

トンネル内張補強材料としての吹付けコンクリートの適用性について

APPLICATION OF SHOTCRETE FOR THE REPAIR AND REINFORCEMENT OF TUNNEL LINING

弘中義昭*・岩藤正彦*・坂下文夫*・伊東良浩*・石橋哲夫*

Yoshiaki Hironaka, Masahiko Iwafuji, Fumio Sakashita, Yoshihiro Ito and Tetsuo Ishibashi

Recently, the use of shotcrete is increasing in the tunnel lining and the repair of structures. Therefore, it is requested to improve the performance of shotcrete for decreasing rebound and dust, and increasing strength and durability. In Europe, silica fume has been widely mixed in shotcrete for solving above problems. This report deals with the performance and quality of wet mix silica fume shotcrete.

According to the results of the experiment, it is confirmed that the compressive strength and the bond strength of the shotcrete are improved by mixing silica fume.

Keywords: Shotcrete, Tunnel Lining, Reform, Single Shell Lining, Silica Fume

1. まえがき

劣化したトンネルを補修する方法としては、覆工コンクリートを全面解体する方法、あるいは覆工の内壁面劣化部分を除去した後、補強材料を内張する方法などがあげられる。筆者等は新しいトンネル補修工法として、覆工の内壁面劣化部分をカッターヘッドにより除去する工法の開発を行っている¹⁾。この工法における補修材料としては、既存のコンクリートとの密着が良く、型枠を組み立てる必要のない吹付けコンクリートが有効と考えられる。しかし、現在、トンネルの一次覆工に用いられている吹付けコンクリートは、普通コンクリートに比べ耐久性に劣るため、永久構造物として使用されることは希である。一方、欧米においては吹付けコンクリートにシリカフュームを混和し、永久構造物として使用することを目指して高品質化を図ることが進められている²⁾。このような現状にもとづき、本報告は、トンネル覆工の内張補強材料としてのシリカフューム混和吹付けコンクリートの適用性について、その耐久性に主眼を置いて行った実験の結果について報告するものである。また、シリカフュームの代替材料として高炉スラグ微粉末の利用の可能性についてもあわせて検討した。

*正会員 佐藤工業(株)中央技術研究所

2 実験方法

実験は吹付けコンクリートの施工性に関する実験と品質に関する実験を行った。

2. 1 実験装置と実験方法

吹付けコンクリートの製造、運搬および吹付けは図－1 に示す実験装置によった。

2. 1. 1 施工性試験

施工性試験としては、吹付けコンクリートの圧送性能およびリバウンドと関係の深い、吹付け時のコンクリートの付着性能を検証する試験を実施した。付着性能を検証する試験は吹付けノズルを固定した状態で、天井に設置したパネル(1000 × 1000mm)にコンクリートを一定量(150 ℓ)吹付け、パネルに付着したコンクリートの重量を連続的に測定して行った。

2. 1. 2 品質試験

品質試験としては吹付けコンクリートの圧縮強度、凍結融解、透水、乾燥収縮および付着強度の各試験を実施した。各試験のための供試体は図－1 に示す試験装置により、以下に示す手順で作成した。

- ①供試体作成用パネル(750 × 750mm)にコンクリートを吹付ける。
- ②コンクリートが硬化した後(材令24時間)、所定の寸法にコアリングもしくはカッティングする。
- ③成型した供試体は、所定の期間標準水中養生(20± 2℃)を行った後各試験を実施。

表－1 に試験項目と試験方法を示す。

なお、付着試験は、図－1 に示す試験装置の天井に設置したコンクリートパネル(Cmax=13mm, C+SF=450kg, W/C=35%, 材令=28日)に所定の配合のコンクリートを吹付け(厚さ約70mm)、20± 2℃、湿度60%の室内で養生した後、材令28日でコンクリートパネルと吹付けコンクリートとの付着強度を測定した。付着強度の測定は建研式引張り試験機を用いた。

