

# 低はね返り・低粉じん型高強度吹付けコンクリートの開発

## Development of High Strength Shotcrete of Low Rebound and Low Dust

東 光秋<sup>1)</sup>・越智 修<sup>2)</sup>・末永充弘<sup>3)</sup>・伊藤祐二<sup>4)</sup>

Mitsuaki HIGASHI, Osamu OCHI, Mitsuhiro SUENAGA, Yuji ITO

This report describes the development of high strength shotcrete making use of the merits of high quality shotcrete. The cost saving in tunnel construction is main object of this development. This high strength shotcrete will form ground support which can be applied to the expansive ground and the high speed excavation. Developed high strength shotcrete shows the performance more than the target.

**Key Words:** high strength shotcrete, tunnel, NATM, low rebound, low dust

### 1. はじめに

日本鉄道建設公団では、NATMにおける支保部材としての吹付けコンクリートの高性能化、高能率化を目指して、低はね返り・低粉じん型吹付けコンクリート（高品質吹付けコンクリート<sup>1)</sup>）の開発を進め、現在では80箇所余の現場に採用し、トンネル建設コストの縮減を図っている。高品質吹付けコンクリートは、石灰石微粉末とシリカフューム(SF)を使用し、分割練混ぜ(SEC)工法で製造することで、粘性を制御し良好な施工性（はね返り・粉じん量）を有すること、強度が従来より向上することを特長としている。

本研究開発は、トンネル建設コストの縮減を目指した研究の一環として、高品質吹付けコンクリートの特長を生かし、膨張性地山などにおける早期地山安定や高速掘進に対応可能な効果的で効率的な支保部材となる、高強度吹付けコンクリートの開発を行うことを目的としたものである。

### 2. 開発目標と手順

現行の高品質吹付けコンクリートの施工実態調査<sup>2)</sup>を分析し、開発にあたっての前提条件を以下のとおりとした。

1) はね返り率、粉じん濃度、ポンプ圧送性などの施工性については、現行の高品質吹付けコンクリートの水準を維持する。

2) このため、コンクリートに石灰石微粉末およびシリカフュームを使用し、分割練混ぜ方式により製造する。

3) 開発目標強度は40N/mm<sup>2</sup>とし、管理供試体強度は施工実態調査結果から得られた変動係数が8.2%、割増し係数が1.155であるので、急結剤添加による強度低下率の0.17を考慮して $40 \times 1.155 / (1 - 0.17) = 56 \text{ N/mm}^2$ を確保する。

また、開発手順としては、

(1) 第1段階（予備試験）において、施工実態調査の分析結果から、一次水結合材比、細骨材の粒子含有率に

---

1) 正会員 日本鉄道建設公団

2) 正会員 日本鉄道建設公団

3) 正会員 住鉱コンサルタント(株)

4) 正会員 (株)フジタ 技術センター 土木研究部

よる強度発現状況への影響をモルタル練混ぜ試験により把握し、さらに模擬トンネルを用いた暫定配合での予備吹付け試験により、吹付けコンクリートのフレッシュ性状、ポンプ圧送性、強度特性の確認を行う。

(2)第2段階(練混ぜ試験)では、経済性の観点からセメント量の低減および配合の汎用性を高めるため、細骨材の産地別の物性値変化(特性)による影響を考慮して、練混ぜ試験においてコンクリートのフレッシュ性状の観察と強度特性の確認を行う。

(3)第3段階では実トンネルでの吹付け施工試験(実吹付け試験)により、強度発現性、ポンプ圧送性、およびはね返り率や粉じん濃度などの施工特性を確認し、高強度吹付けコンクリートの標準配合を決定する。

(4)また、各開発段階において施工性と密接に関係するコンクリートの粘性については、従来の(断続)モルタルフロー試験による評価と合わせて、羽根沈入型粘度計<sup>3)</sup>による粘度測定を行い、羽根沈入型粘度計の適用性についても検討する。

表-1に使用材料を、表-2に養生および試験方法を示す。

### 3. 予備試験

予備試験では分割練混ぜで製造されたコンクリート中における、造殻に寄与する細骨材の粒度を検討するために、使用する現状の北陸産細骨材(S1)の粒度分布から、各フルイに留まる量を50%増しにした粒度調整細骨材(表-1参照)を5種(例えば、S2は0.15mmフルイ残留分を50%増)準備し、結合材量、水結合材比一定条件( $W/(C+SF)=0.57, SF=(C+SF) \times 5\%, L=S \times 10\%$ )の下で、モルタルを練混ぜ、強度特性およびモルタル性状を試験した。

