

高性能初期高強度吹付けコンクリートの開発

Development of high performance shotcrete with high early strength

越智 修¹⁾、小澤 勝巳²⁾、吉原 伸行³⁾、石田 積⁴⁾

Osamu OCHI, Katsumi OZAWA, Nobuyuki YOSHIWARA, Atsumu ISHIDA

High performance shotcrete with high early strength, over 3 N/mm² after 10 minutes, has been developed for improvement of safety and application of high-speed excavation. High strength additive and super self-hardening acceralator, together to form ettringite, are applied to high quality shotcrete, which is achieved by adoption of two-stage mixing, known as SEC method, and usage of silica-fume, limestone fine-powder. Both table tests and shotcrete experiments in a model tunnel are described.

Key Words: tunnel, shotcrete, high early strength, high-speed excavation

1. はじめに

日本鉄道建設公団では吹付けコンクリートの高品質化を目的に、微粉末の混入による粘性増加と分割練混ぜ (SEC コンクリートの製造) による分離抵抗性効果を活用し、はね返りと粉じんを低減した「高品質吹付けコンクリート」¹⁾を開発し、新幹線トンネルを主体に 100 現場におよぶ施工実績を上げ、実用化している。

本研究は、この高品質吹付けコンクリート技術をさらに高性能化し、吹付け直後の初期材齢における強度を向上させた「高性能初期高強度吹付けコンクリート」を開発するものであり、例えば軟岩地山のトンネル掘削作業において、鋼製支保工建て込みを施工サイクルから省略し、鋼製支保工建て込み作業時における岩盤や吹付けコンクリートのはく離・落下による労働災害の防止、あわせて掘削サイクルの短縮によるトンネル掘進速度の大幅な向上が期待できる。

2. 開発の着眼点

高品質吹付けコンクリートは、石灰石微粉末とシリカフュームを使用し、分割練混ぜを用いて吹付け時の はね返りと粉じんの低減が得られている。^{2, 3)} また、カルシウムサルフォアルミネート系の高強度型急結剤を用い、セメント量増加、水セメント比低減により、従来の 2 倍程度の強度向上が得られている。^{4, 5, 6)}

この高品質吹付けコンクリート技術をもとに、さらに初期材齢の強度を上げるため、ベースコンクリートに高強度混和材を加え、超急硬性セメント鉱物が主成分の急結剤を検討した。この初期強度を上げる技術は高強度混和材と急結剤が混ざり、水和反応を経て微細な針状結晶体であるエトリンガイトを生成し、セメントコンクリート組織を緻密化して高強度を発現するもので、瞬結モルタルとして実績がある。^{7, 8)}

本研究では吹付けコンクリートの初期材齢 10 分で 3 N/mm² 以上の強度発現を目標に、コンクリートの配合条件を変えて最適化すると共に、コンクリート吹付けの施工性についても施工設備を変えて比較検討した。

1) 正会員 日本鉄道建設公団 本社 設計技術室
2) 正会員 日本鉄道建設公団 北陸新幹線建設局 工事第三課
3) 正会員 日本鉄道建設公団 北陸新幹線第二建設局 計画課
4) 正会員 電気化学工業 (株) 青海工場 セメント特混研究所

3. 開発試験

開発試験は室内モルタル試験と屋外模擬トンネルでのコンクリート吹付け試験に分けて実施した。

3. 1 使用材料と配合

表-1 に試験に用いた材料を示す。セメント(C)は普通ポルトランドセメント、骨材はモルタル試験で3種類の細骨材(S)、コンクリート試験で近隣で入手可能な細骨材①と粗骨材(G)を用いた。そのほか、シリカフューム(SF)と石灰石微粉末(LS)を用い、さらにエトリンガイトを生成する高強度混和材と超急硬性セメント鉱物が主成分の初期高強度用の粉体急結剤を用いた。なお、急硬性セメント鉱物からなる一般用急結剤も比較試験で用いた。

