

論文 高強度繊維補強コンクリートの特性に及ぼす使用材料と養生方法の影響

俵 道和^{*1}・呉 承寧^{*2}

要旨: 高強度、高靱性を有する高強度繊維補強コンクリートの開発を目指し、コンクリートを構成する材料、養生方法の組み合わせを変化させた時にコンクリートの硬化特性値に与える影響について検討を行なった。使用材料の影響を調べるために、結合材について4種類のセメントと1種類の混和材、骨材について2種類の岩種と3種類の寸法、繊維について3種類を用いた。養生方法の影響を検討するため、水中養生および蒸気養生を行った。これらの結果に基づいた最適な使用材料および養生方法で製造された高強度繊維補強コンクリートは圧縮強度が130N/mm²、ひび割れ発生強度が8N/mm²、引張強度が12N/mm²と優れた性能を有した。

キーワード: 高強度繊維補強コンクリート、ひび割れ発生強度、引張強度

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート橋に関して、スパンの長大化や上部工の断面を小さくすることにより軽量化が望まれている。これまで、PC鋼材を主桁の床版やウェブに配置するインナケーブル方式で施工されていたものが、上部工断面の縮小にともない外ケーブル方式として設計され合理化が図られている。

外ケーブル形式では、定着体や、偏向部などのコンクリートに生じる引張応力に対して十分抵抗できる構造とする必要がある。このため、定着体および偏向部に補強筋が密に配置されている。しかし、このような過密な配筋は、鉄筋とコンクリートとの付着が小さくなり、打ち込み時、コンクリートの充填ができないなど問題が懸念される。そこで、定着体および偏向部に自己充填性を有する高強度繊維補強コンクリートを使用することにより、一部分の引張応力を高強度繊維補強コンクリートに負担させ、鉄筋量を低減させ、耐久性に優れた合理的な設計が可能になるものと考えられる。

本稿は、圧縮強度、引張強度および靱性に優れた高強度繊維補強コンクリートの開発を目指し、高強度繊維補強コンクリートの特性に及ぼす使用材料および養生方法の影響を検討し、最適な使用材料と養生方法を選定した。

2. 試験方法

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。結合材としては、高強度を目指すため、水和発熱の抑制および長期強度の増進が期待できるものを選定した。骨材については、硬質砂岩の砕砂および砕石であり骨材自身の強度が高いものと、粒子が細かい珪砂を選定した。高性能減水剤は、ポリカルボン酸系の高強度コンクリート用のものを用いた。

2.2 コンクリートの製造

コンクリートの製造には、公称容量100リットルのパン型強制練りミキサーを用いた。練り混ぜ方法は、セメント+混和材、細骨材を投入し30秒間空練りを行い、練り混ぜ水、混和剤を投入してモルタルの流動性が得られるまで約10分間先練りし、コンクリートについては粗骨材を投入し、最後に繊維を投入して3分間練り混ぜ後に排出した。

3. 試験結果

3.1 結合材種類の影響

結合材の違いによる圧縮強度に及ぼす影響を確認するため、4種類の結合材を選定した。結合材として、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームの2種混合セメント(SFC)、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末およびシリカフェームの3種混合セメント(VKC)、中庸熱ポルトランドセメントとシリカフェーム混和材の組合せ、および低熱ポルトランドセメントとシリカフェーム混和材の組合せについて圧縮強度を比較した。

表-2に示す配合のコンクリートを用いてフレッシュ性状の確認した上で、φ100×200mmの円柱供試体を製作し、圧縮強度を確認した。

表-3に示すように、中庸熱ポルトランドセメントとシリカフェーム混和材を用いたコンクリート(M16)は、他の結合材を用いたコンクリートに比べ、最も大きなフロー値、すなわち、高い流動性を呈した。また、低熱ポルトランドセメントとシリカフェームの混合セメントを用いたコンクリート(SFC16)は、低熱ポルトランドセメントとシリカフェーム混和材を用いたコンクリート(L16)に比べ、高い流動性があった。その原因の一

*1 オリエンタル白石株式会社 技術研究所 工修 (正会員)

