

はね返り低減を志向した繊維補強 吹付けコンクリートの模索と合理的配合

三谷 浩二¹・海瀬 忍²・吉武 勇³・中川 浩二⁴

¹正会員 日本道路公団 九州支社八代工事事務所 (〒866-0826 熊本県八代市本野町池端 662-1)

²正会員 日本道路公団 本社 (〒100-8979 東京都千代田区霞ヶ関 3-3-2)

³正会員 博(工) 山口大学助手 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁴フェロ-会員 工博 山口大学教授 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

はね返りの少ない繊維補強吹付けコンクリートの合理的配合を求める目的から、プレーンおよび鋼繊維補強吹付けコンクリートの吹付け試験を実施した。合理的配合の模索過程において、一般的な配合よりはね返りが10%程度低減できるプレーン吹付けコンクリートの配合を求めた。しかしながら、同コンクリートによる繊維補強吹付けコンクリートでは、繊維のはね返り率が40%以上に達し経済性が懸念された。そこで、従来型とは特性の異なる数種類の吹付けコンクリートについて検討を図った。その結果、粉体急結剤を改良して吹付け直後のコンクリートに可塑性を持たせる、コンクリートの高粘性化を図る、吹付け後初期の凝結反応が遅い液体急結剤を使うなどの方法が有効であることが確認された。

Key Words : fiber reinforced shotcrete, plain shotcrete, rebound, mix design, cost performance

1. はじめに

山岳トンネルの一次支保構造として、吹付けコンクリート単体のもと吹付けコンクリートを鋼アーチ支保工で補強したものが、ロックボルトと組み合わせられて使用されている。実際に現場でこれらを選択する場合、両者の間には構造的あるいは経済的な面で大きな隔たりがあり、地山状況によっては中間的な支保構造がふさわしいと考えられる場合にしばしば遭遇する。そこでこれらの中間的な支保構造として、繊維補強吹付けコンクリートが考えられる。構造的な面では、吹付けコンクリートを繊維で補強することで曲げ靱性を高めることができるとともに、経済的な面では鋼アーチ支保工の設置を省略することで施工速度を上げ、ひいては施工費の低減という可能性が挙げられる。また施工の安全面を考えると、鋼アーチ支保工の設置は補強されていない地山(切羽)に作業員が近づかなければならない最も危険な作業の1つであるが、繊維補強吹付けコンクリートによって鋼アーチ支保工を省略できるならば、切羽から離れて機械によって施工できるため、小崩落や肌落ちに対する作業員の安全性が向上するものと考えられる。

繊維補強吹付けコンクリートを標準的な支保構造

として実際のトンネル現場に適用するためには、合理的な配合を検討する必要がある。合理的な配合とは、必要となる機械設備および材料が安価で、かつはね返りが少ないもの、言い換えれば機械設備、材料、はね返りを総合的に考慮して最も経済的なものと定義できる。

吹付けコンクリートのはね返りに関する研究は最近多く報告されてきているが^{1)~13)}、繊維補強吹付けコンクリートに関する報告は極めて少ない。また、経済性を主眼とした研究報告例はほとんど見当たらない^{14),15)}。そこで、本研究は繊維補強吹付けコンクリートの合理的な配合を見出すために各種の吹付け試験を行い、経済性を含めた検討を試みた。

2. 研究の流れ

本研究では、まず一般的に使われている吹付けコンクリート(以下「従来型吹付けコンクリート」とよぶ)の配合を出発点とし、できるだけ汎用性のある機械設備、材料の使用を条件とした試験吹付けによってはね返りが少なくなるように配合の修正を試みた。この配合修正のための試験吹付けには、繊維を含まないプレーン吹付けコンクリートを用いた。

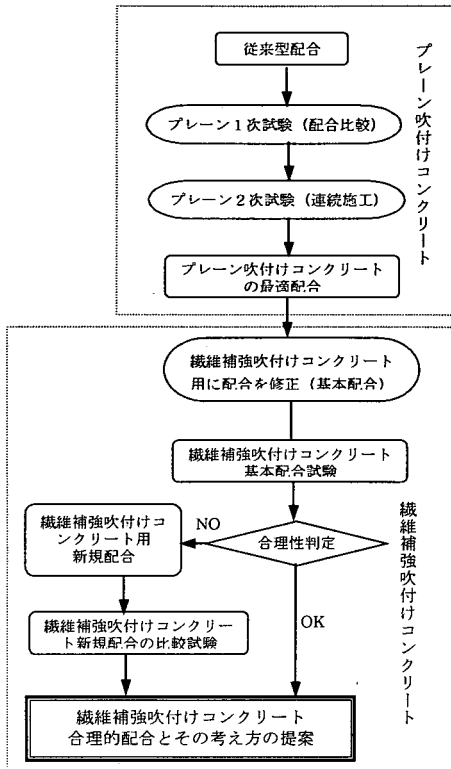


図-1 研究の流れ

次に、修正された配合を基にした繊維補強吹付けコンクリート（以下「繊維補強吹付けコンクリート基本配合」とよぶ）の試験吹付けを行い、繊維を混入した場合の施工性やはね返り率、靱性や強度を調べた。そして、上記の試験結果から明らかになった問題点を解決するために、微粉末混和材の添加、コンクリートの高流動化、液体急結剤の使用等による新しい繊維補強吹付けコンクリートの配合を考えた。

そして、これらを同一の条件で吹付けて施工性やはね返り率を試験するとともに経済性を比較し、現段階で最も経済的な繊維補強吹付けコンクリートが得られる配合の考え方を示した。以上で述べた本研究の主な流れを図-1に示す。

3. プレーン吹付けコンクリートおよびそれに基づく繊維補強吹付けコンクリートの特性

(1) 従来型吹付けコンクリート配合の修正方針

現在各種仕様書等に示され一般的に使われている山岳トンネルの吹付けコンクリートの配合例を表-1に示す^{16)~18)}。この配合では、トンネル天端で30%程度の材料がはね返るのが一般的であり、このままでは材料費の高い繊維補強吹付けコンクリートには適

表-1 従来型吹付けコンクリートの配合
(プレーン吹付けコンクリート)

W/C (%)	s/a (%)	セメント (kg/m ³)	急結剤	28日強度 (N/mm ²)
55~60	60~65	360	対セメント質量比 7%	18

一般に急結剤はカルシウムアルミネート(CA)系を使用

表-2 プレーン1次試験の概要^{19),20)}

項目	内容
試験場所	東名高速道路改築 日本坂トンネル
試験数量	トンネル上半部施工：2配合×2.5m ³ トンネル下半部施工：6配合
細骨材	静岡県丸子産 砕砂 密度 2.70g/cm ³
粗骨材	静岡県大井川産 川砂利 密度 2.60g/cm ³ , Gmax=8mm
吹付け機械	空気圧送式
はね返り試験	トンネル上半部施工：直接法 トンネル下半部施工：簡易法

さない。しかし、一方でこの配合に近ければ近いほど、現在使われている施工機械、プラント設備を利用でき、かつ作業員の不慣れの問題も発生しないという利点もある。したがって、まず表-1に示す従来型吹付けコンクリートの配合を、一般的な機械設備、材料で施工できるという条件で修正した場合、どこまではね返り率を低減できるかを、プレーン吹付けコンクリートを用いて試験した。

従来型吹付けコンクリートのはね返り率を小さく修正するためには、ベースコンクリートの粘性を増加させることが有効であるとされている¹⁾。そのための方法としては、①単位セメント量を大きくする、②シリカフューム等の微粉末混和材を混入する、などが考えられる。ただし、①②ともにコンシステンシーを確保して単位水量を減らすために高性能AE減水剤の使用が必要となる。そこで、まずW/Cの変化および微粉末混和材混合がはね返りに与える影響を調べるため、種々の配合の吹付けコンクリートを実際のトンネルに吹付けて比較した。便宜上本研究では、同試験を「プレーン1次試験」とよぶ。

次に、上記の試験結果からはね返りが少なく、施工する上で大きな問題のない配合を選定し、これを連続して使用する試験施工を行った。この試験施工の過程で、はね返りのデータを収集するとともに、この配合の吹付けコンクリートが実施工に適するものか検討を試みた。本研究では同試験を、「プレーン2次試験」とよぶ。