2. 2 試験の因子と水準

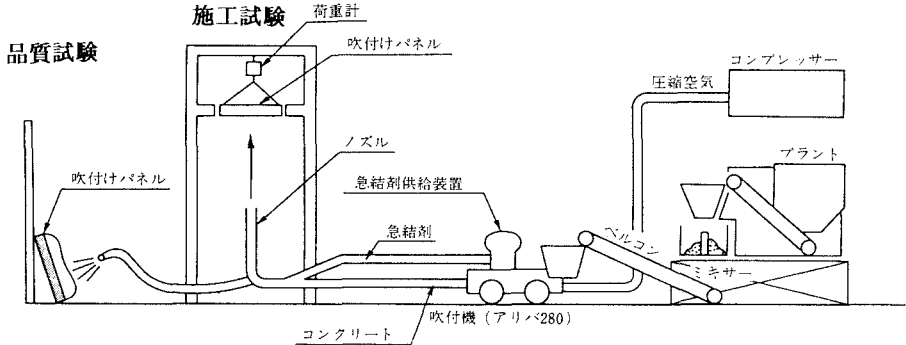
表－2 に試験の因子とその水準を示す。

なお、2つの試験ともまだ固まらないコンクリートの性質および吹付け条件は同様とし、以下に示すとおりとした。

- ・ス ラ ンプ＝10±2cm
- ・空 気 量＝4±2%
- ・吹付け圧力＝4～5 kgf/cm²
- ・設定吐出量＝6 m³ /hr

表－1 試験項目と試験方法

試 験 項	材 令	試 験 方 法
プルアウト試験	3, 24 hr	土木学会基準F－V
圧縮強度試験	7, 28, 91 日	J I S A 1108
凍結融解試験	14 日	A S T M C 666
透 水 試 験	28 日	D I N
乾燥収縮試験	7 ～ 365 日	J I S A 1108
付着強度試験	28 日	建研式



図－1 実験装置

2. 3 コンクリートの配合

施工性試験および品質試験に用いたコンクリートの配合を表-3に示す。ここで、施工性試験は実用的な配合を対象としたため、単位結合材量に対する水結合材比の組合わせはそれぞれ一通りとし、単位結合材量360kg, 400kg, 450kg に対し水結合材比はそれぞれ55%, 45%, 35%とした。また、スランプは高性能A E減水剤の添加量で調節した。

3 実験結果と考察

3. 1 施工性試験

3. 1. 1 付着重量

実験では、ノズルを固定して一点に吹付けるため、付着重量に耐えられず途中で吹付けコンクリートが落下したものもあるため、吹付け終了時の付着重量ではなく最大付着重量で比較を行った。図-2に各配合ごとの最大付着重量を示す。全体にシリカフュームを混和したものが付着重量が多く、この傾向は、鬼頭等³⁾による現場施工試験でのリバウンド測定と同様の結果で、シリカフュームの混和により付着力が増し、リバウンドの低減が図れることを示している。一方、高炉スラグ微粉末を添加した場合は、付着重量は60kg前後となりシリカフュームを10%置換した場合には及ばなかった。これは粘性が強すぎて圧送時の脈動が発生し、コンクリートが塊となって吐出したため、パネルに付着したコンクリートがたたき落とされたことによると思われる。

3. 2 品質試験

3. 2. 1 圧縮強度

図-3に材令91日までの圧縮強度の経時変化を示す。なお、図-3には整理の都合上、結合材360kg・W/C=55%, 結合材400kg・W/C=45%, および結合材450kgのW/C=35%, と45%のケースについて示した。

これより、いずれの配合においても材令28日および91日においてはセメントの5ないし10%をシリカフュームで置換することにより強度の増進が認められた。一方、材令7日以前の若材令においてはその効果は顕著でない。また、材令24時間までの強度は、急結剤の混合の程度による影響を受けた。

