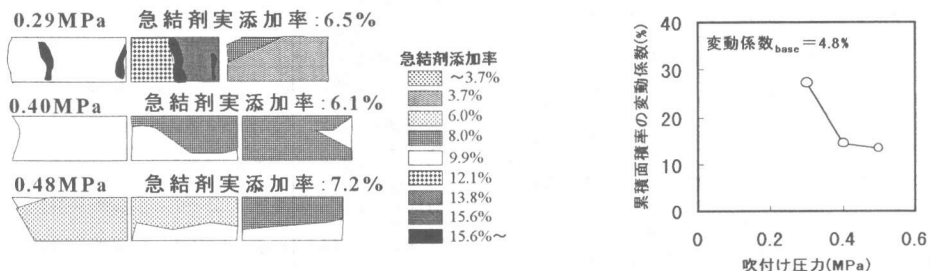


図-5 圧送圧力を変化させたときの急結剤添加率分布と累積面積率の変動係数

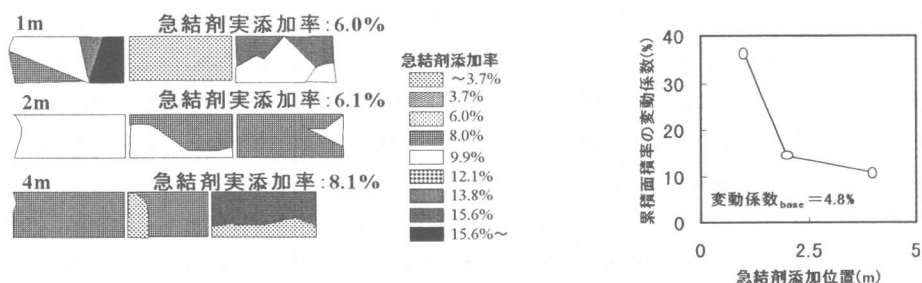


図-6 急結剤添加位置を変化させたときの急結剤添加率分布と累積面積率の変動係数

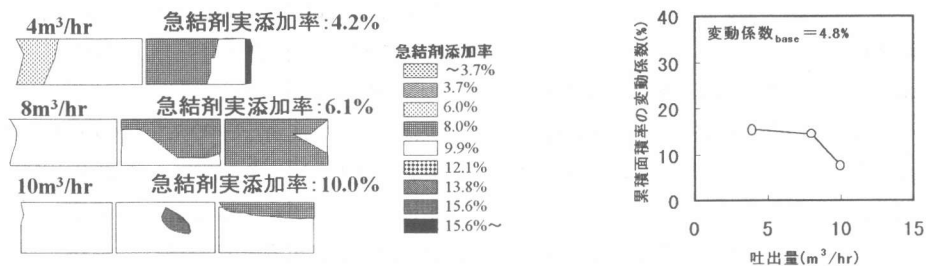


図-7 CON吐出量を変化させたときの急結剤添加率分布と累積面積率の変動係数

3.4 吹付け性状と急結剤濃度分布の関連

吹付け性状と吹付けコンクリート中の急結剤の混合状態は密接に関連しており、その関係について考察した。吹付け性状は、3人の目視による3段階評価とし、0.40MPaのときを基準(評価点2)とし、それに対し数字が小さい程状態が悪く、数字が大きい程状態が良いことを表す。結果を表-4に示す。また、それぞれの評価点での判定条件も示した。圧送圧力を

変化したときは、配管の脈動状態及び急結剤の混合状態は圧送圧力が低いほど悪くなり、それに伴い累積面積率の変動も大きくなる。これは、コンクリートの圧送性が悪くなり、連続的なコンクリートの吐出がなされないことに起因する。急結剤添加位置を変化させたときは、配管の脈動状態は添加位置が4.6mのとき最も悪く、また、そのときの急結剤の混合状態も悪い。しかし、累積面積率の変動係数は最も小さく、急結