(2) プレーン1次試験

a) 試験方法

プレーン1次試験の概要を表-2に示す。はね返り

表-3 プレーン1次試験の配合

配合記号	W/C (W/B) %	s/a %	単位量 kg/m ³						急結剤 ^{※2} 対セメント %
			水	セメント	微粉末混和材	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤 ^{※1}	
P60	60	60.5	232	387	—	1,046	665	—	7
P50	50	60.5	194	388	—	1,107	704	5.0	7
P40	40	60.5	204	510	—	1,028	654	6.6	7
P35	35	60.5	189	540	—	1,037	659	7.8	7
P40Si	(40)	60.5	194	436	シリカフューム：49	1,046	665	7.0	7
P40Et	(40)	60.5	195	454	エトリングイト生成系混和剤：34	1,050	668	—	7

※1 主成分：ポリエチレングリコールエーテル(PEG)系高分子化合物、※2 急結剤種類：セメント鉱物カルシウムアルミネート(CA)系粉体急結剤

試験は、トンネル下半部施工中に6配合について簡易法を実施し、さらに簡易法による結果の傾向を確認するために、そのうちの2配合は上半施工中に2.5m³の材料をトンネル天端面に吹付ける直接法も追加して行った。ここで簡易法とは、壁面に立て掛けられた型枠(幅60cm×長さ60cm×深さ25cm)にコンクリートを吹付け、型枠に付着した材料とはね返り材料の質量より、両者の合計質量に対するはね返り材料の質量割合からはね返り率を求める方法である。また直接法とは、トンネル掘削面に吹付けコンクリートを直接吹付け、はね返った材料の質量を現地にて測定し、吹付け全材料質量に対する割合を求めるものである。

試験した吹付けコンクリートは、表-3に示すようにW/Cを60%から35%まで変化させた配合と、シリカフュームあるいはエトリングイト生成系微粉末混和材を混ぜてW/Bを40%にした配合のものを使用した。

b) 試験結果

はね返り試験の結果を図-2に示す。簡易法ではW/Cを60%から35%にするにつれて、はね返り率が27%からほぼ半分の14%に低下した。また直接法におけるはね返り率は、簡易法のそれより若干大きくなるが、傾向はほぼ同様であると推定された。さらに、W/Bを40%としたP40SiおよびP40Etは、はね返り率が14%と比較的良好な結果が得られた。ただし、W/C35%のものは、はね返り率は低いもののノズルやマテリアルホースの閉塞、脈動、大量粉じん等のトラブルが発生し、連続施工には問題があるものと思われた。なお同評価結果は、空気圧送式を採用した際のものであるが、W/C35%ではポンプ圧送式も同様に施工性に難有りとして評価されたことを追記する¹⁹⁾。

(3) プレーン2次試験

a) 試験方法

プレーン1次試験の結果から、W/C(W/B)を小さくすることではね返り率の低下が期待できることが判

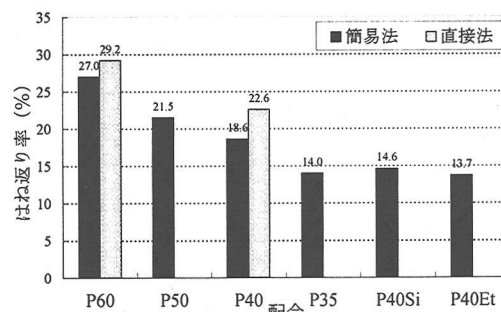


図-2 プレーン1次試験におけるはね返り率

表-4 プレーン2次試験の概要²¹⁾

項目	内容
試験場所	磐越自動車道 鞍手山トンネル
試験数量	トンネル延長344.85mを連続施工 はね返り試験は17回実施
細骨材	福島県玉川村 阿武隈川産 川砂 密度 2.58g/cm ³ , FM 2.96
粗骨材	福島県郡山市産 6号砕石 Gmax=13mm 福島県北会津村 阿賀野川産砂利 Gmax=10mm, 密度 2.60g/cm ³ (両方)
吹付け機械	ポンプ圧送式
はね返り試験	直接法 (トンネル上半部施工)

明した。そこで、従来型の配合(P61)および低W/Cの配合(P45)のコンクリートを使って、表-4に示す条件のもと、トンネル延長約345mの区間にて連続試験施工を行い、実施工上の問題点と強度発現性を調べた。なお、実トンネルでの施工のため、トラブルを避ける観点から安全側となるようW/Cは45%と設定した。

表-5に示すP45配合で骨材単位量や高性能AE減水剤が一定でないのは、水とセメント量を一定にしてこれらを変化させて試験したことによるものである。

b) 試験結果

はね返り試験の結果を、現場到着時のスランプの値を横軸にして整理した(図-3参照)。ここで、同

表-5 プレーン2次試験の配合

配合記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					急結剤	
			水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤	種別	対セメント質量比
P61	61	60.5	220	360	1,040	6号砕石 : 705	—	CA系粉体	7%
P45	45	57.5~63.5	203	450	942~1,040	6号砕石 : 603~702	4.1~4.5	CSA系粉体	10%

CA : カルシウムアルミネート, CSA : カルシウムサルフォアルミネート

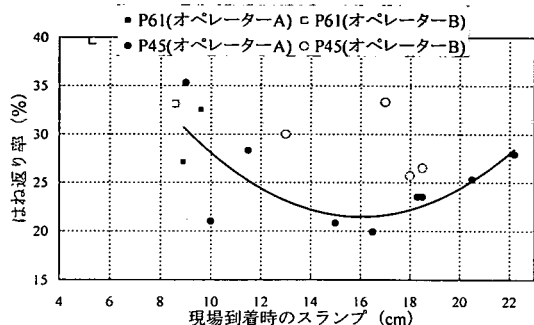


図-3 プレーン2次試験におけるはね返り率

表-6 繊維補強吹付けコンクリートの修正型配合(プレーン)

W/C (%)	s/a (%)	セメント (kg/m ³)	混和剤 質量比	急結剤 質量比	28日強度 (N/mm ²)
45	60	450	対セメント 1~1.5%	対セメント 10%	36

※CSA系粉体急結剤を使用、各値は修正配合における概略値

表-7 従来型と修正型配合の材料費比較

	材料費 円/m ³					比率 %
	セメント	骨材	混和剤	急結剤	合計	
従来型	3,348	4,805	0	5,040	13,193	61
修正型	4,185	4,529	1,820	11,250	21,784	100

※表-6、表-7における混和剤は、高性能 AE 減水剤

結果は試験時に吹付け機械のオペレーターが交代したので区別して表示している。はね返り率は、オペレーターによって大きく左右される傾向にあり、オペレーターAは同Bに比べてはね返り率が明らかに小さくなった。これより、吹付けコンクリートのはね返り試験では、オペレーターに依存する部分が大きく、同一条件で行うことが必要であるといえる。

両者の吹付け方法の違いとして、オペレーターBは吹付け面をすばやく何度も往復させて仕上げていくのに対し、オペレーターAはゆっくりと部分ごとに厚く仕上げる傾向が強いことが認められた。従来型吹付けコンクリートでは、はね返りの大きさよりもむしろ表面の滑らかさが重視される傾向が強いため、オペレーターBの吹付け方法が一般的に採用される場合が多い。オペレーターAのようにはね返り率低減に留意して吹付ければ、現場到着時のスラン

表-8 基本配合試験の概要²⁵⁾

項目	内容
試験場所	第二東名高速道路 清水第三トンネル(上り線, 下り線)
試験数量	トンネル延長 400m(4区間)で連続施工 はね返り試験は5回実施
吹付け機械	ポンプ圧送式, 14~20m ³ /h
はね返り試験	直接法(トンネル上半部施工)

プ16cmでおおよそ20%程度のはね返り率とすることができ。また、施工性に関しては特に大きな問題がなく、従来の機械設備で連続施工が可能であるとともに、その圧縮強度は初期から長期にかけて従来型吹付けコンクリートの2倍程度の大きさ(材齢1日強度 : 17 N/mm², 28日強度 : 51 N/mm²)が得られた²¹⁾。