表-1 使用材料

名前/記号	仕様	密度(g/cm ³)
セメント/C	普通ポルトランドセメント	3.16
シリカフューム/SF		2.20
石灰石微粉末/LS	100 メッシュ品	2.70
細骨材/S	①新潟県姫川砂、F.M. 2.82	2.62
	②北陸産石灰砂、	2.67
	③熊本産陸砂、F.M. 2.88	2.62
粗骨材/G	新潟県姫川産 6 号碎石	2.64
高強度混和材/Σ	エトリンガイト系混和材	2.70
初期高強度用急結剤	超急硬性セメント鉱物	2.80
一般用急結剤(比較)	急硬性セメント鉱物	2.60

表-2 にモルタル試験での配合範囲を示す。モルタルの配合はコンクリートから粗骨材を除いた材料配合で設定した。(C+SF)を380、400、430kg/m³の3水準とし、SFは(C+SF)の5%に設定した。Σの添加率は対(C+SF)で8から12%の3水準で試験検討した。なお、試験では(C+SF+Σ)を結合材(P)とした。LSは細骨材置換で、粒径0.15mm以下の微粒分が15%になるよう設定した。水(W)はコンクリートの作業性を確保する観点から200kg/m³を基本とし、さらに強度向上を目的に190kg/m³も比較検討した。急結剤の添加率は対(C+SF)で8から12%の3水準で検討した。

表-3 にコンクリート吹付け試験の配合を示す。吹付け試験ではモルタル試験で得られた結果を元に配合を絞り込んだ。比較のために一般の高品質吹付けコンクリートの吹付け試験も併せて実施した。

表-2 初期高強度吹付けコンクリートのモルタル試験における検討配合

W/P (%)	基準となるコンクリート配合 (kg/m ³)							急結剤
	W	C	SF	LS	S	(G)	Σ (C+SF x %)	C+SF x (%)
40.3~48.9	190、200	361, 380, 408	19, 20, 22	139~146	1241~1300	(345~361)	8~12%	8~12%

$$P(\text{結合材}) = C + SF + \Sigma$$

表-3 初期高強度吹付けコンクリートのコンクリート吹付け試験における検討配合

No.	s/a (%)	W/P (%)	基準となるコンクリート配合 (kg/m ³)							急結剤
			W	C	SF	LS	S	G	Σ (C+SF x %)	C+SF x (%)
1	80	44.6	200	380	20	141	1232	345	48 (12%)	48 (12%)
2	70	42.4	190	380	20	125	1094	525	48 (12%)	48 (12%)
比較	60	60	216	342	18	91	929	683	-	25.2 (7%)*

* 一般向け急硬性セメント鉱物系急結剤

3. 2 室内モルタル試験

モルタル試験体の作製はモルタルを練り混ぜた後に急結剤を添加する湿式法を用いた。ブロッカー貫入試験で貫入抵抗を測定し、さらに圧縮強度(材齢10分、1、3時間、1、7、28日の6水準)を測定し、吹付けコンクリートに必要な急結性や付着性、および強度発現性を評価した。試験条件は、温度20℃、湿度80%

で、試験体の養生は材齢 1 日まで湿潤条件、材齢 1 日以降は 20℃水中養生した。また、フレッシュモルタルのフロー (f_{1g}) およびフロー保持特性 (練混ぜ後、0、30、60 分) を測定して作業性を評価した。

3. 3 模擬トンネルでのコンクリート吹付け試験

コンクリート吹付け試験では、ベースコンクリートを近隣の生コン工場で製造し、下記の手順で材料をミキサーに投入して分割練混ぜた。

$S \cdot G + W1 \Rightarrow 10$ 秒間混合 $\Rightarrow C \cdot SF \cdot LS \cdot \Sigma \Rightarrow 30$ 秒間混練り $\Rightarrow W2 \Rightarrow 30$ 秒間混練り

練混ぜ後、コンクリートを所定時間練り置き、コンクリートスランプ変化に伴う吹付け施工性も評価した。

吹付け試験は幅 5.5m、高さ 4.5m、長さ 20m の

模擬トンネルで実施した。表-4 に吹付け試験に用いた機械設備を示す。コンクリートの搬送にはピストンポンプ式と圧縮空気搬送式の 2 形式で比較検討した。試験ではコンクリート吐出量を $12\text{m}^3/\text{hr}$ に設定して実施した。