次に高炉スラグ微粉末でセメントの一部を置換した場合の圧縮強度の経時変化を図-4に示す。これより、結合材400kgの場合は材令7日以降シリカフュームと同様にプレーンに比べ20~30%の強度増加効果が認められた。一方、結合材450kgの場合は、スラグによる置換の効果は見られなかった。この原因として、以下のことが考えられる。結合材450kgの場合は結合材400kgに比べ、コンクリートの粘性が強い。これに高炉スラグ微粉末を添加したことでさらに粘性が増したため、とくに結合材450kgではコンクリート圧送時に脈動が発生し、吹付けられたコンクリート内に空隙が発生しやすくなったためと思われる。したがって、高炉スラグを添加する場合は、コンクリートの粘性増加による圧送性能を損なわない範囲に配合の調整を行う必要がある。粘性の制御が可能な範囲であれば、シリカフュームと同様、スラグに含まれる約3

表-2 試験の因子と水準

因 子	水 準
単 位 結 合 材 量(kg)	360, 400, 450
水 結 合 材 比(%)	35, 45, 55
シリカフューム置換率(%)	0, 5, 10
高炉スラグ微粉末置換率(%)	0, 10, 25
急 結 剤 添 加 率(%)	6

表-3 コンクリートの配合

Gmax	スランプ	空気量	W/C+	C+	S ¹ a	SF	B
mm	cm	%	SF+B %	SF+B kg	%	%	%
13	10±2	3±1	45, 55	360	65	0.5, 10	0
13	10±2	4±1	45	400	65	0.5, 10	0
13	10±2	5±1	35, 45	450	65	0.5, 10	0.10, 25

備考 比重 C:3.16 G:2.61 S:2.57 SF:2.2 B:2.91
シリカフューム 比重面積:200,000cm²/g SiO₂ 含有量:90%以上

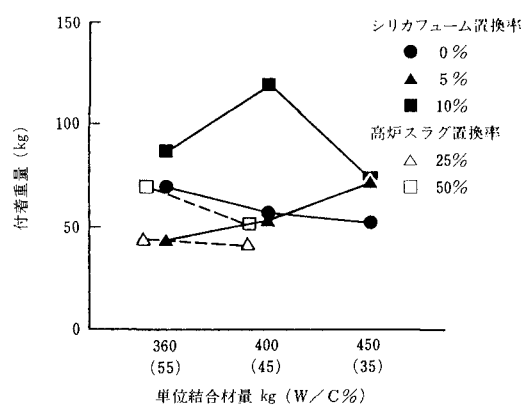


図-2 付着重量試験

0～40%のSiO₂によるポズラン反応の効果が得られるものと思われる。今後、粘性による施工性の低下を改善することができれば高炉スラグ微粉末をシリカフェームの一部代替として利用することも可能と考える。

