

微粒分を混入した吹付けコンクリートの施工特性 CONSTRUCTION PERFORMANCE OF THE SHOTCRETE INCLUDING MINUTE PARTICLES OF FINE AGGREGATE

鬼頭 誠*, 末永充弘*, 登坂敏雄*, 吉永正雄**, 弘中義昭***

Makoto KITO, Mitsuhiro SUENAGA, Toshio TOSAKA, Masao YOSHINAGA, Yoshiaki HIRONAKA

This paper presents the results on field test on shotcrete in the Shin-kurikara tunnel located in Toyama prefecture. The purpose is to understand the influence of the viscosity on the construction performance and quality of shotcrete. From the field test results, it is observed that the slump adjusted by mixing of minute particles of fine aggregate are effective in reducing the rebound and the dust, and also in improving the strength and durability of the shotcrete.

Consequently, a fine mix proportion of shotcrete is proposed; consisting 15 percent of minute particles of fine aggregate, 5 percent of silicafume and the slump is adjusted to 14cm. This mix proportion provides fine construction performance and improved quality of shotcrete.

Keywords: shotcrete, silicafume, durability, minute particles of fine aggregate
construction performance

1. はじめに

NATMによるトンネル施工時の支保部材は、鋼製支保工、吹付けコンクリート、ロックボルトが主体であるが、その中でも吹付けコンクリートは、施工の機動性、作業の安全性、地山と他支保部材とを一体化して、拘束効果、土圧分散効果および支保力の伝達効果等の支保機能を有し、配合、金網との併用、鋼繊維の混入などによる高性能化、巻厚選定の自由度等の点で、他の支保部材に比較して優れた特性を保有しており、最も有効な支保部材と位置付けされている。

しかし、施工現況を概観すると、施工面ではリバウンドが30%前後あり、切羽粉塵濃度は通気状況による変動はあるものの、概ね $10\sim 20\text{mg}/\text{m}^3$ の状況下にある。リバウンドは、材料の損失、必要作業量の増加をきたして掘削サイクルの延長につながり、最終的にコストの低減を阻んでいるばかりでなく、硬化コンクリートの品質にも大きく影響する。一方、粉塵の発生は坑内作業環境の悪化を招き、作業員の健康に障害を与える恐れもある。さらに、品質の面からは、コア供試体強度は一軸圧縮強度で、標準養生された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年度以降、このような問題点の解決を図って、吹付けコンクリートの優れた特性を十分活用しながら、経済性、高品質化を図ることを目的として、吹付けコンクリート材料に起因する粘性の影響、

* 正会員 日本鉄道建設公団設計技術室

** 佐藤工業(株)土木技術部, *** 正会員 佐藤工業(株)中央技術研究所

急結剤添加時の混練効果、初期養生効果、耐久性向上策などについて、現場施工試験を主体に研究を進めてきている^{1) 2)}。

本論文では、粒径0.15mm以下の微粒分の増加が、リバウンド、粉塵濃度、実吹付量などの施工性改善の大きな要因となっていることが判明したので、若干の考察を加えて以下に述べる。

2. 試験概要

試験は、粒径0.15mm以下の微粒分の増加により生ずる吹付けコンクリートの粘性と施工性能との関係を把握するため、北陸新幹線新倶利伽羅トンネル（東）において実施した。試験項目は、①細骨材微粒分およびシリカフュームの添加率がコンクリートの粘性に及ぼす影響を検証するための室内試験と②室内試験の配合を基本とするコンクリートを現場にて吹付け、施工性および吹付けコンクリートの品質を検証する実施工試験の2種類である。

2. 1 今回の試験に至る経緯

今回実施した試験の目的および位置づけを明確にするため、新倶利伽羅トンネルにて実施工試験を実施するまでの経緯を図-1のフロー図に示し概要を以下に述べる。

加越トンネルにおいては¹⁾、シリカフュームの添加がリバウンド率の低減と強度の増加に寄与することが明らかとなった。しかし、粉塵濃度は減少せず、粉塵濃度の抑制にコンクリートのスランプが影響することが示唆された。五里ヶ峯トンネルにおいては²⁾、リバウンド率及び粉塵濃度を抑制できる最適スランプ域を提起するとともに、細骨材の0.15mm以下の微粒分がコンクリートの粘性に影響を及ぼし、施工性の向上に効果のあることが推察された。以上2トンネルの実施工試験の結果から、これらを検証するために新倶利伽羅トンネルにおいて試験を実施した。試験は、室内試験により微粒分混入率と粘性との関係を検証し、実施工試験によりこれらの微粒分が施工性および品質に及ぼす影響を検証することとした。

