

## 論文 繊維補強吹付けコンクリートの配合設計手法に関する一提案

清水 哲史<sup>\*1</sup>・伊藤 正憲<sup>\*2</sup>・田中 斉<sup>\*3</sup>・魚本 健人<sup>\*4</sup>

**要旨：**鋼繊維補強吹付けコンクリートに要求されるポンプ圧送性、施工性、強度および耐久性を兼ね備えたコンクリートを経済的、安定的に得られる配合選定手法の確立が望まれている。本研究は、鋼繊維を使用した吹付けコンクリートの合理的な配合選定方法を確立する目的で、室内においてスランプ試験の他にスランプフロー試験、スプレッド試験および目視観察による状態評価を併せて行い、最適な配合を見出すとともに、高性能減水剤の適正な使用量の検討を行い、この配合を用いた吹付け実験を行った結果、選定された配合の有効性が確認された。

**キーワード：**吹付けコンクリート、繊維補強、配合設計、スプレッド試験、状態評価

## 1. はじめに

近年、山岳トンネル工事の主流となったNATM工法において、吹付けコンクリートは重要な支保部材に位置づけられている。更に、トンネル断面の大型化<sup>1)</sup>やシングルシェル構造化に対応するためのコンクリートの高強度化や、支保部材としての有効性を高めるための高じん性化等、吹付けコンクリートの高性能化が望まれている。

このような観点から、本研究は今後ますます使用されると思われる高強度繊維補強吹付けコンクリートの配合選定方法を確立するために実施したものである。

高強度繊維補強吹付けコンクリートに求められる主な性能として、フレッシュコンクリートにおいては所要のコンシステンシーはもとより、各種材料の均一性や良好なポンプ圧送性が挙げられる。また、吹付け施工時にはノズルだれを含めたりバウンドや粉塵の低減、良好な付着性、急結性が要求され、吹付け後においては初期ならびに長期の強度特性や耐久性が要求される。

本研究はこれら高強度繊維補強吹付けコンクリートに要求される諸性能を経済的、且つ安定的に得られるコンクリートの配合選定方法を確立

する目的で、室内試験時にスランプフロー試験、スプレッド試験および目視観察による状態評価を取り入れた選定試験を行い、室内試験で得られたコンクリートのポンプ圧送性、施工性(リバウンド)および硬化コンクリートの品質を模擬トンネルを用いた吹付け実験で検証したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

試験に使用した材料を表-1に示す。吹付け実験に使用した細骨材はサンドスタビライザーを用いて調整し、使用時の表面水率は2%前後であった。また、粗骨材の表面水率の調整は、プラントの一次ストックヤードで散水により行い、ほぼ表乾状態で使用した。なお、吹付け実験に使用した急結剤はセメント鉱物系急結材であった。

### 2.2 コンクリートの配合

試験に供したコンクリートの配合は、強度レベルを一般強度と高強度、目標スランプを一般強度は12cm、高強度は21cmとし、鋼繊維の使用量は、吹付け時に生ずるリバウンドを考慮して、最大1.5%までの3水準とした。コンクリートの配合条件を表-2に示す。

\*1 (株) エヌエムビー中央研究所 (正会員)

\*2 東急建設 (株) 技術研究所 土木研究室 工修 (正会員)

\*3 飛島建設 (株) 技術本部 技術研究所 材料研究室 (正会員)

\*4 東京大学 国際・産学共同研究センター教授 工博 (正会員)

表—1 使用材料

材料	名称	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	諸元、主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	3.15	比表面積3320cm <sup>2</sup> /g
細骨材	千葉県君津市産山砂	2.62	吸水率1.64%、FM 2.62
粗骨材	東京都八王子産6号碎石	2.69	吸水率0.97%、FM 5.88
混和剤	高性能減水剤	1.05	主成分 ポリグリーコールエステル誘導体
鋼繊維	両端フック付結束型	7.85	鋼線切断法による鋼繊維 φ0.6/30mm

表—2 コンクリートの配合条件

水セメント比 (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	鋼繊維の使用量 (%)
55.6 (一般強度)	12±2.5	2±1.5	0
			0.5
			1
			1.5
44.4 (高強度)	21±1.5		0
			0.5
			1
			1.5

