

湿式吹付けコンクリートの研究

STUDY ON HIGH PERFORMANCE WET-MIX SHOTCRETE

坂本全布*・志田 亘**・青山繁夫**

masanobu SAKAMOTO, wataru SIDA and shigeo AOYAMA

The object of the study was to develop the admixture, which reduce the rebound and gain the high strength of the wet-mix shotcrete, and to develop the accelerating agent for the shotcrete applying to not only dry but also wet surface of rock. As results, following conclusions were obtained.

1. A viscosity agent was very effective to reduce the shotcrete rebound.

2. High strength shotcrete could be obtained to use silica fume and high fineness blast furnace slag.

Key words: shotcrete, high strength, silica fume, high fineness blast furnace slag.

1. まえがき

NATMはトンネル掘削の標準工法となり、吹付けコンクリートが重要な支保部材となっている。また、吹付けコンクリートは、吹き付け機械や施工方法、粉じん低減剤の研究開発などにより、急速に改善・改良が図られている。¹⁾しかしながら、はね返り率は依然として大きい、湧水下での効果的な施工方法がないなどの課題も多い。一方、大空間への適用、地圧の高いトンネルへの適用、増し吹付けや変状対策などで使用する場合、安定した高強度の確保が求められる。

このような現状や将来の予測を踏まえて、本開発目標として下記の項目を掲げた。

①はね返りを低減できる混和材料、配合の確立。

②圧縮強度 400kgf/cm²以上の高強度化の実現。

③湧水下・水分がある箇所での混和材料、配合の確立。

本報告は、これらの①および②について述べる。

2. はね返りを低減できる混和材料、配合の確立

