

鋼繊維補強吹付けコンクリートの トンネル試験施工とその適用性評価

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 技術部道路技術課 (〒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 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

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

本研究は、鋼繊維補強吹付けコンクリートのトンネル現場における施工性の検証を目的とした比較実験について報告するものである。特に鋼繊維補強吹付けコンクリートの課題のひとつであるはね返り問題に対し、その低減化を図った4種類の吹付けシステムの適用性について検討した。適用性の評価にあたり、フレッシュ時におけるコンクリートの流動性や若材齢期も含めた強度特性に加え、はね返りコンクリートに対する調査・試験を行った。さらに熟練技術者である複数の評価員によって、各吹付けシステムの主要特性に関する点数付けを試みた。ここで得られた結果を踏まえて、実トンネルへの適用性について論じた。

Key Words : steel fiber reinforced shotcrete, accelerator, rebound, field test, questionnaire

1. はじめに

大断面・扁平トンネルなどにおける支保構造材料として、鋼繊維を混入した吹付けコンクリートの採用が考えられる。この鋼繊維補強吹付けコンクリートは、一般的な吹付けコンクリートに比べ、曲げ靱性能等に優れることから、鋼アーチ支保工で補強するまでに至らない程度の地山状況では、経済的な支保構造となりうると考えられる。また鋼繊維補強吹付けコンクリートを用いることにより地山(切羽)の崩落および肌落ち等の危険性を伴う鋼アーチ支保工の設置作業から解放され、吹付け機による機械施工が可能となり、作業員の安全性が向上する利点を有する。

ここで、鋼繊維を用いない一般的な配合も含め、吹付けコンクリートにおける最大の問題点のひとつに、吹付け時の材料のはね返り(リバウンド)が挙げられる。特に、鋼繊維補強吹付けコンクリートでは、全材料のはね返りに比して鋼繊維のはね返りが多く^{1)~3)}、所要される靱性能を得るためには鋼繊維の必要混入量を多くしなければならないことなど、経済性に影響を及ぼす問題が生じる。著者らの行ったはね返り率測定結果に基づけば、材料全体ではね返り率20~25%に対し、鋼繊維単身では40~55%にまで達するほどである。そのため、吹付け施工における品質確保や経済性向上のためには、鋼繊維のはね返

りの低減が必要不可欠な課題と考えられる。

吹付けコンクリートのはね返りに関して、酒井ら^{4),5)}および荒木ら^{6),7)}の行った実験的検討から伊藤ら⁸⁾によるトンネル施工事例、牧・魚本⁹⁾の2次元個別要素法を用いた解析的研究に至るまでいくつかの研究報告がなされている。また、近年では高強度吹付けコンクリートの研究開発が精力的に行われており、特にのはね返りや強度発現性状、実トンネルへの適用研究が複数報告されている^{10)~15)}。しかしながら、鋼繊維補強吹付けコンクリートを主対象としたはね返り低減に関する検討は少なく、例えば新開発の吹付けシステムを用いた研究報告例がみられる程度である¹⁶⁾。また、高強度且つ低リバウンド型の鋼繊維補強吹付けコンクリートに関しては、そのフレッシュ性状や吹付け後における諸性状の検討・評価報告例はほとんどなされていない。

そこで、本研究では4種の鋼繊維補強吹付けコンクリートおよび吹付けシステムを用いて、中央自動車道(改築)新岩殿トンネルにて試験施工を実施した。本報は、これら4種の吹付けシステムの試験施工に対して、各吹付けシステムを熟知したコンクリート専門技術者から構成される評価員に求めた吹付け状況の評価結果をまとめるとともに、はね返り特性やフレッシュ性状、強度(発現)性状について調査し、鋼繊維補強吹付けコンクリートシステム開発に関する基礎データとして資することを目的とした。

表-1 検討した吹付けシステムの概要

HP		<p>【ベースコンクリート】 高炉セメントB種 スランプフロー650mm程度の高流動タイプ</p> <p>【急結剤】 カルシウムアルミネート系粉体型急結剤</p>
RJ		<p>【ベースコンクリート】 早強ポルトランドセメント</p> <p>【急結剤】 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</p>
SA		<p>【ベースコンクリート】 早強ポルトランドセメント +シリカフェウム +内添型養生剤</p> <p>【急結剤】 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</p>
SL		<p>【ベースコンクリート】 早強ポルトランドセメント +粘調剤</p> <p>【急結剤】 スラリー型急結剤 (カルシウムサルフォアルミネート系粉体急結剤)</p>

2. 各吹付けシステムの概要

(1) 吹付けシステムの概要

本研究における試験施工では、鋼繊維を内割容積比で1.0%（靱性性能に優れ且つ経済的施工が可能な配合）混入する吹付けコンクリートを基本条件とした^{17),18)}。以下に、本研究で検討を試みた4種類の吹付けシステム(HP法, RJ法, SA法, SL法)の特徴を示すとともに、表-1にその概略をまとめて示す。なお、ここで示すベースコンクリートとは、急結剤および繊維を含まないコンクリートを意味する。

a) HP法(HP吹付けシステム)