表-5 に試験項目と試験方法の一覧を示す。試験はフレッシュコンクリートの性状を確認した後に吹付けを開始し、強度評価用のブルアウト板およびコアを採取した。圧縮強度は材齢 10 分から開始し、材齢 1 日以内はブルアウト法で、材齢 7、28 日はコアリングした試験体で測定した。リバウンド測定は地面にシートを敷設後、約 1m^3 のコンクリートを天端部に吹き付け、吹付け後にシートに落ちたコンクリート重量を測定して求めた。

4. 実験結果および考察

4. 1 モルタル試験結果

表-6 に試験結果を、図-1 に初期高強度モルタルの材齢 10 分から 1 日までの強度発現性を示す。図-1 では急結剤と Σ の添加率 10%、 $W190\text{kg}/\text{m}^3$ で $(C+SF)$ を変えた試験結果を示す。 $(C+SF)$ が増えると配合の W/P が下がり、急結剤と Σ の単位量が増える。一部データの逆転があるが、 $(C+SF)$ が多いと強度が高くなる。また、いずれも時間軸が対数でほぼ直線的に強度が増加している。

図-2 と図-3 に急結剤添加率と材齢 10 分および材齢 28 日の圧縮強度との関係を示す。材齢 10 分の圧縮強度は急結剤添加率と高い相関性が認められ、急結剤を $10\text{kg}/\text{m}^3$ (添加率にして 2.5%前後) 増やすと圧縮強度は約 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 高くなる。一方、材齢 28 日では圧縮強度と急結剤添加率との相関が小さく、 $(C+SF)$ 量と圧縮強度との相関が大きい。 $(C+SF)$ 量を 380 から $430\text{kg}/\text{m}^3$ に増やすと、圧縮強度が約 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 高くなる。急結剤添加率と圧縮強度との相関関係は材齢 1 日以内では大きく、材齢 7 日以降は小さくなる。従って、初期材齢では急結剤による強度発現作用が大きく、長期材齢ではセメント量もしくは水セメント比が強度発現に大きな影響を与えていることが明らかである。

表-4 吹付け試験の使用機械

機械種類	仕様
吹付けロボット	伸縮ストローク: 2.0m、吹付け面半径: 5.7m
急結剤添加機	タンク容量: 280ℓ、圧送能力: 1 ~ 8 kg/min
コンクリート搬送機	ピストンポンプ式(P)、最大吐出量 $25\text{m}^3/\text{hr}$
	圧縮空気搬送式(A)、最大吐出量 $21\text{m}^3/\text{hr}$
コンプレッサ	100PS 級エンジン式 × 2 台、空気量 $10\text{m}^3/\text{min}$

表-5 吹付け試験における試験項目と方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101 準拠
空気量	JIS A 1128 準拠
温度	棒状温度計にて測定
モルタルフロー	JIS R 5201 モルタルフロー試験方法準拠
初期強度 ブルアウト法	JSCE-G 561 準拠。材齢: 10 分、1、3 時間、1 日。養生: 現場湿潤 (材齢 1 日は 20℃湿潤)
圧縮強度	JSCE-F 552、JSCE-F 561、JIS A 1108 準拠。材齢: 7、28 日。標準水中養生 試験体寸法: ベースコンクリートは $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 、吹付けコンクリートは $\phi 55 \times 110\text{mm}$
リバウンド	地面にシートを敷設後、約 1m^3 のコンクリートを天端部に吹き付け、吹付け後にシートに落ちたコンクリート重量を測定。