現在、吹付けコンクリートの材料には、混和剤として急結材が用いられるだけで、その他の混和剤は一般

* 正会員 大成建設(株)技術研究所

** 大成建設(株)土木技術部

**正会員 大成建設(株)土木技術部

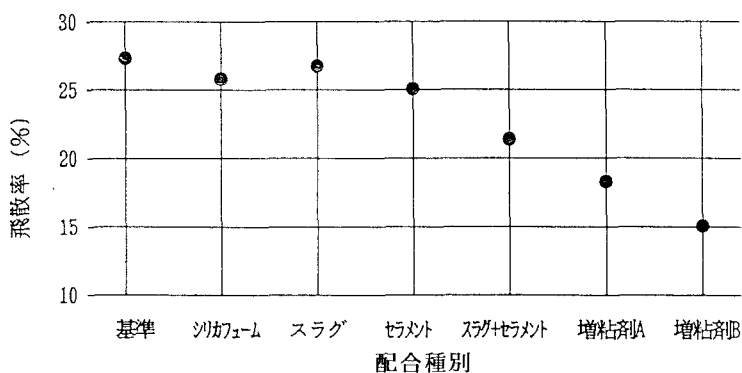


図-1 配合と飛散率の関係

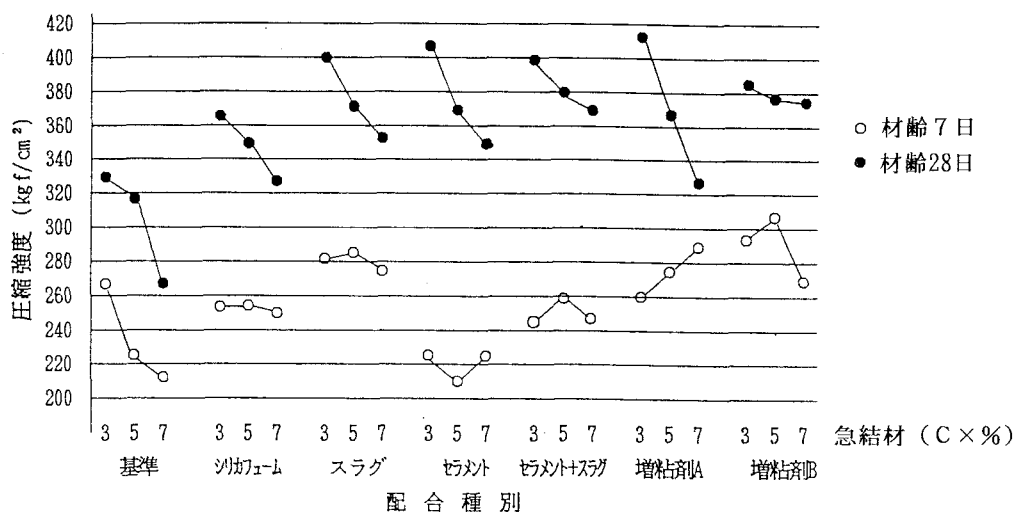


図-2 配合と圧縮強度の関係 (室内試験)

2.2 現場実証試験

品質、コストを勘案して、実証試験の配合は、基準、セラメント、セラメント+スラグ、増粘剤Bの4種類を実施した。吹付け試験は、実工事のトンネルで湿式方式で行った。コンクリートは、現場の専用プラントで製造し、トラックアジテータで運搬後、ロボット一体型の吹付け機を用いて吹付けた。吹付け量は、1回2 m³で各々3回吹付け試験を行った。吹付けに使用した主な機械を表-3に、トンネル断面を図-3に、実証試験結果をまとめて表-4に示す。

スランブが4ケースとも大きかったのは、スランブ12cmで予備試験を行ったが、吹付けが順調でなかったこと、この現場では常時18cm程度で施工していたこと、施工条件をできる限り合わせて、配合そのものの違いを試験する目的などによる。

図-4に実証試験のはね返り率と飛散率の関係を、図-5にコンクリートコアによる圧縮強度試験の結果を示す。はね返り率が最も少なかったのは増粘剤Bで15%であった。セラ

表-3 主な使用機械

名 称	性 能	数	メーカー名
ルッチャプラント	0.5 m³/バチ	1台	北川鉄工所
コンクリートミキサー車	4.5 m³	2台	カヤバ
吹付け機	ダンプミキサー	1台	技術資源開発
ポンプ	90kw 14.5 m³	1台	日立製作所

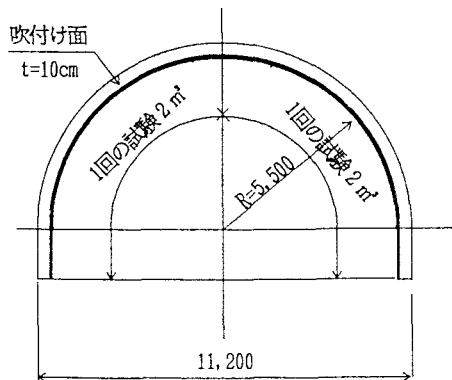


図-3 トンネル断面図

メント、セラメント+スラグのケースは、はね返り率が26.9%、25.7%で基準コンクリートの30.6%より少なかった。コンクリートコアによる材齢28日の圧縮強度試験結果は、基準、セラメント、セラメント+スラグのケースは、ほぼ同等で、293～304 kgf/cm²であったが、増粘剤Bは221 kgf/cm²と小さかった。ただし、設計基準強度の180 kgf/cm²は満足していた。なお、圧縮強度が低下したのは、スランプが19.5cmと大きかったために水セメント比が大きくなったものと推定される。

