

論文 高品質吹付けコンクリートの開発

弘中義昭*¹・鬼頭 誠*²・末永充弘*³・登坂敏雄*⁴

要旨：吹付けコンクリートの施工性および品質の向上を目的として、シリカフュームや細骨材の0.15mm以下の微粒分を混入した吹付けコンクリートの現場施工試験を平成2年度以来、北陸新幹線加越、五里ヶ峯、新倶利伽羅トンネルにおいて行ってきた。これらの結果、吹付けコンクリートのリバウンドおよび粉塵濃度抑制等の施工性が向上するばかりでなく、品質面においても硬化体が緻密化することによる高強度化、AE減水剤の添加により凍結融解抵抗性の向上等、吹付けコンクリートの高品質化にも大きな効果があることを確認した。

キーワード：吹付けコンクリート、シリカフューム、微粒分、粘性、粉塵、凍結融解

1. はじめに

NATMにおける吹付けコンクリートは、施工の簡便性、機動性はもとより、地山と一体化して有効な力学的機能が期待できることから、優れた支保部材と位置付けられており、永久構造物としても適用されている。

しかし、従来の吹付けコンクリート工法においては、施工面ではリバウンドが30%程度、切羽粉塵濃度も $10\text{mg}/\text{m}^3$ を越える等問題があり、施工能率、作業環境の向上を図るためにもこれらの改善が強く望まれている。

また、品質面では、コア供試体強度が標準養生された急結剤を添加しない打込み供試体強度の60～80%程度の発現状況であること、耐久性の指標の一つである凍結融解抵抗性が小さいこと等の問題が存在している。

筆者等は、平成2年度以来、これらの問題点を解決して、吹付けコンクリートの持つ優れた特性を十分活用しながら、経済性の向上および高品質化を図ることを目的として、シリカフューム等微粒分を混入した吹付けコンクリートの現場施工試験を実施してきた[1], [2], [3]。

本論文では、シリカフュームと細骨材の0.15mm以下の微粒分（以下微粒分という）の混入がリバウンド、粉塵濃度、実吹付け量等の施工性改善の主要な要因となっていること、また、これらの混入により、硬化体の微細な空隙を充填して緻密化する効果により、AE減水剤の混入効果と相まって強度の増進や凍結融解抵抗性の向上等高品質化に寄与していることを確認したので、以下に北陸新幹線新倶利伽羅トンネルで実施した試験を主体に若干の考察を加えて述べる。

2. 試験概要

試験は、シリカフュームを添加した吹付けコンクリートに微粒分を混入して、①室内試験によるフレッシュコンクリートの軟度と粘度に及ぼす影響についての検証、この結果をもとにして、

*1 佐藤工業株式会社 中央技術研究所土木研究部主任研究員（正会員）

*2 前日本鉄道建設公団 設計技術室調査役（正会員）

*3 日本鉄道建設公団 設計技術室主任技師（正会員）、*4 同 設計技術室補佐

②適性軟度領域におけるフレッシュコンクリートの粘性の実施工時の施工性能との把握、③②における硬化体の強度、凍結融解抵抗性と煮沸吸水率との関係から品質改善効果の検討等について実施した。

表-1 室内試験配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	AIR (%)	W/C (%)	s/a (%)	セメント (kg/m ³)	シリカフューム (C×%)	微粒分 (S×%)
10	12~18	4.5±1.5	60	60	360	0.5	10, 20, 30

2.1 室内試験
新倶利伽羅トンネル
で使用している吹付け

コンクリートを参考に、表-1に示す配合で6水準について粘性の評価指標を得るためにVロート試験(吐出口寸法 65×75mm)を行った。試験は、減水剤によりスランプを10~20cmの範囲に調整して、スランプとVロート流下時間から粘性と軟度との関係を観察した。なお、本論文では微粒分を細骨材として扱っており、微粒分混入率の調整は、細骨材の0.15mmフルイ通過率と各水準での必要微粒分率との差を表-3に示す石灰石粉(炭酸カルシウム)で置換した。図-1に細骨材の粒度分布図を示す。この場合の微粒分含有率は5.5%である。