HP法(以下HPと略す)は、ベースコンクリートがスランプフロー650mm程度の高流動タイプであり、これにカルシウムアルミネート(CA)系の高強度粉体急結剤を組み合わせたものである¹⁹⁾。本研究の対象とした4種の吹付けシステムのうち、唯一高炉セメントB種を用いる。

b) RJ法(RJ吹付けシステム)

RJ法(以下RJ)は、ベースコンクリートに早強ポルトランドセメントを用い、これにアルカリフリー液体急結剤を添加するものである²⁰⁾。なお、これに用いる急結剤は、沈降性シリカを主成分とするものであり、pH 2.4の酸性を呈するタイプである。また、

RJは、液体急結剤使用の専用添加リングを用いて、圧縮空気によって急結剤をコンクリートに添加する手法をとっている。

c) SA法(SA吹付けシステム)

SA法(以下SA)では、早強ポルトランドセメント、シリカフェウムおよび内添型養生剤を用いてベースコンクリートを作製している。使用した急結剤は、水溶性アルミニウム塩を主成分とし、pH 2.5の酸性を呈するタイプである。同システムでは、専用ノズルを用いて、ノズル手前までコンクリートを密充圧送するとともに、1系統のみのエア配管で急結剤の添加およびコンクリートの吹付けを兼用するものである。

d) SL法(SL吹付けシステム)

SL法(以下SL)は、ベースコンクリートに早強ポルトランドセメントを用いるとともに、はね返り低減を目的に粘調剤を添加して、コンクリートに粘性を付与するものである。また、同吹付けシステムでは、カルシウムサルフォアルミネート(CSA)系粉体急結剤に連続的に加水することでスラリー化し、粉体急結剤の特徴である粉じんを低減するとともに、長期強度の発現を阻害しない特徴を有する。

(2) 使用材料と配合条件

各吹付けシステムにおけるコンクリートの配合条

表-2 各吹付けシステムの配合条件

記号	水結合材比%	細骨材率%	ベースコンクリート 単位量 kg/m ³								急結剤 kg/m ³			
			水W	結合材 C		B シリカフューム	細骨材	粗骨材	鋼繊維	高性能減水剤	内添型養生剤	粘調剤	急結剤	水
				早強	高炉									
HP	35.4	60.0	230	-----	650	-----	835	561	78.5	5.20 B×0.8%	-----	-----	32.5 C×5%	-----
RJ	37.9	65.0	220	580	-----	-----	970	526		5.80 B×1.0%	-----	-----	58.0 C×10%	-----
SA	35.1	70.0	200	525	-----	45	1077	469		7.41 B×1.3%	5.00	-----	42.0 C×8%	-----
SL	40.8	68.0	204	500	-----	-----	1087	516		7.00 B×1.4%	-----	0.15	50.0 C×10%	35

表-3 使用材料の諸物性値

記号	セメント		急結剤	細骨材	粗骨材	鋼繊維	高性能減水剤
	種類	密度 g/cm ³	状態(比重)				
HP	BBC	3.04	CA系粉体	大月産砕砂 表乾比重2.64 吸水率1.54% 粗粒率2.79	大月産6号砕石 表乾比重2.66 吸水率1.00% 粗粒率6.34 最大寸法15mm	両端フック 長さ30mm 径0.6mm 比重7.85	ポリグリコール エステル誘導体 比重1.04~1.06
RJ	HPC	3.14	液体(1.4)				
SA	HPC	3.12	液体(1.44)				
SL	HPC	3.12	CSA粉体				

BBC；高炉セメントB種，HPC；早強ポルトランドセメントを表す

件の詳細を表-2に示すとともに、使用材料の諸物性値を表-3にまとめて示す。なおこれらの配合条件は、各提案配合を参考に、新岩殿トンネル工事で使用されている現地骨材(大月産砕砂および同6号砕石)による試験練りを行い、フレッシュコンクリートの要求品質を満足するよう修正を施したものである。表-3に示すように、本研究における使用材料のうち、骨材、鋼繊維および高性能減水剤は、各システムとも共通のものを使用した。

3. 試験施工方法およびその評価方法

(1) 使用機械設備

本研究において用いたコンクリートプラントは、最大0.5m³の強制練りミキサーであり、自動制御方式の混和剤添加装置(1.8m³タンク)を採用した。なお、機長7m、幅0.35mのベルトコンベアを有する鋼繊維投入装置によって鋼繊維の混入を行った。また、コンクリートの吹付けに際しては、吹付け能力25m³/hrの吹付け機および吹付けロボットを使用した。

(2) 試験項目および試験方法

本研究で行った試験項目を大別すると、①プラント管理、②フレッシュコンクリート性状、③吹付け

状況、④吹付けコンクリートの強度、および⑤吹付けコンクリートのはね返り状況となる(表-4参照)。このうち、フレッシュコンクリートに関する試験では、一般にワーカビリティの指標となるスランブ試験に加え、フレッシュコンクリートのコンシステンシーの評価を目的に、逆スランブ試験を試みた。逆スランブ試験とは、漏斗代替としてスランブコンを逆さに使用し、充填されたフレッシュコンクリートの流下時間をストップウォッチで測定するものである。本研究では、逆スランブ試験を同一試料につき2回行い、その平均流下時間を求めた。