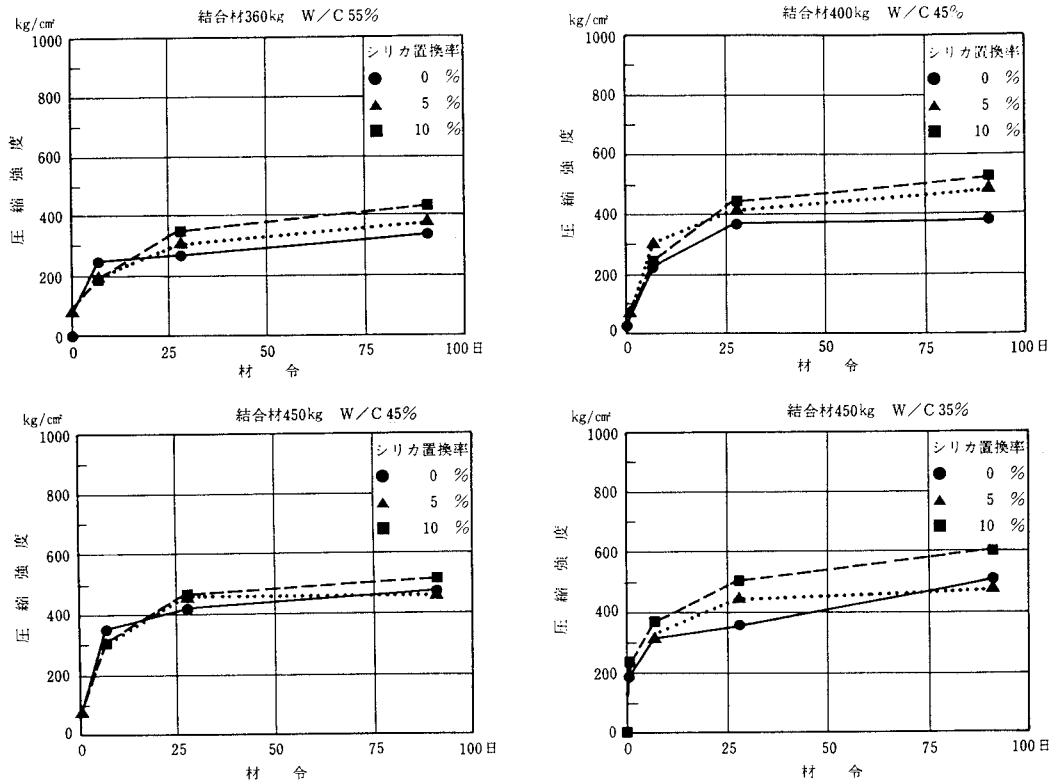


図-3 圧縮強度の経時変化（シリカ置換）

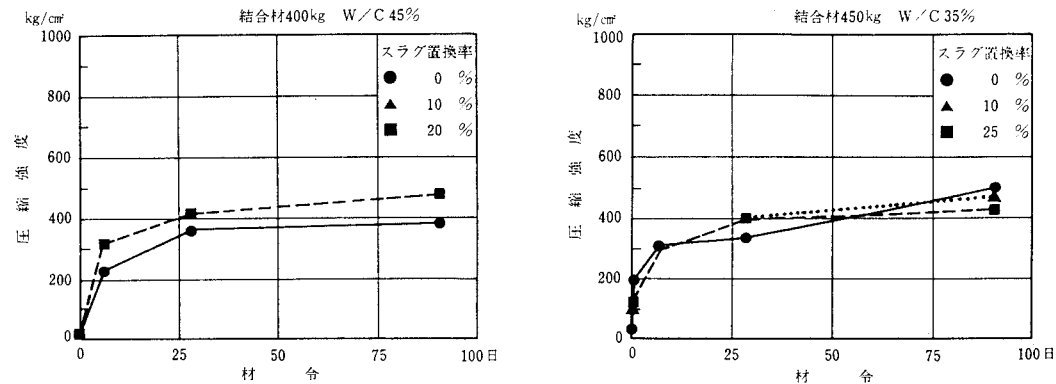


図-4 圧縮強度の経時変化（スラグ置換）

3. 2. 3 凍結融解抵抗性

図-5に単位結合材料360kgでW/C=55%の場合、単位結合材料400kgでW/C=45%の場合および単位結合材料450kgでW/C=35%の場合の凍結融解試験結果を示す。

これより、単位結合材料450kgでW/C=35%のケースはすべて300サイクルを達成した。ただし、シリカフェームを混和しないケースは150サイクル前後から動弾性係数比の低下が大きくなった。また、単位結合材

料360kg および400kg のケースはシリカフェュームの有無に関わらず300 サイクルには至らなかったが、単位結合材料400 kgの場合にはシリカフェュームの置換率が増えるとサイクル数も増加した。したがって、単位結合材料が一定量以上であればシリカフェュームの混和量を増すことで凍結融解抵抗性を増すことが可能と思われる。一方、単位結合材量450kg のケースで高性能A E減水剤の添加量をかえて空気量が凍結融解抵抗性に与える影響を検証した。この結果、空気量の多い方が動弾性係数低下率が小さく、凍結融解抵抗性に有利であるといえる。従来の吹付けコンクリートにおいては、コンクリートのエントレインドエアーが高压吹付けにより破壊され凍結融解抵抗性が劣るという報告もある。しかし、結合材を増加したりシリカフェュームを混和することでコンクリートの粘性が適度に増すと、エントレインドエアーが破壊されにくくなることも予想され、これが凍結融解抵抗性能の向上に寄与したとも思われる。全般に、凍結融解抵抗性の低いものは供試体にラミネーションや連続気泡等、吹付け時の施工性の影響により発生した不具合から劣化が進行しているケースが多く、今後この点を改善することも凍結融解抵抗性能の向上に結び付くと考えられる。