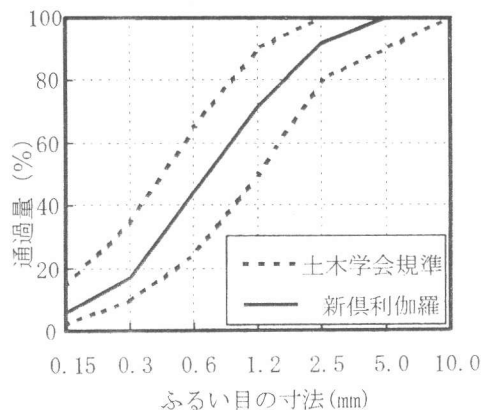


図-1 細骨材の粒度分布

2.2 実施工試験

2.2.1 試験概要

室内試験結果をもとに適性軟度領域をVロート試験時の流下スランプ範囲と想定し、この配合時のリバウンド、粉塵濃度、実吹付け量等の施工性と強度、凍結融解抵抗性、煮沸吸水率等の硬化体の品質試験を実施した。

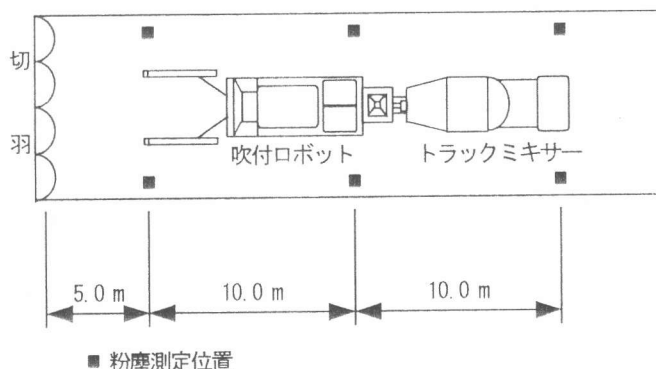


図-2 測定方法

また、すべてのケースにおいて打込みコンクリート強度と比較するため、急結剤無添加のモールド供試体を標準養生した管理供試体強度を測定した。さらに、吹付けコンクリートの初期湿潤養生(7日間)が以降の強度発現に与える影響についても調査した。なお、微粒分混入率30%のケースは、所定のスランプではホース内の閉塞が生じたので中止した。

2.2.2 試験方法

フレッシュコンクリートの性状を切羽で確認した後、所定量(リバウンド:1m³, 粉塵:4~5m³)を吹付けて、この間のリバウンド、粉塵濃度を測定した。図-2に概要を示す。また、強度は材齢3時間、24時間の若材齢はプルアウト試験により、材齢7日、28日、91日強度は、コア(Φ70×140mm)により行った。材齢7日以降は管理供試体強度も併せて求めた。なお、強度試験はすべて供試体3個により行い、その平均値を供試体の強度とした。表-2に吹付けコンクリートの実施

工試験条件を、表一 3 に試験使用材料を示す。

表一 2 実施工条件

設定吹付け量	10 m ³ /hr
吹付け厚さ	平均 15 cm
地山との吹付け距離	約 2 m
微粒分混入率	5.5, 15, 30(20)%
シリカフェーム混入率	0, 5 %