吹付け直後からのコンクリート強度を調べる目的から、0.2~1.0MPaまでの強度測定が可能な針貫入試験²¹⁾によって材齢1時間までの強度変化を調べた。なお同試験は、曲げ靱性能試験用に切出し採取したコンクリートブロックの表面に対して、簡易なニードルペネトレータを用いて径3mmピンを15mm深まで貫入させ、それに要する力から圧縮強度を推定するものである。また、材齢1~8時間までは、圧縮強度試験用コア切出し供試体に対して、空気圧ピン貫入試験²²⁾による強度推定を試みた。さらに、コンクリートの(長期)強度管理にあたり、ベースコンクリートならびに吹付けコンクリートの圧縮強度を、材齢7日および28日にて試験した。

吹付け時におけるコンクリートのはね返り試験で

表-4 試験項目および試験方法

	試験種別	時期(材齢)	方法
	骨材の表面水率 [※]	練混ぜ前	赤外線水分計
①	計量動荷重 [※]	1車毎	印字記録目視
	ミキサー負荷電流 [※]		電流計目視
②	スランプ	1車毎 出荷時 現着時	JIS A 1101
	逆スランプ		流下時間計測
	空気量		JIS A 1128
	打設温度 [※]		温度計目視
③	エア圧, ポンプ圧 [※]	吹付け中	圧力計目視
	坑内温度 [※]		温度計目視
	吹付け状況		評価員3名以上の目視評価
④	ブルアウト試験	3, 8時間	JHS702-1992
	コンクリート温度 [※]	~1時間	自動計測機
	針貫入試験	5,15,30,60分	—
	空気圧ピン貫入試験	1,3,8時間	—
	圧縮強度	ベース 吹付け	7,28日
曲げ靱性能試験	28日		
⑤	材料全はね返り	吹付け 直後	—
	繊維はね返り		—
	はね返りの粒度分布		JIS A 1102

※主に品質管理用試験のため、本報に結果を記載しない

は、ワイヤーモッコおよびブルーシートにはね返りコンクリートを捕集し、ロードセルを用いてはね返り重量を測定する手法で評価を試みた。さらに、全はね返り材料の1/4をランダムに回収して重量を測定した後、磁石を用いて回収された鋼繊維の重量測定を行うことで、はね返り材料における鋼繊維の割合を求めた。また、JIS A 1102に基づいてはね返りコンクリートの粒度分布の測定も併せて行った。

(3) 吹付け状況の評価方法およびその基準

本研究における吹付け状況の評価にあたり、評価員として先述のコンクリート専門技術者4名および施工業者(JV)1名の計5名を選任し、混合状態・脈動状態・ノズルダレ・急結状態・粉じん・付着状態について、予め設けた判断基準(表-5参照)をもとに評価を試みた。なお、これらの評価は各吹付けシステムのコンクリートミキサー車1台ごとを対象とし、5~

表-5 吹付け状況の評価判断基準

項目	良←目視評価→否 <点数>					判断基準
	5	4	3	2	1	
混合状態	良	←	—	→	否	ノズルから吐出後のコンクリートと急結剤の混合状態を表す。例えば白スジ等がみられる場合は、良い混合状態ではない。
脈動状態	無	←	—	→	激	管内の付着物生成やコンクリートの流動性低下に起因し、マテリアルホースの脈動・あばれを表す。閉塞前兆と捉える。
ノズルダレ	無	←	—	→	多	ノズルの先端から配管内のノロが落ちる状態であり、コンクリート性状やエア不足、ノズルチップの絞り起因する。
急結状態	急	←	—	→	遅	触指で判断される壁面付着後の急結状態を表す。天端部では、吹付けエアによる下地コンクリートの撓られ等で判断する。
粉じん	少	←	—	→	多	粉じんの多少を判断する。
付着状態	良	←	—	→	否	はね返り・剥離・剥落の多少や吹付け表面の平滑さを含む総合的な付着状態を判断する。

1点までの5段階評価による点数付けを行った。ここで行われる評価において、最低点1点は「施工難」と判断されるものであり、最高点5点となるものは、ブレーション吹付けコンクリートも含めて(繊維補強の有無に拘わらず)、現状で最も優れた吹付けコンクリートシステムと同等もしくはそれ以上の性能を有すると評価員が評価するものである。

4. 試験施工結果と考察

(1) フレッシュコンクリートの試験結果

本研究で行ったフレッシュ時におけるコンクリートの諸物性試験結果、すなわちスランプフロー、スランプおよび逆スランプ試験結果を、それぞれ図-1~図-3に示す。ここで、図中の棒グラフの各値は、コンクリートミキサー車1台ごとに対応するものである。なお、いずれの試験においても、コンクリートの練り上がり時および吹付け時に測定を試みた。

図-1の結果より、高流動タイプであるHPのスランプフロー値が比較的大きいものの、その他の吹付けシステムはほぼ同程度のスランプフロー値であることが分かる。また図-2に示すスランプ試験結果に