以上のことから、はね返りを低減できる混和材料は、増粘剤が最適であることが分かった。

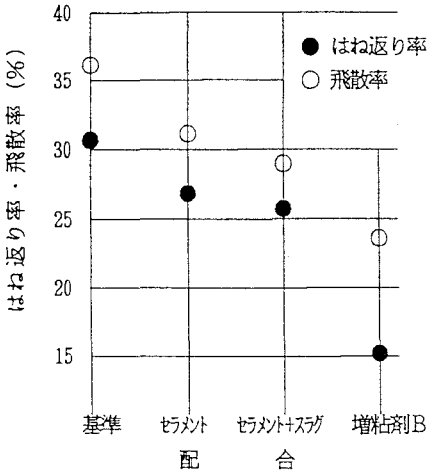


図-4 配合とはね返り率・飛散率の関係

3. 圧縮強度400 kgf/cm²以上の高強度化の実現

一般に吹付けコンクリートは、品質管理が極めて難しいことから、圧縮強度のバラツキが大きく、材齢28日で200～300 kgf/cm²程度がほとんどである。

今後、高強度吹付けコンクリートは、第二東名神などの大断面トンネルや変状対策に適用されることが予想される。一方、吹付けコンクリートを永久支保部材として設計するためには、高強度化と品質のバラツキが少ないことが要求される。予備試験で実施した現場での吹付けコンクリートの凍結融解試験結果から、高品質の吹付けコンクリートを得るために圧縮強度 400kgf/cm²以上の高強度化の実現を図った。

3.1 高強度吹付けコンクリートの配合および試験方法

表-5に使用材料、表-6に基準配合、表-7に試験配合および試験結果を示す。高強度を得るために混和材料には、シリカフェームおよびスラグ（超微粉末高炉スラグ14,000cm³/g）を用いた。コンクリートのじん性を向上させるために鋼繊維を用いた。試験は先ず室内試験を実施し、この結果から、現場実証試験を行った。試験方法および吹付け方法は、2章と同様で行った。

表-4 実証試験結果

項目	配合	単位	基準	セラメント	セラメント+スラグ	増粘剤B
スランプ	cm		16.5	18.0	17.5	19.5
単位容積重量	kg/m ³		2,348	2,357	2,318	2,127
温度	℃		22.0	21.8	20.8	21.7
飛散率	%		36.2	31.2	29.0	23.7
はね返り率	%		30.6	26.9	25.7	15.0
急結材使用量	kg/m ²		25.2	15.9	15.9	15.2
急結材使用量	Cx%		7.0	4.5	4.5	4.2
ブルアウト3時間	kgf/cm ²		6.7	6.3	4.7	6.3
コンクリートコア材齢7日	kgf/cm ²		212	164	173	113
コンクリートコア材齢28日	kgf/cm ²		293	293	304	221

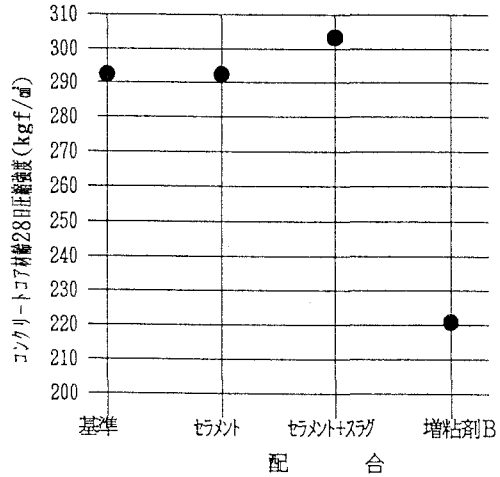


図-5 配合とコンクリートコア材齢28日圧縮強度の関係

表-5 使用材料

材料種別	物性または特徴
セメント	普通ポルトランドセメント 比重 3.16
細骨材	川砂 比重 2.66
粗骨材	川砂利 比重 2.75
急結材	セメント系 テカトックN0.5
鋼繊維	直径0.6mm 長さ25mm
シリカフェーム	粉末タイプ 輸入品
スラグ	超微粉末高炉スラグ 14,000cm ³ /g
高性能減水剤	芳香族/ミナルボン 酸系

表－6 基準配合

配合の種類	鋼繊維 混入率 (%)	粗骨材 最大寸 法(mm)	スラッグの 範囲 (cm)	セメント 比 W/C (%)	細骨材 率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					
						鋼繊維 SF	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	急結材
通常湿式	—	10	12±2.5	55.0	67.0	—	198	360	1,137	563	25.2
鋼繊維用	1	10	12±2.5	54.9	71.0	80	220	450	1,188	502	31.5