表-6 モルタル試験結果

No.	配合単位量 (kg/m ³)			W/P (%)	急結剤 C+SF x(%)	モルタルフロー(mm)			圧縮強度 (N/mm ²)					
	C+SF	Σ	W			t=0	t=30	t=60	10分	1時間	3時間	1日	7日	28日
1	408+22	41	200	42.5	10	196	185	181	2.8	7.8	12.1	15.3	59.3	74.0
2		33		43.2	8	185	173	165	2.4	6.4	10.4	11.1	60.3	75.6
3		41	190	40.3	10	176	164	162	3.9	10.5	13.9	17.7	66.8	76.0
4		33		41.1	8	155	146	—	2.9	7.0	11.7	11.4	58.6	65.3
5	380+20	46	200	44.9	12	205	187	179	3.4	9.2	11.6	17.8	54.3	62.6
6		38		45.7	10	195	175	171	2.7	6.7	8.9	12.3	53.0	62.0
7		46	190	42.7	12	180	172	165	3.8	11.2	14.0	19.0	58.7	68.1
8		38		43.5	10	173	162	152	2.9	7.0	10.4	14.7	59.0	67.0
9	361+19	43	200	47.3	12	207	185	177	2.7	8.1	10.8	15.1	48.8	56.7
10		36		48.1	10	194	177	167	2.0	6.5	10.0	11.4	50.3	55.2
11		29		48.9	8	173	157	151	1.4	3.6	6.2	6.9	48.1	56.2
12		43	190	44.9	12	185	169	161	3.0	9.8	13.9	18.5	53.2	63.5
13		36		45.7	10	178	163	155	2.4	6.8	10.8	13.0	55.6	60.2
14		29		46.5	8	164	150	—	1.7	4.4	8.4	8.5	53.8	62.1

この強度の発現機構を水和生成物と関連付けると、初期材齢では急結剤と高強度混和材が合わさり、水和反応して生成したエトリンガイトが骨組みを形成するように硬化体を成し、長期材齢ではセメントの水和反応が進行して硬化体中のエトリンガイト生成後の空隙を充填して、コンクリート組織を緻密化する働きが生じていると考えられる。

モルタルの凝結特性を評価した結果、今回試験した配合範囲では急結剤を添加した直後から強いこわばりが得られ、45秒後のプロクター貫入抵抗値は28N/mm²以上で終結した。吹付けに必要な急結性を充分有することがモルタル試験で確認できた。60分間練り置いたモルタルの凝結試験も行ったが、プロク