表—3 試験項目および方法 (フレッシュコンクリート)

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101に準拠した
スランプフロー	JSCE-F- 503 に準拠した
スプレッド	DIN 1048に準拠した
空気量試験	JIS A 1128に準拠した

## 2.3 試験概要

### (1) 室内試験

鋼繊維補強コンクリートの配合を選定する方法として、鋼繊維を用いないコンクリートの配合を基準に、鋼繊維の使用量に応じて単位水量および細骨材率の補正を行う方法<sup>2)</sup>が提案されている。本試験においては、この方法を吹付けコンクリートに適用するために、鋼繊維の使用量と単位水量ならびに最適細骨材率の関係を求め、吹付けコンクリート用の補正值を算定した。また、高強度配合においては、近年高強度吹付けコンクリートに一般的に使用されるようになった高性能減水剤の実用範囲を判定する方法（単位水量の設定と高性能減水剤の適正使用量の関係）について検討

した。試験項目および試験方法を表—3に示す。なお、配合を選定する上で特に重要なファクターと考えられるコンクリートの状態の判定を試験に取り込んだ。表—4にコンクリートの状態評価を5段階とした私案を示した。状態評価はスプレッド試験時の変形性状を目視で判定した。

### (2) 吹付け実験

室内試験によって求められたコンクリートの配合が、ポンプ圧送性、施工性および硬化物性の面で最良値を示すかどうかを、模擬トンネルを用いた吹付け実験におけるコンクリート圧送時の管内圧力の変動係数、吹付け時のコンクリートならびに鋼繊維のリバウンド率および硬化コンクリートの圧縮強度および曲げじん性から検証した。試験項目および試験方法を表—5に示す。

表—4 コンクリートの状態評価

評価点	評価	コンクリートの状態
5	良好	繊維とコンクリートの分離が無く繊維が均等に分散している、適度な粘性を持ちスランプ試験ならびにスプレッド試験による変形性状が良好である
4	ほぼ良好	繊維とコンクリートの分離が無く、均等に分散しているが、コンクリートの粘性が適当でなく、タンピング時の変形性状にやや改善を要する
3	可	スランプ試験時の変形性状はほぼ良好であるが、タンピング時の変形性状に改善を要し、タンピング後は軽微な分離が認められる
2	要改善	スランプ試験時の変形性状が良好でなく、タンピングにより繊維とコンクリートが分離する傾向が認められる
1	不可	スランプ試験時に繊維が鳥の巣状に絡み合う状態で、タンピングにより繊維とコンクリートが分離する

表一5 試験項目および方法（吹付け実験）

試験項目			試験方法
吹付け実験	圧送圧力		吐出量8m <sup>3</sup> /hr.圧送圧力0.3Mpa.配管径φ65mm,Y字間までの配管長10mのほぼ中央部の圧力を測定した
	リバウンド率		箱供試体(寸法600x600x250mm)採取時に、回収したリバウンド材の重量を、吹付けに要したコンクリートの重量で除して算出した。なお、リバウンド材中の鋼繊維の重量は磁石で分級した後、洗浄して測定した
硬化試験	圧縮強度	へース	JSCE-F 552に準拠して供試体を作製し、JSCE-G 551に準拠して試験した
		吹付け	JSCE-F 561に準拠して供試体を作製し、JIS A 1107に準拠して試験した
	曲げ靱性	へース	JSCE-F 552に準拠して供試体を作製し、JSCE-G 552に準拠して試験した
		吹付け	JSCE-F 561に準拠して供試体を作製し、JSCE-G552に準拠して試験した