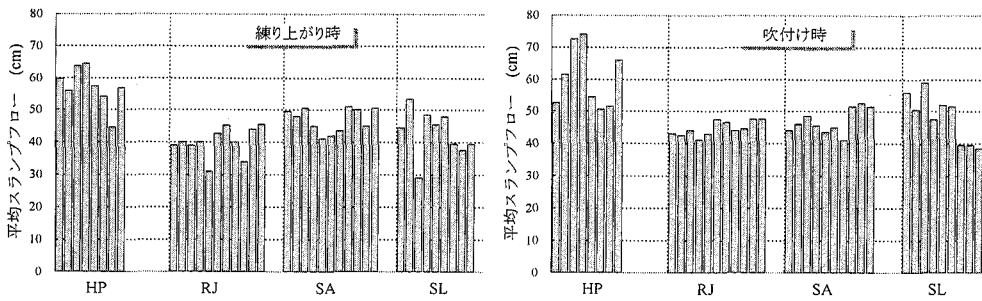


図-1 平均スランプフロー試験結果

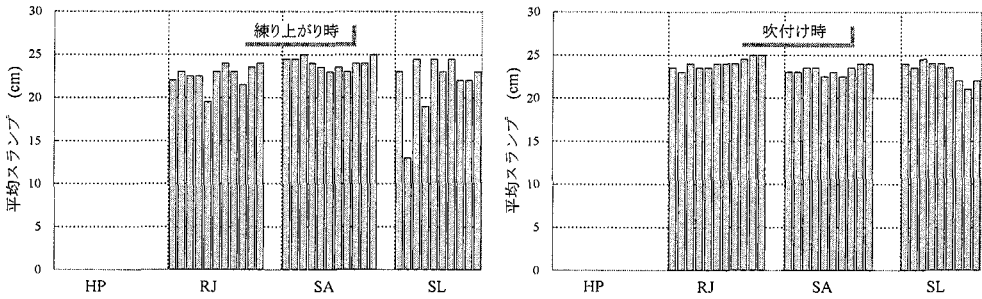


図-2 スランプ試験結果

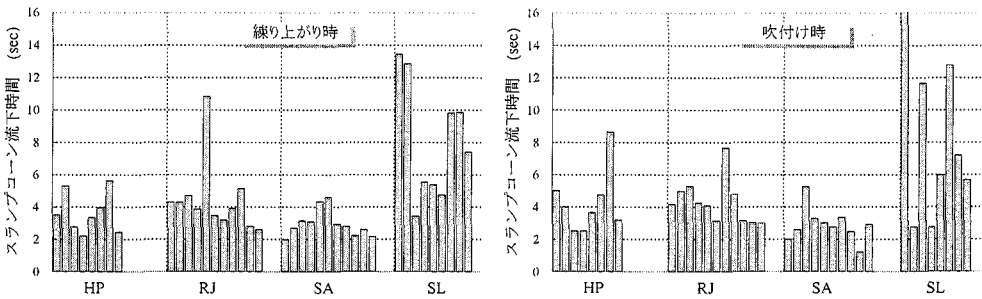


図-3 逆スランプ試験によるスランプコーン流下時間

表-6 はね返り試験結果

吹付けシステム	吹付け		はね返り重量 kg		サンプル重量 kg	繊維重量 kg	はね返り率 %	繊維はね返り率 %	繊維残存率 %
	容量 m ³	重量 kg	測定値	はね返り					
HP	2.00	4773	1195	1071	225	12.29	22.4	37.2	80.9
RJ	2.00	4749	1350	1226	222	9.53	25.8	33.5	89.7
SA	1.90	4550	820	696	177	12.85	15.3	33.8	78.1
SL	1.70	4055	580	456	101	5.94	11.2	20.0	90.1

※繊維残存率 = 「壁面付着した吹付けコンクリートの繊維混入率」 / 「吹付けた吹付けコンクリートの繊維混入率」

においても、高流動タイプのHPを除く各吹付けコンクリートでは、スランプフロー試験とほぼ同様の傾向が認められ、一部に例外はあるものの概ねスランプ20~25cmの流動性を有する結果を得た。

また、図-3に示される逆スランプ試験結果では、HP、RJ、SAの3吹付けシステムにおいて、スランプコーン流下時間が概ね5秒以下であったが、SLにおける一部の試験では、突出して大きくなる傾

向があった。すなわち、スランプ(フロー)値が他と同程度であるにも関わらず、スランプコーン流下時間が大きいことより、SLが他に比して比較的大きな粘性を有することが伺える。なお、SLではスランプコーン流下時間にばらつきがみられるが、これは同コンクリートの粘性の高さにより、スランプコーンに付着するコンクリートの影響を受けるものであろう。このことから、逆スランプ試験法は、高粘

