

[226] 吹付けコンクリートにおける急結剤とコンクリートの混合に関する研究

正会員 ○竹 内 恒 夫(間組技術研究所)

正会員 喜 多 達 夫(間組技術研究所)

正会員 中 内 博 司(間組技術研究所)

1. はじめに

吹付けコンクリートは急結性のコンクリートを圧縮空気を用いて岩盤に直接吹付け、岩盤と密着したコンクリート層を形成するが、作業空間の狭いトンネルでは発生粉じんによる作業環境の悪化が大きな問題となっている。

急結性のコンクリートはセメントの水和物と急結剤成分とが反応することによって得られる。この反応はノズルでコンクリートと急結剤が混合することによって生ずる。この時、多量の圧縮空気が急結性のコンクリートの混合や運搬に用いられる。急結性のメカニズム¹⁾やコンクリートの凝結時間、圧縮強度などの物理的性質²⁾は数多く研究されているが、コンクリートと急結剤の混合状態は急結剤に着色剤を入れて施工したコンクリートを観察し、その色むらの状態で定性的にとらえているにすぎない。

本研究はコンクリートと添加量の少い急結剤の混合状態を検討するために、急結剤に着色剤を混入して吹付けたコンクリート面の濃度を測定し、ノズルの形状の差による混合度を比較した。あわせて小断面模擬トンネル($\phi 2 \times 11 \text{ m}$)で吹付けを行い、急結剤やノズルの種類などを変えたときの発生粉じんの差についても検討した。

2. 急結剤とコンクリートの混合

2.1 実験の概要

コンクリート中の急結剤の分布を見るために、セメントは白色セメント、急結剤はセメント鉱物系の粉体(添加量 $C \times 5\%$)に着色剤(ベンガラ、 $C \times 0.06\%$)を混合したものをを用い、表-1に示すコンクリート配合で、写真-1のような吹付けを行った。ノズルは表-2に示す3種類を使用し、コンクリートの吐出量は時間当たり 2 m^3 と 4 m^3 の2種類とした。

吹付けたコンクリートから $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ のコアを抜き、カッターで半割にし、図-1に示すように分割した。この分割した部分に写真-2に示す富士プレスケール濃度計(型式 FDP201)をあて、コンクリート中に含まれる赤色濃度を測定した。この濃度計は赤色の濃淡により圧力を測定するものを応用した。測定値は $0 \sim 1.5$ までの低濃度用を用い、数字が大である程高い濃度を示す。

ベンガラは要素中に均一に分布しているとは限らないため、ここでは、その要素中で測定した値のうち最も濃度が高く表われている値を測定値としてとった。

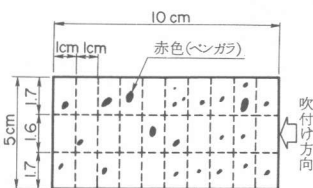


図-1 供試体の分割状況

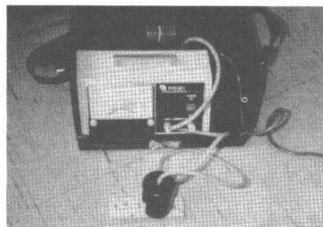


写真-2 赤色濃度計

表-1 コンクリートの配合

Gmax	SL (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m^3)			
				C	W	S	G
15	8 ± 1	55	75	389	214	1,172	403



写真-1 吹付け状況

表-2 ノズル形状

NO	ノズルの外形	ノズルの断面	混合個所
1			1
2			2
3			3

注) → は急結剤

2.2 混合度

コンクリートと急結剤のような固体粒子の混合は、流体の混合よりも複雑である。

2成分系混合については矢野など多くの人が報告している。仕込み組成が未知ということから混合度の均一性を推定するために、サンプルの分散 σ^2 の大小で比較検討した。

サンプル X_i の平均は、 $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$ であり、サンプルの分散 σ^2 は、 $\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2$ で表わされる。図-2に3種類のノズルを使用し、吐出量を変えた場合のヒストグラムを示す。

この図からコンクリート中に含まれる赤色濃度を示すペンガラはほぼ正規分布を成し、吐出量の少い方がどのノズルでも分散が小さく良く混合していることがうかがわれる。今回コンクリートの圧送にスクイズ式ポンプを用いているため吐出量が小さいとコンクリートの管内圧力が小さくなるとともに脈動も少なくなることから⁴⁾