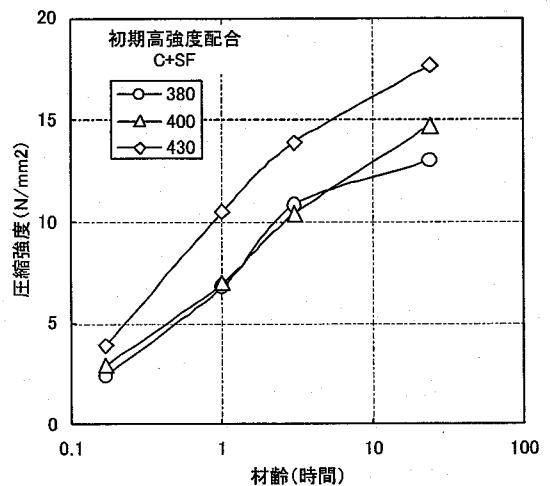


図-1 初期高強度モルタルの初期強度発現性

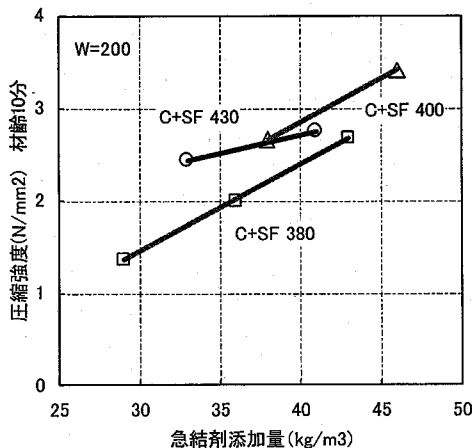


図-2 急結剤添加量と材齢10分強度

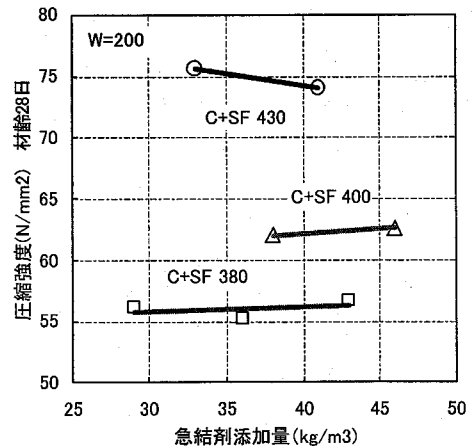


図-3 急結剤添加量と材齢28日強度

ター貫入抵抗値は変わらず、長時間練り置くことによる凝結特性の低下は認められない。

モルタルフローを評価した結果、単位水量が多く、 Σ 量が多いとフロー値が大きい。最大 60 分間練り置いてフロー変化を測定したが、特に単位水量や Σ 量による保持性能の大きな差は認められず、低下幅は大きくて 30mm 程度であり、作業時間を確保できる結果が得られた。

モルタル試験の結果、材齢 10 分で圧縮強度 3 N/mm^2 以上を得る配合は、(1) (C+SF) 400 kg/m^3 、 Σ と急結剤の添加率 12%、(2) (C+SF) 430 kg/m^3 、 Σ と急結剤の添加率 10%、であり、コストなどを勘案して (1) 配合をコンクリート吹付け試験で検討する事にした。

4. 2 コンクリート吹付け試験結果

表-7 に吹付けコンクリートのフレッシュ性状を示す。測定時間は生コン工場から試験場所に搬入した時点をとし、30 分後と 60 分後の経時変化も評価した。生コン工場から試験場所への所要時間は約 5 分である。コンクリートスランブは吹付け時の脈動や閉塞を防ぎ、作業性を確保するために 20cm を目安にした。試験時期が異なり、コンクリート温度に違いがあるが、両配合ともスランブの経時変化は少なく、作業性を確保できた。なお、比較で試験した高品質吹付けコンクリートはスランブ $8 \pm 2\text{ cm}$ に調整した。

表-7 吹付けコンクリートのフレッシュ性状

No.	測定時間 (分)	スランブ (cm)	フロー (mm)	空気量 (%)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)
1	0	19.5	310	3.4	28.0
	30	16.0	295	2.4	29.0
2	0	19.5	330	3.1	18.0
	60	17.0	280	2.6	17.0
比較	0	8.5	-	0.7	23.0

表-8 に吹付けコンクリートの強度測定結果を示す。いずれの配合も材齢 10 分で約 5 N/mm^2 以上の高い圧縮強度が得られ、モルタル試験結果と比べて高くなった。この原因として、コンクリートには粗骨材が入ること、吹付け試験の方がモルタル試験と比べて急結剤の混合性や成形性において優れた試験体の作製が可能で、考えられる。

表-8 吹付けコンクリートの強度測定結果

No.	施工 機械	強度 (N/mm^2)							
		プルアウト				コア		ベース	
		10m	1h	3h	1d	7d	28d	7d	28d
1	P	4.9	5.6	7.7	21.3	33.6	47.0	33.3	58.7
2	A	6.3	-	6.8	25.1	36.5	50.7	35.1	60.7
	P	5.4	-	6.4	25.8	43.5	58.2		
比較	P	-	-	2.2	14.5	-	26.7	-	40.1

その他の材齢で吹付けコンクリートとモルタル試験体と比較すると、材齢 1 日は吹付けの方が高いが、材齢 3 時間、7、28 日は逆に低くなっている。吹付け試験では材齢 10 分の強度が高い分、材齢 3 時間の強度の伸びが小さい。試験体の作製方法が、急結剤と高強度混和材とセメントの混合状態や水和反応の進行状態を変える可能性もあり、今後の検討課題としたい。

材齢 28 日のコアの強度とベースコンクリートの強度を比較すると、コア強度はベース強度の 80% 以上あり、100% に近い結果も得られた。比較で試験した高品質吹付けではコア強度はベース強度の約 $2/3$ であり、今回検討した吹付けコンクリートは長期材齢で強度の低下が少なく、高強度が得られる。