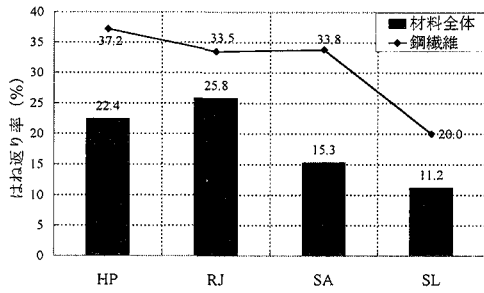


図-4 材料全体および繊維のはね返り率試験結果

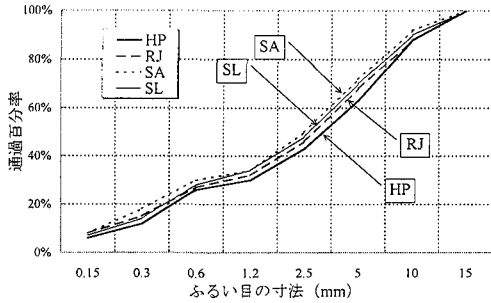


図-5 はね返りコンクリートの粒度分布

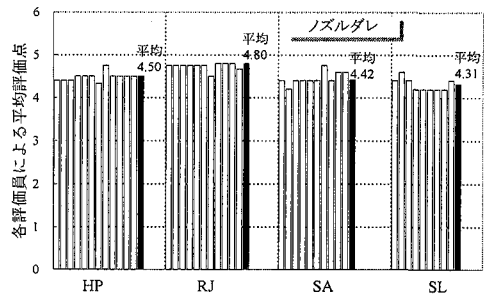


図-8 ノズルダレに対する評価

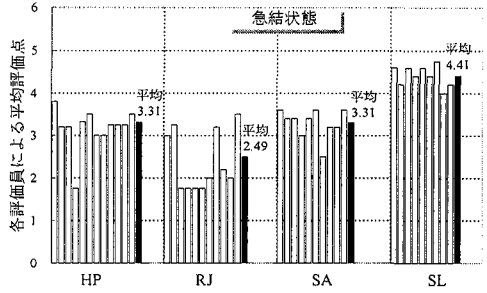


図-9 急結状態に対する評価

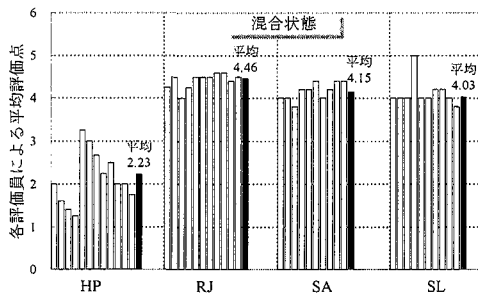


図-6 混合状態に対する評価

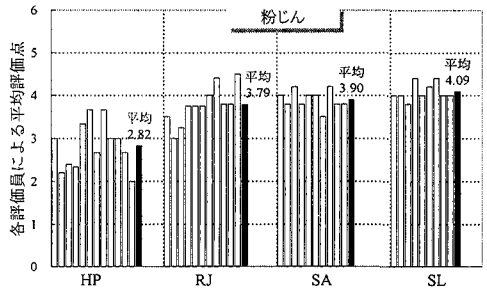


図-10 粉じんに対する評価

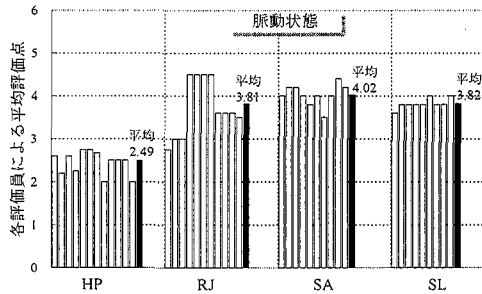


図-7 脈動状態に対する評価

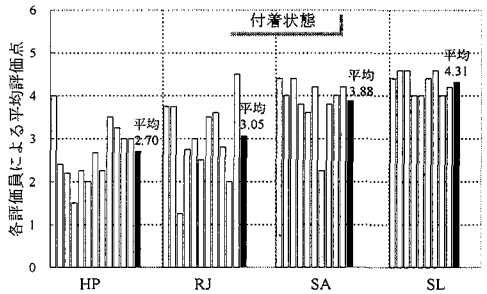


図-11 付着状態に対する評価

性コンクリートに対しては適切に評価できないものと考えられる。

(2) 吹付け試験結果とその評価

表-6および図-4に各吹付けシステムのはね返り試

験結果を示す。一般的な鋼繊維補強吹付けコンクリートのはね返りは、約40～55%にまで達することが報告されているが、本研究で採用したいずれの吹付けシステムにおいても、それらの一般値を下回るとともに、表-6中に定義される繊維残存率はおよそ80

～90%と比較的良好なものであった。吹付けコンクリート材料全体のはね返り率そのものも最大で26%程度であり、SLに到っては約11%と極めて小さな値であった。また、はね返りコンクリートの粒度分布を示す図-5の結果に着目すれば、比較的偏りなく分布していること、および粒度分布に関しては各吹付けシステム間に大きな差異がないことが分かる。

図-6～図-11にそれぞれ、吹付けコンクリートの混合状態・脈動状態・ノズルダレ・急結状態・粉じん・付着状態の評価結果を示す。同結果は各吹付けシステムのミキサー車1台ごとのコンクリートに対して、先述の評価員が採点した評価結果の平均点を示すものである。なお、評価員は原則5名であるが、都合により欠員がある場合もあり、本報では3名以上の評価員により評価された結果について示している。すなわち、棒グラフの棒1つ1つは採点した評価員の平均値を示すものであり、評価の偏りの影響は小さくできるものと考えられる。また、これらの結果には、濃色棒グラフで示される各々の吹付けシステムの平均値も併記しており、以下ではその平均値をもとに各吹付けシステムの特長について論じることとする。なお、一部の結果にはミキサー車ごとに評価点のばらつきが認められるが、実規模の現場実験であること、評価点そのものに個人差が含まれることなどを考慮すれば、各吹付けシステムの平均値を代表値として評価を行っても差し支えないものと思われる。さらに、各吹付けシステムの評価数が同一でないのは、1サイクルの吹付け材料を運搬するミキサー車が3台あるいは4台であったことによる。