表－7 試験配合および試験結果

試 験 配 合						室 内 試 験 結 果				現 場 実 証 試 験 結 果		
配合 種別	セメント (kg/m ³)	鋼繊維 (kg/m ³)	シリカフューム (kg/m ³)	スラッグ (kg/m ³)	高強度吹付け (kg/m ³)	圧縮強度(kgf/cm ²)			飛散率 (%)	3時間 カアウト	パネル28日 圧縮強度	はね返り率 (%)
						3時間	7日	28日				
①	360	—	0	—	0	5.6	240	344	27.6	16.4	272	24.3
②	360	—	18 5%	—	1.8	7.4	307	449	25.5	—	—	—
③	360	—	36 10%	—	2.8	7.8	318	489	21.8	21.1	443	17.0
④	360	—	54 15%	—	3.9	10.4	324	503	21.0	—	—	—
⑤	450	80	0	—	0	7.8	294	411	26.2	18.7	376	22.3
⑥	450	80	22.5 5%	—	2.3	9.2	329	472	20.9	—	—	—
⑦	450	80	45.0 10%	—	4.5	10.5	354	507	18.0	28.5	481	15.7
⑧	450	80	62.5 15%	—	5.8	12.4	368	529	17.8	—	—	—
⑨	288	—	—	72	1.0	6.7	300	385	19.0	—	—	—
⑩	302.4	—	—	75.6	1.9	7.2	312	431	17.9	—	—	—
⑪	316.8	—	—	79.2	2.9	7.7	324	475	17.0	—	—	—

3.2 試験結果

図－6に各混和材料を用いた場合の室内試験における材齢3時間圧縮強度の結果を示す。シリカフュームの使用量が増加するにしたがって3時間圧縮強度が増大している。セメント＋スラッグ（超微粉末高炉スラッグ14,000cm³/g）の場合も同様な傾向である。図－7に飛散率に関する試験結果を示す。シリカフュームおよびスラッグ（超微粉末高炉スラッグ14,000cm³/g）の使用量が増加するにしたがって飛散率は減少する。ただし、シリカフュームの場合、単位セメント量の外割りで10%を超えるとあまり変化が見られなくなる。図－8は室内試験における材齢28日の圧縮強度の結果を示したものである。シリカフュームの使用量がC×5%以上あるいはスラッグ（超微粉末高炉スラッグ14,000cm³/g）79.2kg/m³の配合で圧縮強度は、450 kgf/cm²以上得られている。現場実証試験におけるパネルより切り出した材齢28日の圧縮強度の試験結果を図－9に、はね返りに関する試験結果を図－10に示す。パネルより切り出した材齢28日の圧縮強度は、セメント360 kg/m³：シリカフューム36kg/m³の配合では443 kgf/cm²、鋼繊維使用のセメント450 kg/m³：シリカフューム45kg/m³の配合では、481 kgf/cm²となっている。はね返り率は、シリカフュームを用いない配合①および配合⑤に対して、7%程度減少していた。

以上のことより、単位セメント量360 kg/m³以上でシリカフューム36kg/m³以上用いることにより、材齢28日で400 kgf/cm²以上の高強度吹付けコンクリートが得られる。この時の吹付けコンクリートのはね返り率は、17～22%程度である。スラッグ（超微粉末高炉スラッグ14,000cm³/g）を用いた場合には、スラッグ（超微粉末高炉スラッグ14,000cm³/g）の混入量が単位セメント量の内割りで20%の使用でセメント＋スラッグ（超微粉末高炉スラッグ14,000cm³/g）が380 kg/m³で、ほぼ同等の値が得られる。

このように、圧縮強度400 kgf/cm²以上の高強度吹付けコンクリートを得るためには、シリカフュームおよびスラッグ（超微粉末高炉スラッグ14,000cm³/g）を用いることが有効であることが分かった。