2. 2 室内試験

室内試験は、新倶利伽羅トンネル（東）で使用している吹付けコンクリートを対象に、細骨材の0.15mmフルイ通過微粒分（以下微粒分と称す）混入率およびシリカフュームの添加率を変化させて、モルタルの粘性との関係を調査した。モルタルの粘性評価は、微粒分混入率10%、シリカフューム添加量 0%の配合のフロー値を基準として、微粒分およびシリカフュームを添加した場合に同一のフロー値を確保するために要した減水剤添加率を指標とした。表-1にモルタルの配合を示す。

次に、モルタル試験の結果をもとに表-2に示す吹付けコンクリートの配合を選定し、モルタル同様、減水剤添加率をコンクリートの粘性と置き換えて評価した。また、併せてV型ロート試験（吐出口寸法65×75mm）を行い³⁾、スランプとV型ロート流下時間との関

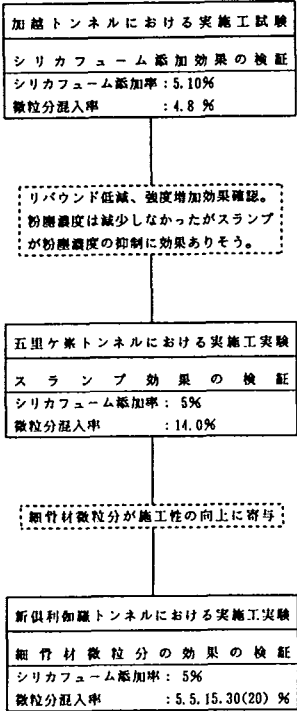


図-1 実施工試験の経緯

表-1 室内試験用モルタルの配合

W/C	C/S	シリカフューム 添 加 率	微粒分混入率	減水剤添加率
(%)		(%)	(%)	(%)
60	1/3	0, 3, 5, 7	10, 20, 30	0 ~ 1.5

表-2 室内試験用コンクリートの配合

G _{max} (mm)	スランブ (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

表-3 吹付け条件

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) %
シリカフューム添加率	0.5 %

係を測定した。なお、各試験用モルタルおよびコンクリートの微粒分混入率の調整は、プレーンの微粒分混入率と各水準での必要微粒分量との差を石灰石粉（炭酸カルシウム）で置換することとした。

2. 3 実施工試験

(1) 試験概要

実施工試験は、室内試験の結果を基にシリカフュームの添加率および細骨材微粒分混入率を変化させた吹付けコンクリート（表-4）を施工して、この時のリバウンドおよび粉塵発生量を測定するとともに、強度試験、凍結融解試験および煮沸吸水率試験を実施した。また、吹付けコンクリートと急結剤との混合効果を向上させるため、口元混合装置（図-2）の性能試験も行った。なお、微粒分混入率30%のケースについては、スランブを所定の値にしても吹付け時のホースの閉塞が生じたので、中止した。

(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率（吹付け量1m³）、粉塵濃度（吹付け量4~5m³）を測定した（図-3）。また、吹付けコンクリートの強度試験は、材齢 3hr, 24hr, の若材齢強度は、プルアウト試験により、材齢 7日, 28日, 91日の強度は、コアおよび管理供試体により求めた。また、煮沸吸水試験および凍結融解試験はASTMに定める方法に準拠して行った。また、口元混合装置の性能試験は、吹付けノズルの手前3mの位置にある急結剤添加用のY字管に直接口元混合装置を取付ける方法により行った。表-3に吹付けコンクリートの施工条件を示し、配合および使用材料の一覧をそれぞれ表-4, 5に示す。