混合状態に対する評価結果に着目すると、HPを除く3吹付けシステム(RJ, SA, SL)の評価は平均4～4.5点でありほぼ同程度であることが分かる。これらの3吹付けシステムが液体あるいはスラリー化急結剤を使用しているのに比べ、高流動のコンクリートに粉体急結剤を組み合わせたことにより、HPの混合状態の評価が低くなったものと思われる。さらに、このような傾向は脈動状態に対する評価も同様であり、HPを除き平均4点前後であった。また、ノズルダレに対する評価は、いずれの吹付けシステムも平均4.3点以上と高得点であり、その状態が良好であることが伺える。また、粉じんに対する評価結果では、HPの評価点が低い傾向にあるが、これは一般に液体急結剤より粉じん発生が多くなるといわれる粉体急結剤を用いたことによるものと考えられる。また、SLにおいても同様に粉体急結剤を使用しているが、水混合によるスラリー化のため、粉じんに対する評価は液体急結剤を使用したRJやSAに比しても有意な差異は認められず、平均で3.8～4.1

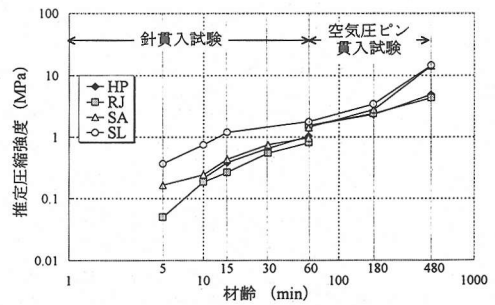


図-12 針貫入および空気圧ピン貫入試験結果

表-7 針貫入および空気圧ピン貫入試験結果

		推定圧縮強度MPa			
		HP	RJ	SA	SL
針貫入試験	材齢min				
	5	---	0.050	0.165	0.365
	10	0.213	0.185	0.244	0.745
	15	0.382	0.266	0.432	1.189
	30	0.652	0.541	0.748	---
空気圧ピン貫入試験	60	1.030	0.803	0.965	---
	180	2.310	2.420	2.800	3.460
	480	4.890	4.350	14.200	14.500

※1 試験不可能, ※2 1.0MPa以上(適用範囲外)

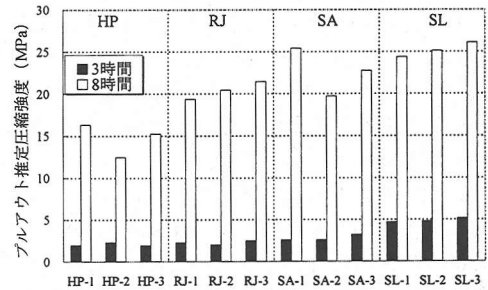


図-13 ブルーアウト試験結果

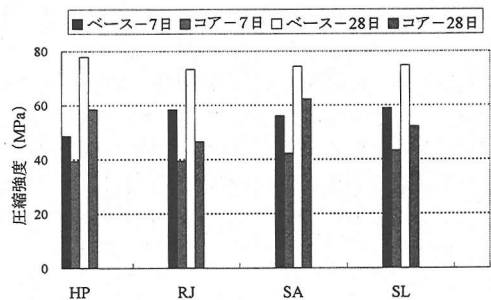


図-14 材齢7日および28日圧縮強度

点という結果が得られた。

さらに急結状態および付着状態に対するいずれの評価結果もSL>SA>RJの順に高得点であり、これは後述する極若材齢期の強度発現の傾向も同様

表-8 材齢7日および28日における圧縮強度・ヤング率試験結果

吹付けシステム	試験	材齢7日 圧縮強度(MPa)				材齢28日 圧縮強度(MPa)				同ヤング率(GPa)	
		ベースコンクリート		吹付けコア		ベースコンクリート		吹付けコア		吹付けコア	
		強度	ヤング率	強度	ヤング率	強度	ヤング率	強度	ヤング率	強度	ヤング率
HP	HP-1	48.00		42.60		77.70		59.00		29.30	
	HP-2	49.10	48.63	37.70	39.33	79.60	77.90	59.50	58.47	30.20	29.17
	HP-3	48.80		37.70		76.40		56.90		28.00	
RJ-1	55.00	40.90		74.20		47.70		34.90			
RJ	RJ-2	59.80	58.40	39.40	39.43	73.10	73.30	45.20	46.50	34.80	35.40
	RJ-3	60.40		38.00		72.60		46.60		36.50	
	SA-1	56.30		42.70		73.80		47.60		28.50	
SA	SA-2	56.40	56.03	41.60	42.17	73.20	74.33	66.50	62.23	29.50	29.13
	SA-3	55.40		42.20		76.00		72.60		29.40	
	SL-1	56.00		39.90		74.00		50.40		21.60	
SL	SL-2	60.40	58.93	45.60	43.20	75.10	74.73	52.50	52.20	32.30	28.90
	SL-3	60.40		44.10		75.10		53.70		32.80	

