

論文 高強度コンクリートの力学特性に与える鋼繊維の影響

佐々木 亘^{*1}・芦塚 憲一郎^{*2}・出口 宗浩^{*3}・谷口 秀明^{*4}

要旨: $W/B=30\%$ および 25% の高強度コンクリートに対する鋼繊維の補強効果について検討を行った。実験の結果、圧縮強度に与える鋼繊維の影響は小さいこと、鋼繊維の混入に伴う単位粗骨材絶対容積の低減により静弾性係数は低下する傾向にあること、粗骨材最大寸法 20mm のコンクリートに対して繊維長 22mm の極細鋼繊維を用いても補強効果が期待できること、 W/B が小さいほうが鋼繊維によるせん断強度の増加が大きいこと、コンクリート 1m^3 中に含まれる短繊維の表面積が大きいほど曲げじん性係数やせん断強度が大きくなることなどがわかった。

キーワード: 鋼繊維, 高強度コンクリート, せん断強度, 曲げ強度, 曲げタフネス

1. はじめに

近年、コンクリートの高強度化に関する技術の進歩により、高強度コンクリートがPC上部工等の実部材に適用される事例が増えている^{たとえば, 1)}。高強度コンクリートの適用により、部材の薄肉化・軽量化, プレストレスの効率化等のメリットが生じる。一方、部材断面の薄肉化が進むと、補強鉄筋が密に配置されコンクリートの充填が難しくなることや、補強鉄筋そのものの配置が難しくなることも可能性として考えられる。このような状況に対し、超高強度繊維補強コンクリート²⁾(以下, UFC)が実用化され、道路橋への適用³⁾も始まっている。

UFCは粒径の小さい細骨材を使用したモルタルであるが、コンクリートはモルタルに比べて、収縮やクリープが小さく寸法安定性に優れることや、セメント量を少なくできるため、水和発熱が低減できるといった特長がある。また、現状では、UFCのように設計基準強度 180N/mm^2 までの高強度を必要とする構造物は少ない。このため、通常のコンクリートからUFCで対象とする圧縮強度までの間を補完する短繊維補強コンクリートの技術が確立すれば、様々な用途に広く展開できるものと考えられる。しかし、鋼繊維補強コンクリートの設計施工指針(案)⁴⁾(以下, 指針案)や鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル⁵⁾(以下, マニュアル)といった、現状発刊されている短繊維補強コンクリートの設計施工に関する指針類は、水セメント比が 50% 程度のコンクリートを対象としたものであり、前述のような高い強度域を対象とした短繊維補強コンクリートの検討もなされてはいるものの^{たとえば, 6)}、必ずしも十分とは言えない。

筆者らの一部は、設計基準強度が 180N/mm^2 までに達しない範囲で比較的高い強度域における、鋼繊維, PVA

繊維,あるいはアラミド繊維を用いた短繊維補強コンクリートの品質を確認してきた^{7),8),9)}。本稿では、主としてコンクリート自体のせん断強度の増加に着目し、鋼繊維を用いた設計基準強度 $80\sim 100\text{N/mm}^2$ に相当する高強度繊維補強コンクリートの力学特性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

検討を行った短繊維の特性を表-1に示す。本実験では短繊維として、力学特性に優れ、また、比較的容易に入手が可能である鋼繊維を用いた。普通鋼繊維はトンネル覆工等で用いられている一般的なものであり、両端にフック状の加工がされている。高強度鋼繊維は普通鋼繊維と形状は同一であるが、引張強度が高く繊維径は小さい。指針案およびマニュアルに基づいて粗骨材最大寸法を考慮し、それらの繊維長はいずれも 30mm とした。一方、極細鋼繊維は繊維長が 22mm とやや小さいが、繊維径が非常に小さくアスペクト比が相当に大きい。

表-2に短繊維以外の使用材料を示す。骨材は高強度コンクリートでの使用実績のあるものである。高性能AE減水剤は高い減水性能を有する高強度コンクリート用のものを用いた。また、空気量は空気量調整剤によって調整した。