図-1に細骨材種別と圧縮強度の関係を示す。 $S/(C+SF)=2.0$ ではS4(0.6mm残留分50%増)細骨材使用の場合の圧縮強度は、材齢によらず最も大きい。一方、 $S/(C+SF)=2.5$ ではS4細骨材使用の場合の圧縮強度は、現状細骨材使用の場合とほぼ等々であった。以上の試験結果より、以降の試験に0.6mmフルイ残留分を20%(実用的範囲)増加した粒度調整細骨材(S0)を使用し、水結合材比および $S/(C+SF)$ を変更要因とした試験を行い、モルタル粘性、強度特性試験より造殻に必要な結合材量と細骨材量を検討した。

図-2に $S/(C+SF)$ と圧縮強度の関係を示す。水結合材比0.45~0.57では、 $S/(C+SF)=2.5$ において圧縮強度がほぼ最

表-1 使用材料

| 材 料             | 仕 様                                           |
|-----------------|-----------------------------------------------|
| 北陸産細骨材(現状細骨材:S) | 青海産石灰岩砕砂, 比重:2.67, FM:2.93                    |
| 粒度調整細骨材(S2~S6)  | S2:0.15mm 残留分 50%増, 以下同様にして S6:2.5mm 残留分 50%増 |
| 東北産細骨材          | 混合砕砂, 比重:2.64 FM:2.97                         |
| 九州産細骨材          | 砕砂, 比重:2.67, FM:3.05                          |
| 粗骨材(G)          | 青海産石灰岩碎石(1505) 比重:2.67, FM:6.22               |
| セメント(C)         | 普通ポルトランド, 比重:3.16                             |
| 石灰石微粉末(L)       | 比重:2.7, 100メッシュ                               |
| シリカフューム(SF)     | 比重:2.2                                        |
| 高性能減水剤(Ad)      | ポリカルボキレート系                                    |
| 急結剤             | CSA系(高強度用)                                    |

表-2 養生および試験方法

| 項 目   | 方 法                                                                                                                                                                                |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 練混ぜ試験 | 養生条件: 20℃打設, 材齢1日脱枠, 試験材齢まで標準養生<br>試験方法: スランフ: JIS A 1101, 空気量: JIS A 1128, モルタルフロー: JIS R 5201, 圧縮強度: JIS A 1108                                                                  |
| 吹付け試験 | 養生条件: ・管理供試体: 試料採取, 材齢2日脱枠, 試験材齢まで標準養生<br>・ポルトランド供試体: 試料採取, 3時間まで屋内, 1日まで20℃恒温<br>・JF供試体: 試料採取, 材齢3日まで屋内, JFホーリング後標準養生<br>試験方法: ポルトランド強度: JSCE-G561<br>JF強度: JSCE-F561, JIS A 1107 |

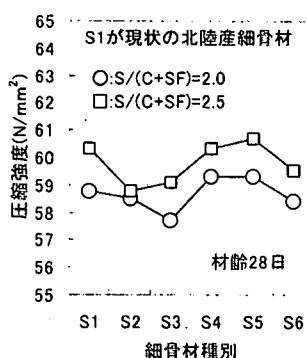


図-1 細骨材種別と圧縮強度の関係

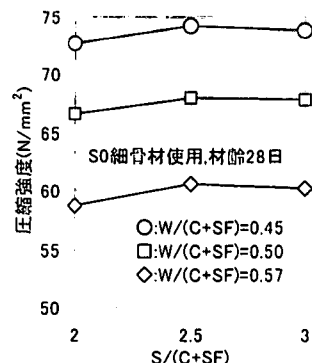


図-2  $S/(C+SF)$ と圧縮強度の関係

大となっている。従って、造殻に必要な細骨材量と結合材量の比として、 $S/(C+SF)=2.5$  を確保することとした。

続いて、モルタルの試験結果を踏まえてコンクリート配合を検討するために、単位結合材量、水結合材比、細骨材率を変化させた 12 種類 ( $(C+SF)=360, 400\text{kg/m}^3$ ,  $W/(C+SF)=45, 50, 57\%$ , 細骨材率( $s/a$ )= $60, 65\%$ ) の配合を練混ぜ、フレッシュ性状および強度特性を検討した。その結果について、目標管理供試体強度を満足するほか、吹付けコンクリートとしてのポンプ圧送性および施工性を確保する観点より、スランプが  $8\pm 2.5\text{cm}$  であることを条件とし、以下のように考えた。