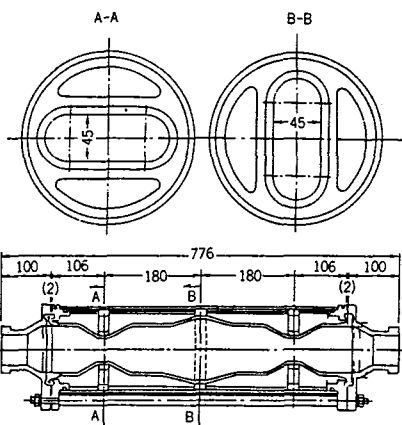


図-2 口元混合装置

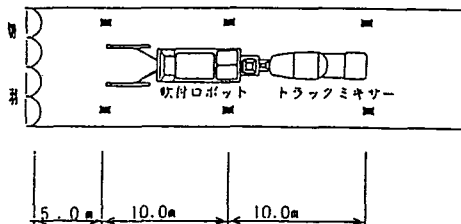


図-3 測定方法

3. 室内試験結果と考察

3. 1 微粒分混入率およびシリカフューム添加率と粘性との関係

図-4にモルタル試験における微粒分混入率と減水剤添加率との関係をシリカフュームの添加率ごとに示す。全てのケースで微粒分混入率の増加に対応して減水剤の添加率が増加している。また、同一微粒分混入率の場合には、シリカフュームの添加率の増加に対応して微粒分同様、減水剤の添加率が増加している。

表-4 実施工試験のコンクリート配合

Gmax (mm)	スランブ (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	14 ~16	4.5 ±1.5	55	60	360	0.5	5.5, 15, 20, 30

表-5 材料の諸元

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	デンカナトミック
シリカフューム	マイクロシリカ920 相当品
A E 減水剤	N T-1000
空気導入剤	775S

したがって、シリカフュームの添加および微粒分を混入することにより、モルタルの粘性が増加することを確認した。また、コンクリートの場合もスランブに着目した微粒分混入率と減水剤の添加率との関係は、モルタルと同様の傾向であった。なお、当然のことながらスランブを大きくするために必要な減水剤の添加率も増加した。

3. 2 微粒分混入率とVロート流下時間

図-5にコンクリートのスランブとVロート流下時間との関係を示す。これによれば、Vロートで流下するスランブの下限値は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、スランブ

下限値付近の配合を見ると、シリカフュームを添加した場合、微粒分が20%以下であれば流下し、シリカフュームを添加しない場合は、微粒分混入率が20%の場合のみ流下している。したがって流下の条件としては、シリカフュームを添加するか微粒分混入率20%程度とした適度な粘性が必要であると考えている。そこで、空気圧送方式の吹付けコンクリートの場合、従来の圧送モデルにおける分離抵抗性の効果と併せて、圧送用チャンパー内に所定量のコンクリートがスムーズに自然落下することが吹付けの重要な要因と考え、これを達成するために粘度と軟

