

吹付けコンクリートの施工性および品質特性の向上 を目指した配合の提案

PROPOSALS OF THE MIX PROPORTION TO IMPROVE THE WORKABILITY AND QUALITY OF THE SHOTCRETE

鬼頭 誠*・末永充弘*・登坂敏雄*・弘中義昭**・吉永正雄***

Makoto KITOH, Mitsuhiro SUENAGA, Toshio TOSAKA, Yoshiaki HIRONAKA and Masao YOSHINAGA

This report describes the result observed during the practical application of shotcrete including silicafume in the Gorigamine tunnel. The experiment is designed so as to confirm the workability and quality of the shotcrete composite with silicafume, which has been already confirmed in laboratory test by the authors. According to the examination, it is observed that the shotcrete including silicafume has following characteristics; the range of slump to reduce the quantity and rebound ratio is comparatively wider than that of conventional shotcrete; the existence of minute particles of fine aggregate is effective to improve the construction performance of the shotcrete.

Keywords: shotcrete, silicafume, rebound, dust, minute particles of fine aggregate

1. まえがき

現在、トンネルにおける吹付けコンクリートは、その機動性、早強性、地山に密着した施工等の特長から地山と支保工との一体化、地圧の分散、支保力の伝達、早期の地山拘束効果等を合せ持つ、NATMにおける重要な支保部材となっている。

一般に、トンネルにおける湿式吹付けコンクリートの施工では、スランプ8～10cmの生コンクリートを径2～3インチのホースにより吹付け機から切羽まで20～30m圧送し、吹付けノズル手前で粉状の急結剤を添加して地山に吹付けている。したがって、圧送圧力により、コンクリートがホース内あるいは地山に吹付けられる際に、コンクリートの分離に起因すると考えられるリバウンドが発生したり、急結剤とコンクリートの混合が十分行われていないことに起因すると考えられる粉塵が発生する等の問題が生じている。また、コンクリートの品質面では、粗骨材の一部がリバウンドにより失われたり、空気の混入によるものと推定される打込みコンクリートに対する強度低下の問題がある。

筆者らは、こうした従来の吹付けコンクリートの問題点の改善とシングルシェル化に対応するため、吹付けコンクリートの高品質化を目的として、シリカフュームを添加（混和）した吹付けコンクリートの実施工

* 正会員 日本鉄道建設公団 設計技術室

** 正会員 佐藤工業株式会社 中央技術研究所 *** 正会員 佐藤工業株式会社 土木技術部

試験を行ってきた。試験にあたっては、シリカフェームの添加量と施工性（リバウンド量、粉塵発生量）、品質との関係、施工性の改善が図れる最適なスランプ領域の検証、急結剤との混合を促進する混合装置の性能確認、湿潤養生が強度増加に対する効果および細骨材粒度が施工性改善に及ぼす影響等の検証を行った。以下にこれらの試験結果を報告する。

2. 実施工試験の概要

2. 1 試験概要

実施工試験は、北陸新幹線、加越トンネルおよび五里ヶ峯トンネル（上田工区）において実施した。加越トンネルでは、主としてシリカフェームの添加量とリバウンド量、粉塵発生量およびコンクリート強度（一軸圧縮強度）との関係についての試験を実施した。また、五里ヶ峯トンネルでは、①スランプの変化とリバウンド発生量、粉塵発生量およびコンクリート強度との関係、②湿潤養生が吹付けコンクリート強度に与える効果の検証、③吹付けコンクリートと急結剤の混合を向上させるための急結剤混合装置の性能試験を実施した。

2. 2 試験方法

試験は、所定の配合の吹付けコンクリートを切羽にて吹付け、この時のリバウンド発生量および粉塵発生量を測定して施工性の検証を行った（図－1 参照）。また、吹付けコンクリートの強度は、プルアウト試験による材齢3 hr、24 hrの若材齢強度、コアおよび管理供試体による材齢7日、28日、91日の強度試験を行った。なお、単位時間あたりの吹付け量は、加越トンネルでは7～8 m³/hr、五里ヶ峯トンネルでは10～11 m³/hrであった。また、掘削工法は加越トンネルは上半先進工法、五里ヶ峯トンネルは補助ベンチ付き全断面工法である。