なお単位セメント量を多くすると、これに比例して急結剤の添加量が多くなり、ベースコンクリートに対する吹付けコンクリートの強度が低下するという欠点は、急結剤をCA系からCSA系に変更することによって解決できる^{19)~24)}。ただし、CSA系急結剤の一般的な使用量は対セメント比10%とCA系の7%よりも多く、経済面では不利となる傾向にある。

(4) プレーンコンクリートの修正型配合

プレーン吹付けコンクリートの試験結果より、現在一般的に使用されている材料、施工機械で問題なく施工が可能で、かつはね返りが低減できるように修正した配合(以下、修正型配合と表す)を表-6に示す。修正型配合による吹付けコンクリートは、従来型に比べてはね返り率を約10%程度小さくできる。そこで本研究では、この修正型配合を出発点として繊維補強吹付けコンクリートの試験を行い、さらに経済的な配合に修正していくことにした。

表-7に、修正型および従来型吹付けコンクリートの材料費の比較を示す。これより、修正型配合では急結剤の費用が高く、これにセメント増量と高性能 AE 減水剤の使用を加えた材料費アップの方が、はね返り率の10%低減による材料費節減よりも大きい。したがって、修正型配合はプレーン吹付けコンクリートにはそのままでは適さず、材料単価の高い繊維補強吹付けコンクリートに適用することが望ましいと考えられる。ただし、修正型吹付けコンクリート

表-9 繊維補強吹付けコンクリート基本配合

配合記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 kg/m ³					繊維	急結剤
			水	セメント	細骨材※1	粗骨材※2	高性能AE減水剤		
F45base	45	70	203	450	1,114	481	5.9~7.2 対セメント質量 比 1.3~1.6%	1.0% Vol. 78.5kg/m ³	CSA系 対セメント 質量比 10%

※1 細骨材：密度 2.59g/cm³ FM 3.01, ※2 粗骨材：密度 2.60g/cm³

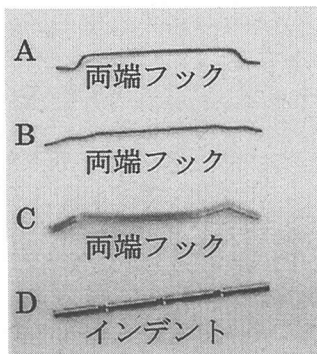


写真-1 繊維の形状 (長さ 30mm 共通)

表-10 繊維の種類

記号	寸法	形状	製造方法(7s ⁺ 外比)
A	φ0.6×30mm	両端フック	鋼線切断法(50)
B	φ0.6×30mm	両端フック	鋼線切断法(50)
C	φ0.6×30mm	両端フック	鋼線切断法(45)
D	φ0.6×30mm	インデント	鋼線切断法(50)

の3時間以降の圧縮強度は、従来型のそれに比べて約2倍程度大きいため、設計厚さを薄くできることが可能ならば経済的になる可能性もある^{19),20)}。

(5) 繊維補強コンクリートの基本配合試験

a) 試験方法

本研究では表-8に示される条件のもと、プレーン吹付けコンクリートの修正型配合をベースとする繊維補強吹付けコンクリートの吹付け試験を実施し、はね返り、強度、施工上の問題点を検証した²⁵⁾。ここで採用した配合条件 (F45base ; 基本配合と呼ぶ) を表-9に示す。基本配合は繊維混入を考慮し、配合は修正型配合に比べてs/aを10%程度上げるとともに高性能AE減水剤の使用量を多く設定した。

混入繊維は、写真-1および表-10に示す5種類の異なる形状、材質のものを採用し、はね返りと靱性性能を比較した。なお、繊維の選定に際しては国内、海外産の繊維 (11種類) を混入した繊維補強コンクリートの靱性性能試験を事前に行い²⁶⁾、その効果の高いあるいは特徴ある5種類を選定したものである。

b) 試験結果

はね返り率試験結果を図-4に示す。同図における

各はね返り率の定義は以下の通りである。

① 全体はね返り率：

「吹付けた繊維補強吹付けコンクリート」に対する「落下した繊維補強吹付けコンクリート」の質量比

② 繊維はね返り率：

「吹付けた繊維補強吹付けコンクリートに含まれる繊維」に対する「落下した繊維」の質量比

ここに落下した繊維の質量は、落下した材料を4分割したうちの1つから、主に磁石によって繊維を抽出し、落下した全材料に含まれる繊維の質量に換算したものである。この図より、全体はね返り率は20~25%程度であったが、繊維はね返り率は35~55%にも達していることがわかる。繊維補強吹付けコンクリートに含まれる繊維は、扁平形状の粗骨材とも捉えることができ、通常の骨材よりもはね返りやすいものと考えられる。

このように先に定めた基本配合を用いた繊維補強吹付けコンクリートでは、単価が高い、あるいは構造的に重要な繊維の部分が約半分もはね返ってしまうという問題があることがわかった。さらに、繊維の形状によっても繊維のはね返り率が大きく異なることもわかった。

4. 新規配合に基づく繊維補強吹付けコンクリートの各種性能比較

(1) 試験の概要

現在一般的に使用されている材料、機械をそのまま使う条件下では、はね返りが少ないプレーン吹付けコンクリートの配合が得られたが、この配合を繊維補強吹付けコンクリートに適用すると、材料全体のはね返りに比べて繊維のはね返りが2倍程度も大きくなるという欠点が目明らかになった。したがって、繊維補強吹付けコンクリートの繊維のはね返りを低減するためには、従来型とは大きく異なる新しい材料も含めた新規の配合を検討することが必要と考えた。新規の配合として、s/aの増加、シリカフェームの添加¹⁾、液体急結剤の使用^{2),11)}など幅広いバリエーションが挙げられる。これらの新規の配合は、主にセメントや混和剤メーカー等を中心に研究が進めら

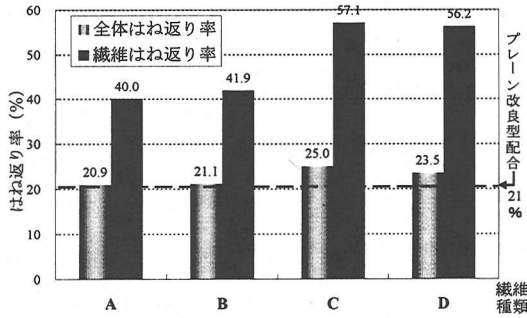


図-4 基本配合試験における繊維別はね返り率

表-11 繊維補強吹付けコンクリートの要求性能

強度項目	要求性能
1日圧縮強度	10N/mm ² 以上
28日圧縮強度	36N/mm ² 以上
曲げ靱性性能	図-5 参照

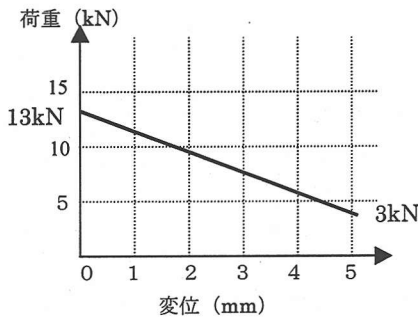


図-5 曲げ靱性に関する要求性能—下限値—
(100×100×400mm 試験体による2点載荷)

れているのが現状であり、これらを同一条件で比較し、その中から最良の配合を模索することが必要と判断した。また、吹付けコンクリートのはね返りを検討するためには、実施工とほぼ同じ条件で壁面に吹付け、かつ配合を変えても機械やオペレーターの条件が変わらないことが必要となることから、模擬トンネルを使って新規の配合による繊維補強吹付けコンクリートの吹付け試験を行い、はね返り率や強度の比較を試みた。

(2) 新規配合

a) 配合の基本条件

本研究では、配合の基本となる条件として以下に示す3項目を掲げるとともに、セメントおよび混和剤メーカー各社の研究内容を調査し、かつ条件を満足するための配合に関する聞き取り調査を行って新規の配合を決定した。