*2 オリエンタル白石株式会社 技術研究所 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの使用材料

材料	記号	種類・産地	諸物性
結合材	SFC	低熱ポルトランドセメント とシリカフェュームの混合セメント	密度：3.08g/cm ³ 比表面積：6160cm ² /g
	VKC	普通セメント，高炉スラグ微粉末 およびシリカフェュームの混合セメント	密度：2.99g/cm ³ 比表面積：3270cm ² /g
	M	90%中庸熱ポルトランドセメント	密度：3.21g/cm ³ 比表面積：3140cm ² /g
		10%シリカフェューム	密度：2.20g/cm ³ 比表面積：200000cm ² /g
	L	90%低熱ポルトランドセメント	密度：3.22g/cm ³ 比表面積：3450cm ² /g
10%シリカフェューム		密度：2.20g/cm ³ 比表面積：200000cm ² /g	
骨材	S1	相馬硅砂	骨材最大寸法 2.5 mm，表乾密度 2.60 g/cm ³ ，粗粒率 3.36
	S2	茨城県桜川市飯渕産砕砂	骨材最大寸法 5 mm，表乾密度 2.61 g/cm ³ ，粗粒率 2.86
	G1	茨城県桜川市飯渕産 6 号碎石	骨材最大寸法 13 mm，表乾密度 2.63 g/cm ³ ，粗粒率 6.74
	G2	茨城県桜川市飯渕産 2005 碎石	骨材最大寸法 20 mm，表乾密度 2.63 g/cm ³ ，粗粒率 6.26
繊維	BF	ビニロン繊維	繊維径=0.66mm，公称長さ=30mm，引張強度=880N/mm ² ，密度=1.3
	NSF	鋼繊維	繊維径=0.6mm，公称長さ=30mm，引張強度=1000N/mm ² ，密度=7.8
	HSF	高強度鋼繊維	繊維径=0.2mm，公称長さ=21mm，引張強度=2000N/mm ² ，密度=7.8
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリカルボン酸系

表-2 結合材の検討用示方配合

種類	W/B (%)	SP/B (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	SF	S2
SFC16	16.0	3.0	135	844	0	1490
VKC16			135	844	0	1469
M16			135	759	84	1488
L16			135	759	84	1490

注：B=C+SF

表-3 コンクリートのフレッシュ性状

種類	フロー値 (mm)	空気量 (%)
SFC16	211	5.1
VKC16	206	5.1
M16	254	4.1
L16	175	4.7

つとしては、ブレミックスされた混合セメントにあるシリカフェュームが混和材としてコンクリートに混入されたシリカフェュームに比べ、よく分散されていたためと思われる。

コンクリートの圧縮強度に及ぼす結合材の種類の影響を図-1に示す。各種コンクリートの材齢91日の圧縮強度は、L16>SFC16>M16>VKC16の順になって行った。これは結合材のセメントに長期強度発現の大きいC₃Sの含有量と関係があることが考えられる。一方、材齢7日の圧縮強度において、逆にC₃Sの含有量が比較的多い普通ポルトランドセメントとシリカフェュームの混合セメントを用いたコンクリート (VKC16) が最も高くなっていた。

中庸熱ポルトランドセメントとシリカフェューム混和材を用いたコンクリート (M16) は、他の結合材を用い

たコンクリートに比べ、流動性だけではなく、初期強度と長期強度ともに高い値を示しているため、高強度繊維補強コンクリートの結合材として妥当と考えられる。よって、以下の検討は中庸熱ポルトランドセメントとシリカフェューム混和材を結合材としたコンクリートを用いて行う。

3.2 骨材の岩種と最大寸法の影響

コンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす骨材の影響を検討するために、細骨材2種類、粗骨材2種類について比較を行った。試験に用いた配合を表-4に示す。

コンクリートのフレッシュ性状に及ぼす骨材の影響は、同じ岩質の場合、骨材最大寸法が小さくなるにつれて粘性が大きくなり、材料の分離抵抗性が向上されたが、空気量が増える傾向が見られた。