- 1) 材齢 28 日での圧縮強度は水結合材比が 57% では  $56\text{N/mm}^2$  を僅かに満足せず、57% 未満とする必要がある。
- 2) 水結合材比 45%, スランプ 8cm ではいずれの配合であってもコンクリートの粘性が高くなり、吹付け時のポンプ圧送性に問題があると考えられるので、水結合材比は 50% 以上とする。
- 3) 単位結合材量を 360 と  $400\text{kg/m}^3$  とした配合を比較すると、後者のポンプ圧送性が優れており、単位結合材量は  $400\text{kg/m}^3$  とする。
- 4) 細骨材率を 60, 65% とした配合を比較すると、65% とした配合のプラスティシティーが良く好ましいが、単位結合材量を  $400\text{kg/m}^3$  とした場合には大差なく、逆に強度発現性は前者が優れているので  $s/a=60\%$  とする。

以上より、単位結合材量  $400\text{kg/m}^3$ ,  $s/a=60\%$ , 水結合材比を 50~55% とした試験練りを行い、表-3 に示される配合( $W/(C+SF)=53\%$ )を予備吹付け試験に用いることとした。

予備吹付け試験のコンクリートは実現場のプラントにて分割練混ぜ方式にて練混ぜ、3 バッチ分  $1.5\text{m}^3$  のコンクリートを試験場に運搬した

(運搬時間 20 分)。使用した吹付け機はピストンポンプ式で、吹付け機によりプルアウト試験用供試体、コア採取用供試体および模擬トンネル

(幅  $4.5\text{m}\times$  高さ  $5.5\text{m}$ ) 円周方向に吹付け、その状況(はね返り、粉じん発生)を観察するとともに、フレッシュ性状の試験と管理供試体の作成を行った。吹付け時の吐出量は  $9.4(\text{m}^3/\text{hr})$ 、急結剤添加率は 9.5(%)であった。

吹付け状況を観察したところ、はね返り量が少なく、付着性が非常に良好であった。また、粉じんの発生も非常に少なかった。

表-4 に圧縮強度試験結果を示す。プルアウト試験結果によると、材齢初期の強度発現性状は低温にもかかわらず非常に良好であった。

一方、コア供試体強度の管理供試体強度に対する比は、材齢 28 日で 0.99 となっている。これは、急結剤に高強度用として開発された CSA 系急結剤を使用したため、急結剤添加による強度低下が小さいことが考えられる。

#### 4. 練混ぜ試験

##### 4.1 コンクリートの配合

予備試験より水結合材比 53%, 単位結合材量  $400\text{kg/m}^3$ ,  $s/a=60\%$  とした配合で、目標強度  $40\text{N/mm}^2$  を確保しつつ、施工性が良好な高強度吹付けコンクリート配合を得ることができた。

さらに、配合の汎用性および一層の経済性を目的に、北陸・東北・九州産細骨材を用いた練混ぜ試験を行

表-3 予備吹付け試験用配合

| 目標スランプ(cm) | W/(C+SF)(%) | s/a(%) | 単位量( $\text{kg/m}^3$ ) |     |    |     |     |     |
|------------|-------------|--------|------------------------|-----|----|-----|-----|-----|
|            |             |        | W                      | C   | SF | L   | S0  | G   |
| $8\pm 2.5$ | 53          | 60     | 212                    | 380 | 20 | 106 | 941 | 703 |

表-4 圧縮強度試験結果

| 種 類                                                 | 圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ ) |       |                |
|-----------------------------------------------------|-------------------------|-------|----------------|
|                                                     | 3 時間                    | 24 時間 | 28 日           |
| 管理供試体<br>( $\phi 10\times 20\text{cm}$ )            |                         |       | 58.3           |
| 吹付け供試体                                              | 2.3                     | 18.0  | 57.9<br>(0.99) |
| ・ ()内数字は同材齢管理供試体強度に対する比率<br>・ 3 および 24 時間強度はプルアウト試験 |                         |       |                |

って検討した。表－5に練混ぜ試験のコンクリート配合を、現状の高品質吹付けコンクリートと比較して示す。ここで、 $W/(C+SF)=50\%$ としたのは強度確保のためであり、 $s/a$ を65%とし、石灰石微粉末を単位細骨材量の10%置換としたのは、単位結合材量を低減した場合に単位粉体量( $C+SF+L$ )を $500\text{kg/m}^3$ 程度とすることでフレッシュコンクリートのプラスティシティーを確保するためである。なお、配合の汎用性を図るために細骨材の粒度調整は行わなかった。