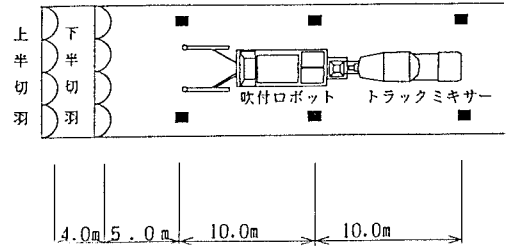
2. 3 試験の材料と配合

両トンネルにおいて用いた吹付けコンクリートの配合および材料は表－1、表－2に示すとおりである。細骨材は、加越トンネルでは川砂、五里ヶ峯トンネルでは砕砂を用いた。五里ヶ峯トンネルの細骨材は一般の細骨材に比べ0.15mmフルイ通過量が14%と微粒分の多い細骨材である。また、粗骨材は両トンネルとも6号碎石を用いた。

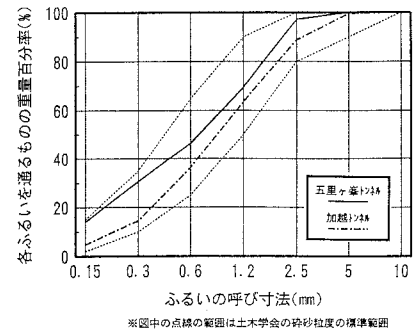
表－1 配合表

トンネル	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	セメント (kg)	シリカフェーム (C×%)
加 越	7～10	55	60	360	0.5, 10
五里ヶ峯	8～18	60	60	360	0.5

■ は粉塵測定位置



図－1 試験方法概要図



図－2 細骨材の粒度分布

表－2 材料の諸元

材料	試 験 項 目	加 越	五里ヶ峯
細骨材	比重	2.54	2.58
	粗粒率	2.92	2.42
	0.15mm通過量 %	4.8	14.0
	洗い試験 %	2.7	6.7
	実績率 %	64.1	66.1
粗骨材	比重	2.60	2.65
	粗粒率	6.52	6.09
	実績率 %	58.2	55.9
その他	シリカフェーム	940-D	920-D
	セメント	普通ポルトランド	
	急結剤	セメント鉱物系	

注) シリカフェームは SiO₂ 含有量86%以上

2. 4 測定方法

2. 4. 1 強度試験

強度試験のうち、材齢3hrおよび24hrの若材齢強度試験は、プルアウト試験方法により行った。長期強度試験は、側壁部の所定の範囲にコア採取に必要な厚さでコンクリートを吹付け、各試験材齢の3日前にコア（加越トンネル：φ10×20cm、五里ヶ峯トンネル：φ7×14cm）を3本採取して端面を整形した後、圧縮強度試験を行った。また、管理供試体として、急結剤を添加しない打込み供試体（φ10×20cm、標準養生）を作成し、コア供試体強度と比較することにより、吹付け後のコンクリート強度との差を求めた。

湿潤養生による効果の検証は、五里ヶ峯トンネルにおいて、スランプ12～14cmの試験ケースで行った。養生方法は吹付け後7日間散水した後、所定の材齢でコアを採取して強度試験を行い、気中養生のコア強度とを比較した。

2. 4. 2 粉塵発生量

測定は、光散乱式デジタル粉塵計を使用した。測定範囲は図-1に示すように、吹付け位置から2.5m離れた地点までとし、測定箇所は6地点とした。測定は原則として吹付け作業が開始されてから5分後と15分後の2回とし、測定値は6測点における2回の測定の平均値とした。なお、粉塵測定と共に坑内の風速および温度、湿度を切羽より2.5m離れた地点で測定した。加越トンネルでの風速は平均0.9m/s、五里ヶ峯トンネルでの平均風速は1.1m/sであった。