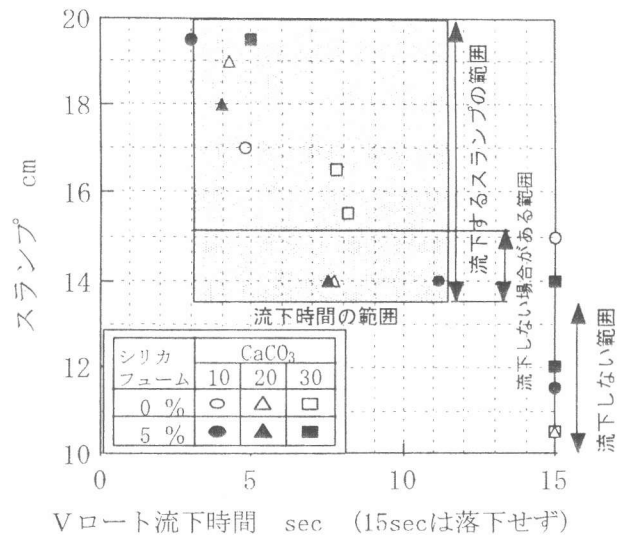
3. 試験結果と考察

3.1 室内試験

図一 3 にコンクリートのスランプと V ロート流下時間との関係を示す。この結果、V ロートで流下するスランプの下限値は 14cm 前後に位置しており、この付近が今回の吹付けコンクリートの軟度と粘度を評価する場合の基準になるものと考えられる。この場合、スランプ下限値付近の配合から、V ロート流下の条件としては、シリカフェームを添加するか、微粒分混入率を 20% 程度とした粘性が必要である。このことは、フレッシュコンクリートが吹付け機の供給用チャンパーにスムーズに流下する事が連続吹付けの重要な要因とすれば、粘度と軟度がバランスした適性スランプが存在し、シリカフェームや微粒分がこれに大きく寄与しているものと考えている。

表一 3 試験使用材料の一覧

材 料	種 類
セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	庄川産 砕砂 比重:2.54 FM:2.92
粗骨材	庄川産 砕石 (Gmax10mm) 比重:2.62 FM:6.21
微粒分	炭酸カルシウム 325M
急結剤	デンカナトニック
シリカフェーム	マイクロシリカ920相当品
AE 減水剤	NT-1000
空気連行剤	775 S



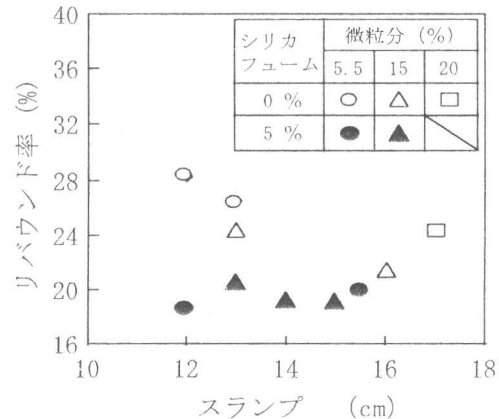
図一 3 微粒分混入率と V ロート流下時間の関係

3.2 実施工試験

3.2.1 微粒分、スランプが施工性に及ぼす効果

(1) リバウンド

図一 4 にスランプとリバウンド率との関係を微粒分混入率毎に示す。リバウンドとスランプの関係は、シリカフェームを添加した場合は既往の試験 [1][2] とほぼ同様の傾向を示した。スランプ 12~16cm の範囲では微粒分の混入に拘らず、リバウンド率は 28% から 20% 程度まで低下した。一方、微粒分混入のみの場合は、混入率の増加、スランプの増加に伴い減少傾向を示しているが、スランプ 19cm では剥落が多くなってリバウンド率が上昇した経緯や混入率 20% の結果から判断して、スランプ 14cm~19cm 間にリバウンドに対する最適領域が存在するものと考えている。これらのことは、リバウンド率が微粒分の混入、シリカフェーム添加、スランプ調整等により抑制できることを示唆している。



図一 4 スランプとリバウンド率との関係

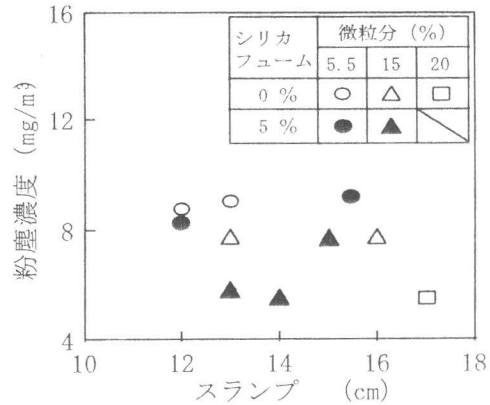
(2) 粉塵濃度

図一 5 にスランプと粉塵濃度との関係を微粒分混入率毎に示す。シリカフェュームを添加しない場合には、スランプ、微粒分混入率の増加に伴い減少傾向にあり、シリカフェュームを添加した場合には、混入率 15% を主体にスランプ 14cm 付近に最小とする軟度領域が存在している。

