

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

PROPERTIES OF HARDENED MATERIALS IN NEW SHOTCRETE WITH TWO-STAGE MIXING

伊藤 隆¹⁾・越智 修¹⁾・末永充弘²⁾・伊藤祐二³⁾・田村忠昭⁴⁾
Takashi ITO, Osamu OCHI, Mitsuhiro SUENAGA, Yuji ITO, Tadaaki TAMURA

Japan Railway Construction Public Corporation applies the new shotcrete to many tunnels, which is using limestone powder and silica fume with two-stage mixing. The authors investigated the material, efficiency, and strength etc. of the new shotcrete at the construction site. This report describes the properties of hardened materials in new shotcrete based on efficiency and strength of new shotcrete at the construction site.

Key Words: tunnel, NATM, new shotcrete, two-stage mixing, hardened materials

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、シリカフェーム、石灰石微粉末を混入し粘性を活用した吹付けコンクリートに、材料分離抵抗性、圧送性の更なる向上と粉じん抑制効果を目指して分割練混ぜ(SEC)工法を加えた高品質吹付けコンクリートの開発を進めてきた。平成9年5月、「高品質吹付けコンクリート設計・施工指針(案)」(以下、指針(案))を体系化し、平成9年度発注の整備新幹線トンネル建設工事から適用した。平成12年3月末現在、施工箇所は65現場に達している。

筆者らは、平成9、10年度に施工現場の成果確認と指針(案)の検証を行うため、施工実態調査および施工実績検討の機会を得た。調査対象は高品質吹付けコンクリート48現場である。ここでは、分割練混ぜ(SEC)による高品質吹付けコンクリート(以下、新吹付けコンクリート)の施工実態および強度発現実績から硬化体特性について検討を行った結果を新しい知見も加えて述べる。

2. 新吹付けコンクリートの配合および材料特性

新吹付けコンクリートの示方配合例を表1

に示す。現場ごとの配合は、現場使用材料(粉体および細骨材)の保水特性を予め試験し、一次水結合材比($W1/(C+SF)$)を算定した後、現場プラントにて試験練りを行って決定する。練混ぜは骨材に一次水($W1$)を加えて調整練

表1 新吹付けコンクリートの示方配合例(ポンプ搬送の場合)

粗骨材 最大寸 法	スラン プの範 囲	水結合 材比 ($W/(C+SF)$)	細骨 材率 (s/a)	単位セメ ント量 (C)	石灰石 微粉末 (L)	((C+SF)×%)		
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(kg/m ³)	(S×%)	急結 剤	混和 材 (SF)	減水剤 (Ad)
10~15	8±2	55~60	60~65	342	概ね15	4~7	5	必要量

- 1) 正会員 日本鉄道建設公団 設計技術室
- 2) 正会員 住鉱コンサルタント㈱
- 3) 正会員 ㈱フジタ 技術センター 土木研究部
- 4) 正会員 リブコンエンジニアリング㈱

りを行った後、混合粉体(C+L+SF)を加えて練混ぜ、骨材周囲に粉体を付着させて造設する一次練混ぜと、造設された骨材に残りの二次水(W2)および減水剤(Ad)を加えて全体を練混ぜる二次練混ぜとに分けて行われる。このように、分割練混ぜを行うのは、混合粉体粒子間の結合を吸着水膜を共有した強固な状態とし利用するためである。

表2に地区別材料保水特性を示す。細骨材粗粒率(FM)は東北地区が2.47と最も低く、北陸地区が2.94と最も高くなっている。また、0.15mm以下粒子含有率は九州地区が8.6%と最も高く、次いで東北、北陸地区の順となっている。従って、北陸地区の細骨材は概して粗く、東北地区は反対に細かく、九州地区は比較的粗いが0.15mm以下粒子の含有率が高いという特徴を有している。新吹付けコンクリートの一次水結合材比(WI/(C+SF))は平均35.8%(標準偏差3.3%)であり、細骨材および混合粉体の保水特性に影響される。ただし、WI/(C+SF)の変動には混合粉体のキャピラリ域である水混合粉体比(α)の影響よりも、細骨材固有の拘束水である細骨材表面吸着水率(β_{OH})の影響の方が大きい。これは、 β_{OH} と α の変動はいずれも2%程度であるのに対して、細骨材量が結合材量(C+SF)の2.5倍以上であるためである($WI=(\alpha \cdot (C+SF) + \beta_{OH} \cdot S)/100$)。図1にWI/(C+SF)と細骨材FMの関係を示す。