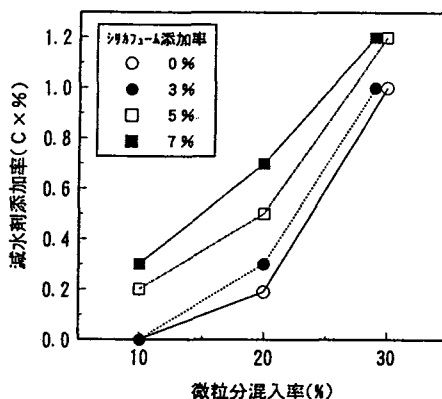


図-4 微粒分混入率と減水剤添加率との関係

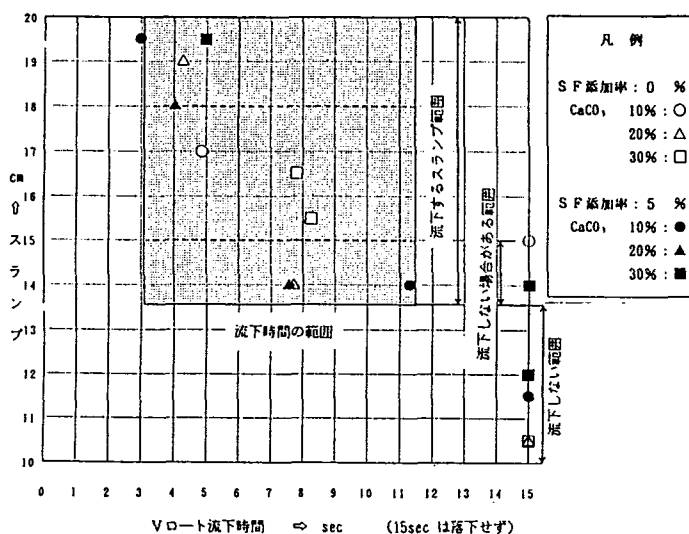


図-5 微粒分混入率とVロート流下時間の関係

度のバランスを確保する適性スランプが存在し、シリカフュームおよび微粒分がこれに大きく寄与していると考えられる。

4. 実施工試験結果と考察

4. 1 シリカフューム添加率および微粒分混入率が施工性に及ぼす効果

(1) リバウンド

図-6に微粒分混入率とリバウンド率との関係をシリカフュームの添加の有無に分けて示す。図よりシリカフュームを添加しない吹付けコンクリートの場合には、微粒分混入率が5.5%から15%に増加すると、リバウンド率は平均27%程度から23%程度に減少し、微粒分混入率を20%とした場合には15%の場合とほぼ同程度の値となった。一方、シリカフュームを添加した吹付けコンクリートの場合には微粒分混入率の増減に関わらず、平均19%程度とブレンコンクリートに比べ非常に小さな値を示した。このことから、微粒分を混入することによるリバウンド低減効果は見られるものの、シリカフュームを添加することによるリバウンドの低減効果の方が大きいことがわかる。

(2) 粉塵濃度

図-7に微粒分混入率と粉塵濃度との関係を示す。図より微粒分混入率が増加すると粉塵濃度は減少する傾向にあり、しかもシリカフュームを添加することにより30~40%の大幅な減少が認められる。これは、シリカフュームのみの添加では見られなかった現象であり、五里ヶ峯トンネルでの結果と合わせて検討すると⁴⁾微粒分混入により発生する粘性の効果に起因することがわかった。粉塵濃度の絶対値が五里ヶ峯トンネルの値に比べ大きくなっているが、これは今回の試験を行った新俱利伽羅トンネルの施工断面が五里ヶ峯トンネルの1/2程度であったため、換気用送風量を同一と考えると単位換気量あたりの粉塵濃度は概ね同じ値となる。したがって、微粒分混入率が五里ヶ峯トンネルと同様に15%程度になると粉塵濃度の低減に大きな効果があることがわかる。

(3) 実単位吹付け量

図-8に微粒分混入率と実単位吹付け量との関係を示す。ここで、実単位吹付け量とは、単位吹付け量からリバウンド量を差し引いた実際に地山に吹付けられた単位時間当たりのコンクリート量である。これより、図-8