- ①強度：表-11に示す要求性能が得られること。
- ②施工性：現在の機械設備で大きな問題がないこと。

③経済性：はね返りを考慮した材料費ができるだけ安価になること。

なお、表-11に示す要求圧縮強度は、表-9の基本配合で十分に達成できる値である²⁵⁾。また、図-5の曲げ靱性に関する要求性能は、土木学会基準：JSCE-G552に基づくものであり、体積比0.75%混入した繊維補強コンクリート(≠吹付けコンクリート：通常打設)の曲げ靱性性能試験で得られる荷重—たわみ曲線から決定した²⁶⁾。ここで繊維混入率0.75%は、トンネル施工実績のある体積比0.5~1.0%について靱性性能試験を実施したところ、圧縮強度30N/mm²以下のコンクリートにおいて、0.75%以上の混入率で明確な差異が認められなかったことから決定したものである²⁶⁾。

b) 配合の詳細

セメントおよび混和剤メーカーからの提案を受け、本研究で比較を行った配合の特徴、配合の詳細、使用材料の詳細をそれぞれ表-12~表-14に示す。本報では粉体急結剤を使用する配合をFpw1~5、液体急結剤を使用する配合をFlq1~2と略記する。また、比較に用いた基本配合F45baseは、先述のとおりである。ここで比較を容易にするため、いずれの配合も表-10に示される鋼繊維Bを採用した。

各配合の材料費の内訳を図-6に示す。なお、ここで用いた材料単価は、試験を実施した平成10年10月時点におけるものである。シリカフュームは単価が高いため、少量使用でも材料費を押し上げる傾向が強い。なお、Fpw1にはセメントに、Flq2には急結剤にシリカフュームを混入しているが、それぞれセメント、急結剤で材料費を計上している。急結剤使用量には、各配合間に大きな差がみられ、概してCA系粉体急結剤は少なく、他の急結剤と比べて安価となっている。また、アルカリフリー液体急結剤はCSA系粉体急結剤と比べて単価、使用量とも大きな差はみられない。

Fpw1およびFpw2は、微粉末添加やs/aを高くすることで、はね返り率の低減をねらったものである。これらは、高性能AE減水剤の使用を抑えているものの、単位水量が多く急結剤の使用量も多くなっている。逆にFpw3では、高性能AE減水剤により単位水量を小さくするとともに急結剤の使用量を3%と抑えている⁹⁾。高流動タイプ¹²⁾のFpw5は、セメントを大量使用するものの、比較的安価な高炉セメントB種を用いるため材料費は安価である。

(3) 吹付け試験方法

試験を実施した模擬トンネルの縦断・横断図および使用機械の配置・仕様を、図-7の吹付けコンクリ

表-12 繊維補強吹付けコンクリート新規配合の特徴

配合記号	配合の特徴	骨材	セメント	急結剤	混和剤
Fpw1	石灰石微粉末とシリカフュームでコンクリートを増粘化。CSA系粉体急結剤を使い、単位水量を多くすることで高性能減水剤の使用量を抑制。	I	特殊	CSA粉体	V
Fpw2	細骨材率90%とモルタルに近い。CSA系粉体急結剤を使い、単位水量を多くすることで高性能減水剤の使用量を抑制。急結剤使用量が極めて多い。	I	普通	CSA粉体	V
Fpw3	セメントとシリカフュームスラリーでコンクリートを増粘化。CA系粉体急結剤を使うがその使用量は極めて少ない。	II	普通	CA粉体	VI
Fpw4	セメント単味でコンクリートを増粘化。早強セメントと修正型CA系粉体急結剤を組み合わせ使用。	II	早強	CA粉体	VI
Fpw5	セメント量650kg/m ³ 、W/C=32%の高流動コンクリートと修正されたCA系粉体急結剤を組み合わせ使用。セメントは高炉セメントB種。	II'	高炉B	CA粉体	VI改良
Flq1	セメントとシリカフュームスラリーでコンクリートを増粘化。早強セメントと液体急結剤を組み合わせ使用。	II	早強	液体III	VI
Flq2	セメント単味でコンクリートを増粘化。早強セメントと沈降性シリカを含んだ液体急結剤を組み合わせ使用。	II	早強	液体IV	VI
F45base	表-9に示す基本配合。	II	普通	CSA粉体	VI

I~VIは表-14参照

表-13 新規配合に基づく繊維補強吹付けコンクリートの配合条件

配合記号	W/B %	s/a %	単位量 kg/m ³									
			水	セメント	細骨材	粗骨材	シリカフューム	石灰石微粉末	混和剤	対結合材%	急結剤	対結合材%
Fpw1	55	70	247	449	1008	435	※1	125	1.8	0.40	45	10.0
Fpw2	42.3	90	277	665	1191	133	—	—	2.6	0.39	66.5	10.0
Fpw3	38	70	190	475	1077	473	25	—	8.5	1.70	15	3.0
Fpw4	40	70	200	500	1139	488	—	—	7.5	1.50	35	7.0
Fpw5	32	65	205	650	899	484	—	—	9.75	1.50	32.5	5.0
Flq1	35	70	190	518	1048	463	25	—	10.9	2.00	43	7.9
Flq2	40	70	200	500	1139	488	※2	—	7.5	1.50	45	9.0
F45base	45	70	203	450	1114	478	—	—	6.5	1.44	45	10.0

※1：セメント中に混入，※2：急結剤中に混入

結合材B：結合材の合計でセメント+シリカフュームとするが、急結剤に混入されたシリカフュームは加えない

表-14 繊維補強吹付けコンクリート比較試験の材料

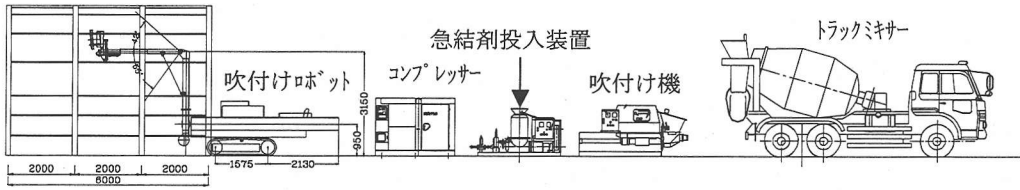
材料	種別	特徴
骨材	I	細骨材：川砂(2.62 g/cm ³ , FM 2.82), 粗骨材：川砂利(2.64 g/cm ³ , Gmax=15mm)
	II, II'	細骨材：陸砂(II, II' : 2.59, 2.64 g/cm ³ : FM 2.67, 2.51), 粗骨材：6号砕石(2.59 g/cm ³)
急結剤	CSA系粉体	カルシウムサルフォアルミネート急結剤
	CA系粉体	カルシウムアルミネート急結剤
	液体III	アルカリフリー液体急結剤, 主成分：水溶性アルミニウム塩 密度：1.44 g/cm ³ (20°C), pH：2.5(20°C)
	液体IV	アルカリフリー液体急結剤, 主成分：水溶性アルミニウム塩+沈降性シリカ 密度：1.4 g/cm ³ (20°C), pH：2.6(20°C)
混和剤 (高性能AE減水剤)	V	主成分：ポリエチレングリコールエステル系高分子化合物 (A社製)
	VI	主成分：ポリエチレングリコールエステル系高分子化合物 (B社製)
	VI改良	
シリカフューム		質量濃度50%のスラリー, 比表面積:17.1cm ² /g, 密度:2.2g/cm ³ , 二酸化ケイ素:96.7%

ート施工次第図とともに示す。模擬トンネルは、鋼アーチ支保工を間隔2.0mで10基建て込み、これにキーストンプレートを取り付けたものである。吹付けの前処理として、吹付けコンクリートをキーストンプレートの表面に2~3cm厚さ程度吹付けた。なお、

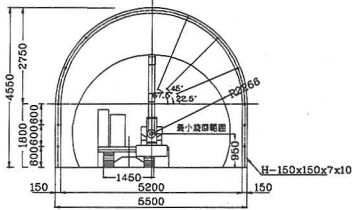
使用した吹付け機は、ポンプ圧送方式のものである。

試験条件の影響を少なくするため、機械設備やオペレーターは全試験を通して同じとした。ただし、急結剤投入装置については、粉体・液体あるいはその種別によって異なるため、それぞれに必要なもの

縦断面図



断面



単位 mm

機械	仕様
吹付けロボット	ストローク 2000mm
吹付け機	吐出能力：20m ³ /h 所要空気圧：0.7MPa
コンプレッサ	吐出能力：12.3m ³ /h 75kW×2台 吐出空気圧：0.7MPa