表2 地区別材料保水特性

地区	東北	北陸	九州
保水特性			
細骨材粗粒率(FM)	2.47	2.94	2.71
0.15mm以下粒子含有率(%)	6.42	5.74	8.57
75 μ m以下粒子含有率(%)	2.33	1.86	3.18
細骨材表面吸着水率(β_{OH})(%)	2.32	1.15	3.02
水混合粉体比(α)(%)	24.0	23.0	22.0
WI/(C+SF)(%)	37.82	34.48	34.95

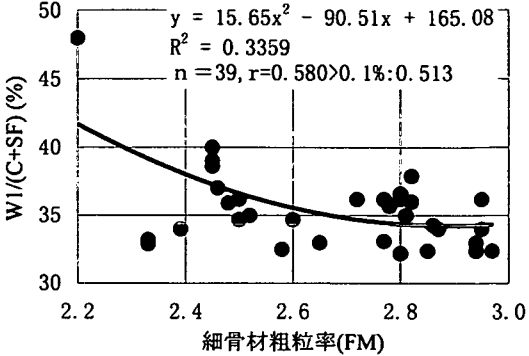


図1 WI/(C+SF)と細骨材FM

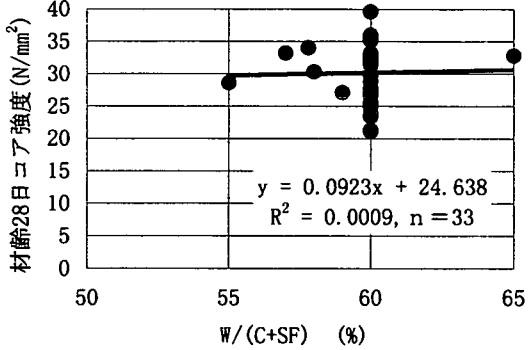


図2 コア強度と水結合材比の関係

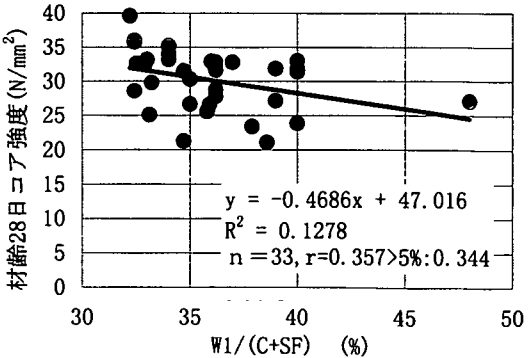


図3 コア強度と1次水結合材比の関係

3. 新吹付けコンクリートの強度および施工特性

図2～3に新吹付けコンクリートの材齢28日コア強度(コア強度)と水結合材比(W/(C+SF)), および WI/(C+SF)との関係を示す。これらの図より以下のことが言える。

- (1) 新吹付けコンクリートのコア強度は W/(C+SF) よりも、WI/(C+SF) との関係が強い。
- (2) コア強度は 20～40N/mm² で分布している(設計基準強度は 18 N/mm²)。

ここで、新吹付けコンクリートのコア強度が、W/(C+SF)の影響よりも、WI/(C+SF)の影響を強く受けることについては次のように考えている。

- WI/(C+SF)は混合粉体が細骨材粒子周囲にキャピラリ状態を形成するのに必要な α に大きく影響される。
- WI/(C+SF)は β_{OH} に大きく影響される。
- WI/(C+SF)は細骨材FMに大きく影響される。通常、WI/(C+SF)は細骨材FMが大きい場合に小さくなり、コア強度が大きくなる傾向がある。
- β_{OH} は細骨材が微粒分を多量に含有している場合に大

きくなる傾向がある。微粒分量が大きい細骨材の場合には実積率が低下して空隙率が増加することにより β_{OH} が大きくなる。

前記 a)～d)より、新吹付けコンクリートの場合には現場毎に使用材料(粉体および細骨材)の特性を試験したうえで、適切な $W1/(C+SF)$ を定めて分割練混ぜを行うことで図9の概念図に示すように、細骨材粒子を中心にキャピラリー状態の混合粉体ペーストを付着させている(強固な造殻の形成)ことが、コア強度の発現効果を助長していると考えられる。一方、材齢28日管理供試体強度(管理供試体強度)と $W1/(C+SF)$ の間には、新吹付けコンクリートの水結合材比がほぼ一定であることから、(一)相関が得られていない。一方、管理供試体強度と $W1/(C+SF)$ の間には、コア強度の場合と同様の(一)相関が認められることから、 $W1/(C+SF)$ が強度発現に影響していることが分割練混ぜ(SEC)工法の特徴であり、一次練混ぜで形成された造殻部分(水結合材比は、ほぼ $W1/(C+SF)$)が吹付け作業時コンクリートの材料分離や急結剤添加による強度低下作用に対して強く抵抗していることを示していると考えられる。

