

論文 鋼繊維補強超硬練りコンクリートの配合と強度

加賀谷 誠^{*1}・城門 義嗣^{*2}・國分 修一^{*3}・徳田 弘^{*4}

要旨：形状と寸法の異なる4種類の鋼繊維を用いて、舗装用転圧コンクリートの修正 VC 値と単位水量の関係を求め、最適細骨材率および最大締固め率を示した。また、このとき鋼繊維混入率1.0%が適当であること、ならびに曲げ強度がこれを混入しない場合より鋼繊維種別ごとに1.3～1.8倍となることを明らかにした。

キーワード：舗装用転圧コンクリート、単位水量、細骨材率、鋼繊維混入率、曲げ強度

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリートは、曲げ強度やひび割れ抵抗性に優れた材料であることからトンネルのライニングや床版増厚工法に用いられている。鋼材の使用が困難とされている舗装用転圧コンクリート(RCCP 用コンクリート)にこの特長を生かすことが出来れば、性能向上が期待できる。しかし、この分野に関する研究成果¹⁾は少なく、基礎データを蓄積する必要がある。

本研究では、形状・寸法の異なる4種類の鋼繊維を使用し、鋼繊維補強 RCCP 用コンクリートの配合および曲げ強度特性を明らかにすることを目的とした。この目的のため、単位水量、細骨材率および鋼繊維混入率を変化させた3シリーズの実験を行い、鋼繊維無混入の場合との比較を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

普通セメント、川砂および砕石を使用した。骨材の物理的性質を表-1に示す。

混和剤として、リグニンスルホン酸塩を主成分とする遅延形 AE 減水剤をセメント量に対し0.25%添加し、混和剤使用量は水量の一部と

してこれを用いた。

鋼繊維は、インデント加工したものⅠとフック付きⅡであって、それぞれ2種類の寸法のもの計4種類を使用した。これらの寸法を表-2に示す。

2.2 コンクリートの配合および製造

本研究では、1 単位水量、2 細骨材率および3 鋼繊維混入率を変えた3シリーズの試験を行った。シリーズ1においては、鋼繊維無混入のベースとなる RCCP 用コンクリートにⅡ-2を鋼繊維混入率1.0%として使用し、単位水量を変えてコンシステンシーを測定して比較検討した。シリーズ2においては、4種類の鋼繊維を混入率1.0%として用い、シリーズ1において所要のコンシステンシーが得られた単位水量を用いて細骨材率を変えたコンクリートのコンシステンシーを測定し、細骨材率を選定した。シリーズ3においては、シリーズ1および2で得られた単位水量および細骨材率について4種類の鋼繊維を使用し、混入率を変えてコンシステンシーを測定して比較検討した。鋼繊維無混入のベースとなる RCCP 用コンクリートおよびシリーズ1～3に用いたコンクリートの配合を表-3に示す。コンクリートの練混ぜには、容量50ℓの

*1 秋田大学教授 工学資源学部土木環境工学科 工博 (正会員)

*2 秋田大学大学院 鉱山学研究科土木環境工学専攻

*3 大林道路株式会社技術研究所 工博 (正会員)

*4 秋田大学長 工博 (正会員)

表-1 骨材の物理的性質

骨材種別	比重	吸水率 (%)	粗粒率	単位容 積重量 (kg/m³)
川砂	2.56	3.01	2.70	1560
碎石	2.69	1.13	6.60	1530

表-2 使用した鋼繊維の寸法

記号	長さ(mm)	直径(mm)	備 考
I-1	50.0	0.7	インデント 加工
I-2	30.0	0.6	
F-1	60.0	0.8	フック付き
F-2	30.0	0.6	

表-3 コンクリートの配合

No.	粗骨材の 最大寸法 (mm)	修 正 V C 値 (sec)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)					
					W	C	S	G	鋼繊維	混和剤
1	20	38~82	37.0~41.2	41.8	107~119	289	845~858	1236~1255	0	0.72
2		20~60	39.8~46.7	41.8	115~135		821~842	1191~1222	79	
3		50~273	39.8	30.0~60.0	115		597~1203	843~1476	79	
4		21~285	39.8	40.0	115		791~806	1256~1281	0~118	