2. 4. 3 リバウンド率

リバウンド率の測定は、吹付けコンクリート1m³を切羽の右肩部に吹付け、発生したリバウンドをあらかじめ底部に敷いたシートで受けた後、ロードセルにてその重量を測定した。リバウンド率(R)は式(1)により算定した。

$$R(\%) = \frac{(\text{リバウンド重量})}{(\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{ の全重量})} \times 100 \quad (1)$$

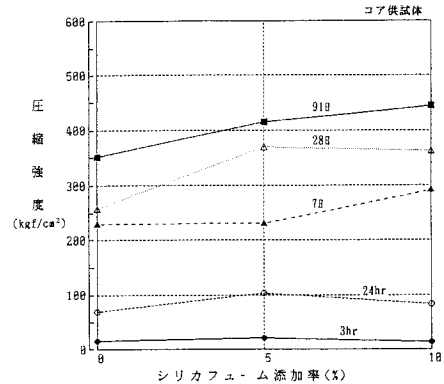


図-3 シリカフェームの添加率と強度との関係（加越トンネル）

3. 試験の結果と考察

3. 1 吹付けコンクリートの強度

3. 1. 1 シリカフェームの添加効果

図-3は加越トンネルにおけるシリカフェーム添加率と強度との関係である。また、図-4は五里ヶ峯トンネルにおけるシリカフェームを添加しない吹付けコンクリート（以下プレーンコンクリート）の強度に対するシリカフェームを添加した吹付けコンクリートの強度比である。

加越トンネルでは、シリカフェームの添加率の増加に伴い強度は増加傾向にあり、材齢91日ではシリカフェーム添加率5%の場合約20%の強度増加率である。一方、五里ヶ峯トンネルでは、スランプの変化により強度増加率は10%から40%の範囲で変動し

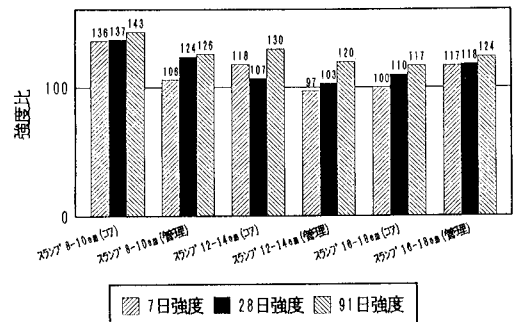


図-4 シリカフェームの添加率と強度との関係（五里ヶ峯トンネル）

ている。したがって、シリカフュームを5%添加した場合、概ね20%程度の強度増加が見込めることが分かった。

3. 1. 2 湿潤養生の効果

図-5に五里ヶ峯トンネルにおける湿潤養生効果検証試験の結果を示す。図は管理供試体強度に対する湿潤養生コア強度との比率を示す。シリカフュームを添加した場合の7日強度は、管理供試体強度と同等以上で、28日以降の強度においても同材齢の管理供試体強度には至らないが、無添加のものに比し、大きな強度の発現が認められる。このことから湿潤養生が吹付けコンクリートの強度増加に有効であると考えられる。

3. 1. 3 急結剤混合装置の効果

図-6は、急結剤混合装置の有無による若材齢強度の比較を示したものである。装置がある場合の強度は、ない場合の強度に比べ約2倍程度となった。これは、急結剤混合装置によりコンクリートと急結剤の混合が良好となり、強度増加につながったためと考えられる。

3. 2 粉塵発生量とリバウンド率

3. 2. 1 シリカフュームの添加効果

図-7に両トンネルにおけるシリカフュームの添加率と粉塵発生量との関係を示し、図-8に両トンネルにおけるシリカフュームの添加率とリバウンド率との関係を示す。

(1) 粉塵発生量

加越トンネルにおいては、スランブを8cmに固定したため、シリカフュームの添加によりコンクリートの粘性が増加したことに起因して粉塵の発生量が増加している。一方、五里ヶ峯トンネルにおいてはシリカフュームを添加することで粉塵発生量が減少しており、シリカフュームの添加効果が見られる。また、五里ヶ峯トンネルの値は加越トンネルに比べかなり低いことが分かる。このことは五里ヶ峯トンネルの配合にはシリカフュームの添加効果に加えて粉塵の発生を抑制する要因が存在することを示している。