3. 2. 4 透水性

図-6に各試験ケースごとの透水深度およびスプレッド値を示す。これより、どの配合も透水深度の最小値は2cm 前後とほぼ同様の値であるが、スプレッド値が小さくなると透水深度のばらつきが大きくなる傾向にある。これは、スプレッド値が小さくなると吹付け時の脈動が発生しコンクリートに空隙が発生しやすくなるためと思われる。

3. 2. 5 付着強度

図-7に単位結合材量450kg, W/C=35%におけるシリカフェューム混和率と付着強度および施工性試験で示した付着重量との関係を示す。得られた付着強度は、コアリングによる影響、試験装置の設置精度等の影響を受け、ばらつきは大きい。シリカフェュームの混和率が増加するにつれ、付着強度も増加する傾向にある。これはシリカフェュームの混和によるコンクリート強度の増加によるものが考えられるが、一方でコンクリート吹付け時の付着力の増加も寄与していると思われる。

3. 2. 6 乾燥収縮

図-8に単位結合材量450kg, W/C=35%におけるシリカフェュームの混和率と乾燥収縮の経時変化を示す。図より

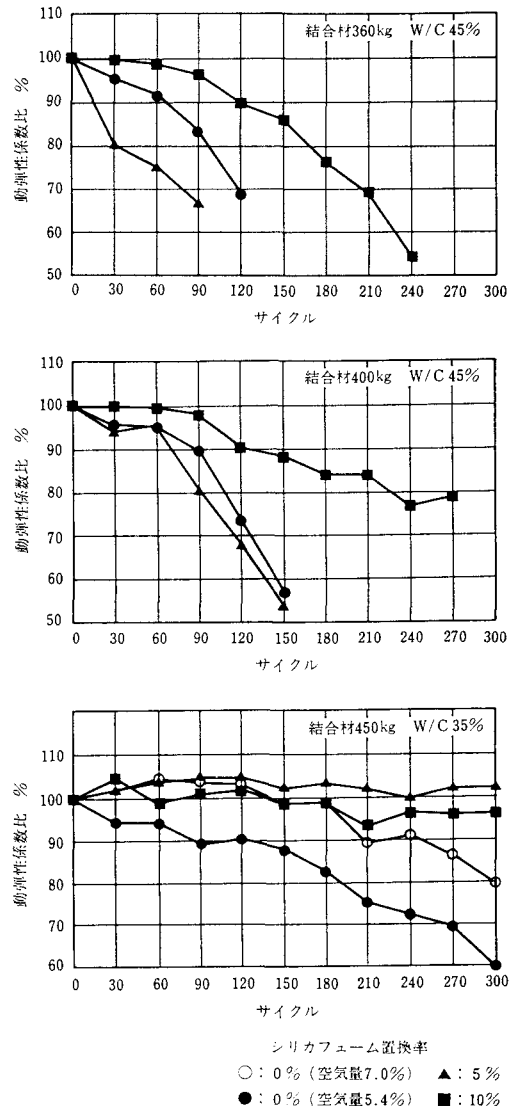


図-5 凍結融解試験

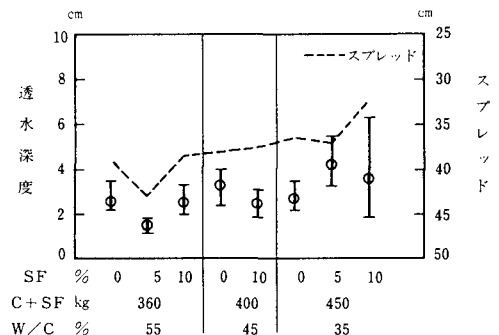


図-6 透水試験

シリカフュームの混和率が増すと乾燥収縮量は減少する傾向にあるが、各配合とも材令91日の時点で 1000μ 以上の値を示した。同様の配合で収縮低減剤を添加したものは 700μ 程度に減少しており、その効果が認められる。さらに乾燥収縮を低減するには、材料面のみならず養生方法、ファイバーの添加等による対策が必要である。