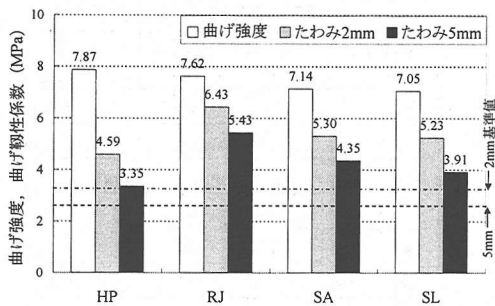


図-15 曲げ靱性能試験結果

の順であった。しかしながらHPは、急結状態に対する評価は比較的高いものであったにも拘わらず、先述のように混合状態に対する評価は4吹付けシステム中最も低かったように、局所的な水和状態となる傾向にあり、結果的に付着に対する評価は比較的低いものであった。

本研究で対象としたいずれの吹付けシステムもそれぞれの特徴があり、ここで示す採点方法だけでは十分にその特徴を評価できない可能性も否めない。また、厚吹きの場合など用途に応じて吹付けシステムの最適性も異なることから、各評価方法それぞれに対し、重みを同じくして平均値を求め、総合評価とするような手法では大きな疑問が残る。このような見解から、本報では特に総合的評価を行わず、単に各評価方法に応じた点数付けにとどまっている。本報で示した各吹付けシステムに対する評価結果は、トンネル施工の様々な制約状況下において、最適な吹付けシステムの選択に関する一資料となりえるものと思われる。

(3) 強度試験結果

吹付け後のコンクリートの強度発現性を調べるため、材齢5～60分では針貫入試験、材齢60～480分では空気圧ピン貫入試験²²⁾を行った。さらに、材齢3時間および8時間において日本道路公団の吹付けコンクリートの強度管理規格²³⁾であるブルアウト試験を

行った。これらの試験において得られた結果を基に推定される吹付けコンクリートの圧縮強度を図-12、表-7および図-13に示す。なお、図-12および表-7における材齢5分時のHPの推定圧縮強度は、針貫入試験の強度測定対象範囲を下回るものであり、試験が行えていない。

針貫入試験(図-12および表-7参照)より、極若材齢期(材齢5～15分)からSLが0.4～1.2MPa程度と最も高い強度発現性を示し、材齢15分以降では、針貫入試験の適用範囲外に至る強度にまで達する結果を得た。さらに、材齢60分および180分にて行った空気圧ピン貫入試験では、各吹付けシステムによるコンクリート強度はほぼ同程度であったが、材齢480分になるとSAおよびSLが約14MPaと極めて高い強度を有し、他2種の約3倍に達する結果となった。

ここで、本研究で採用した吹付けシステムのベースコンクリートおよび吹付け後のコア採取コンクリートについて、材齢7日、28日にて行った強度試験結果を図-14および表-8に示す。材齢28日におけるベースコンクリートの圧縮強度は、各吹付けシステム間に大きな差異はみられなかったものの、吹付けコア採取コンクリートでは、HPおよびSA吹付けシステムの圧縮強度が約60MPa程度と他の2種に比して高強度となった。

また本研究では、鋼繊維補強吹付けコンクリートに期待される性能のひとつである曲げ靱性能に関する試験も同時に試みた。図-15にスパン長300mm供試体を用いて求めた曲げ靱性能試験結果を示す。なお、同図において求めたたわみ2mmおよび5mmの曲げ靱性係数は、曲げ応力-たわみ曲線から形成される積分値(面積)を、それぞれ2mmおよび5mmたわみで平均化した値である。

図-15に示される結果より、いずれの吹付けシステムにおいても、7MPa以上の曲げ強度を確保できることが分かる。また、曲げ靱性係数に着目すると、たわみ2mmおよび5mmのいずれにおいても、RJが5～

6MPa以上と最も大きく、続いてSAおよびSLではほぼ同程度の曲げ靱性係数であることが分かる。なお、いずれの吹付けシステムも、日本道路公団の定める靱性能(たわみ2mm ; 3.3MPa, 同5mm ; 2.4MPa)を十分に満足できるものであったことを追記しておく(図-15参照)。

5. おわりに

本研究は、経済的な支保構造として採用が期待される鋼繊維補強吹付けコンクリートのトンネル施工に対する適用性評価を試みたものである。特にはね返り低減のための工夫を施した4種類の吹付けシステムに対し、フレッシュコンクリートの流動性状、若材齢期を主眼とした強度発現性状、およびはね返りコンクリートの諸性状に着目した実験的検討を試みた。本研究の範囲内において得られた結論を以下に要約する。

(1) 吹付けコンクリート(システム)の特性

- ① 高流動タイプのHPを除き、他の吹付けコンクリートのスランプは20~25cm程度であり、およそ同程度の流動性を確保した。しかしながら、逆スランプ試験に至っては、粘性に富むSLのスランプコーン落下時間が突出して大きくなる傾向が認められた。
- ② 各吹付けシステムのはね返り率は、それぞれ22.4%(HP)、25.8%(RJ)、15.3%(SA)、11.2%(SL)であり、一般的な鋼繊維補強吹付けコンクリートに比して材料のはね返りを抑えることができた。さらにそれら吹付けコンクリートの繊維残存率は78%以上と良好な結果を得た。
- ③ 針貫入試験に基づく、材齢5~15分の極若材齢時においては、SLの推定圧縮強度が0.4~1.2MPa程度と最も高い結果を得た。さらに材齢60分以降において実施した空気圧ピン貫入試験では、SAおよびSLの推定圧縮強度が、14MPa程度と他2種の約3倍の強度であった。
- ④ 材齢28日におけるベースコンクリートの圧縮強度は、4種の吹付けコンクリート間に大きな差異はなかったが、吹付けコア採取コンクリートでは、HPおよびSAの圧縮強度が約60MPaと比較的高強度であった。さらに鋼繊維補強コンクリートの特徴である靱性能の向上に着目すると、RJが5~6MPa以上と最も高い曲げ靱性係数であった。