コンクリートの圧縮強度に及ぼす骨材の影響は、φ100×200mmの円柱供試体を製作し圧縮強度試験を行った結果を図-2に示す。その結果、硬質砂岩S2を用いたコンクリートの圧縮強度は160N/mm²であり、硅砂S1を用いたコンクリートの圧縮強度126N/mm²に比べ、34N/mm²大きくなった。これにより、圧縮強度に及ぼす岩種の影響が確認された。

そして、同じ岩種の場合、最大寸法がそれぞれ5mm、13mm、および20mmの骨材を用いたコンクリートM16-S2、M16-G1およびM16-G2のコンクリート圧縮強度は、骨材の最大寸法が大きくなるにつれて圧縮強度が小さくなる傾向があった。これは骨材中に存在するひび割れなどの欠陥の確率が骨材の最大寸法が大きいほど多いことと関係があると考えられる。

表-4 骨材の検討用示方配合

種類	W/B (%)	SP/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	SF	S	G
M16-S1	16.0	3.5	100	130	731	81	1457(S1)	—
M16-S2				130	731	81	1462(S2)	—
M16-G1		2.0	45	130	731	81	658(S2)	810(G1)
M16-G2				130	731	81	658(S2)	810(G2)

注：B=C+SF

3.3 養生方法の影響

コンクリートの圧縮強度は養生方法に大きな影響を受ける。高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす養生方法の影響を調べるために、本研究は、水セメント比19%の中庸熟セメントとシリカフェーム混和材を用いたコンクリート(M19)の供試体に対して、20℃の水中養生、60℃蒸気養生および90℃蒸気養生それぞれを行った。60℃蒸気養生と90℃蒸気養生とは、打設後24時間に20℃の環境で湿潤養生を行った後、供試体を脱型し、4時間で60℃または90℃まで升温し、60℃または90℃を5時間保持した後20℃まで徐冷し、圧縮試験まで20℃の水中に養生する方法である。

圧縮強度に及ぼす養生方法の影響の試験結果を図-3に示す。この図より、材齢28日の圧縮強度においては養生温度が高いほど高い値が得られたが、材齢91日の圧縮強度は60℃の蒸気養生を行ったものが最も高い圧縮強度が得られた。よって、高強度コンクリートに対して60℃の蒸気養生が適していると考えられる。

3.4 繊維の種類と添加量の影響

高強度コンクリートの引張強度および靱性を向上するために、繊維補強が必要となる。本研究は最適な繊維種類および混入率を検討するために、高強度鋼繊維、鋼繊維およびピニロン繊維の3種類の繊維についてコンクリートの硬化特性を調べた。

試験に使用したコンクリート配合を表-5に示す。結合材は中庸熟セメントとシリカフェーム混和材、養生方法は60℃の蒸気養生を行った。

(1) 圧縮強度

圧縮強度に及ぼす繊維の影響を図-4に示す。この結果、繊維を混入しなかったプレーンコンクリート(M)の圧縮強度が約160N/mm²と最も高かった。繊維補強コンクリートの圧縮強度は、繊維の種類および混入率によって若干の差があったが、約140N/mm²であり、概ねプレーンコンクリートの9割であった。

(2) ヤング係数

コンクリートのヤング係数に及ぼす繊維の影響を図-5に示す。この図より、コンクリートのヤング係数に及ぼす繊維の影響はほとんどなかった。繊維混入の有無、また繊維種類に関係なく40kN/mm²程度を示した。