4 まとめ

今回の実験の結果、以下に示すことが明らかとなった。

- ① シリカフュームの混和により吹付けコンクリートの付着性能は向上する。
- ② シリカフュームをセメントの 5ないし10%置換することにより、材令28日および91日では圧縮強度の増進が認められた。一方、材令7日以前の若材令においては、シリカフュームの混和効果は顕著でない。
- ③ 凍結融解抵抗性は、単位結合材量が一定量以上（今回の試験では $400\text{kg}/\text{m}^3$ ）であれば、シリカフュームの置換率が増えると向上する傾向にあった。
- ④ 吹付けコンクリートにおいても、AE剤によるエントレインドエアーの効果により凍結融解抵抗性は増す。
- ⑤ 透水深度の最小値はシリカフュームの置換率に関わらず約2cmと一定であるが、スプレッド値が小さくなると、透水深度のばらつきが大きくなる。
- ⑥ シリカフュームの混和によりコンクリートの付着力は増加する。これはコンクリートの圧縮強度の増加と合わせて、吹付け時の付着力の増加によるものと思われる。
- ⑦ 乾燥収縮量はシリカフュームを添加することで減少する傾向を示したが、材令91日で 1000μ 以上に達しており、乾燥収縮量の低減のための養生方法あるいはファイバーの添加等の検討が必要と考えられる。
- ⑧ 高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、シリカフュームを混和した場合以上に粘性が増すが、付着性能は、圧送時に脈動が発生する等のためシリカフュームを混和したケースに及ばなかった。

5 参考文献

- 1) 岩藤, 坂下, 伊東, 目時: 補修工事用劣化コンクリート切削装置の開発, 建設の機械化, No. 497, 1991. 1
- 2) D. R. Morgan; EVALUATION OF SILICA FUME SHOTCRETE, INTERNATIONAL WORKSHOP ON SILICA FUME IN CONCRETE, MONTREAL, QUEBEC, MAY 4-5, 1987
- 3) 鬼頭, 種池, 末永, 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試験, 第46回土木学会年次学術講演会, 1991. 10

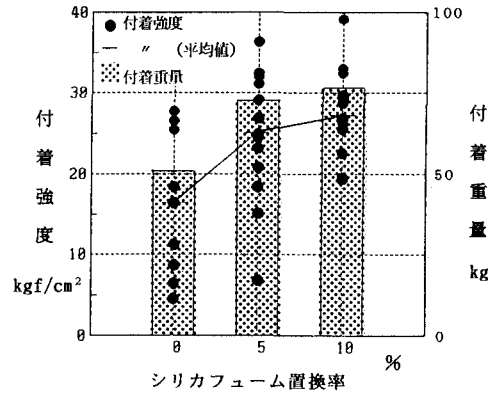


図-7 付着強度

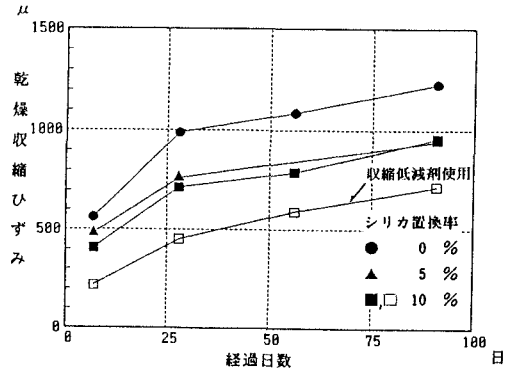


図-8 乾燥収縮測定結果