一定量供給される急結剤とコンクリートがよく混合したものと思われる。

なお、ノズル形状に着目した場合、ノズル2と3はほぼ同様な濃度の分布を示し、ノズル1に比べ分散も小で混合もよくなっていることから、複数個の穴から急結剤を噴出できるノズルを用いるのがよいと考えられる。

2.3 ノズル間の混合のバラツキ

ノズルと吐出量に関し、2組の間で濃度の分散や平均の差に違いがあるかを危険率5%で検定を行った。組合わせは吐出量4m³/hとしノズル1と2、ノズル1と3、ノズル2と3およびノズル3の吐出量2m³/hと4m³/hで行った。ノズル1と2の分散は有意であり明らかに両者間に違いがあるが平均値でみるとノズル間の濃度差があるとはいえない。また、ノズル1と3の分散と平均の差は共に有意であり、ノズル間で混合に違いがある。一方、ノズル2と3の分散は有意でなく、濃度の分散状態が等分布と考えられるが、平均の差でみると有意であり、ノズル間の濃度差があるといえる。濃度の分散および平均の差の検定から混合状態を判断すると、コンクリートに対し急結剤が2方向よりも3方向から混合する形式が両者をよく混合させるものと思われる。

ノズル3の吐出量2m³/hは4m³/hは分散および平均の差でも共に有意であり、吐出量の増加に伴って濃度のバラツキも生じてくる。

3. 発生粉じんからみた混合性状⁵⁾

3.1 実験概要

ノズルや急結剤の種類などにより発生する粉じんに差があるかどうかを調べるために表-3に示す組合わせで実験を行った。表-4に使用したノズルの仕様を示す。表中の記号AおよびBは急結剤とコンクリートの混合を調べるために用いたノズル1およびノズル3である。写真-3に記号Bのノズルを示す。これは急結剤がコンクリートに対し均等な圧力で混合するように圧力調節を行うようにしたこと、コンクリートの逆流によって急結剤の噴出孔を閉塞時に分解できるように工夫したものである。

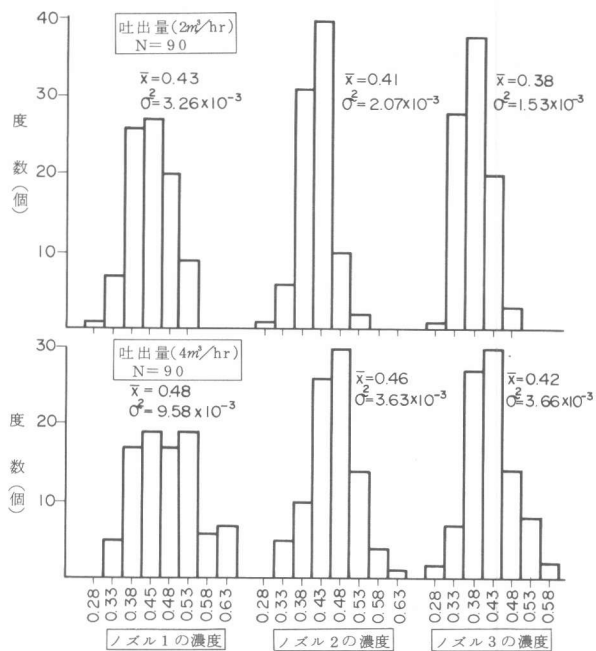


図-2 各ノズルごとの濃度のヒストグラム

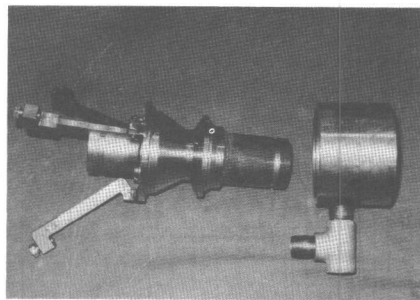


写真-3 ノズルB

ノズルCおよびDは写真－4に示すように、液体急結剤
 用で、圧縮空気を添加して急結剤を花弁状に噴出する。

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は鬼怒川
 産および利根川産の粒調砂（比重2.60，FM=2.77），粗骨
 材は鬼怒川産砕石（ $G_{max}=13mm$ ，比重2.70，FM=5.92），急
 結剤はセメント鉱物系の粉体急結剤とアルミン酸塩系の液
 体急結剤，流動化剤はナフタレンスルホン酸塩系の標準
 型，粉じん低減剤は粉体の水溶性高分子材料（ $C\times 0.03\%$ ）を用
 いた。No.3，7は粉体急結剤やセメント（ $C\times 3\%$ ）に粉じん
 低減剤を混入したものを用いた。表－5に配合を示す。