パン型強制練りミキサを使用し、練混ぜ時間を4.5分とした。

コンクリートのコンシステンシー測定方法として VC 振動締固め試験方法²⁾を用いて、修正 VC 値および締固め率を測定した。空気量は、バイブレーティングタンパを用いて締固めた後ワシントン型エアメーターによりこれを測定した。

2.3 曲げ強度試験方法

曲げ強度試験用供試体の寸法は、断面10×10 cm、長さ40cm であって、供試体の製造を文献2)に準じて行った。コンクリートの締固めには、振動数50Hz、質量15kg のバイブレーティングタンパを使用した。

曲げ強度試験は、JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じてこれを行い、供試体個数をそれぞれ3個とした。試験材齢を、シリーズ1およびシリーズ2においては7日、シリーズ3においては28日とし、それまで標準水中養生を行った。なお、本実験は、室温21±3℃、湿度60±10%の実験室内で行われた。

3. 実験結果および考察

3.1 単位水量と修正VC値の関係

表-3の配合 No.1および2を用いて鋼繊維を

混入した RCCP 用コンクリートの単位水量と修正 VC 値の関係を検討した。

図-1に鋼繊維 F-2 (混入率=1.0%)を用いた場合の単位水量と修正 VC 値の関係を示す。図中には鋼繊維を混入しない通常の RCCP 用コンクリートの場合についても示した。図より修正 VC 値は、単位水量の増加に伴って減少傾向を示すが、単位水量125kg/m³以下における単位水量1kg/m³の変化に対する修正 VC 値の変化は、鋼繊維を混入した場合および無混入の場合でそれぞれ3および4秒程度であり、大きく異なることがわかる。また、修正 VC 値を一定とした場合、鋼繊維を混入することにより単位水量が約4kg/m³増加することがわかる。フレッシュコンクリートに鋼繊維を混入することによって、スランプが低下して単位水量が増加することは既に指摘されている³⁾が、本研究においても同じ結果となった。なお、その程度については、使用する鋼繊維の形状・寸法および混入率によって異なると考えられることから、次節以降においてこれを示す。

図-2に前図に示したコンクリートを用いた場合の W/C と材齢7日における曲げ強度の関係を示す。前図に示したように、単位セメント量を一定として単位水量を増加することによって