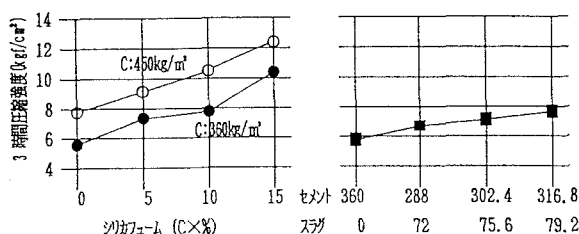


図-6 室内試験における材齢3時間圧縮強度の結果

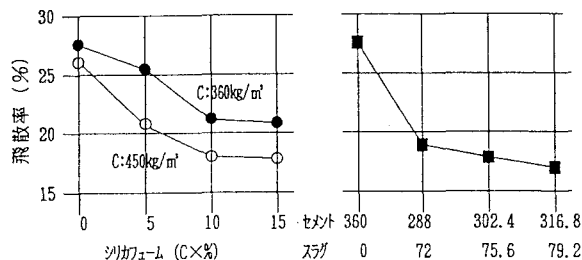


図-7 飛散率の試験結果

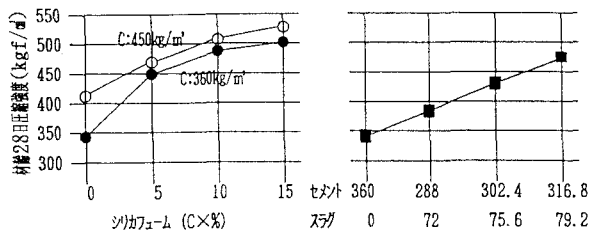


図-8 室内試験における材齢28日圧縮強度の結果

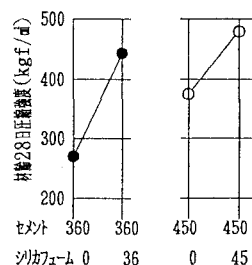


図-9 パネルより切り出した材齢28日圧縮強度結果

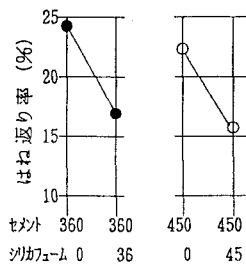


図-10 はね返り率の試験結果

4. まとめ

湿式吹付けコンクリートの品質改善を目的として、はね返りを低減できる混和材料および高強度を得られる吹付けコンクリートの研究開発についての検討を行った。これらの結果を以下に示す。

- ① はね返りを低減できる混和材料は、増粘剤の低粘度タイプが最も有効である。このはね返り率は、15%程度であった。
- ② はね返りを低減できる混和材料としては、シリカフューム、スラグ（超微粉末高炉スラグ14,000cm³/g）およびセラメント（高炉スラグ4,120 cm³/g）も有効であるが、これらのはね返り率の低減は、従来の基準吹付けコンクリートに対して3～5%程度であった。
- ③ 圧縮強度 400kgf/cm²以上の高強度吹付けコンクリートを得るためには、単位セメント量 360kg/m³ シリカフューム36kg/m³ および単位セメント量 302.4kg/m³ スラグ（超微粉末高炉スラグ14,000cm³/g）75.6kg/m³ 以上用いるとよい。

なお、湧水下・水分がある箇所での混和材料、配合については、昨年度から試験を実施しており、付着性について良い成果を得ている。現在、強度試験の結果を待っており、これについては別の機会に発表したい。

参考文献

- 1) 樋口芳郎：注入・圧送・吹付け工法 詳述，技報堂出版株式会社，1983年6月20日
- 2) 坂本全布，松岡康訓，志田亘，斎藤辰生，青山繁夫：湿式吹付けコンクリートの試験方法に関する研究，土木学会第45回年次学術講演会，平成2年9月
- 3) 坂本全布，松岡康訓，志田亘：高強度吹付けコンクリートの研究，土木学会第45回年次学術講演会，平成3年9月