さらに、新吹付けコンクリート製造において一次練混ぜ時に造殻される骨材粒子径を明らかにする目的で、細骨材粒子径の範囲毎でコア強度を整理した。その一部を図4～6に示す。これらの図より、新吹付けコンクリートのコア強度と関係が強い細骨材粒子径は0.6-1.2mmの範囲であり、この粒子径の細骨材が主として造殻していると推定できる。

以上より、 $W1/(C+SF)$ の小さい場合、および細骨材の0.6-1.2mm粒子含有率が高い場合に強度増進が期待可能となると言える。

図7にリバウンド率と細骨材FM、図8にリバウンド率と $W1/(C+SF)$ の関係を示す。これらの図より、細骨材FMが小さい場合、 $W1/(C+SF)$ が大きい場合にリバウンドが低減可能となる。細骨材FMが小さい場合には2.で示したように $W1/(C+SF)$ が大きくなる。 $W1/(C+SF)$ は60%前後でほぼ一定であるので、 $W1/(C+SF)$ が大きいことは二次水結合材比($W2/(C+SF)$)が小さいことを意味する。すなわち、造殻に寄与せず流動性に寄与するペーストの粘性が高いことが、リバウンド低減の大きな要因であると考えられる。

4. 新吹付けコンクリートにおける造殻の効果

以上の知見をもとに、新吹付けコンクリートの強度および施工特性を明らかにするため、分割練混ぜの原理・混

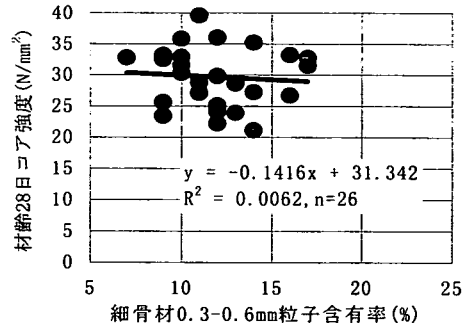


図4 コア強度と細骨材の0.3-0.6mm粒子含有率の関係

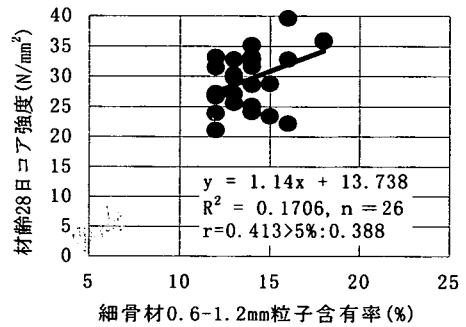


図5 コア強度と細骨材の0.6-1.2mm粒子含有率の関係

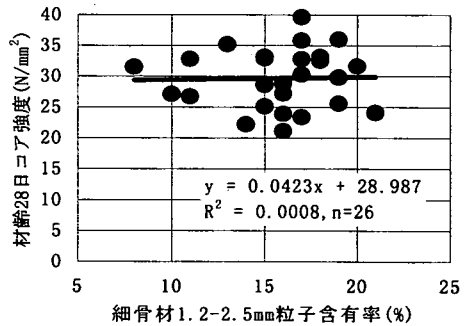


図6 コア強度と細骨材の1.2-2.5mm粒子含有率の関係

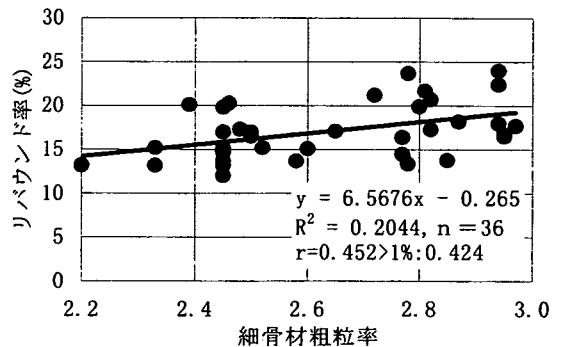


図7 リバウンド率と細骨材FMの関係

合過程に着目して造殻の効果を検討した結果、練混ぜ時および硬化時に次のような現象が発生していると考えられる。

(1)一次練混ぜ時 a) 混合粉体粒子が吸着水膜を共有するキャピラリー状態の強固な結合を形成する。 b) 粒子径 0.6-1.2mm を主体とする細骨材周面でキャピラリー状態の混合粉体と造殻(造殻体)を形成する(この時フレッシュコンクリートは0スランプ状態)。