また、試験に使用した細骨材の産地は異なっても何れも砕砂であり、粒度分布に大差ないにもかかわらず、同一粉体量において同一スランプ( $8\pm 2.5\text{cm}$ )を目標とした場合、高性能減水剤混入率が大きく異なる。特に九州産砕砂の場合には北陸産砕砂を用いた場合と比べて倍以上となっている。これは、北陸産細骨材は石灰岩砕砂であり九州産砕砂に比べて粒子形状が比較的整っているためと考えられる。

ちなみに、施工実態調査によると現状の高品質吹付けコンクリートの水結合材比は55～65%であり、現場ごとの日常管理コア強度から求められる設計基準強度(土木学会定義)は、 $26\text{N/mm}^2$ 程度である<sup>2)</sup>。

## 4.2 練混ぜ試験結果

表－5 練混ぜ試験のコンクリート配合

| No. | 細骨材の産地 | 単位結合材量 P (kg/m <sup>3</sup> ) | 水結合材比 W/(C+SF) (%) | 細骨材率 s/a (%) | 一次水結合材比 W1/(C+SF) (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |      |                 |     | 高性能減水剤 (P <sup>2</sup> ×%) |
|-----|--------|-------------------------------|--------------------|--------------|-----------------------|-------------------------|-----|----|------|-----------------|-----|----------------------------|
|     |        |                               |                    |              |                       | W                       | C   | SF | S    | L <sup>1)</sup> | G   |                            |
| 1   | 北陸     | 360                           | 50                 | 65           | 32.8                  | 180                     | 342 | 18 | 1099 | 122             | 658 | 0.7                        |
| 2   |        | 380                           |                    |              | 32.0                  | 190                     | 361 | 19 | 1074 | 119             | 642 | 0.5                        |
| 3   | 東北     | 360                           |                    |              | 37.7                  | 180                     | 342 | 18 | 1086 | 121             | 658 | 1.1                        |
| 4   |        | 380                           |                    |              | 36.5                  | 190                     | 361 | 19 | 1061 | 118             | 642 | 0.9                        |
| 5   | 九州     | 360                           |                    |              | 40.1                  | 180                     | 342 | 18 | 1099 | 122             | 658 | 1.5                        |
| 6   |        | 380                           |                    |              | 38.8                  | 190                     | 361 | 19 | 1074 | 119             | 642 | 1.2                        |
| *   | 北陸     | 360                           | 57                 | 60           | 32.2                  | 205                     | 342 | 18 | 989  | 98              | 725 | 1.1                        |

\*1:単位細骨材量の10%置換, \*2:P=(C+SF), \*:現状の高品質吹付けコンクリート配合

表－6にコンクリートの試験結果を示し、主な知見を以下に述べる。

1)全ての配合において目標管理供試体強度の $56\text{N/mm}^2$ は満足した。圧縮強度は水結合材比が50%と一定であるため、単位結合材量および細骨材産地が異なっているにもかかわらず、最大でも10%程度の差となっている。なお、九州産細骨材の場合、強度が小さい傾向がある。これは、九州産細骨材を使用した場合には一次水結合材比が他の場合と比べて大きいため、硬化コンクリート中の硬化体強度が比較的小さいためと考えられる<sup>4)</sup>。

2)単位結合材量が $360\text{kg/m}^3$ の場合には、細骨材産地にかかわらずコンクリートにパスツキ感があり、ポンプ圧送性が懸念されたが、 $380\text{kg/m}^3$ とすることでコンクリートのワーカビリティが大きく改善され、特にNo.2配合が最も良好と判断された。

以上の検討より、実吹付け試験はNo.2配合にて行うこととした。

表－6 コンクリートの試験結果

| No. | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |      | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 温度 (℃) | モルタルフロー (mm) | コンクリートのフレッシュ性状      | 施工性 |
|-----|---------------------------|------|-----------|---------|--------|--------------|---------------------|-----|
|     | 7日                        | 28日  |           |         |        |              |                     |     |
| 1   | 43.7                      | 60.3 | 10.0      | 2.9     | 19.5   | 160          | パスツキ感があり、ポンプ圧送性に懸念。 | △   |
| 2   | 43.7                      | 61.0 | 8.0       | 3.1     | 19.8   | 159          | ワーカビリティが最も良好。       | ◎   |
| 3   | 42.5                      | 62.6 | 7.5       | 3.7     | 19.5   | 148          | モルタルフローより、ポンプ圧送性不良。 | ×   |
| 4   | 43.1                      | 63.4 | 8.5       | 3.8     | 19.5   | 169          | 粘性が多少大、ワーカビリティ良好。   | ○   |
| 5   | 40.3                      | 58.7 | 7.5       | 3.8     | 19.0   | 138          | モルタルフローより、ポンプ圧送性不良。 | ×   |
| 6   | 40.7                      | 57.3 | 10.0      | 3.1     | 19.3   | 158          | パスツキ感があり、ポンプ圧送性に懸念。 | △   |