表-1 使用した短繊維

種類	繊維径 (mm)	繊維長 (mm)	アスペクト比	引張強度 (N/mm ²)
普通鋼繊維	0.62	30	48	1100
高強度鋼繊維	0.38	30	79	2610~3190
極細鋼繊維	0.20	22	110	2000以上

*1 三井住友建設(株) 技術開発センター 土木材料グループ 修(工) (正会員)

*2 西日本高速道路(株) 九州支社 建設事業部 構造技術課 課長

*3 西日本高速道路(株) 中国支社 保全サービス事業部 改良課

*4 三井住友建設(株) 技術開発センター 土木材料グループ 上席研究員 博(工) (正会員)

2.2 コンクリートの条件

表-3 にコンクリートの配合を示す。水結合材比(W/B)は 30%および 25%とし、結合材としては W/B=30%では普通ポルトランドセメント、W/B=25%では普通ポルトランドセメントおよびシリカフェームを用いた。シリカフェームの置換率(SF/B)は既往の研究¹⁰⁾を参考に、10%とした。

コンクリート標準示方書¹¹⁾(以下、示方書)では高強度コンクリートの流動性状として、スランプ 18~21cm、スランプフロー500mm~650mmを標準としている。流動性は施工条件に応じて設定する必要があるが、本実験でのスランプは 18cm 以上を得ることを目標とした。

マニュアルを参考とすると、短繊維の混入により単位水量は相当に増加することが予想される。しかし、本実験では上記のように W/B が小さいため、単位水量の増加に伴い、単位結合材量が相当に増加する。このことから、

表-2 使用材料

材料	種類	産地、物性、成分	密度	記号
水	上水道水	千葉県流山市	1.0	W
結合材	セメント	普通ポルトランドセメント、比表面積 3360cm ² /g	3.15	C
	混和材	エジプト産シリカフェーム、BET 比表面積 16.2m ² /g	2.25	SF
細骨材	山砂	千葉県富津産、吸水率 2.56%、F.M.2.01	2.59	S1
	砕砂	茨城県岩瀬産硬質砂岩、吸水率 1.47%、F.M.2.93	2.62	S2
粗骨材	砕石 2005	茨城県岩瀬産硬質砂岩、吸水率 0.82%、F.M.6.58	2.65	G
化学混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物	-	SP
	空気量調整剤	ポリアルキレングリコール誘導体	-	Ad

注) 骨材の密度は表乾密度である。

単位水量は、示方書に示される通常のコンクリートにおける標準値の上限 175kg/m³を基本としたが、極細鋼繊維 1.0%および高強度鋼繊維 1.5%では、所定の流動性を得るためには単位水量を 200kg/m³とする必要があった。

単位粗骨材絶対容積は、短繊維を混入しないコンクリートにおいて W/B=30%では 0.350m³/m³、W/B=25%では 0.330m³/m³とし、短繊維混入率を増加させるに伴い、単位粗骨材絶対容積を減じた。ただし、コンクリートの範囲とするため、その最小値は 0.200m³/m³とした。比較として、W/B=25%、高強度鋼繊維 1.5%の条件では粗骨材を用いないモルタルについても検討を行った。

空気量の設計値は、示方書に示される設計基準強度 80N/mm²の場合の標準値に準じ、3.5%とした。

2.3 実験方法

公称容量 100L の強制 2 軸ミキサにより、コンクリートの練混ぜを行い、ただちにフレッシュ性状の確認および硬化コンクリートの品質確認のための供試体の製作を行った。各供試体は材齢 1 日で脱型後、材齢 28 日まで標準水中養生を行い強度試験に供した。硬化コンクリートの品質は、鋼繊維補強コンクリートの圧縮強度および圧縮タフネス試験(JSCE-G551)、曲げ強度および曲げタフネス試験(JSCE-G552)、せん断強度試験(JSCE-G553)により確認を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 短繊維の種類および混入率が力学特性に与える影響