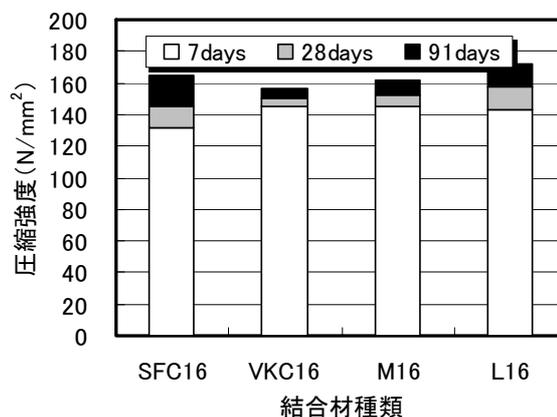


図-1 圧縮強度に及ぼす結合材種類の影響

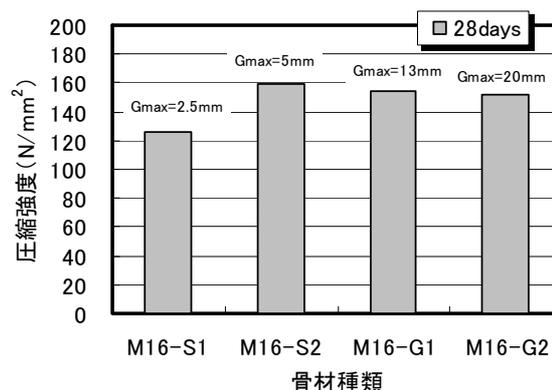


図-2 圧縮強度に及ぼす骨材種類の影響

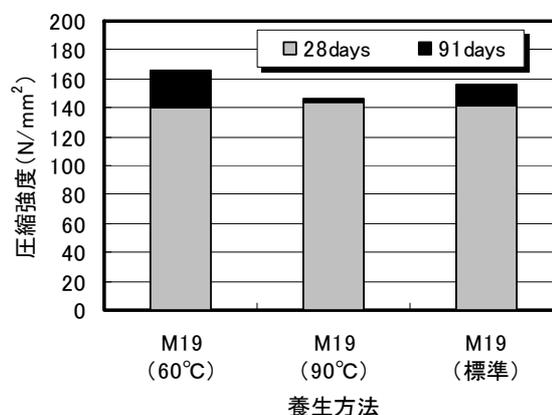


図-3 圧縮強度に及ぼす養生方法の影響

表-5 繊維の検討用示方配合

種類	W/B (%)	SP/B (%)	V _f /V _c (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	SF	S2	F
M	17.0	3.5	0	175	947	82	1233	0
BF		3.5	2.0	175	947	82	1233	26(BF)
NSF-2.0		3.5	2.0	175	947	82	1233	156(NSF)
NSF-2.5		3.8	2.5	175	947	82	1233	195(NSF)
HSF		4.5	1.5	175	947	82	1233	117(HSF)

B=C+SF

(3) 割裂引張強度

コンクリートの割裂引張強度試験は、φ100×200mmの円柱供試体を用いて、JIS A 1113に準拠して行った。さらに、コンクリートのひび割れ発生時の引張応力を確認するため、供試体の端面中心に、荷重方向と垂直になるようひずみゲージを貼り付け、荷重とひずみを連続的に計測することによって、計測値が不連続となった点からひび割れ発生時を特定した。また、繊維を混入することによる、ひび割れ発生時からの引張応力の伸びを比較するため、終局時の引張応力についても比較を行った。

試験結果を図-6に示す。コンクリートのひび割れ発生時の引張応力は、繊維を混入することにより、若干高くなった。しかしながら、コンクリートの終局時の引張応力は、ビニロン繊維を混入したコンクリートを除いて、繊維を混入することにより大幅に増加した。特に、高強度繊維を用いたコンクリートは終局時において最も高い引張応力を示した。また、鋼繊維を混入したコンクリートは、繊維の混入率の増加につれ終局時の引張応力の増加が確認された。

これより、繊維自体の引張強度と混入率は、ひび割れ発生時の引張応力に与える影響は少ないが、コンクリートの終局時の引張応力に与える影響は大きくなることが確認された。

(4) 曲げ強度

曲げ強度試験は、100×100×400mmの角柱供試体を用いて、JIS A 1106に準拠して行った。さらに、ひび割れ発生強度を確認するため、供試体底面にひずみゲージを取り付けて計測を行った。

試験の結果を図-7に示す。この図より、コンクリートの曲げ強度に及ぼす繊維影響は、引張強度に対する影響とほぼ同じ傾向を示している。高強度鋼繊維を混入したコンクリートの曲げ強度が最も高く、繊維を混入しないプレーンコンクリートの約2倍となった。

(5) 破壊エネルギー

破壊エネルギーの測定は、JCI-S-001-2003に準じて行った。破壊エネルギー試験方法は100×100×400mmの角柱供試体に幅5mm、高さ30mmの切り欠きを中央に入れ、中央変位とクリップ型変位計を用いて切り欠き開口幅