剤濃度のばらつきが小さいことを示唆している。これは、ノズル先端から吐出した時の状態から付着した吹付けコンクリート中の急結剤の混合状態を評価することはできないことを示しており、吹付けコンクリート中の混合状態は、圧送性を無視すれば添加位置が長い方が良くなる。CON 吐出量を変化させたときは、 $10\text{m}^3/\text{hr}$ のときに配管の脈動状態が悪くなっているにも関わらず、急結剤添加率分布には、大きな変動は認められなかった。また、脈動が小さい $4\text{m}^3/\text{hr}$ のときに高い急結剤添加率で局在化した領域が認められた。これは、CON 吐出量が多いほど、時間あたりの圧送するコンクリート量が多いので、脈動してもコンクリートの連続性は、小さい吐出量のときより良好と考えられる。つまり、脈動の周期が短くなることで、急結剤がコンクリートと定常的に混合されやすくなったためと考えられる。一方、 $4\text{m}^3/\text{hr}$ のときは、配管内を流れるコンクリート量が少なくなるため、不連続なコンクリートの流れに対し敏感に作用したため、高い急結剤濃度で局在化した部分が発生したと考えられる。

4. まとめ

- (1)均一に混合された標準供試体を用いて急結剤濃度と急結剤添加率の関係を求めることができ、急結剤の均一性をさらに向上させることにより定量性を高めることができる。
- (2)吹付けコンクリートでは、急結剤濃度に変動が認められ、特に、圧送圧力が低いとき、急結剤添加位置が短いときに顕著に認められた。
- (3)急結剤添加率が局在化する要因は、吹付け性状（特にコンクリートの脈動状態）と深く関連しており、脈動が大きくなるとき吹付けコンクリート中の急結剤の混合性が悪くなる。ただし、急結剤添加位置が長くなると、また、コンクリートの吐出量が多くなると緩和された。

謝辞

本研究は東京大学生産技術研究所における『高

表-4 吹付け性状と急結剤濃度分布の関連

実験要因	実験水準	吹付け性状*		累積面積率の変動係数
		配管の脈動状態	急結剤の混合状態	
圧送圧力	0.29MPa	1	1	0.273
	0.40MPa	2	2	0.144
	0.48MPa	3	2	0.134
急結剤添加位置	1m	2	1	0.363
	2m	2	2	0.144
	4m	1	1	0.108
CON吐出量	$4\text{m}^3/\text{hr}$	3	1	0.155
	$8\text{m}^3/\text{hr}$	2	2	0.144
	$10\text{m}^3/\text{hr}$	1	1	0.0744

* 配管の脈動状態

1: 基準よりコンクリートの吐出が不連続的

2: 基準

3: 基準よりコンクリートの吐出が連続的

* 急結剤の混合状態

1: 基準よりノズルから吐出したコンクリートと急結剤が分離し

2: 基準

3: 基準よりノズルから吐出したコンクリートと急結剤の分離が

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 牛島栄氏、(株)エヌエムビー 富山徹氏、(株)大林組 田湯政孝氏、鹿島建設(株) 大野俊夫氏、(株)熊谷組 岡田喬氏、佐藤工業(株) 大野一昭氏、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) 入内島克明氏、東急建設(株) 伊藤正憲氏、飛鳥建設(株) 平間昭信氏、西松建設(株) 佐藤幸三氏、太平洋セメント(株) 綾田隆史氏、(株)間 杉山律氏、前田建設工業(株) 赤坂雄司氏、協力会社として参加頂いた富士物産(株)阿部隆夫氏、(株)北川鉄工所 見浦光夫氏、(株)東京測器研究所 佐藤達也氏、吹付け実験に参加された多くの方々、千葉工業大学卒論生の今村信仁氏、芝浦工業大学卒論生の久保田雄彦氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1)U.C.Puri・魚本健人：Findings of the Effects of Nozzle Orientation on Shotcrete from Numerical Analysis. コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1183-1188, 1998.7
- 2)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