図-7 吹付けコンクリートの施工次第図

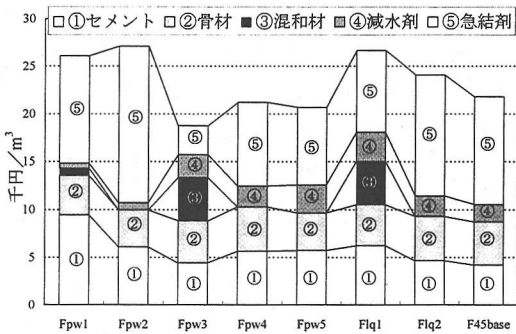


図-6 新規配合の材料費内訳

を適時使用した。また、空気圧や配管、ノズルの形状については、配合ごとに予備試験を実施し、それぞれ最適と思われるものを選定した。

1 配合あたり2.5m³の吹付けコンクリートの材料を試験場所に持ち込み、吹付け量2.0m³(平均厚12cmに相当)を目途とし1カ所に集中して厚くならないように注意を促した。また強度試験のため、供試体用型枠をセットし、これに残りの材料を吹付け、強度試験用供試体を作製した。

(4) 試験項目

a) 強度試験

強度試験ではその材齢(水和度)に応じて、①空気圧ピン貫入試験²⁷⁾(適用範囲1~30N/mm²)、②ブルアウト試験(日本道路公団規格:JHS702-1992に準拠)、③圧縮強度試験(土木学会規準:JSCE-G551に準拠)によって間接的あるいは直接的に圧縮強度を求めた。すなわち、①ピン貫入試験では材齢10、

30分、1、3、8、24時間、②ブルアウト試験では材齢1日の圧縮強度を推定するとともに、③圧縮強度試験では28日材齢圧縮強度を測定した。

b) 曲げ靱性試験

吹付けコンクリートを繊維で補強する目的は、コンクリートに共通する弱点である脆性を改善し、靱性性能を付与することにある。この靱性性能を評価するために曲げ靱性試験を行った。曲げ靱性試験は、土木学会規準:JSCE-G552に準拠して3等分載荷(2点載荷)で行った。供試体は900×900×1500mmの型枠に繊維補強吹付けコンクリートを吹付け、そこから100×100×400mmの角柱供試体を切り出して作成した。図-8に曲げ靱性試験の方法を示す。同試験では、変位計を支承点、載荷点と中央部に設置するとともに、π型変位計を用いてひび割れ開口幅の測定を行った。

ここで2点載荷による曲げ靱性試験では、載荷点間が等曲げモーメント分布になるためにひび割れ発生位置が必ずしも供試体中央に発生するとは限らない。そのため、供試体中央変位はひび割れ発生位置の影響を受ける可能性がある。そこで、ひび割れ発生位置による影響を取り除くために、π型変位計で得られた載荷点間の変位を用いて、次式から供試体中央変位の算定を行った。

$$\delta_c = \frac{3}{4} \cdot \omega \quad (1)$$

ここに、 δ_c : 補正中央変位、 ω : π型変位計で測定された載荷点間の変位、である。

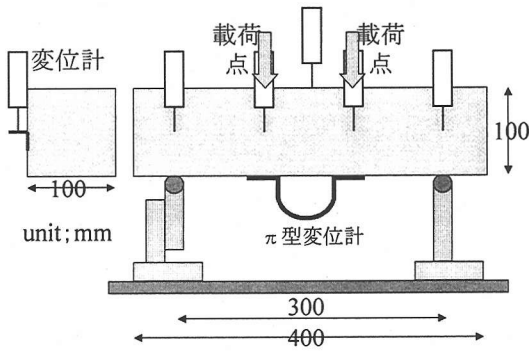


図-8 曲げ靱性試験

表-15 フレッシュ性状

配合記号	スランブ (cm)	スランブフ ロー(mm)	空気量(%)	温度 (°C)
Fpw1	15.5	—	5.2	27.0
Fpw2	20.5	410×390	4.9	27.5
Fpw3	19.5	295×295	3.5	27.5
Fpw4	24.5	530×570	4.6	24.5
Fpw5	—	660×680	5.7	27.0
Flq1	20.5	285×300	3.2	27.0
Flq2	21.0	320×330	7.5	27.0
F45base	18.0	—	4.3	29.5

c) はね返り試験

はね返り試験では、模擬トンネル下部にシートを敷設し、模擬トンネル上半部のキーストンプレート1間(L=2.0m)にコンクリートを吹付け後、シート上に落ちた材料の収集を行った。はね返り材料中の鋼繊維含有量の測定では、はね返り材量の約1/4の量を別途水洗いし、磁石で鋼繊維を回収後、その質量を計測した。その際、鋼繊維の金属光沢が回復するまで数回水洗いを繰り返し鋼繊維の質量を測定した。模擬トンネルに付着した吹付けコンクリートの測定は、断面測定器によって支保工間隔2mあたり3断面の吹付け厚を計測し、その平均厚に実測面積、密度を乗じて付着コンクリートの質量とした。

(5) 試験結果と考察

a) フレッシュ性状

表-15に各配合のフレッシュ性状を示す。スランブは、石灰石微粉末を含むFpw1が15cm程度と比較的小さく、その他のスランブ試験を実施したコンクリートでは、18~25cm程度となった。また、高流動タイプのFpw5のフローは660mm×680mm、Fpw4は530mm×570mm程度であった。

b) 圧縮強度試験結果

空気圧ピン貫入試験、プルアウト試験および圧縮強度試験による各配合の強度発現結果を、図-9およ

び表-16に示す。なお、図-9には従来型吹付けコンクリートの平均的な強度発現結果¹⁹⁾も併記した。

材齢10分ではFpw1, Fpw2, Flq1, Flq2, 材齢30分ではFpw2, Flq1, Flq2が空気圧ピン貫入試験での強度測定ができなかった(1N/mm²未満のため)。このことより、液体急結剤とCSA系粉体急結剤による単位水量の多い配合では、初期強度の発現が期待できないことが伺える。また、液体急結剤の材齢1時間強度は1.1~1.3N/mm²となり、従来型吹付けコンクリートとほぼ同程度の値は得られるものの、吹付け直後の手触りでは、粉体急結剤によるものが吹付け直後に硬化するのに対して、液体急結剤によるものは可塑性を有していることが認められた。なお、本報におけるコンクリートの「可塑性」とは、岩盤に十分に付着し自立できるものであるが、吹付け直後の材料が僅かに塑性性状(手触りで指先が貫入する程度)を呈することを意味する。

また、これらの結果では、粉体急結剤のものに比べて、液体急結剤による配合の材齢1時間以内の強度発現は劣るものの、材齢1~8時間における強度増進は、粉体急結剤のものより著しいことが分かる。これは、液体急結剤がセメント中のC₃Aの反応を促進させ急結効果を発揮するのに対し、粉体急結剤はC₃Aの反応促進とともに自硬性を有することから、このような差異が生じたものと考えられる²²⁾。さらに材齢3時間以降では、提案された配合の全てにおいて、従来型のものより2倍以上の強度を有する結果となった。なお、いくつかの配合において8~24時間で強度が低下する現象がみられるが、これは空気圧ピン貫入試験とプルアウト試験の相違に起因するものと考えられる。

c) 曲げ靱性試験結果

曲げ靱性試験によって得られた曲げ靱性係数の一覧を表-16の最右列に示す。ここで曲げ靱性係数は、式(1)により補正した中央変位を用い、これが5mmになるまでの荷重-変位曲線を積分して式(2)より求めた。なお、表-16の曲げ靱性係数は、供試体4本の試験値の平均値を示すものである。

$$\sigma_b = \frac{T_s}{\delta_s} \cdot \frac{l}{bh^2} \quad (2)$$

σ_b : 曲げ靱性係数

T_s : 変位5mmまでの荷重-変位曲線 積分値

δ_s : 補正中央変位

l : 荷重スパン

b : 供試体幅 (100mm)

h : 供試体高さ (100mm)