(2) リバウンド率

加越トンネルでは、プレーンコンクリートで約30%のリバウンド率がシリカフュームを添加することで約20%に減少している。一方、五里ヶ峯トンネルではプレーンコンクリートで、加越トンネルのシリカフュームを添加した場合とほぼ同程度の約20%が得られ、シリカフュームを添加することでさらに減少して16%と

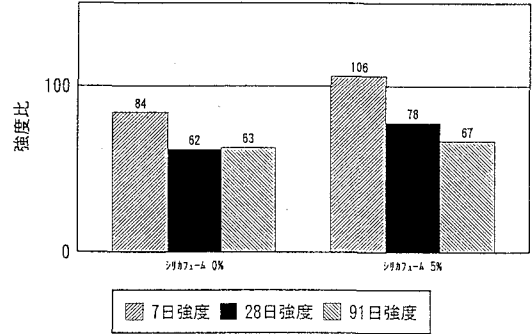


図-5 湿潤養生の効果

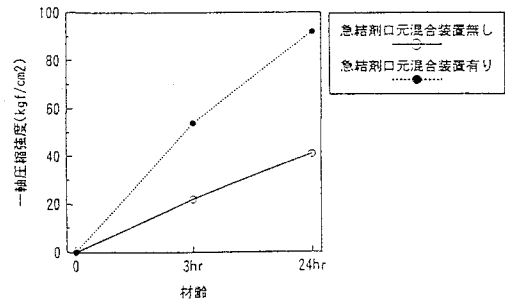


図-6 急結剤混合装置の効果

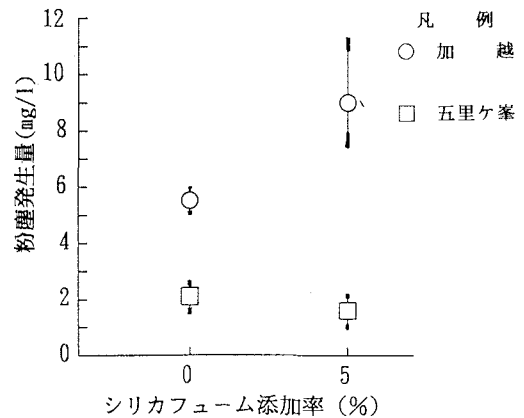


図-7 粉塵発生量の比較

なった。このことは粉塵の場合と同様にシリカフェュームの添加効果による減少効果と併せて、プレーンコンクリートにおいてもリバウンドを抑制する要因が存在しているものと推察される。

3. 2. 2 スランプとの関係

(1) 粉塵発生量

図-9は五里ヶ峯トンネルにおけるスランプと粉塵発生量との関係を示したものである。

粉塵発生量は 2 mg/m^3 前後と極めて低い値となっているため、シリカフェューム添加の有無による差は明確ではないが、シリカフェュームを添加した吹付けコンクリートでは、スランプの増加につれて減少する傾向にある。一方、プレーンコンクリートではスランプの増加に対して幾分増加の傾向にある。これはコンクリートの粘性の違いによるものと思われる。すなわち、プレーンコンクリートの場合はスランプの増加によりコンクリートの粘性が低下し、急結剤との接着力が低下して、粉塵発生量が増加するものと考えられる。一方、シリカフェュームを添加した場合は、スランプが低いレベルでは粘性が強すぎて急結剤との混合が不十分となるが、スランプが増加することで適度な粘性となるためであろう。