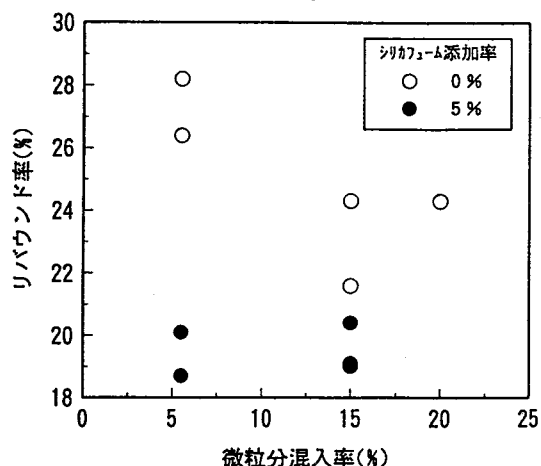


図-6 微粒分混入率とリバウンド率との関係

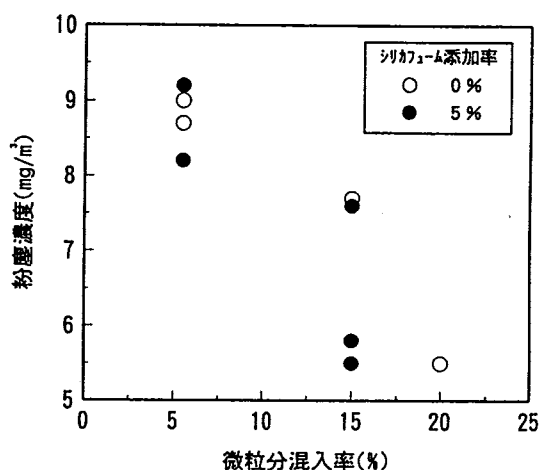


図-7 微粒分混入率と粉塵濃度との関係

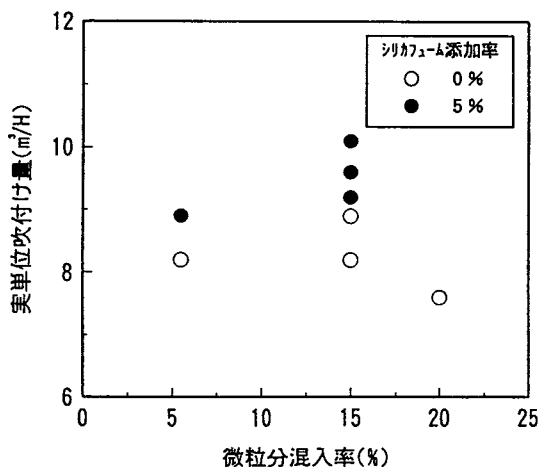


図-8 微粒分混入率と実単位吹付け量との関係

微粒分混入率が15%になると概ね実単位吹付け量が最大を示す。したがって、実単位吹付け量がコンクリートの供給効率および圧送効率とリバウンド性能との複合された結果とすると、微粒分の混入とシリカフュームの添加が吹付け効率の向上に大きく寄与していることがわかる。

4. 2 スランブが施工性に及ぼす効果

(1) リバウンド

図-9にスランブとリバウンド率との関係を示す。シリカフュームの添加の有無によりリバウンド率に差はあるものの、概ねスランブ14cm付近にリバウンドを最小とする範囲が存在している。これは、室内試験結果で得られた粘度と軟度のバランス点にほぼ相当しており、リバウンド率がコンクリートの粘度と軟度の調整により抑制できることを示していると考えられる。

(2) 粉塵濃度

図-10にスランブと粉塵濃度との関係を示す。シリカフュームを添加しない場合には、スランブの増加に伴い概ね減少傾向にあるが、シリカフュームを添加した場合には、微粒分混入率15%を主体としてスランブ14cm付近に粉塵濃度を最小とする領域が存在している。

(3) 実単位吹付け量

図-11にスランブと実単位吹付け量との関係を示す。実単位吹付け量の最大値はスランブ14cm付近に存在し、シリカフュームを添加して微粒分を15%とした場合に最大となる。微粒分混入率とスランブが吹付け効率の向上に大きく係わっていることがわかる。

4. 3 口元混合装置が施工性に及ぼす効果

図-12、13は口元混合装置の有無によるリバウンド率および粉塵濃度の比較である。口元混合装置を装着することでシリカフュームの添加の有無に関係なくリバウンド率は減少しており、口元混合装置の効果が明らかである。また、粉塵濃度との関係を見ると、シリカフュームを添加しない場合は口元混合装置の効果は見られないものの、シリカフュームを添加した場合は、その効果が発揮されている。すなわち、本装置によるコンクリートと急結剤との混合の促進効果が、施工性の改善に大きく寄与することがわかる。