(2) 評価員による適用性評価

- ① 吹付けシステムの提案各社(者)から構成される評価員によって、それぞれの吹付けシステムに対し、混合状態・脈動状態・ノズルダレ・急結状態・粉じん・付着状態について点数付けを行い、その特性の客観的評価を実施した。
- ② HPを除く3吹付けシステムの混合状態および脈動状態に対する評価は、比較的高くほぼ同程度であるとともに、ノズルダレに対する評価は、いずれのシステムも高いものであった。
- ③ 粉体急結剤を用いるHPの粉じんに対する評価点は他に比して低く、液体急結剤やスラリー化した粉体急結剤を使用するRJ、SAおよびSLの評価には、大きな差はなかった。
- ④ 急結状態および付着状態に対する評価では、RJ<SA<SLの順に高得点であった。また、HPの急結状態は比較的高い評価であったが、混合状態が良好でないことに起因して、付着状態に対する評価は、最も低いものとなった。

(3) 今後の課題

本研究において試験を行った4種類の吹付けシステムは、実トンネル施工の条件下において、材料全体および繊維のはね返りを少なくできることが確認された。しかしながら、現在一般的に使用されている吹付けコンクリートに比べ、a)機械設備が複雑、b)骨材等の表面水管理が困難、c)厚吹きができない、といった諸問題が浮上した。今後は、これらの諸問題について検討するとともに、鋼繊維補強吹付けコンクリートを支保部材として適用できる地山条件を明らかにすること、さらに同コンクリートの設計手法の確立が課題として挙げられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、日本道路公団試験研究所トンネル研究室、上野原工事事務所および新岩殿トンネル工事JVの関係者各位に多大な協力を受けました。また、各吹付けシステムの評価にあたり、評価委員の方々に御尽力頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 今田 徹, 岡林信行, 野間正治: 最新山岳トンネルの施工, 鹿島出版, pp.122~139, 1996.9.
- 2) 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, 1999.8.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 酒井芳文, 駒田憲司, 川口和義, 牛島 榮: 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.
 - 6) 荒木昭俊, 平間昭信, 伊東良浩, 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.
 - 7) 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.
 - 8) 伊藤祐二, 北川修三, 末永充弘, 弘中義昭: 混和剤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.
 - 9) 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.
 - 10) 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.
 - 11) Pigeon, M., Lacombe, P., Beaupre, D. and Cloutier, E.: Properties of Dry-Mix Shotcrete Containing Supplementary Cementitious Materials, *CONCRETE INTERNATIONAL*, pp.51~57, 2000.10.
 - 12) 岡林信行, 田沢雄二郎, 松川久俊, 今田 徹: 高土被りトンネルへの高強度吹付けコンクリートの適用に関する一考察, 土木学会論文集, No.546/VI-32, pp.145~156, 1996.9.
 - 13) 田沢雄二郎, 本橋賢一, 横関康裕, 岡田浩司: シリカフェームを混和した高強度吹付けコンクリートの物性と適用例, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.173~184, 1996.11.
 - 14) 福留和人, 長沢教夫, 杉山 律, 喜多達夫, 笹川幸男: 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.
 - 15) 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.
 - 16) 室 充, 市川健作, 樋田瑞明, 平間昭信: 新しい急結剤を用いた吹付けコンクリートの試験施工, トンネルと地下, Vol.32, No.1, pp.25~31, 2001.1.
 - 17) 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.
 - 18) 三谷浩二, 海瀬 忍, 吉武 勇, 中川浩二: 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, 土木学会論文集, VI 部門査読後修正中.
 - 19) 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.
 - 20) 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.
 - 21) Austrian Concrete Society: Guideline on Shotcrete, 1990.
 - 22) 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.
 - 23) 日本道路公団: 日本道路公団試験法, 吹付けコンクリートの初期強度試験 (JHS 702-1992), 1997.

(2001. 8. 29 受付)

APPLICABILITIES OF STEEL FIBER REINFORCED SHOTCRETE BY FIELD TESTS IN A TUNNEL

Koji MITANI, Shinobu KAISE, Isamu YOSHITAKE and Koji NAKAGAWA

This paper presents the field test results using steel fiber reinforced shotcrete (SFERS). Generally, the rebound of SFERS includes lots of steel fiber; such shotcrete system tends to be uneconomical. This research required the high performance shotcrete systems to the experts, based on such a current state. The proposed 4-shotcrete systems have the property of lower rebound and high ductility. This paper summarized the questionnaire by proponents for its applicability to mountain tunnel, examined the fundamental characteristics, such as flow, strength include stage of young-age, toughness and rebound.