粘度との関係を検討した。

その結果、降伏値と塑性粘度の両者とも水結合材比や水粉体比および二次水結合材比との関係が強いことが分かった。図-4に一例として水結合材比( $W/(C+SF)$ )と降伏値および塑性粘度との関係を示す。ただし、粘度と最も関係が強いのは二次水結合材比( $W2/(C+SF)$ )であり、これが大きくなるとともに粘度は小さくなることが明らかとなった(図-5参照)。今回の測定結果によると、水結合材比や水粉体比も粘度と関係が深い、二次水結合材比が最も相関が良い結果が得られた。

このことは、分割練混ぜで製造されたコンクリートにおいては、一次水結合材比はコンクリート硬化体の特性を支配し、二次水結合材比はコンクリートのフレッシュ性状を支配するという考え<sup>4)</sup>を裏付けている。

## 7. まとめ

トンネル建設コストの縮減を目指した研究の一環として、高品質吹付けコンクリートの特長を生かし、膨張性地山などにおける早期地山安定や高速掘進に対応可能な、高強度吹付けコンクリートの開発を行い、その経緯と検討結果について述べた。まとめとして、以下のことが言える。

- (1)高品質吹付けコンクリートの配合を水結合材比 50%, 単位結合材量  $380\text{kg}/\text{m}^3$  に変更し, CSA 系急結剤を用いることで, 材齢 28 日コア強度  $60\text{N}/\text{mm}^2$  程度を得ることが可能であり, 実吹付け試験からはね返り率および粉じん濃度が非常に小さいことが確認され, 低はね返り・低粉じん型高強度吹付けコンクリートの標準配合を決定することができた。
- (2)羽根沈入型粘度計によるモルタルの粘度測定値は二次水結合材比と良い相関があることが分かり, これらは粘性指標の手がかりとなると考えられる。

## <参考文献>

- 1) 日本鉄道建設公団：高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案), 1997.5
- 2) 越智ほか:分割練混ぜによる新吹付けコンクリートの施工実態, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第VI部門, pp.400-401, 1999.9
- 3) 室賀ほか:モルタルの粘性評価試験装置の開発, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.400-401, 2000.9
- 4) 伊藤ほか:分割練混ぜ(SEC)による新吹付けコンクリートの硬化体特性, 土木学会トンネル工学研究論文・報告集, 第10巻, pp.141-144, 2000.9

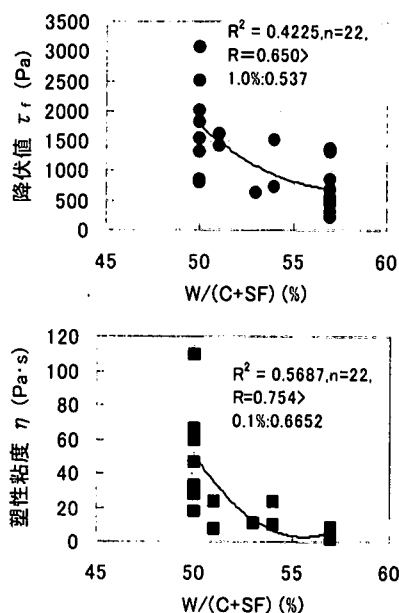


図-4 水結合材比と降伏値および塑性粘度との関係

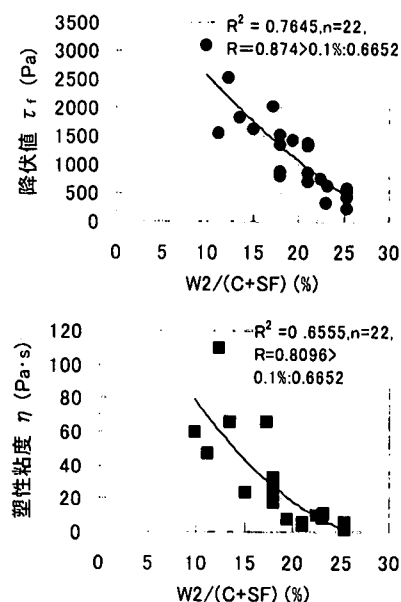


図-5 二次水結合材比と降伏値および塑性粘度との関係