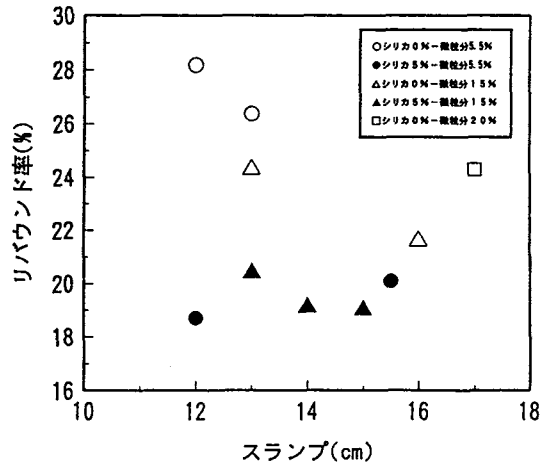


図-9 スランブとリバウンド率との関係

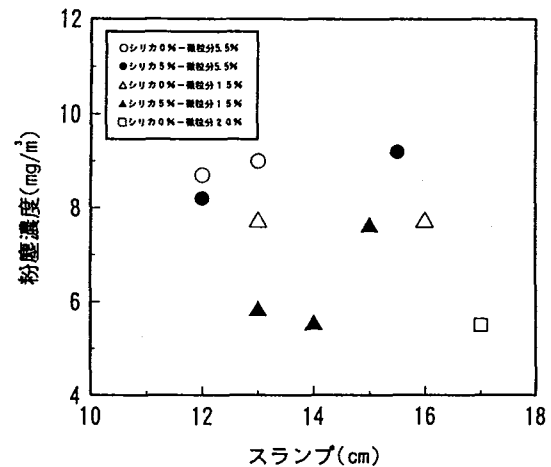


図-10 スランブと粉塵濃度との関係

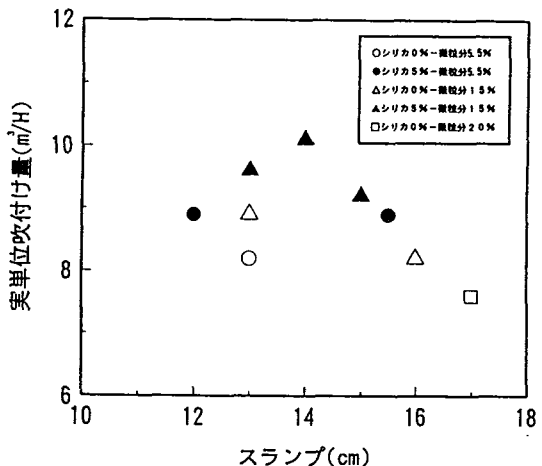


図-11 スランブと実単位吹付け量との関係

4. 4 シリカフューム添加率および微粒分混入率が品質に及ぼす効果

図-14に、微粒分の混入による強度への影響を示す。図は微粒分混入率5.5%の強度を100とした場合の微粒分混入率15%の強度比を示したものである。図から微粒分の混入による強度の増加が見られる。これは通常、吹付けコンクリート中に存在している空隙部分を微粒分が満たす結果と考えられる。このことは図-15に示した煮沸吸水率試験結果で、シリカフュームを添加し、微粒分を混入した場合の煮沸吸水率がプレーンに比較して低下していることから、硬化体が高密度化した結果によることは明らかである。

図-16は吹付けコンクリート供試体の凍結融解試験の結果である。シリカフュームを添加し、微粒分を15%とした場合に300サイクルで60%以上の相対動弾性係数が得られ、耐久性が向上したことを示しているすなわち、シリカフュームを添加し微粒分を15%とした場合、施工性のみならず品質面においても大きな効果が期待できる。

4. 5 吹付けコンクリートの粘性特性

吹付けコンクリートは、粗骨材の最大寸法、細骨材率、単位セメント量等から、普通コンクリートと比較してよりモルタルに近い。粘性特性は配合、骨材性状、単位水量等複雑な要因に支配されており、一般に、フロー、スランプ等の軟度は、ほぼ降伏値を表し、これを減水剤により施工可能な範囲に調整しても、分離抵抗性、流動性、付着性、結合性等に寄与する塑性粘度の変化に大きな影響はないものとされている。このようなことから、今回、微粒分の適量混入より施工に適した軟度に調整の結果、本配合条件で発生した粘性を十分に活用して、施工性を最大とする軟度がスランプ14cm付近にありこれを捉えることができたものと評価している。

5 まとめ

吹付けコンクリートの施工性の向上は、0.15mm以下の微粒分の混入による適度の粘性付与と減水剤によるスランプ調整により可能であることがわかった。すなわち、吹付けコンクリートの施工性がフレッシュコンクリートの継続的な供給とこれのホース内圧送時の輸