### 3. 試験結果

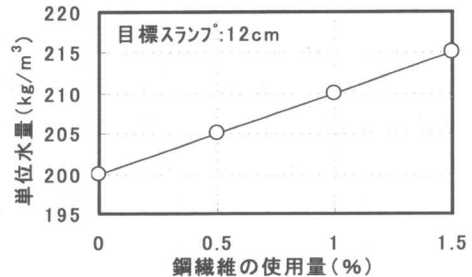
#### 3.1 室内試験結果

##### (1) 一般強度配合の単位水量と細骨材率の選定

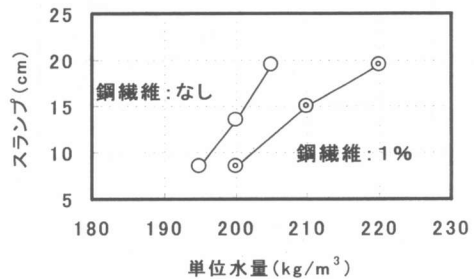
図一1に一般強度の吹付けコンクリートを対象とした鋼繊維の使用量と単位水量の関係を示した。この結果から、目標スランプを満足する単位水量は、鋼繊維の使用量が多くなるほど増え、その程度は鋼繊維の0.5%増加に対して5kg/m<sup>3</sup>であった。この時の細骨材率は今回使用した材料の使用実績よると、鋼繊維を使用しないコンクリートの最適値は60%であり、これを基に鋼繊維を使用した場合の補正量を鋼繊維の使用量毎に検討した。その結果、鋼繊維の使用量0.5%に対して細骨材率を2.5%増加すると良好なワーカビリティが得られた。

小林ら<sup>2)</sup>の論文中の配合を定める場合の参考表によると、鋼繊維の使用量を0.5%増すと単位水量を10kg/m<sup>3</sup>および細骨材率を10%補正する指標が示されているが、本試験結果ではこれに比べ単位水量ならびに細骨材率共に小さい補正量で目標のコンシステンシーおよび良好なワーカビリティが得られた。これは配合の基準とした鋼繊維を使用しない吹付けコンクリートの単位水量ならびに細骨材率が、一般の打込みコンクリートに比べ元々大きく設定されており、鋼繊維を使用した時の悪影響が緩和されるため、補正量が少なくなったものと考えられた。

鋼繊維の使用量を1%と一定にして、単位水量を変化させた場合の単位水量とスランプの関係を図一2に示した。この図からスランプを1cm増減するために要する単位水量の変化量は3kg/m<sup>3</sup>となることが分かり、前述した参考表と良く一致



図一1 鋼繊維の使用量とスランプの関係（一般強度）

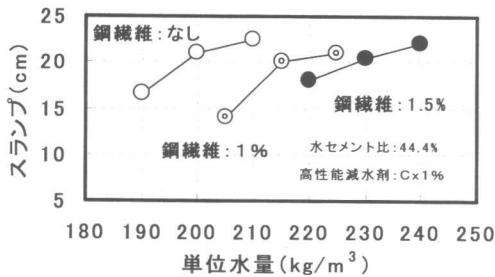


図一2 単位水量とスランプの関係（一般強度）した結果が得られた。

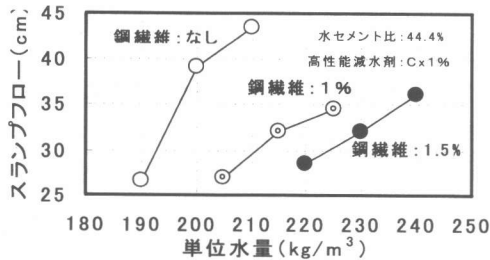
##### (2) 高強度配合の単位水量と細骨材率の選定

高強度コンクリートを対象に、高性能減水剤をC x 1.0%使用した条件における単位水量とスランプ、スランプフローおよびスプレッド値の関係を図一3～5に示した。図一3に示したとおり、単位水量とスランプの関係は、前述した一般強度のコンクリートと同様に、鋼繊維の使用量が多くなるに従って所要の水量も増える傾向にあった。単位水量の増加量は、鋼繊維を1%使用した場合には+15kg/m<sup>3</sup>、鋼繊維を1.5%使用した場合には+30kg/m<sup>3</sup>と一般強度のコンクリートに比べ大幅に増加した。これは目標としたスランプの大小に影響されたものと考えられる。なお、単位水量とスランプならびにスランプフローの関係はほぼ同様な関係を示した。