(2) リバウンド

図-10は五里ヶ峯トンネルにおけるスランプとリバウンド率との関係を示したものである。

図よりスランプ値が8～10cmおよび16～18cmの範囲でシリカフェュームを添加した効果が認められる。とくに、スランプ値が16～18cmの場合、プレーンコンクリートではリバウンド率が40%近くまで増加するのに比べ、シリカフェュームを添加した場合には大きな変動がない。このことは、シリカフェュームを添加することで、リバウンド率を抑制可能なスランプの領域が広いことを示している。

4 細骨材の粒度が施工性の改善に及ぼす影響

図-7、8で既に示したように、五里ヶ峯トンネルにおける粉塵発生量およびリバウンド率の測定結果は、過去の施工試験結果に比べると非常に低い値であった。

こうした施工性能に影響を及ぼす因子は、材料・コンクリートの性状、地山の状態、圧送圧力や圧送量、そしてノズルマンの技量等があげられる。これらの要因のうち、五里ヶ峯トンネルと加越トンネルの諸条件でとくに異なっている条件がコンクリートの細骨材である。表-2、図-2に示したように五里ヶ峯トンネル

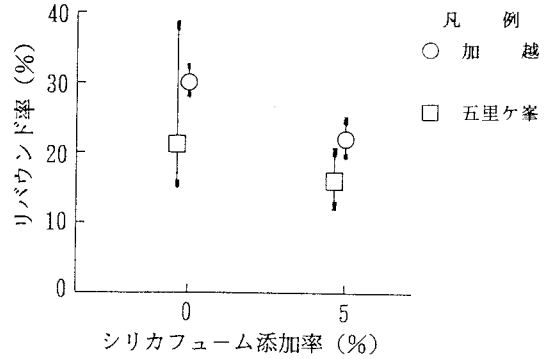


図-8 リバウンド率の比較

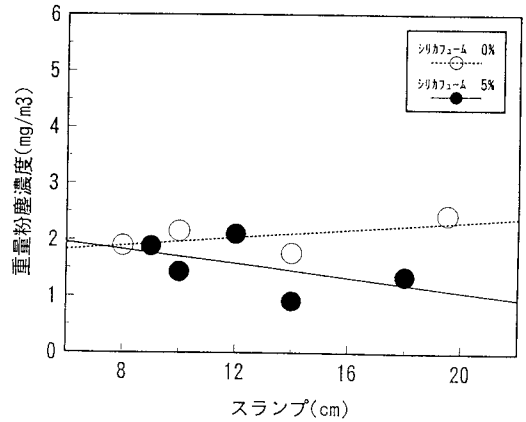


図-9 スランプと粉塵発生量との関係

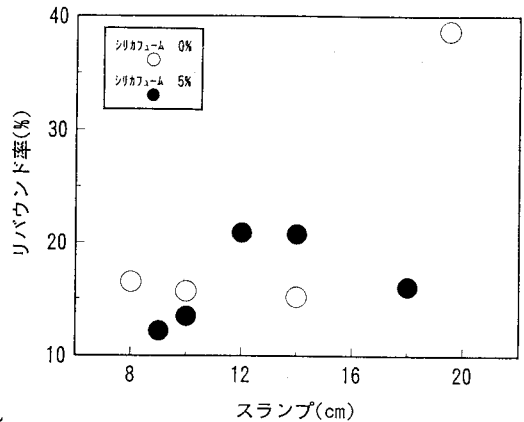


図-10 スランプとリバウンド率との関係

においては細骨材の微粒分が多い。図-11に五里ヶ峯トンネルと加越トンネルでのセメント、シリカフュームを含めた粒径5mm以下の粒度分布（モルタルに相当）のうち、0.15mm以下を対象に示す。セメント、シリカフュームを含めて比較をしても五里ヶ峯トンネルの粒度が細かいことが分かる。吹付けコンクリートの施工性の低下は、ホース内をコンクリートが圧送される際、圧縮空気による分散力よりも、粗骨材とモルタルおよび細骨材とセメントペースト間の結合力が弱い場合に生じるものと推定される⁵⁾。したがって、良質のモルタル（セメントペースト）により分離抵抗性を増し、合せて圧送時の管壁抵抗を小さくすることが施工性向上の上で重要である。