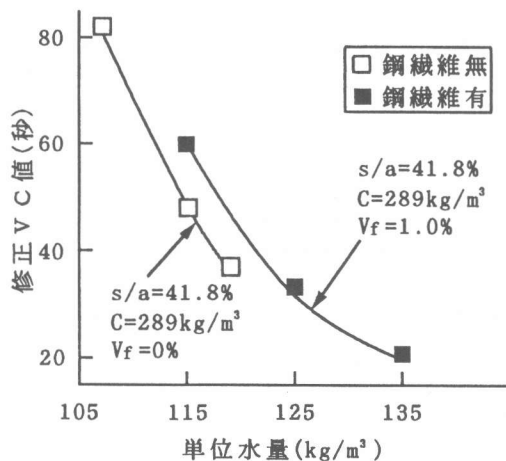


図-1 単位水量と修正 VC 値の関係

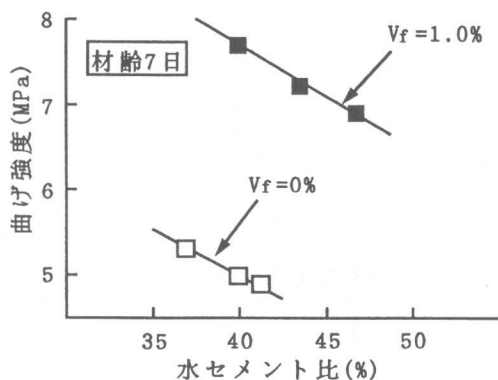


図-2 水セメント比と曲げ強度の関係

修正 VC 値は減少するが、W/C が増加し、曲げ強度は低下する傾向が認められる。鋼繊維を混入した場合および無混入の場合の W/C の変化はそれぞれ40～47%および37～41%であり、このときの曲げ強度の差はそれぞれ0.82および0.49MPa 程度であった。また、鋼繊維の混入による曲げ強度の向上は顕著であり、同一 W/C で無混入の場合と比較すると約1.5倍の強度増加があり、鋼繊維による補強効果が認められた。修正 VC 値を一定に保つため単位水量が増加し、W/C は大きくなるが、鋼繊維の混入に伴う補強効果により、曲げ強度は無混入の場合よりかなり大きくなることが明らかとなった。

3.2 細骨材率と修正VC値の関係

一般にコンクリートの単位水量は、所要のコ

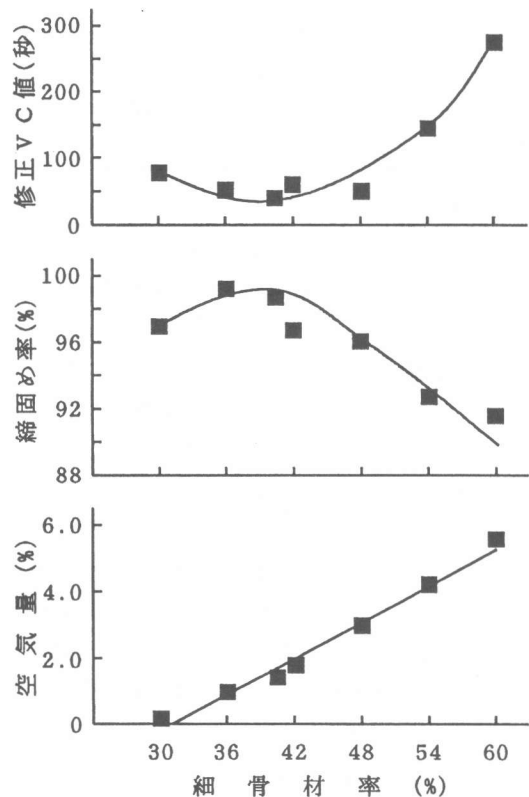
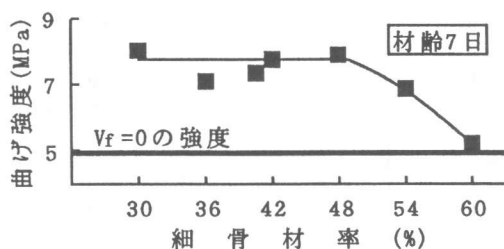


図-3 細骨材率と修正 VC 値、締固め率および空気量の関係

ンシステンシーが得られる範囲内で出来るだけ少なくなるように試験によって定められる。前節において示したように、通常目標修正 VC 値50±10秒の範囲²⁾で最小となる単位水量は115kg/m³であったことから、各種鋼繊維を用いた場合について、単位水量115kg/m³、鋼繊維混入率1.0%として細骨材率を変化させた場合について検討した。

図-3に一例として、鋼繊維 F-2 を用いた場合の細骨材率と修正 VC 値、締固め率および空気量の関係を示す。図より、修正 VC 値は細骨材率の増加に伴って減少した後、増加傾向に転じ、修正 VC 値が最小となる細骨材率が存在することがわかる。締固め率は細骨材率の増加に伴って増加した後、減少傾向に転じ、修正 VC 値が最小となり、かつ締固め率が最大となる細骨材率は40%程度であることがわかる。こ