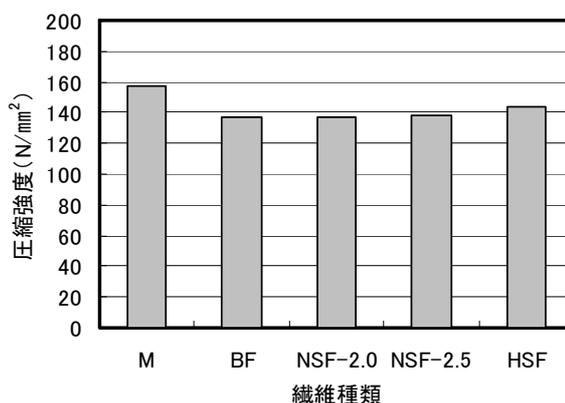


図-4 圧縮強度に及ぼす繊維の影響

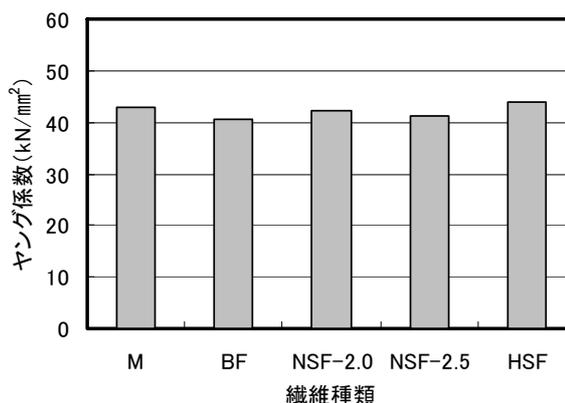


図-5 ヤング係数に及ぼす繊維の影響

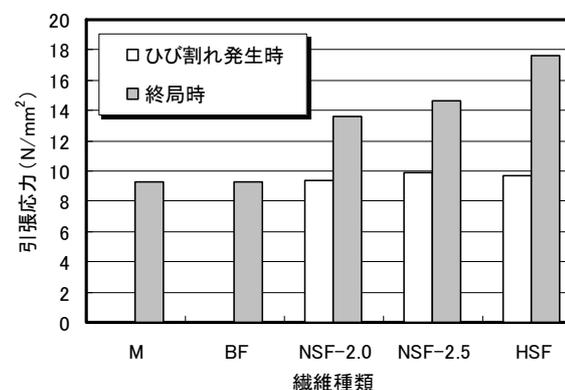


図-6 割裂引張強度に及ぼす繊維の影響

を測定した。

図-8 に中央変位と荷重の関係を各繊維の代表値を示す。その結果、繊維の種類および混入率によって大きく靱性が異なる事が確認できる。コンクリートの靱性と関係する破壊エネルギーを図-9 に示す。この図より、各種のコンクリートの破壊エネルギーは BF, NSF2.0, NSF2.5, HSF の順に大きくなっていることがわかる。これらの試験の結果によると、繊維自体の強度が高いほど、繊維混入量が多いほど、補強されたコンクリートの靱性が高いことが分かる。

(6) 乾燥収縮

乾燥収縮による長さ変化率の試験は、JIS A 1129-3 に準拠して行った。試験の結果を図-10 に示す。繊維無混入のものが材齢 180 日で 600μ と最も大きな収縮量を示し、繊維を混入することにより収縮率が小さくなり、HSF と NSF-2.5 の収縮率が約 480μ と最も小さな収縮率であったことが確認された。これはコンクリートが混入された繊維に拘束され、乾燥収縮が少なくなることと関係する。従って、繊維を混入することにより、コンクリートの引張強度および靱性の向上だけでなく、乾燥収縮の低減による耐久性の向上も期待できると考えられる。

4. まとめ

本研究は、高強度、高靱性、高耐久性を有した高強度繊維補強コンクリートの開発を目指して、コンクリートの特性に及ぼす使用材料の影響を検討した結果、以下の結果が得られた。