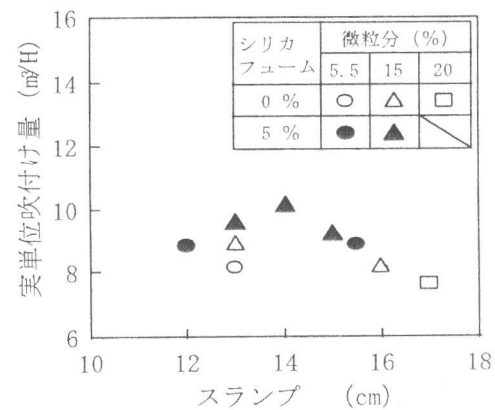
微粒分が粉塵濃度に与える影響についてはシリカフェュームの添加のみでは粉塵濃度が低下しなかった試験 [1] や、細骨材の粒度によってシリカフェュームの添加時に近い値を示した試験 [2] からも、微粒分粒度とシリカフェュームとの併用効果が大きいことおよび最適スランプ領域が存在することがわかった。

(3) 実単位吹付け量

図一 6 にスランプと実単位吹付け量との関係を示す。総吹付け量からリバウンド量を差し引いた実単位吹付け量は実際の施工能率を表現している。実単位吹付け量の最大値はスランプ 14cm 付近に存在し、微粒分混入率 15% にシリカフェュームを添加した場合が最大となる。微粒分混入率とスランプの選定が施工能率に大きな影響を与えていることがわかった。



図一 5 スランプと粉塵濃度との関係

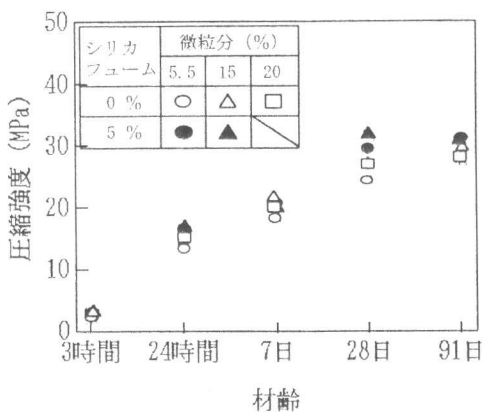


図一 6 スランプと実単位吹付け量との関係

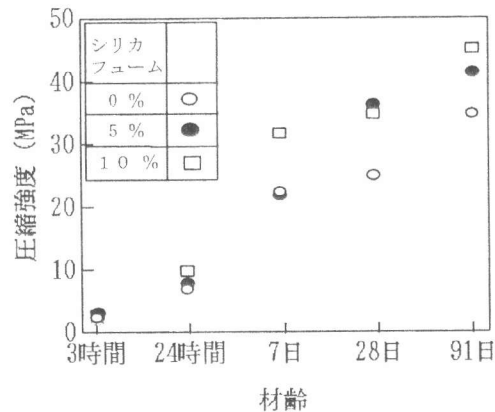
3.2.2 シリカフェューム添加率および微粒分混入率が品質に及ぼす効果

(1) 圧縮強度

図一 7 にコア供試体の圧縮強度の経時変化を示す。各材齢ごとで、シリカフェュームを添加した場合の強度増加がみられ、併せて微粒分混入率 15% とした場合その効果は大きい。この傾向は材齢 28 日まで顕著で、91 日においてもシリカフェュームを添加しないで微粒分混入率 15% とした場合



図一 7 コア強度の経時変化 (新俱利伽羅)