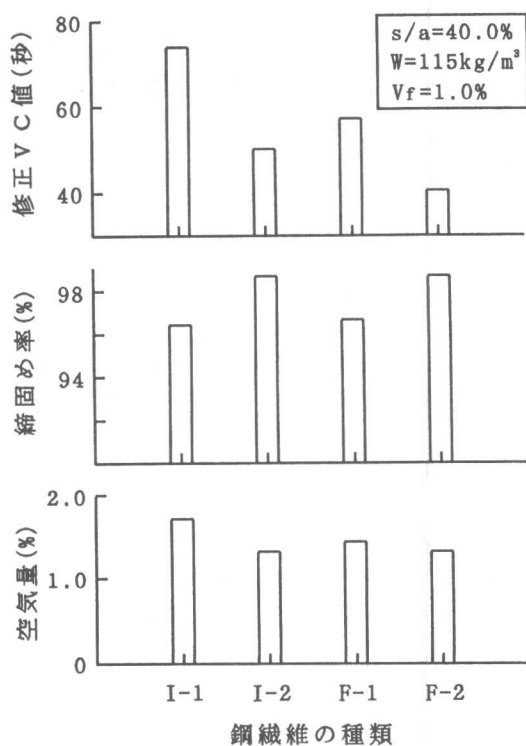
図－４ 細骨材率と曲げ強度の関係

の傾向は、鋼繊維無混入の RCCP 用コンクリートの場合と同じであって⁴⁾、細骨材率40%をこのコンクリートの最適値として用いることとした。また、空気量は細骨材率の増加に伴って直線的に増加することがわかる。これは、単位水量一定のため、締固めが困難となり空隙が増加したためと思われる。これらの傾向は、各値に差はあるものの他の種類の鋼繊維を用いた場合についても認められた。また、細骨材率が48%を超えた場合、鋼繊維が十分に分散せず、局部的に集中すること、特に鋼繊維 F では、水溶性接着剤で4本が1組に接着されているため、練混ぜに際し、鋼繊維 I より分散させてミキサに投入しやすいものの、これが溶解しないまま残っている状況が観察された。

図－４に細骨材率と曲げ強度の関係を示す。図中の横太線は、細骨材率41.8%で鋼繊維無混入の場合を示す。図に示したコンクリートは前図に示したものと同一である。図より、曲げ強度は細骨材率が48%までは大きく変化せずに、鋼繊維無混入の場合の1.5～1.6倍となっているが、これを超えると急激に減少し、細骨材率60%では、無混入の場合に近い値となった。これは、細骨材率を増加させた場合、鋼繊維の分散が不十分となることや修正 VC 値の増加により締固めにくくなることによると考えられる。

3.3 鋼繊維の形状および寸法がフレッシュコンクリートの性質および曲げ強度に及ぼす影響

前節までで得られた単位水量115kg/m³、細骨材率40%を用い、4種類の鋼繊維について混入



図－５ 鋼繊維の形状および寸法の違いによる修正 VC 値、締固め率および空気量の比較

率1.0%としてフレッシュコンクリートの性質および曲げ強度を測定した。配合としては、表－３の No.3を用いた。

図－５に鋼繊維の形状および寸法の違いによる修正 VC 値、締固め率および空気量の比較を行った結果を示す。図より、修正 VC 値は、鋼繊維の寸法をおよそ一定とすると、鋼繊維 I の方が F よりも大きくなること、形状を一定とすると鋼繊維の長いものが短いものより大きくなることからわかる。前節で述べたが、単位水量を115kg/m³として細骨材率を変えたとき、鋼繊維の形状・寸法が異なっても修正 VC 値が最小となる細骨材率はおおよそ40%と一定であるが、その時の修正 VC 値は鋼繊維の形状および寸法の違いによって異なる結果を示している。鋼繊維 F-1, 2 および I-2 は目標修正 VC 値50 ±10秒の範囲内となっているが、I-1 ではこ