吹付け機は写真－5に示す小型のスクイズ式ポンプ方式
 の吹付け機を用いた。粉体急結剤やセメントの供給はパウ
 ダーフィダを用い，液体急結剤はピストンポンプを用いた。

測定項目はスランプ，吐出量および粉じん濃度とした。
 粉じん濃度の測定には多段型分流装置のローボリウムエア
 サンプラとデジタル粉じん計（P-5L型）を用い，吹付け
 位置より3m後方で同時測定した。また，吹付け位置5m
 後方でデジタル粉じん計を用い，粉じん濃度の経時変化を
 測定した。

3.2 粉じん濃度

粉じん濃度の測定結果を表－6に示す。

No. 1 に使用したノズルAは粉体急結剤を用いて通常の
 施工に使用しているもので，粉じん濃度は約 $45mg/m^3$ と
 今回の試験の中で最も高い値を示した。これに対し，ノズ
 ルBを用いたNo. 2の粉じん濃度は約 $16mg/m^3$ とNo. 1に
 比較して約65%低下した。これは急結剤とコンクリートの
 混合で示したように，混合状態が良いものは吹付け施工
 時の発生粉じんの低減に効果を発揮するものと思われる。

No.3はNo.2に少量の粉じん低減剤を加えたものであり，
 粉じん濃度は約 $8mg/m^3$ と他に比べ最も低い値を示した。粉
 じん低減剤は一般に多量の水に溶解して用いるが，本実験

表－3 実験の組合せ

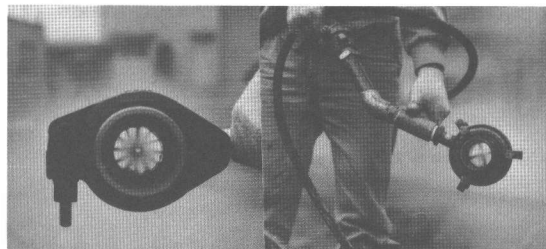
NO.	ノズルの組合わせおよび 圧縮空気の添加位置(↓)	急結剤の 種類	スランプ (cm)	空気消費 量(lit/min)
1	2.5B (A) 2B 20m 2m	粉 体	13	4.8
2	2.5B (B) 2B 20m 2m	粉 体	12.5	4.4
3	2.5B (B) 2B 20m 2m	粉 体 粉じん低 減剤	9.5 ↓ 11.5 (流動化後)	4.2
4	2.5B (B) (C) 2B 10m 10m 2m	液 体	11	4.5
5	2.5B (B) (C) 2B 20m 2m	液 体	9	4.5
6	2.5B (B) (C) 2B 20m 2m	液 セメント	7.5	5.0
7	2.5B (B) (C) 2B 20m 2m	液 セメント 粉じん低 減剤	10	3.9
8	2.5B (D) 2B 20m 2m	液 体	8	3.3

表－4 ノズルの示様

記号	ノズル内 径(インチ)	コンクリートに対し噴出する		
		孔の数	1孔の径(mm)	角度(度)
A	2.5	1	2.5	15
B	2.5	3	1.0	30
C	2	12	3	45
D	2	4	4	45

表－5 コンクリートの配合

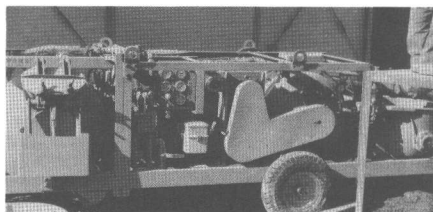
G_{max}	SL (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m^3)			
				C	W	S	G
13	10±2	5.5	5.7	370	203	993	778



ノズルC(12穴)

ノズルD(4穴)

写真－4 液体急結剤用ノズル



写真－5 吹付け機

のように粉体で少量用いた場合でも、粉じん濃度は極めて小さく粉じん低減剤の効果を十分発揮することができた。これは着色剤よりも少い添加量にもかかわらずノズルから均等に分散し、コンクリートとよく混合したことによって、圧縮空気によって飛散するセメントや細骨材などの微粒子をとらえたためと思われる。

No.4はノズルBでコンクリートを飛散し、ノズルCで液体急結剤を添加する方式で、液体急結剤を使用して通常吹付け施工する方式を模擬したものである。この時の粉じん濃度は約 $21\text{mg}/\text{m}^3$ を示し、No.1に比べ約50%低下した。発生粉じんからみると使用する急結剤は粉体よりも液体の方が良いと思われる。