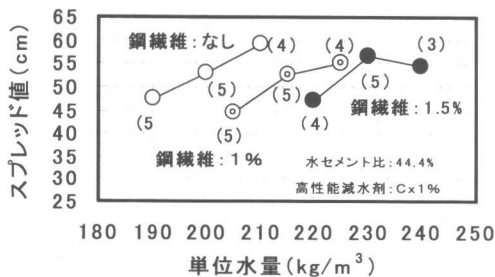
一方、単位水量を変化させたコンクリートのスプレッド値は、鋼繊維を使用しないコンクリートでは単位水量とほぼ直線的な関係が得られたが、鋼繊維を 1.0% 使用したコンクリートにおいて単位水量を 215kg/m<sup>3</sup> から 225kg/m<sup>3</sup> へ 10kg/m<sup>3</sup> 増加してもスプレッド値の増加は少なく、鋼繊維を 1.5% 使用した場合は単位水量を 230kg/m<sup>3</sup> から 240kg/m<sup>3</sup> へ 10kg/m<sup>3</sup> 増すとスプレッド値は低下した。スプレッド値が小さくなった原因として、図一五中の ( ) 内にはコンクリートの状態評価のランクを示したが、鋼繊維を 1.5% 使用した単位水量 240kg/m<sup>3</sup> のコンクリートの状態はペースト量が過多で、状態のランクは(3)に低下しており、スプレッド試験時のタンピングにより材料分離が発生し、スプレッド値が小さくなったと思われる。



図一三 単位水量とスランプの関係



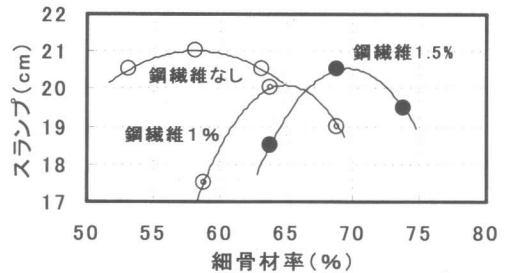
図一四 単位水量とスランプフローの関係



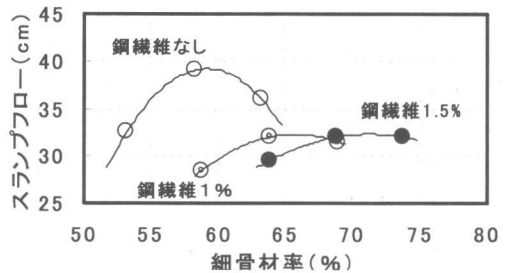
図一五 単位水量とスプレッド値の関係

図一六～八には鋼繊維を使用しないコンクリート（単位水量 200kg/m<sup>3</sup>），鋼繊維を 1.0% 使用したコンクリート（単位水量 215kg/m<sup>3</sup>）ならびに鋼繊維を 1.5% 使用したコンクリート（単位水量 230kg/m<sup>3</sup>）の細骨材率とスランプ，スランプフローおよびスプレッド値の関係を示した。

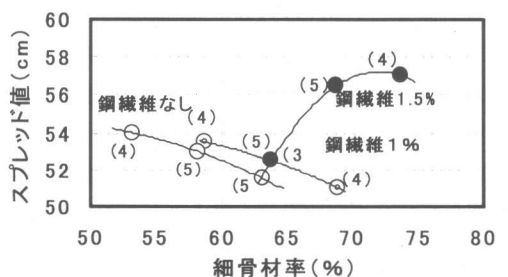
これらの試験結果から、鋼繊維を使用したコンクリートの細骨材率は、鋼繊維を 1.0% 使用した場合鋼繊維を使用しないコンクリートに対して +5%，同様に 1.5% 使用した場合は +10% で最適値を示した。なお、この補正量は一般強度の吹付けコンクリートより大きくなったが、これは主にスランプの目標値の大小に起因すると考えられた。また、スプレッド試験においては最適細骨材率の判定は困難であった。