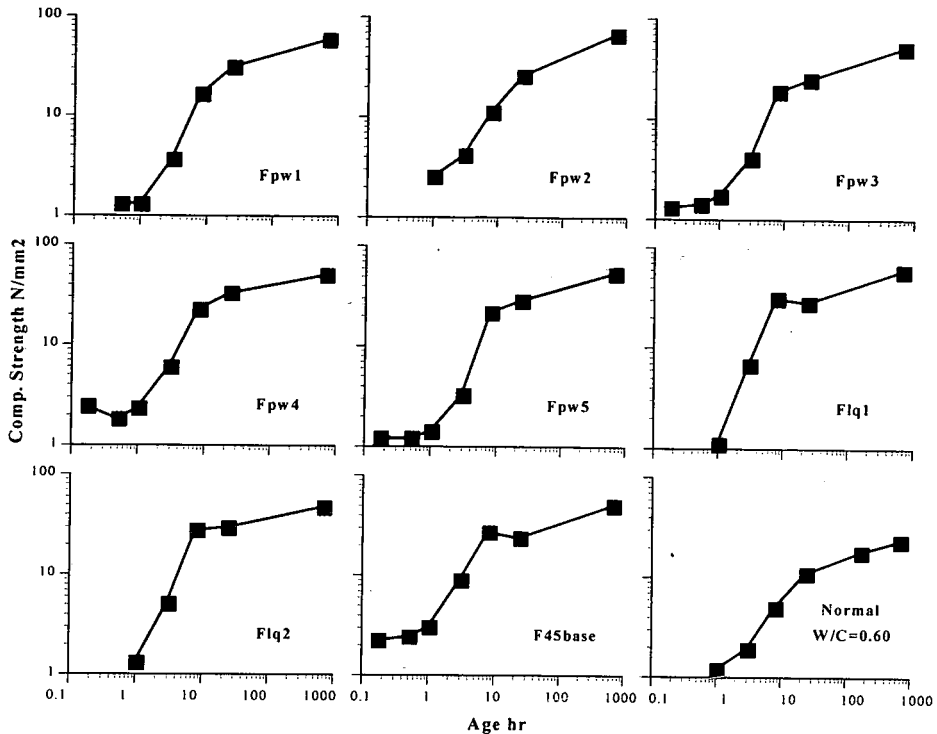


図-9 圧縮強度の発現

表-16 (推定)圧縮強度および曲げ靱性係数試験結果

配合記号	空気圧ピン貫入試験 (N/mm ²)					プリアウト試験 (N/mm ²)	圧縮強度試験 (N/mm ²)	曲げ靱性係数 (N/mm ²)
	10min	30min	1hr	3hr	8hr	24hr	28day	
Fpw1	—	1.3	1.3	3.6	16.2	30.2	57.2	13.9
Fpw2	—	—	2.5	4.1	10.9	25.5	66.2	13.3
Fpw3	1.3	1.4	1.7	4.0	18.6	24.5	50.0	13.1
Fpw4	2.4	1.8	2.3	5.9	22.1	32.4	49.5	12.8
Fpw5	1.2	1.2	1.4	3.2	21.2	28.0	52.5	10.9
Flq1	—	—	1.1	6.7	31.1	28.0	58.4	13.8
Flq2	—	—	1.3	5.0	27.2	28.9	46.4	13.7
F45base	2.2	2.4	3.0	8.9	26.8	23.5	49.7	4.5

注) — は 1N/mm² 未満のため測定不能であったことを示す。

提案されたいずれの配合も、その曲げ靱性係数は、基本配合F45baseにて得られた値4.5N/mm²の2～3倍程度大きいものであった。高流動タイプFpw5の曲げ靱性係数は約11N/mm²と比較的小さいものであったが、その他の配合では約13～14N/mm²とほぼ同程度の値を示した。図-10に曲げ靱性試験によって得られた典型的な荷重-変位曲線を示す。この結果からも新規配合の靱性性能が、基本配合のものより極めて優れていることがわかる。

d) はね返り率試験結果

図-11にはね返り試験の結果を示す。全体はね返り率は、Fpw1とFpw3を除いた配合において約15%以下であり、全体はね返り率約30%のF45baseの半分以下

となった。特にFlq2では全体はね返り率10%を下回る極めて良好な結果が得られた。また、Fpw1とFpw3における全体はね返り率は、23～25%程度であったが、両コンクリートともにF45baseより全体はね返り率を5%以上低減しており、従来型のものより効果は大きいことが伺える。なお繊維はね返り率は、F45baseに対してFlq2で20%以上、Fpw4とFpw5で10%以上低減できること分かった。

なお、はね返り試験におけるはね返り率は、一般に練り混ぜた全量を吹付けた量として算出されるが、本研究において行った試験では、付着した量を直接測定したので、ポンプや配管内の残量が吹付けた量に含まれない。これに加えて、僅かではあるものの

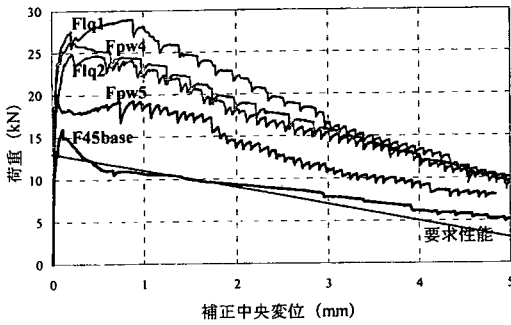


図-10 曲げ靱性試験における荷重-変位曲線

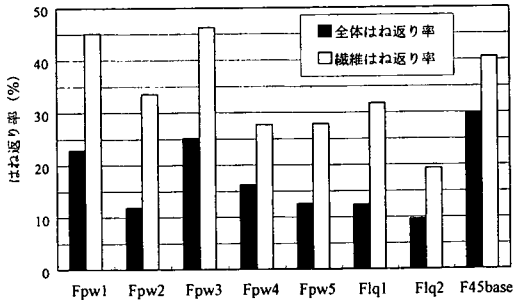


図-11 各種新規配合のはね返り率試験結果

H鋼の背面に吹付けた量が測定できないため、既往の評価結果よりも大きくなる傾向にある。

目視による観察結果から、はね返りの少ない配合に共通する傾向として、吹付け直後に材料が可塑性を有していることが認められた。Fpw5, Flq1, Flq2では短時間で局所的に(吹付け厚12cm以下の範囲においても)吹付け厚を増すと、実用上問題とはならない範囲であるが、吹付け面からの材料ダレが確認された。CA系粉体急結剤を多く添加するFpw1では粉じんの発生が著しく、逆に液体急結剤のFlq1, Flq2では粉じんが少ないことが認められた。

(6) 経済性の比較

はね返りも考慮に入れた各配合の経済性比較を図-12に示す。図-12より約63,000円/m³のF45baseに比して、Fpw4, Fpw5, Flq2ではF45baseの約25%に相当する15,000円/m³程度、Flq1では5,000円/m³程度安価であることがわかる。また、その他の配合ではF45baseとほぼ同等あるいは若干高価となる結果が得られた。

なお図-12には、はね返り率40%程度となる従来型吹付けコンクリートの単価も示している。従来型吹付けコンクリートでは、ベースコンクリートの段階(コンクリートの材料費+はね返りコンクリート)では、22,000円/m³程度と全ての新規配合よりも経済的である。しかしながら、Fpw3, Fpw4, Fpw5の粉体急結剤の配合では、鋼繊維を除くプレーン吹付けコン

クリート部で25,000円/m³以下と、従来型に比して大きな差異はみられないといえる。トンネル施工では、地山状況に応じて繊維補強あるいはプレーンの吹付けコンクリートを切り替えながら施工することが必要となる。ここでFpw3~5といった配合は、繊維補強からプレーンへ切り替えた際でも大きな変更はなく、且つ不経済にならないため、他のものに比べて有利であることが予想される。

(7) 総合評価結果と合理的配合の考え方

上記の結果を踏まえ、特に強度と経済性に着目してまとめると表-17の総合評価表のように整理される。なお要求性能のひとつである施工性については、いずれの新規配合も模擬トンネルにおいて従来設備を用いて施工可能であったことから、これに関する要求性能はいずれも十分に満足するものと考え、ここでは評価対象に含めていない。表-17より、全ての項目で優れるのは、早強セメントと改良されたCA系粉体急結剤を組み合わせたFpw4となった。続いて優れる配合として、経済性を重視すれば高流動タイプのFpw5と液体急結剤によるFlq2となる。なお、表-17の評価方法は以下に示すとおりである。