- (1) 中庸熟ポルトランドセメントとシリカフェーム混和材を用いたコンクリートは、他の結合材を用いたコンクリートに比べ、流動性だけではなく、初期強度と長期強度ともに高い値が示しているため、高強度繊維補強コンクリートの結合材として妥当と考えられる。
- (2) 粗骨材寸法 5 mm の硬質砂岩骨材を用いたコンクリートは 160 N/mm^2 と高い圧縮強度があるため、この骨材は高強度繊維補強コンクリートに適している。
- (3) 60°C の蒸気養生方法は、 20°C の水中養生と 90°C の蒸気養生方法に比べ、養生されたコンクリートの圧縮強度が比較的高いため、高強度繊維補強コンクリートの養生方法として最適である。
- (4) 鋼繊維または高強度鋼繊維を用いたコンクリートは高強度、高靱性、および低乾燥収縮などの特性がある。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004

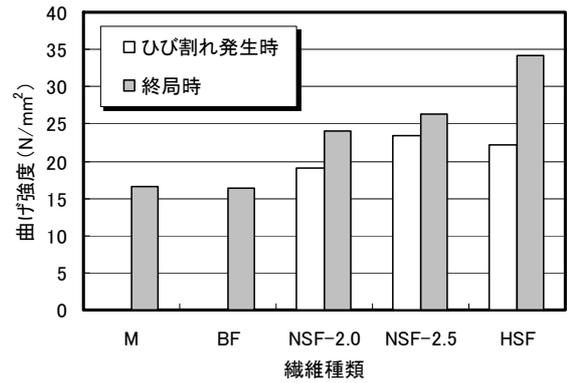


図-7 曲げ強度に及ぼす繊維の影響

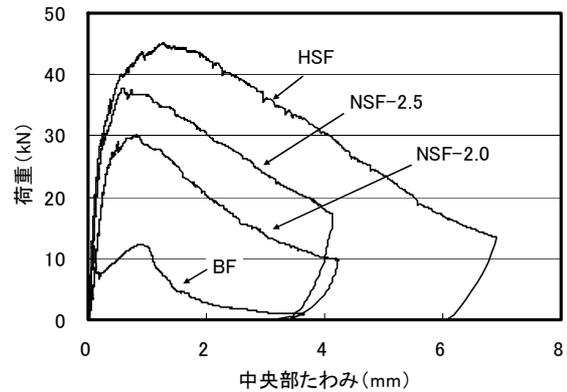


図-8 中央変位と荷重の関係

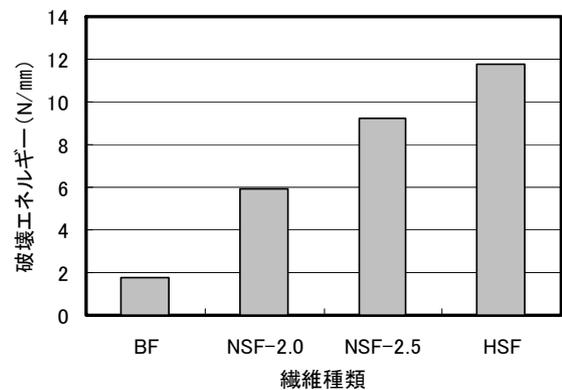


図-9 破壊エネルギーに及ぼす繊維の影響

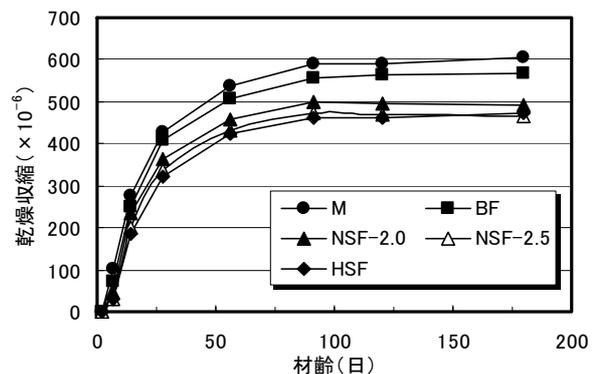


図-10 乾燥収縮に及ぼす繊維の影響