表-3 に強度試験結果の一覧を示す。

(1) 圧縮強度

図-1 に短繊維混入率と圧縮強度比の関係を示す。ここ

表-3 コンクリートの配合と強度試験結果

W/B (%)	単位水量 (kg/m ³)	結合材の種類	単位粗骨材絶対容積 (m ³ /m ³)	短繊維		強度試験結果							
				種類	混入率 Vf (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮じん性係数 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	せん断強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	曲げじん性係数 (N/mm ²)
25.0	175	C+SF	0.330	なし	0	129.4	-	41.4	0.222	11.84	10.66		-
	175		0.225	普通鋼繊維	1.50	116.5	57.48	39.5	0.203	20.93	11.50	10.62	7.71
	175		0.250	高強度鋼繊維	0.75	120.4	80.16	39.9	0.212	19.09	11.26	10.51	8.40
	200		0.200		1.50	122.5	74.11	40.1	0.233	26.03	15.41	11.29	13.23
	250		0	1.50	110.7	51.86	35.0	0.206	24.39	19.57	9.98	16.67	
	175		0.225	極細鋼繊維	0.50	126.5	76.40	40.2	0.216	17.99	10.88	10.09	8.96
	175		0.200		0.75	129.7	79.13	40.5	0.217	21.47	12.31	10.14	11.09
	200		0.200		1.00	129.1	69.68	40.5	0.229	24.52	13.26	10.47	12.07
30.0	175	C	0.350	なし	0	94.1	-	39.2	0.213	11.67	8.12		-
	175		0.250	普通鋼繊維	1.00	89.5	54.10	37.7	0.215	14.37	8.13	7.23	6.20
	175		0.225		1.50	91.3	61.90	38.0	0.213	17.79	9.35	7.24	7.95
	175		0.200		2.00	93.9	61.99	37.8	0.215	17.55	11.13	7.56	8.47
	175		0.250	高強度鋼繊維	0.50	95.6	58.61	37.9	0.212	15.91	11.16	9.65	8.05
	175		0.200		1.00	99.7	60.04	39.0	0.228	18.02	12.44	8.34	10.76
	200		0.200		1.50	96.9	68.36	37.0	0.230	19.48	12.43	8.19	10.99