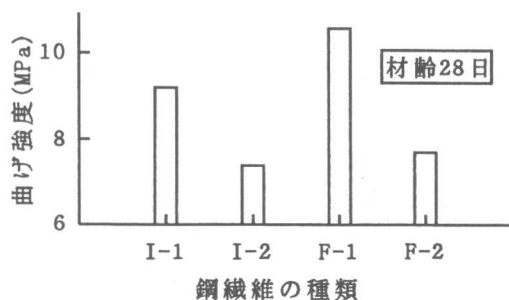


図-6 鋼繊維の形状および寸法の違いによる曲げ強度の比較

れより大きく、目標値とするには、単位水量を 121kg/m^3 程度まで増加する必要があるものと推定される。これは、鋼繊維 I の形状が扁平であるため、長くなると網状の絡みが生じ、モルタルが空隙を充填して浮上するまで時間を要することによると考えられる。締固め率は、鋼繊維の短いものが長いものより大きく締固め易いこと、このとき形状は大きく影響しないこと、空気量は、鋼繊維 I の長いものが他の3種類より幾分大きくなっているが、 $1.5 \pm 0.5\%$ の範囲内にあることがわかる。

図-6 に鋼繊維の形状および寸法の違いによる材齢28日の曲げ強度の比較を行った結果を示す。図に示したコンクリートは図-5 に示したものと同一である。図より曲げ強度は、鋼繊維の寸法をおよそ一定とすると、F の方が I より大きく、鋼繊維の形状を一定とすると長いものが短いものより大きくなることがわかる。これは、両端がフック形状の場合や鋼繊維が長い場合、コンクリートとの付着性状に優れ、補強効果が高まったことによると考えられる。

3.4 鋼繊維混入率がフレッシュコンクリートの性質および曲げ強度に及ぼす影響

単位水量 115kg/m^3 、修正 VC 値が最小となる細骨材率40%を用い、4種類の鋼繊維について混入率を変化させてフレッシュコンクリートの性質および曲げ強度を測定した。配合としては、表-3 の No.4 を用いた。

図-7 に鋼繊維混入率と修正 VC 値、締固め率および空気量の関係を示す。図より、鋼繊維

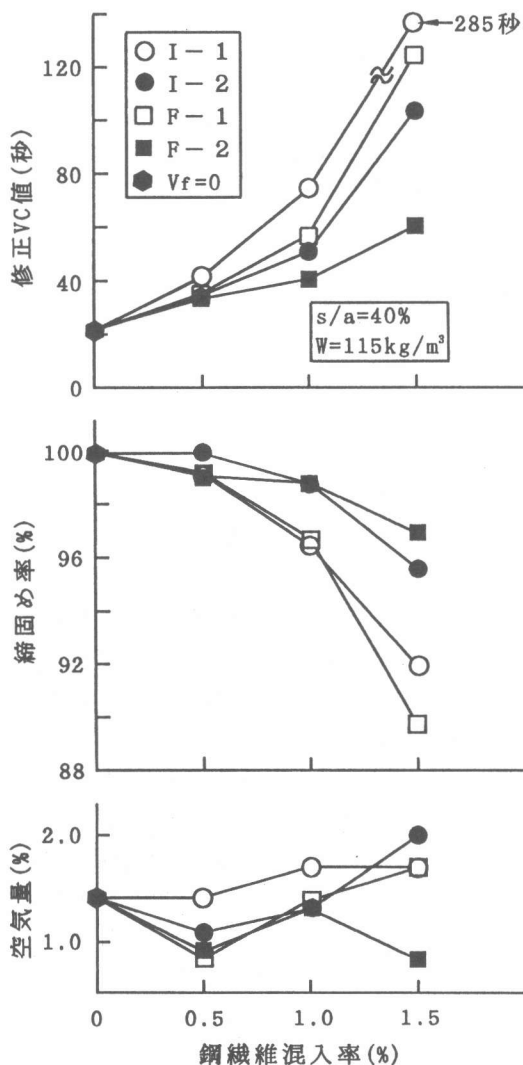


図-7 鋼繊維混入率と修正VC値、締固め率および空気量の関係

混入率の増加に伴って修正 VC 値は増加すること、締固め率は減少すること、これらの傾向は、およそ鋼繊維 F より I の方が、また、長さが長くなるほど顕著となることがわかる。鋼繊維混入率1.5%のとき I-1 を用いた場合、鋼繊維が偏在して網状の絡みが生じること、F-1 を用いた場合、水溶性接着剤が溶解しない束状のものが多く残存することなど分散状態が不十分となることが観察された。鋼繊維混入率を1.5%まで増加させると、修正 VC 値が増加して締固