(2)二次練混ぜ時 c) 細骨材との造殻体の大部分は $W1/(C+SF)$ のまま造殻状態を保持する(造殻部の形成)。 d) 細骨材と造殻していないキャピラリー状態の混合粉体は、水結合材比が増大して流動性を有するスラリー状態となり(非造殻部の形成)、フレッシュコンクリートに流動性を付与する。このように、 $W1/(C+SF)$ は粉体粒子間の結合および造殻体の性能を支配し、 $W2/(C+SF)$ はフレッシュコンクリートの粘性特性や非造殻部の性能に影響を与えていると考えられる。

フレッシュコンクリート中における造殻体は理論的には図9に示すように細骨材を含めて最密充填状態にあること、全体に分布していることから、全体を包含する鎖様の結合状態を形成しており、この結合状態が一次水量の保持と相俟ってブリーディングの抑制、ポンプ圧送性の向上、粉じん発生量の低減²⁾などの効果発生に大きく貢献していると考えている。

(3)硬化時 e) 造殻部は、水結合材比の大きな非造殻部を包含しつつ、細骨材とキャピラリーに近い状態で水和が進行し、早期に硬化することから、硬化体では箍(たが)の役割を果たす。特に、コア供試体の場合には、吹付けによる非造殻部への急結剤混入や空隙の形成が起こり得ることから、劣化した非造殻部を補強する効果が大きいと考えられる。

5. まとめ

①新吹付けコンクリートでは分割練混ぜを行うことで、粒子径 0.6-1.2mm を主体とする細骨材周面でキャピラリー状態の混合粉体と造殻体を形成する。②一次水結合材比は粉体粒子間の結合および造殻体の性能を支配し、二次水結合材比はフレッシュコンクリートの粘性特性や非造殻部の性能に影響を与えている。③新吹付けコンクリートコア供試体の場合には、造殻部は硬化体において箍(たが)の役割を果たし、劣化した非造殻部を補強する効果が大きいと考えられる。④コアの高強度化とリバウンドの低減のためには、新吹付けコンクリートには相反する性能が要求されることになる。材料、一次および二次水量を設定してバランスの良い配合設計を行い、新吹付けコンクリート有効活用を図る必要がある。

最後に、これらの結果を「指針(案)」にも反映させ、内容の充実化を図って行きたいと考えている。本報告をまとめるにあたり、貴重なご助言をいただいた関係各位に心からお礼申し上げます。

<参考文献>

- 1)北川ほか:微粒分を混入し粘性を活用した高品質吹付けコンクリートの諸特性, 土木学会, トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol.7, 1997.11
- 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, 1999.9, pp.400~401

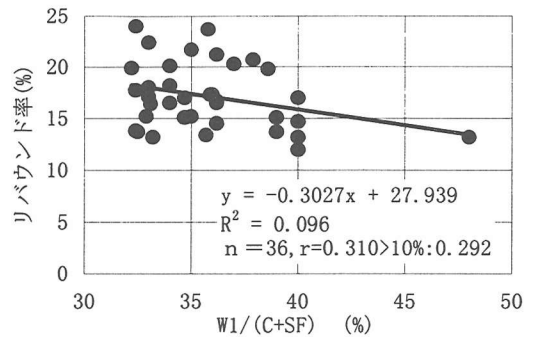


図8 リバウンド率と $W1/(C+SF)$ の関係

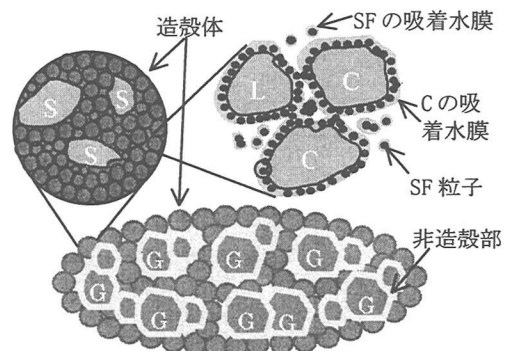


図9 造殻部の概念