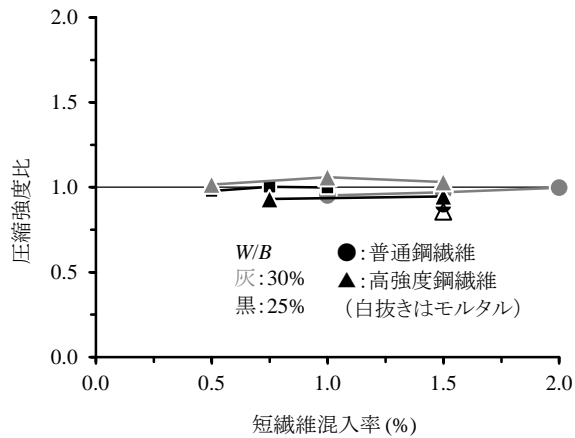


図-1 短繊維混入率と圧縮強度比の関係

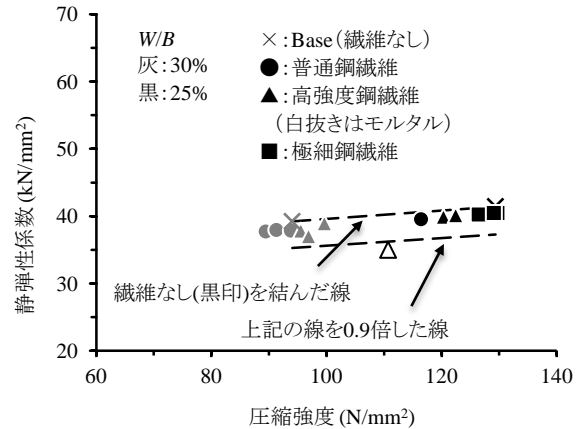


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

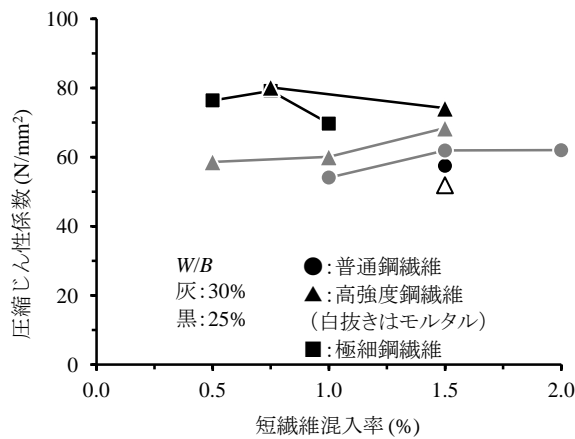


図-2 短繊維混入率と圧縮じん性係数の関係

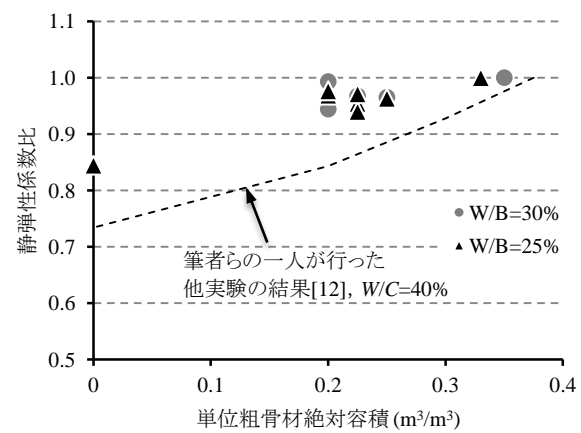


図-4 単位粗骨材絶対容積と静弾性係数比の関係

で、圧縮強度比とは、各配合のコンクリートの圧縮強度を、同一の水結合材比で短繊維を混入しないコンクリートの圧縮強度で除した値である。この図より、モルタル配合では圧縮強度が若干小さいものの、圧縮強度比はおおむね0.9~1.1であった。本実験の範囲内では鋼繊維の混入による圧縮強度への影響は、後述の曲げ強度やせん断強度に比べれば非常に小さいことがわかった。

(2) 圧縮じん性係数

図-2 に短繊維混入率と圧縮じん性係数の関係を示す。W/B=30%では、普通鋼繊維、高強度鋼繊維それぞれにおける短繊維混入率 1.0~1.5%において、短繊維混入率の増加に伴い圧縮じん性係数もわずかに増加しているが、全体的にはほぼ同程度である。一方、W/B=25%においては、短繊維混入率の増加に伴う圧縮じん性係数の増加はみられず、高強度鋼繊維を 1.5%、極細鋼繊維を 1.0%使用した場合には圧縮じん性係数が低下している。さらに、普通鋼繊維 1.5%やモルタル配合の場合には W/B=30%の配合と比べて圧縮強度は高いにも関わらず、圧縮じん性係数は同程度となっている。これらのことより、短繊維混入率の増加や W/B の低減により必ずしも圧縮じん性係数は増加せず、低下する場合もあることがわかる。

(3) 静弾性係数

図-3 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中の破線は、W/B=30%および25%の短繊維を混入しないコンクリートの静弾性係数を結んだもの、およびそれを0.9倍したものである。短繊維を混入したコンクリートの静弾性係数は、短繊維を混入しないコンクリートの0.9~1.0倍の間にあり、モルタル配合では0.9倍を下回った。本実験では、表-3に示すように、良好なフレッシュ性状を得るため、短繊維混入率の増加に伴って単位粗骨材絶対容積を減じている。一般に、同一の粗骨材を用いた場合、その単位量がコンクリートの静弾性係数に与える影響は大きい。筆者らは短繊維としてPVA繊維を用いた場合に、単位粗骨材絶対容積の減少に伴い静弾性係数も小さくなることを報告している⁷⁾。

単位粗骨材絶対容積と静弾性係数比の関係を図-4に示す。ここで、静弾性係数比とは、各配合のコンクリートの静弾性係数を、同一の水結合材比で短繊維を混入しないコンクリートの静弾性係数で除した値である。図中の破線は、筆者らの一人が実施したPVA繊維を含まないコンクリート(W/C=40%)において、単位粗骨材絶対容積とヤング係数の関係を調べた実験結果¹²⁾である。文献12)