今回の結果を高品質吹付けコンクリートと比較すると、材齢 3 時間では 3 倍以上、材齢 1 日以降で 1.5 倍から 2 倍程度の高強度が得られている。

リバウンド試験を No. 1 配合で 2 回実施した結果、8% と 9% の結果が得られ、従来の高品質吹付けのリ

バウンド（同じく模擬トンネルの試験で約 15%）より少なかった。従来の高品質吹付けと比較してこの初期高強度吹付けコンクリートは、粉体量が多く、コンクリートの粘性が増えていること、および急結剤の急結性が従来の急硬性セメント鉱物を主成分とする急結剤より早いためと考えられる。

一連の吹付け試験で吹付けの状態を目視観察した。コンクリートの圧送性、ホースの脈動、リバウンドについてはコンクリート配合あるいは使用機器で有意の差は認められなかったが、粉じん、および配管内部の急結したコンクリートの固着状態は使用機器によって差が認められた。すなわち、ピストンポンプ式は圧縮空気式に比べて粉じんが少ない傾向にあるが、配管内部のコンクリートの固着が多くなった。これは吹付けに使用するエア量に影響が大きい事が示唆される。

5. まとめ

吹付けコンクリートの材齢 10 分で 3N/mm^2 以上の強度発現を目標に高性能初期高強度吹付けコンクリートの開発に着手した。微粉末の混入と分割練混ぜ(SEC)を活用した高品質吹付けコンクリート技術をベースに、さらに高強度混和材と超急硬性セメント鉱物が主成分の急結剤を用い、室内モルタル試験で強度発現性と作業性を評価し、さらに模擬トンネルでコンクリート吹付け試験を実施し、最適化を検討した。その結果、

- (1) 超急硬性セメント鉱物系急結剤の添加量を増やすと材齢 1 日までの初期材齢強度を向上することができる。長期材齢の強度向上にはセメント量増加が有効である。
- (2) モルタル試験の結果、材齢 10 分で 3N/mm^2 以上の強度を得る配合として、セメント 380 kg/m^3 、シリカフューム 20 kg/m^3 、高強度混和材と急結剤をそれぞれ対(C+SF)の 12% 添加する配合を見出した。
- (3) コンクリート吹付け試験の結果、材齢 10 分の強度発現性は室内モルタル試験の値以上が得られ、材齢 3 時間以降も高品質吹付けコンクリートと比較して 1.5 倍から 3 倍程度の高強度が得られた。リバウンドも従来吹付けと比較して低い結果が得られた。
- (4) 吹付け作業の施工状態を目視観察した結果、ポンプ圧送方式は圧縮空気搬送方式に比べて、配管内部にコンクリートの固着が多くなる傾向が認められ、実施工に際しては吹付け機器および吹付け条件などへの対応が必要である。

参考文献

- 1) 「高品質吹付けコンクリート設計・施工指針（案）」、日本鉄道建設公団、1997 年
- 2) 越智ほか、「分割練混ぜによる新吹付けコンクリートの施工実態」、土木学会・第 54 回年次学術講演会講演概要集、第 VI 部門、pp. 400-401、1999 年
- 3) 伊藤ほか、「分割練混ぜ（SEC）による新吹付けコンクリートの硬化体特性」、土木学会・第 10 回トンネル工学研究発表会、2000 年
- 4) 東ほか、「低はね返り・低粉じん型高強度吹付けコンクリートの開発」、土木学会・第 11 回トンネル工学研究発表会概要集、p129～、2001 年
- 5) 荒木ほか、「カルシウムサルフォアルミネート系急結剤の高品質吹付けコンクリート工法への適用」、土木学会・第 55 回年次学術講演会講演概要集、VI-79、2000 年
- 6) 小山ほか、「高強度対応急結剤を用いた高品質吹付けコンクリートの現場試験施工」、土木学会・第 56 回年次学術講演会概要集、V-243、2001 年
- 7) 「高強度吹付けコンクリート技術資料 スーパーショットクリート」、電気化学工業（株）、1996 年
- 8) 「軟岩トンネルの TWS による急速施工（2）」、トンネルと地下、第 29 巻 11 号、pp. 963～973、1998 年