図一六 細骨材率とスランプの関係



図一七 細骨材率とスランプフローの関係



図一八 細骨材率とスプレッド値の関係

### (3) 高性能減水剤の使用量の選定

高強度吹付けコンクリートにおいて、高性能減水剤（以下SP剤と略す）を使用することが一般化しつつある。コンクリートの高品質化に向けて、SP剤を使用して単位水量をできるだけ小さくすることは言をまたないが、SP剤の使用量が過多で単位水量が不足した場合には、フレッシュコンクリートの粘性や変形性能が適性を欠き、吹付けコンクリートの性能を悪化させることも考えられる。SP剤の使用量の選定試験は、SP剤をCx1%使用した時に所要のスランプが得られる単位水量を基準水量とし、SP剤の使用量でコンシステンシーを回復する方法の適用範囲を知る目的で、単位水量を10あるいは20kg/m<sup>3</sup>減じて低下したコンシステンシーをSP剤量で調整したコンクリートの性状について検討した。

図-9にはスランプへの影響を示した。鋼繊維を使用しないコンクリートは単位水量を10kg/m<sup>3</sup>減じた場合、SP剤をCx0.4%、単位水量を20kg/m<sup>3</sup>減じた場合は、SP剤をCx0.8%増加することで、コンシステンシーを調整でき、フレッシュコンクリートの状態も良好であった。これに対して鋼繊維を使用したコンクリートのコンシステンシーを回復するためのSP剤量は鋼繊維を使用しないコンクリートに比べ多くなり、単位水量を基準から20kg/m<sup>3</sup>減じた場合は、SP剤の使用量を2倍量に増しても、コンシステンシーは回復できなかった。図-10はスプレッド試験の結果および図中( )にコンクリートの状態評価を示した。鋼繊維を使用しないコンクリートのスプレッド値はSP剤の使用量を変化させても大きな変化は見られず、コンクリートの状態も良好であった。これに対して鋼繊維を使用したコンクリートは、SP剤の使用量が多くなるに従ってスプレッド値は小さくなり、コンクリートの状態は悪化した。この傾向は鋼繊維を1.5%使用した場合に顕著であり、鋼繊維を比較的多量に使用したコンクリートにおいて、SP剤量の増量によるコンシステンシーの調整範囲は小さいと言える。一方、鋼繊維を1%使用した条件で、単位水量を10kg/m<sup>3</sup>減じ

てSP剤を増量したコンクリートは、ワーカビリティを損なうことなく、コンシステンシーが回復でき、実用範囲にあると判断された。

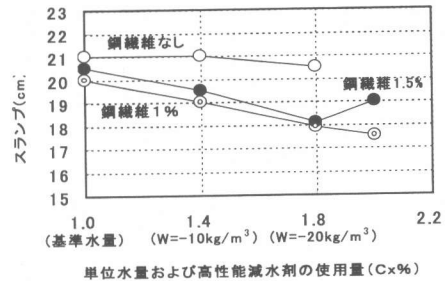


図-9 SP剤の使用量とスランプの関係

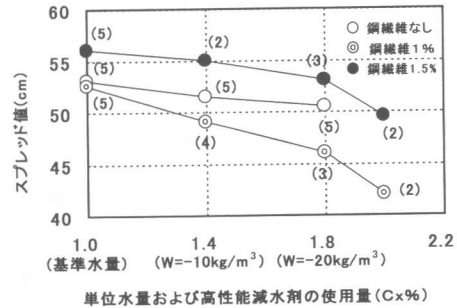


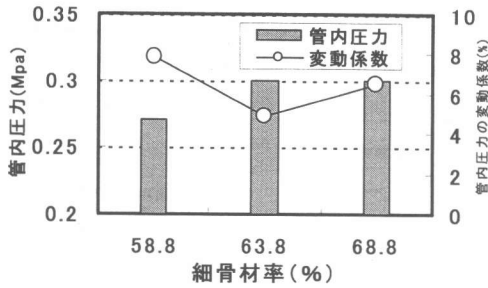
図-10 SP剤の使用量とスプレッド値の関係

### 3.2 吹付け実験

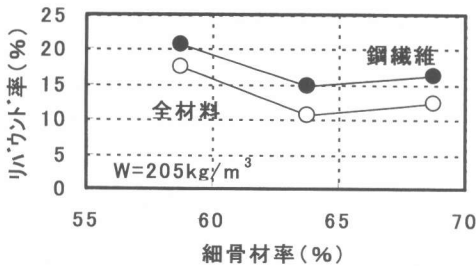
室内試験で選定された高強度配合（単位水量205kg/m<sup>3</sup>、細骨材率63.8%）の有効性について、模擬トンネルを用いた吹付け実験を行い検証した。