図一 8 コア強度の経時変化 (加越)

合には微粒分混入による増加効果が認められた。しかし、材齢91日ではシリカフューム5%添加の場合には、微粒分混入率5.5%と15%に大差がなかった。この原因として、材齢24時間の初期強度が15MPa前後と高いことが考えられる。図-8は微粒分を除いて同程度の配合条件で行った加越トンネルでの試験結果で、材齢24時間の強度差が5MPa程度ある。

これについては、坑内温度が今回25~27℃に対し加越は20~24℃であったことにより、急結剤の初期水和反応が促進された結果と考えられ、このことが今回の材齢28日以降の強度に影響しているものと考えている

図-9は管理供試体とコア供試体強度との関係を示したもので、コア供試体は、管理供試体の60~80%程度となっている。なお、参考に加越の試験結果を示すが、今回に比較して28日以降は高い強度を示している。表-5は湿潤養生を7日間行った場合のコアの強度を示す。表中の()内の数字は気中養生した材齢7日の強度を100とした場合の各材齢の強度比である。湿潤養生を行うことにより、各材齢において強度の増加が認められ、特に材齢91日の時点ではシリカフュームを添加した場合に顕著な強度増進効果を示した。このことは、管理供試体強度に比べコア供試体強度が低い原因として、初期の湿潤養生効果が大きいことを示唆している。また、これらの他、今回の急結剤の添加率が6~7.5%の範囲にあることから、急結剤の初期水和反応の促進による長期強度の低下

も一因と考えられる[4]。

(2) 凍結融解抵抗性

図-10は吹付けコンクリート供試体の凍結融解抵抗性試験の結果である。シリカフュームを添加し、微粒分混入率を15%としてAE剤を添加した場合に300サイクルで60%以上の相対動弾性係数が得られており、耐久性が向上したことを示している。

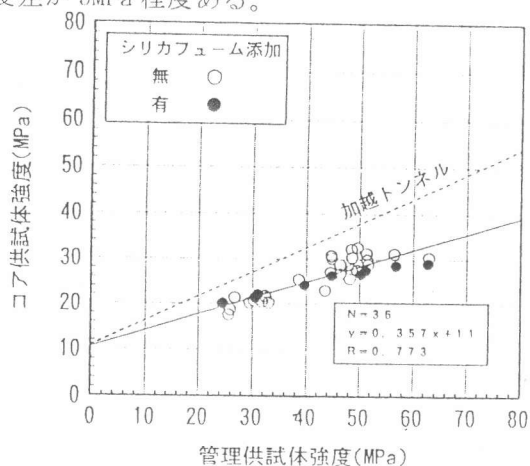


図-9 コア強度と管理供試体強度との関係

表-5 養生温度の効果

シリカフューム添加率	養生条件	一軸圧縮強度 MPa		
		湿潤7日間		
		材齢7日	材齢28日	材齢91日
0%	気中	20.0 (100)	24.0 (120)	26.2 (131)
	湿潤	20.8 (104)	25.0 (125)	27.7 (139)
5%	気中	21.9 (100)	27.4 (125)	29.0 (132)
	湿潤	22.6 (103)	28.6 (131)	32.9 (150)