No.5はNo.4でのノズルをホース先端部に取り付けた場合であるが、粉じん濃度はNo.4に比べ約60%増加する結果となった。これは圧縮空気を用いてコンクリートを長距離運搬するよりも短距離の方が、管壁による摩擦抵抗が小さく、ノズル先端部でのコンクリートの吐出速度の減衰効果が小さいためと思われる。

No.6はノズルBからセメントを液体急結剤の添加量の約50%添加し、さらに、ノズルCから液体急結剤を添加した。これは液体急結剤の約50%が水分で、液体急結剤をコンクリートに混合すると水セメント比が増加し、付着が悪くなるために行ったものである。No.6の粉じん、濃度は約 $26\text{mg}/\text{m}^3$ を示し、No.5に比べ約20%低下した。

No.7はNo.6に粉じん低減剤を加えたもので、粉じん濃度はNo.6に比べ60%の低下を示し、No.3と同様に粉じん低減剤の効果が発揮されたものと思われる。また、No.8はノズルDを用いてコンクリートの飛散距離を短くすることを想定したもので、粉じん濃度は約 $20\text{mg}/\text{m}^3$ を示した。

3.3 粉じん濃度の経時変化

図-3に吹付け位置から5m地点の経過時間と粉じん濃度の関係を示す。粉じん低減剤を添加したものはほぼ安定した粉じん濃度を示すのに対し、その他の方式は時間と共に増加する傾向を示した。

4. 結 論

以上の結果、吹付けコンクリートの急結剤とコンクリートの混合状態は急結剤中に着色剤を混合して得たコンクリート面の濃度を測定し、統計手法によって検討することが可能である。吹付け工法には種々の材料やノズルの組み合わせが考えられるが、混合度の良いノズルは発生粉じんを減じ、さらに粉じん低減剤の添加によりその効果を期待できる。

今後、実施工面に反映し、吹付けコンクリートの低粉じん化を行って作業環境の改善を図りたいと考えている。

最後に本実験に際し、ご協力いただいた極東開発工業(株)、ボゾリス物産(株)、竹本油脂(株)、電気化学工業(株)および富士写真フイルム(株)の関係各位に誌上をお借りして感謝する次第です。

参考文献

- 1) 笠井順一：セメントを急結させるメカニズム—急結材料—，セメントコンクリート，No.406，1980，PP.40～43
- 2) 中川晃次，平野健吉：急結剤，セメントコンクリート，No.427，1982，PP.95～100
- 3) 矢野武夫：混合混練技術，日本粉体工業協会
- 4) 竹内恒夫，喜多達夫：湿式吹付けコンクリートの特性，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，PP.337～340
- 5) 竹内恒夫，木川田一弥：吹付けコンクリートの粉じんに関する2.3の実験，土木学会第40回年次学術講演概要集，第5部

表-6 測定結果

No.	粉じん濃度 (mg/m^3)	デジタル粉じん計の		スランパ (cm)	吐出量 (m^3/h)
		cpm	K値		
1	44.6	—	—	13	5.1
2	15.7	1084	0.014	12.5	7.8
3	8.3	469	0.018	11.5	6.3
4	20.9	1992	0.010	11.0	5.7
5	33.0	1411	0.023	9.0	5.9
6	26.2	1472	0.018	7.5	4.9
7	11.4	1396	0.008	10	—
8	20.3	1496	0.014	8	—

注) $K = L/D$

L：ローボリュームエアサンプラの粉じん濃度(mg/m^3)

D：デジタル粉じん計の相対粉じん濃度(cpm)

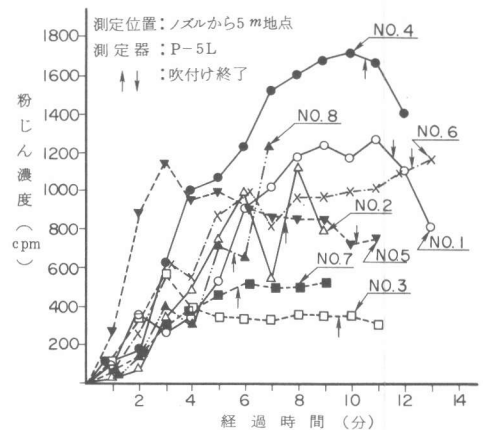


図-3 経過時間と粉じん濃度