強度は、従来型吹付けコンクリートの2倍程度の値(従来設備程度で得られる範囲のうち、設計厚の低減により経済的な優位性のある強度)が得られれば満足できるものと考えて評価した¹⁹⁾。材齢1時間以内の強度は、30分強度で1N/mm²以上、1時間強度で2N/mm²以上の両方を満たせば○、どちらかを満たせば△、どちらも満たさなければ×とした。材齢3~24時間強度は、3時間強度で3N/mm²以上、8時間強度で15N/mm²以上、24時間強度で20N/mm²以上、の3条件を全て満たせば○、どれか1つ満たさなければ△とした。材齢28日強度は、全ての配合において従来型の2倍以上の値が得られたことからいずれも○とした。曲げ靱性性能は荷重-変位関係をもって評価を試みた。Fpw5は要求性能を満足するが他に比べてやや劣るため△、F45baseは概ね要求性能を満足するが(一部例外あり)、他に比して大幅に靱性性能に劣るため×とした。経済性の評価は図-12の結果に基づき、55,000円/m³以下を○、55,000~65,000円/m³を△、65,000円/m³以上を×とした。

表-17に示される総合評価で、強度や靱性性能に関する要求性能(表-11参照)を満足し、且つ経済的と判断された配合(Fpw4, Fpw5, Flq2)について、それぞれの特徴を示すとともに、実用に対してより合理的な配合とするための考え方を以下に示す。

a) Fpw4の特徴と合理的配合へのポイント

Fpw4は、従来型吹付けコンクリートとほぼ同じ材

料を使用し、特別な材料・設備・技術が必要でないこと、プレーン吹付けコンクリートとして用いても経済性に優れるため、地山に応じて繊維補強とプレーンの切り替えが容易であるという大きなメリットを有する。この配合は、石膏成分を比較的多く有する早強セメントを用いるものであり、この石膏成分がカルシウムアルミネートと反応してエトリンガイトを生成し瞬結を防止するとともに、セメントの水和を促進させ長期強度を増加させるといった、CSA系急結剤と同様の効果が得られるものである^{22)~24)}。

Fpw4をより合理的な配合とするには、凝結調整成分および可塑性保持成分の添加といった粉体急結剤の改良を施し、吹付け直後のコンクリートに十分な付着性と極短時間における可塑性、および短時間での急結硬化性を持たせることが望まれる¹⁰⁾。

b) Fpw5の特徴と合理的配合へのポイント

Fpw5は、セメントを増量してコンクリートの粘性をアップする際に、必然的にポンプ圧送時の負荷の増大を伴うという問題をコンクリートの高流動化という形で解決したものである。なお、ここでいう「高流動」とは、材料分離がなく且つポンプ圧送性に優れたコンクリートの流動性を意図するものである。同配合は、はね返りが少なく経済性に優れるが、1時間以内の初期強度や曲げ靱性性能の点でFpw4に比べてやや劣るものであった。また、これまで吹付けコンクリートでほとんど施工実績のない高流動タイプでは、様々な支障が生じる可能性も否めない。この配合の実用化に際しては、吹付け施工可能な程度にコンクリートの流動性を向上（高流動化）させることが必要と考える。

c) Flq2の特徴と合理的配合へのポイント

アルカリフリー液体急結剤型によるFlq2は、はね返りや粉じんが少なく作業環境の点では非常に優れる反面、初期強度発現が低い欠点を有している。メーカーが保証する材齢3時間において3N/mm²以上の強度は満足したものの、3時間以内の強度は粉体急結剤に比べると著しく小さい。また、凝結試験(JSCE-D102-1999)による凝結始発時間は、粉体急結剤使用下で通常1~2分程度に対し、液体急結剤の場合には5分以上(メーカー資料による)と大きな隔りがある。吹付け厚12cm程度の本研究ではほとんど問題とならなかつたが、設計厚の大きな吹付けコンクリートを施工する際には、その凝結時間に伴う付着性状も問題となることが予想され、今後の現場施工において確認を行う必要がある。同配合では、粉体急結剤に比べて吹付け後初期の凝結反応が遅い液体急結剤の特性を利用し、吹付け直後のコンクリートに十分な付着の上で可塑性を持たせること

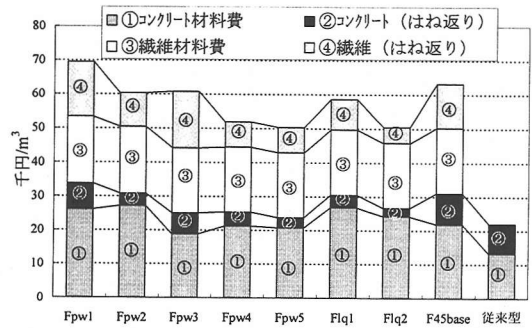


図-12 各種新規配合の経済性比較

表-17 新規配合に対する総合評価

配合記号	強度および靱性性能				経済性
	1時間以内	3~24時間	28日	曲げ靱性	
Fpw1	△	○	○	○	×
Fpw2	△	△	○	○	△
Fpw3	△	○	○	○	△
Fpw4	○	○	○	○	○
Fpw5	△	○	○	△	○
Flq1	×	○	○	○	△
Flq2	×	○	○	○	○
F45base	○	○	○	×	△

が望まれる。

以上のように、繊維吹付けコンクリートのはね返りを低減するためには、①吹付け直後のコンクリートに可塑性を持たせること、②可塑性を持ったコンクリートが分離して落下しないためにコンクリートに高い粘性を持たせること、が必要であると考えられる。さらにコンクリートの粘性を上げる、換言すればW/Bを下げるのはコンクリートのポンプ圧送の限界から決まるものと推察され、一般的な施工機械を使用した本研究の試験では、高性能減水剤の使用したコンクリートでW/B=40%まで、高流動タイプでW/B=30%程度までが可能であった。なお、初期強度の面では粉体急結剤が、作業環境の面ではアルカリフリー液体急結剤が優れるため、地山や作業条件に応じてそれぞれを使い分けることが望ましい。

5. まとめ

本研究は、はね返りの少ない繊維補強吹付けコンクリートの合理的配合(総合的に経済的となる配合)を求めることを目的としたものである。合理的配合を模索する中で、従来型吹付けコンクリートの配合に基づくはね返りの少ないプレーン吹付けコンクリートの配合を求め、これを用いた繊維補強吹付けコンクリートの合理性について検討し、従来型とは大

大きく異なる配合の検討・評価という過程を経た。これらの過程において、はね返りはオペレーターに依存する部分が大きく同一条件で比較評価しなければならないこと、吹付け前後のコンクリートの諸性質を十分に把握すること、さらにはね返りを含めた経済性評価が重要であることを再認識した。本研究の範囲内で得られた結論を、プレーンおよび繊維補強吹付けコンクリートに分けて要約する。

(1) プレーン吹付けコンクリート

プレーン吹付けコンクリートに関する結論を以下にまとめる。

- ① W/C35%とするプレーン吹付けコンクリートでは、粘性が高すぎて問題が残されるものの、W/C45%の吹付けコンクリートでは、現在一般的に使われている機械設備・材料で大きな問題なく連続して施工することができる。
- ② プレーン吹付けコンクリートでは、W/Cを40～45%とすると、上半施工のはね返り率を従来型のものより約10%程度小さくできる。しかし、はね返り率10%程度の低減では、セメント増量とそれに伴う高性能AE減水剤使用に起因する材料費のコストアップをカバーしきれない。
- ③ プレーン吹付けコンクリートでは合理的であった配合を、そのまま繊維補強吹付けコンクリートに適用しただけでは、繊維のはね返り率が35～55%にも達し品質と経済性に問題が残る。