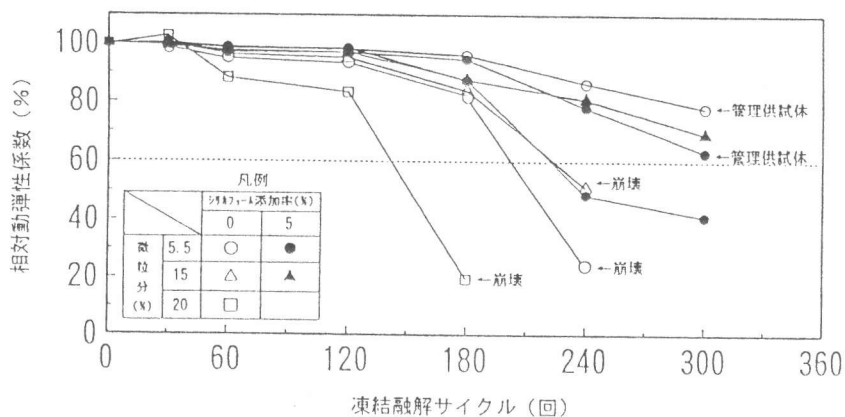
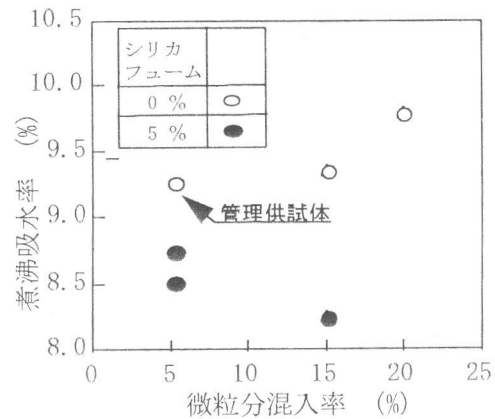


図-10 凍結融解抵抗性試験結果

(3) 煮沸吸水率

図一 11 に煮沸吸水率試験結果を示す。シリカフュームを添加した場合の吸水率が低く、さらに微粒分混入率を15%とした場合に最小値を示しており、シリカフュームの添加と微粒分の混入によりコンクリートが緻密化することを示しているものと考えられる。しかし、微粒分混入率20%では吸水率が最大となり、これは微粒分の混入量が多すぎると粘性が過度に増加し、空気の巻き込み現象が生じるためと考えている。



図一 11 煮沸吸水率試験結果

5. まとめ

試験の結果確認できた事項は以下のとおりである。

- ① 微粒分の適量混入は（今回は、シリカフューム5%、炭酸カルシウム15%）、セメントを含む粉体量の増加につながり、これが粘性を増加させる。
- ② 本配合で発生した粘性を活用して、施工性を最大とする軟度は、スランブ 14cm 付近に存在するものと考えられる。
- ③ 微粒分の混入により材料の使用粒度範囲が広くなり、通常、硬化体中に空隙として残留する部分が充填されて細孔径化し高密度化するとともに、空気圧送式の吹付けコンクリート特有の比較的大きな空隙の発生を抑制する効果がある。これにより、強度増進効果、AE剤との併用による凍結融解抵抗性の向上効果が期待できる。
- ④ 吹付けコンクリートの初期強度は、急結剤の効果に影響されるとともに坑内環境に依存している。また、コア供試体の長期強度が管理供試体強度の60～80%に低下している原因は急結剤の初期水和促進による他、養生条件の違いも要因の一つであると考えている。

このようなことから、適量の微粒分の混入とAE減水剤の添加により、吹付けコンクリートの粘度と軟度の調整を行って、施工性、品質の向上および経済化を図る目的が得られたものと考えており、早期に施工管理手法の確立を目指したい。また、これらを活用した高品質化の対応策としては、初期強度はもとより必要な長期強度発現に対応した急結剤の研究が必要である。さらに、永久構造物への適用に当たっては、所要の水密性および耐久性を確保するため、乾燥収縮量や収縮応力の影響の研究を深度化する必要があるものと考えている。

参考文献

- [1] 末永、羽根、久湊、橋本：耐久性に富む高強度吹付けコンクリートの施工、トンネルと地下 Vol. 22, No. 12, pp. 15～23, 1991
- [2] 末永、丸山、久湊：微粒分混入による吹付けコンクリートの高品質化に関する研究、トンネルと地下、Vol. 26, No. 5, pp. 27～35, 1995
- [3] 鬼頭、末永、登坂、弘中、吉永：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、土木学会トンネル工学研究発表会論文報告集、第4巻、pp. 395～400, 1994
- [4] 原田、松井、手塚、佐伯：高耐久吹付けコンクリートの研究・開発、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 1, pp. 1013～1018, 1995