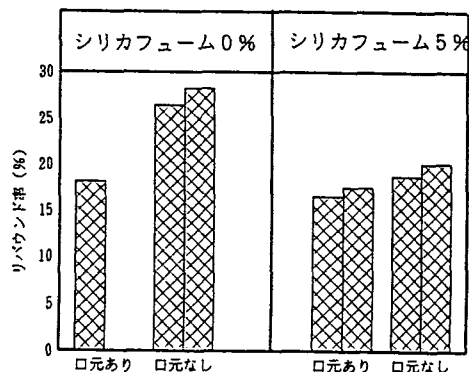


図-12 リバウンド率における口元混合装置の効果

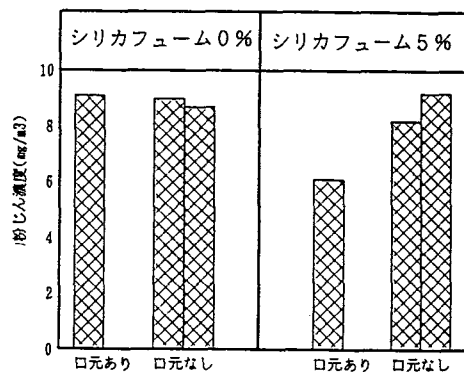


図-13 粉塵濃度における口元混合装置の効果

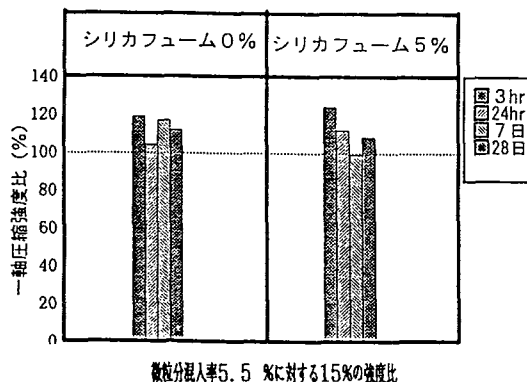


図-14 微粒分混入率と強度比との関係

送体に作用する分散力を粘性に起因する結合力が上回るよう配合設計することの有効性を意味している。なお、この場合シリカフュームは圧送時、ホース壁面との潤滑剤的な効果が大いものと考えられる。

本研究において確認できた事項は次のとおりである。

- ① 微粒分の適量混入は、セメントを含む粉体量の増加につながり、これが粘性を発生させる。
- ② 本配合条件下で発生した粘性を十分に活用して、施工性を最大とする軟度が、スランプ14cm付近にある。
- 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、空隙として残留する部分が充填されて細孔径化して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。
- ④ 微粒分による強度増進効果があり、AE剤との併用により凍結融解抵抗性の向上等にも効果がある。
- ⑤ 施工性及び品質の向上は微粒分の混入の他、コンクリートと急結剤との混合促進によっても達成可能であり、口元混合装置の使用は再練り効果と併せて有効な手段である。

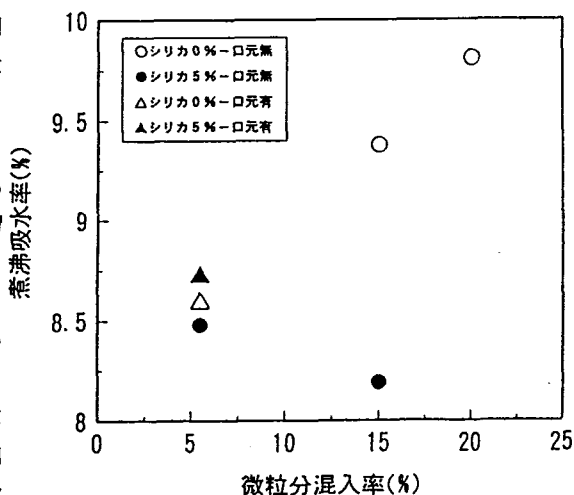


図-15 煮沸吸水率試験結果

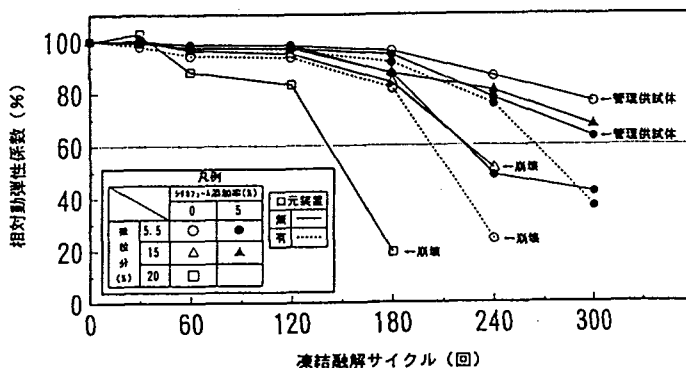


図-16 凍結融解試験結果

6 おわりに

吹付けコンクリートの特性は複雑で

はあるが、6年間にわたる実施工試験

の積み重ねにより、吹付けコンクリートの合理的かつ経済的な設計、施工の方向付けができたものと考えている。今後は、粘性を活用した配合の施工管理手法の研究が重要と考えている。最後になりましたが、試験に協力いただいた方々に感謝申し上げます。

7 参考文献

- 1) 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、pp. 145~152, 1993
- 2) 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発表会論文報告集、第4巻、pp. 395~400, 1994
- 3) 小沢、坂田、岡村：ロート試験を用いたフレッシュコンクリートの自己充填性評価、土木学会論文集N0. 490/V-23, pp. 61~70, 1994.5
- 4) 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