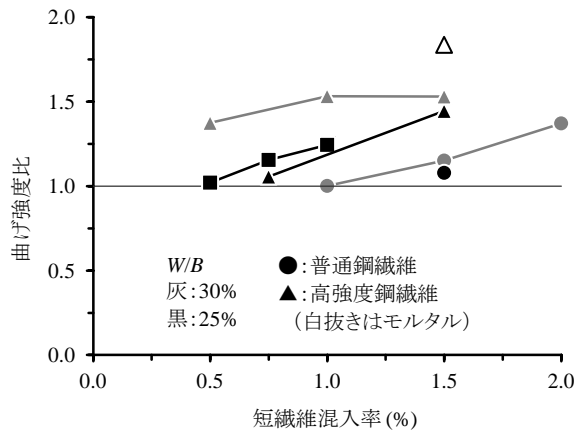


図-5 短繊維混入率と曲げ強度比の関係

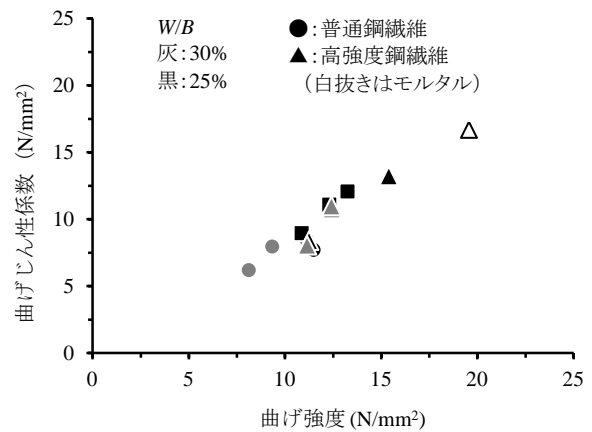
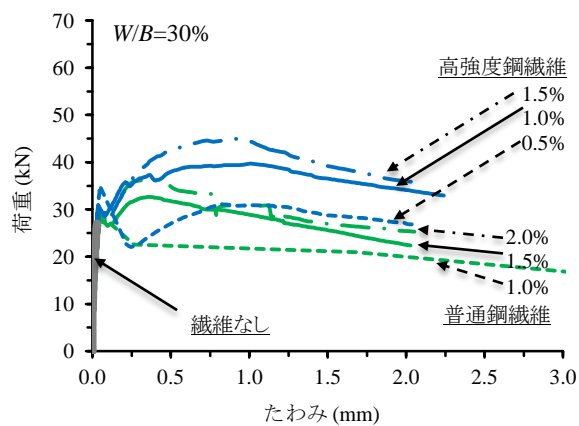
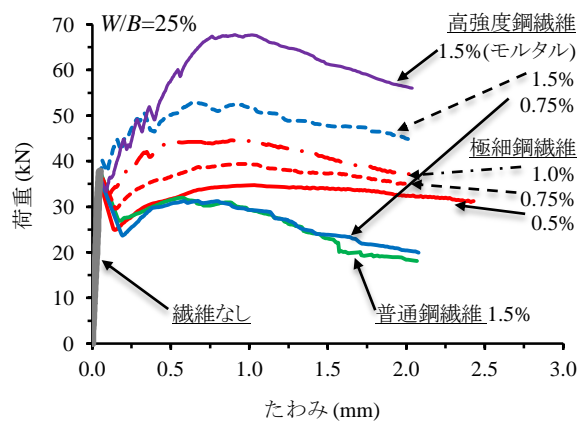


図-7 曲げ強度と曲げじん性係数の関係



(a) 水結合材比 30%



(b) 水結合材比 25%

図-6 曲げ強度試験における荷重-たわみ曲線

のデータに比べると本実験結果の静弾性係数比は大きいですが、単位粗骨材絶対容積の低減に伴う静弾性係数比の低下の傾きは同程度となっている。静弾性係数比が大きいのは、基準となる短繊維を用いないコンクリートの単位粗骨材絶対容積が小さいためであると考えられる。