吹付け実験には空気搬送式のコンクリートポンプを用い、コンクリートの吐出量は8m<sup>3</sup>/hrとした。試験結果を図-11～14に示す。室内試験で選定された最適細骨材率（63.8%）において、管内圧力の変動係数、リバウンド率および吹付けコンクリートの曲げじん性係数ともに最良値を示しており、最適細骨材率の有効性が検証された。

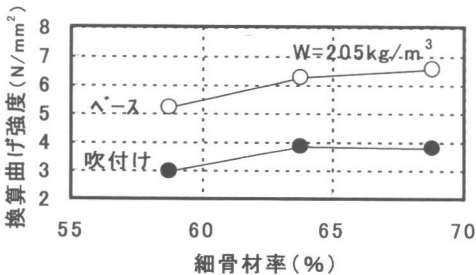
一方、単位水量を増減した実験においても、室内試験で選定した単位水量の中心値（205kg/m<sup>3</sup>）において、リバウンド率は最も小さくなり、単位水量の影響が認められた。これはコンクリートの粘性がリバウンド率に影響したと考えられ、粘性評価の必要性がうかがえた。



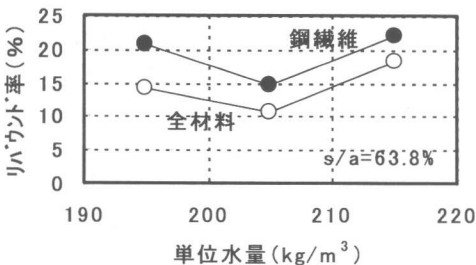
図一 1 1 細骨材率と管内圧力の関係



図一 1 2 細骨材率とリバウンド率の関係



図一 1 3 細骨材率と換算曲げ強度の関係



図一 1 4 単位水量とリバウンド率の関係

#### 4. まとめ

粗骨材最大寸法 15mm, 鋼繊維長さ 30mm の材料条件で行った鋼繊維吹付けコンクリー

トについて、その配合設計手法を見出す目的で室内試験および吹付け実験を行った。本試験範囲内で得られた知見をまとめると以下のとおりとなる。

(1)高性能減水剤を使用しない一般強度の鋼繊維吹付けコンクリートの配合選定は、鋼繊維を使用しない吹付けコンクリートの配合を基準に、鋼繊維の使用量が0.5%増える毎に単位水量を5kg/m<sup>3</sup>, 細骨材率を2.5%それぞれ大きくする補正が適当であった。

(2)高性能減水剤を使用した高強度鋼繊維吹付けコンクリートは、鋼繊維を使用しない吹付けコンクリートを基準に鋼繊維を1%使用する場合、単位水量を15kg/m<sup>3</sup>, 細骨材率を5%, 1.5%使用する場合、単位水量を30kg/m<sup>3</sup>, 細骨材率を10%それぞれ大きくする補正が適当であった。

(3)高性能減水剤の使用量の増量で、単位水量の低減は可能であるが、ワーカビリティを確保するために必要な最低単位水量が存在した。これを判定するためには、コンクリートに外力を与えて、その変形性能を評価・検討する方法(本試験ではスプレッド試験)が有効であった。

(4)室内試験で選定した配合で吹付け実験を行った結果、室内試験で選定された細骨材率および単位水量においてポンプ圧送性、リバウンド率および硬化物性は最良値を示した。

#### 謝辞

本研究は、東京大学国際・産学共同研究センターにおける「高品質吹付けコンクリートの開発」を目的とした共同研究の成果であり、東京大学生産技術研究所技官 西村次男氏および共同研究各社、協力会社ならびに関係各位に深い感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 田中一他, 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, トンネルと地下 2000年8月
- 2) 小林一輔他, 所要のコンシステンシーを得るための鋼繊維補強コンクリートの配合設計方法, 土木学会論文報告集, 第293号 1980年4月