このようなことから、五里ヶ峯トンネルの細骨材の微粒分の増大とシリカフュームのベアリング効果が、材料の適度な粘性、流動性向上に寄与し、施工性の大幅な改善を促して、粉塵発生量、リバウンド率を抑制する要因となったものと考えられる。

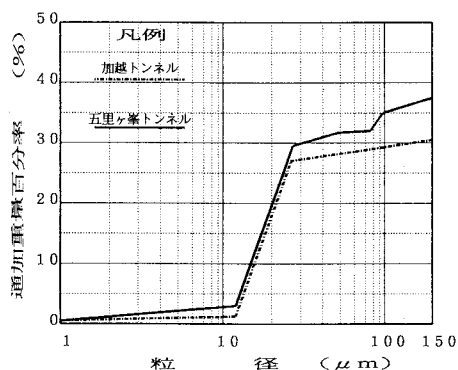


図-11 粒径5mm以下の粒度分布の比較
(分布図は0.15mm以下)

5 まとめ

- ① リバウンドおよび粉塵発生量等の施工性（特に粉塵発生量）を改善するためには、コンクリートは適度なコンシステンシーを保持させる必要があり、シリカフュームを添加した吹付けコンクリートの場合、その範囲は8～16cmと広い範囲にあるものと考えられる。
- ② 急結剤混合装置を使用することで、コンクリートと急結剤の混合が促進され、とくに若材齢時の強度が増加する傾向にある。
- ③ 吹付け後のコンクリートに7日間の湿潤養生を行った場合、材齢7日強度は、打込みコンクリートとはほぼ同等の強度が得られ、長期強度においても、シリカフュームを添加した場合は、同材齢のコンクリートの強度には至らないが、無添加のものに比し、より大きな強度の発現が認められた。このことから、高品質吹付けコンクリートの施工においては湿潤養生が有効であると考えられる。
- ④ 微粒分の多い（0.15mm通過量14%）細骨材を使用することで、コンクリートの粘性が適度に増加し、リバウンド、粉塵発生量等の施工性の改善が認められ、シリカフュームを添加することで、さらにその効果が促進された。また、強度への影響は材齢91日強度では、悪影響は認められなかった。
- ⑤ 以上の結果より、施工性および品質の向上が図れる吹付けコンクリートの配合としては、細骨材は微粒分の多い細骨材を用い（場合によっては0.15mm以下を一部碎石粉で置換）、かつ、シリカフュームをセメント量の5%程度添加した、スランプ8～16cmの配合を提案するものである。

今後は、微粒分がコンクリートの粘性および流動性に及ぼす影響の定量的把握を行って、施工性改善のメカニズム、微粒分に必要な性状の検討を行い、実用化を図りたいと考えている。

[参考文献]

- 1) 鬼頭、末永、種池、弘中：シリカフュームを添加した吹付けコンクリートの施工実験、土木学会第46回年次学術講演会講演要集、第Ⅲ部門、1991.9
- 2) 末永、羽根、久渡、橋本：耐久性に富む高強度吹付けコンクリートの施工—北陸新幹線加越トンネル、トンネルと地下、Vol. 22, NO12, p15~23, 1991.12
- 3) 鬼頭、末永、弘中、伊藤：シリカフュームを添加した吹付けコンクリートの性能、シリカフュームを用いたコンクリートに関するシンポジウム講演論文報告集、p145~152, 1993
- 4) 岡田、木坂、横関、田沢：シリカフュームを混和した吹付けコンクリートの現場施工実験、シリカフュームを用いたコンクリートに関するシンポジウム講演論文報告集、p. 139 ~144, 1993
- 5) 鬼頭、末永、登坂、弘中、吉永：シリカフュームを添加した吹付けコンクリートの施工性改善について、土木学会第49回年次学術講演会講演要集、第Ⅲ部門、p. 1146 ~1147, 1994.9
- 6) A. M. Neville: コンクリートの特性、技報堂出版