(2) 繊維補強吹付けコンクリート

繊維補強吹付けコンクリートに関する結論を以下にまとめる。

- ① はね返り低減を志向して求めた繊維補強吹付けコンクリートの配合は、結合材の増量、低水結合材比および高細骨材率化など、比較的粘性の高いものであった。
- ② 提案に基づく配合は、プレーン吹付けコンクリートで合理的とされた配合をそのまま繊維補強吹付けコンクリートに適用したものよりはね返りが少なく、材料費のアップをカバーできた。最も優れた配合条件では約20%のコストダウンの可能性がみられた。
- ③ 粘性を高くした繊維補強吹付けコンクリートは、繊維そのもののはね返り損失を少なくでき、曲げ靱性性能を大幅に改善することができる。また新規配合のいずれも、従来型に比べて約2倍以上の圧縮強度と高強度のものであった。
- ④ はね返り低減を施した繊維補強吹付けコンクリートの配合は、プレーン吹付けコンクリート

として適用した場合、従来型に比して経済的に大きな差異はみられない。実トンネル施工では、地山条件に応じてプレーンと繊維補強を切り替えながら施工することで、経済的に不利にならないメリットがある。

- ⑤ 新規配合を各種試験やコスト試算によって比較を行い、総合的な評価を行ったところ、a)改良型CA系粉体急結剤と早強セメントを組み合わせた配合、b)CA系粉体急結剤による高流動コンクリート配合、c)早強セメントおよび沈降性シリカを含む液体急結剤用いた配合、が比較的合理的であると判断された。
- ⑥ 合理的と判断された配合の特徴を考慮すると、a)吹付け直後のコンクリートに可塑性を持たせる、b)施工可能な程度にコンクリートを高流動化する、c)吹付け直後のコンクリートに可塑性を持たせる、ことが繊維補強吹付けコンクリートの合理性に有効であることが伺えた。

(3) おわりに

プレーンの吹付けコンクリートでは、高性能減水剤を使用し、水結合材比を小さくするだけで、ある程度のはね返り率の低減が得られるが、はね返り率低減による経済的メリットよりも、材料費の上昇の方が大きく経済的にはならない結果が得られた。しかし、材料が高価な繊維補強吹付けコンクリートでは、プレーンの吹付けコンクリートとは異なる配合に修正することよってはね返りが少なくなり、材料費のアップを吸収できるため、十分経済的かつ靱性性能の面でも優れることがわかった。合理的配合への修正は、液体急結剤あるいは粉体急結剤を使っても可能であり、どちらかに限定するものではない。ただし、初期強度の面では粉体急結剤が、作業環境の面ではアルカリフリー液体急結剤が優れるため、地山や作業条件に応じてそれぞれを使い分けることが望ましい。

本研究において検討を行った配合は、模擬トンネル規模では大きな問題は生じなかった。今後、本論で合理的と判断された配合等を用いて、実トンネル規模での吹付け実験を行い、それらの諸特性の検証を行う必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 伊藤祐二, 北川修三, 末永充弘, 弘中義昭: 混和材を用いた吹付けコンクリートの施工性および品質に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1429~1434, 1997.
- 2) 酒井芳文, 木村正孝, 藤村満夫, 牛島 栄: 高性能吹付けコンクリートシステムを用いた施工実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1435~

- 1440, 1997.
- 3) 酒井芳文, 駒田憲司, 川口和義, 牛島 栄: 急結剤の種類および添加量が吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1141~1146, 1998.
 - 4) 小林裕二, 笹川幸男, 酒井芳文, 魚本健人: 各種配合要因に伴う吹付けコンクリートの強度および空隙特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1153~1158, 1998.
 - 5) 荒木昭俊, 平間昭信, 伊藤良浩, 西村次男: 各種配合要因の変化に伴う吹付けコンクリートのフレッシュ性状及びリバウンド特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1159~1164, 1998.
 - 6) 牧 剛史, 魚本健人: 2次元個別要素法を用いた吹付けメカニズムに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1441~1446, 1997.
 - 7) 牧 剛史, 魚本健人: 吹付けコンクリートのリバウンド評価に対する2次元個別要素法の適用, 土木学会論文集, No.620/V-43, pp.109~118, 1999.5.
 - 8) 荒木昭俊, 西村次男, 魚本健人: 吹付けコンクリートの配合推定と吹付けメカニズム, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.2, pp.1~10, 2000.5.
 - 9) 古沢孝男, 富山 徹, 藪宮芳和, 岡沢 智, 宮下 洋, 佐藤奎一: 高強度吹付けコンクリートの開発, エヌエムビー研究所報, No.11, pp.16~31, 1996.
 - 10) 小川洋二, 結城 渡, 山本盛男: 高強度低リバウンド吹付けコンクリート用粉体急結剤の開発, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.970~971, 1999.
 - 11) 松浦 茂, 小川洋二, 綾田隆史, D. Gardiner: アルカリフリー液体急結剤を使用した高強度コンクリート吹付け実験, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.972~973, 1999.
 - 12) 杉山彰徳, 綾田隆史, 竹内 良: 高強度吹付けコンクリートへの高流動コンクリートの適用(その3), 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.962~963, 1999.
 - 13) Bindiganavile, V. and Banthia, N.: Rebound in Dry-Mix Shotcrete: Influence of Type of Mineral Admixture, *ACI Material Journal*, V.97, No.2, pp.115~119, 2000.3.
 - 14) 魚本健人: 吹付けコンクリートの特性と技術の現状, コンクリート工学, Vol.37, No.8, pp.3~13, 1998.8.
 - 15) 坂本 淳: 吹付けコンクリートに関する最近の研究および施工事例, コンクリート工学, Vol.38, No.7, pp.64~68, 2000.7.
 - 16) 日本トンネル技術協会: トンネルの吹付けコンクリート, pp.32~62, 1996.2.
 - 17) 土木学会: トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, pp.73~75, 1996.7.
 - 18) 日本道路公団: 設計要領第三集トンネル, pp.95~97, 1997.10.
 - 19) 武内 淳, 三谷浩二, 中田雅博: 高強度吹付けコンクリートの開発, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.34, pp.123~130, 1997.11.
 - 20) 福留和人, 長沢教夫, 杉山 律, 喜多達夫, 笹川幸夫: 各種高強度吹付けコンクリートの強度特性および大断面トンネルにおける試験施工, 土木学会論文集, No.602/VI-40, pp.123~137, 1998.9.
 - 21) 佐藤達雄, 三谷浩二, 遠藤祐司, 細谷多慶: 高強度吹付けコンクリートの施工試験, トンネルと地下, Vol.29, No.8, pp.35~41, 1998.8.
 - 22) 五味秀明: 急結セメント, セメント・コンクリート, No.535, pp.84~89, 1991.9.
 - 23) 五味秀明: 急結セメント, セメント・コンクリート, No.560, pp.56~58, 1993.10.
 - 24) 橋 大介: 使用材料および配合が吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, Vol.8, No.2, pp.61~72, 1997.7.
 - 25) 田中 一, 青山繁夫: 第二東名高速道路における超大断面トンネルの試験工事, 清水第三トンネル(総括; その1), トンネルと地下, Vol.31, No.8, pp.15~23, 1998.8.
 - 26) 三谷浩二, 武内 淳: 繊維補強コンクリートの仕様と設計手法に関する検討, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.35, pp.56~63, 1998.11.
 - 27) 岩城圭介, 平間昭信, 三谷浩二, 海瀬 忍, 中川浩二: 空気圧を用いたピン貫入試験による吹付けコンクリートの強度管理方法の提案, 土木学会論文集, No.644/VI-46, pp.99~112, 2000.3.

(2001.8.6受付)

AN ECONOMICAL MIX DESIGN OF THE FIBER REINFORCED SHOTCRETE AIMING AT REDUCING REBOUND

Koji MITANI, Shinobu KAISE, Isamu YOSHITAKE and Koji NAKAGAWA

Generally, fiber reinforced shotcrete has much rebound of fiber, and has problem in cost performance. The object of this paper is to obtain the economical mix design of fiber-reinforced shotcrete. On the process of search for optimal mixture, it was found that fiber-reinforced shotcrete based on high performance plain shotcrete has much rebound of fiber. We surveyed the several new mixtures type of shotcrete, carried out mechanical property test, and evaluated cost performance including rebound. From the test results, it was effective that applying plasticity and viscosity.