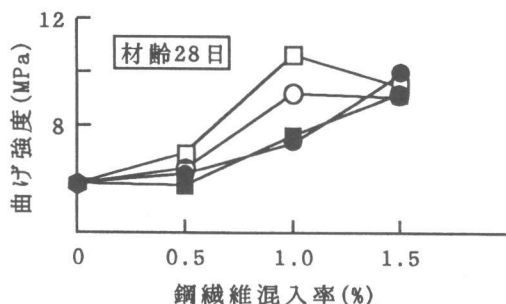


図-8 鋼繊維混入率と曲げ強度の関係

め率が低下し、締固めにくいコンクリートとなるため単位水量の増加に注意する必要がある。空気量は、鋼繊維混入率の増加に伴う一定の増減傾向が明確に認められず、十分締固めを行うことによって $1.5 \pm 0.5\%$ の範囲内となった。ただし、鋼繊維混入率が 1.5% の場合や 1.0% であっても、長さの長いものを用いた場合、エアメーター容器の表面仕上げに時間を要した。

図-8に鋼繊維混入率と材齢28日における曲げ強度の関係を示す。図に示したコンクリートは図-7に示したものと同一である。I-1およびF-1を用いた場合、曲げ強度は、混入率 1.0% で最大値を示した。これは、混入率を 1.5% まで増加させると鋼繊維の分散が不十分となることや、修正VC値の増加によって締固めが十分行われないことにより強度低下が生じたと考えられる。I-2およびF-2を用いた場合、鋼繊維混入率の増加に伴って曲げ強度の増加傾向が認められる。また、鋼繊維の長さが短いものは、長いものより締固めが容易であり、混入率を 1.5% まで増加しても、高い補強効果が発揮されると考えられる。しかし、所要のコンシステンシーを得るために、単位水量を増加する必要がある、鋼繊維混入率は 1.0% が適切であると判断される。

4. まとめ

寸法の異なるインデント加工された鋼繊維 I およびフック付き F をそれぞれ用いた RCCP 用

コンクリートの単位水量、細骨材率、鋼繊維混入率および曲げ強度について検討し、次の結論が得られた。

(1) 鋼繊維混入率を一定としたコンクリートの単位水量は無混入の場合より多くなるが、単位水量の変化に対する修正 VC 値の変化は、両コンクリートにおいて大きく異なる。

(2) (1)で得られた、所要の修正 VC 値の単位水量を有するコンクリートの細骨材率を変化させたとき、修正 VC 値が最小で、締固め率が最大となる細骨材率が存在する。その細骨材率は、鋼繊維の形状・寸法が異なっても大きく変化しないが、このときの修正 VC 値は、鋼繊維 F より I を用いた方が、また、長いほど大きくなる。

(3) (2)で得られたコンクリートの鋼繊維混入率を変化させたとき、目標修正 VC 値と分散状態を考慮した適切な混入率は、 1.0% と判断された。このときの空気量は、 $1.5 \pm 0.5\%$ であった。

(4) (3)で得られたコンクリートの材齢28日における曲げ強度は、鋼繊維 F の方が I を用いるより大きく、また、長い方が大きくなった。このとき、無混入のものと比較して $1.3 \sim 1.8$ 倍増加した。

参考文献

- 1) A. Nanni and A. Johari : RCC Pavement Reinforced with Steel Fibers, Concrete International, pp.64-69, March, 1989.
- 2) (社)日本道路協会：転圧コンクリート舗装技術指針(案), 1990.
- 3) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案), コンクリートライブラリー第50号, 1983.
- 4) 加賀谷誠, 徳田 弘, 因幡芳樹, 國分修一 : RCCP 用コンクリートの配合およびワーカビリティ特性に及ぼす各種混和剤の効果, 材料, No.506, pp.1378-1383, 1995.