以上より、静弾性係数は粗骨材の影響が大きく、短繊維の混入そのものの影響は小さいことがわかった。

(4) 曲げ強度

図-5 に短繊維混入率と曲げ強度比の関係を示す。ここで、曲げ強度比とは、各配合のコンクリートの曲げ強度を、同一の水結合材比で短繊維を混入しないコンクリートの曲げ強度で除した値である。この図より、短繊維の種類および W/B によって、曲げ強度が増加に転じる短繊維混入率が存在することがわかる。すなわち、短繊維混入率が、普通鋼繊維では W/B によらず 1.0%、高強度鋼繊維では $W/B=30\%$ の場合 0~0.5%、 $W/B=25\%$ の場合 1.0%、極細鋼繊維では 0.5% 以上において、短繊維混入率の増加に伴って曲げ強度も増加している。極細鋼繊維は粗骨材の最大寸法 20mm に対し、繊維長が 22mm と一般的な見解¹¹⁾に対して短いですが、十分に補強効果が期待できることがわかった。

図-6 に曲げ強度試験における荷重-たわみ曲線の一例を示す。この図からわかるように、曲げひび割れを発生する荷重は短繊維の種類や混入率によらず、短繊維を混入しないコンクリートの最大荷重とほぼ同程度の値となるが、その後の挙動が短繊維の種類や混入率によって大きく異なる。ひび割れ発生後、短繊維の架橋効果によりたわみの増加に伴う荷重の回復がみられるが、短繊維混入率の増加させることで荷重の増加が大きくなり、ひび割れ発生荷重を上回る。曲げ強度はこの荷重-たわみ曲線における最大荷重に対する値であるため、先述のような短繊維混入率に対する曲げ強度の変化がみられることになる。一方、モルタル配合とした場合、短繊維の種類および混入率、 W/B が同じ条件のコンクリートと比較して曲げ強度が大きい。これは、粗骨材が存在しないこと、およびそのために短繊維が断面内に均一に分散していることによるものと推察される。

図-7 に曲げ強度と曲げじん性係数の関係を示す。この図より、曲げ強度が増加するに伴って曲げじん性係数も大きくなることがわかる。曲げじん性係数は荷重-たわみ曲線下の面積より求められる。本実験の範囲では、図

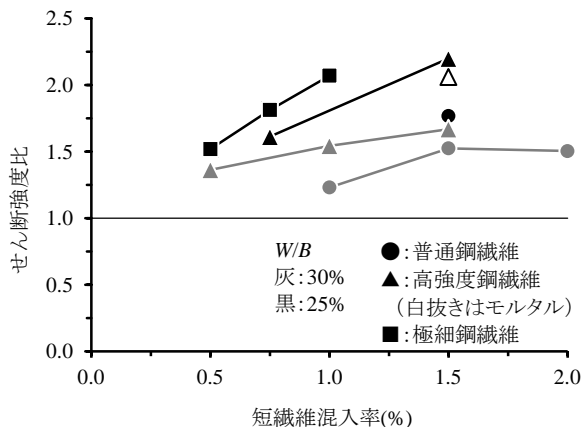


図-8 短繊維混入率とせん断強度比の関係

-5に示したように、ひび割れ発生後の最大荷重が曲げひび割れ発生荷重を超えないために、曲げ強度が短繊維を用いないコンクリートと同程度であるものが、それぞれ短繊維混入率の最も小さい1水準のみである。換言すると、ひび割れ発生後の最大荷重から曲げ強度が求められるものがほとんどであった。このため、曲げ強度と曲げじん性係数は直線関係を示した。短繊維混入率を本実験の水準より小さくすると、曲げ強度が短繊維混入率によらず概ね一定になると考えられ、そのような条件では、曲げ強度は一定のまま、短繊維混入率の増加に従って曲げじん性係数が増加するものと考えられる。

(5) せん断強度

図-8に短繊維混入率とせん断強度比の関係を示す。ここで、せん断強度比とは、各配合のコンクリートのせん断強度を、同一の水結合材比で短繊維を混入しないコンクリートのせん断強度で除した値である。

表-3に示すように、短繊維を混入しないコンクリートのせん断強度はW/Bによらず同程度であった。圧縮強度は35N/mm²程度の差を有するが、この程度の差であればせん断強度に与える影響は小さいことがわかった。しかし、短繊維を混入した場合のせん断強度は大きく異なり、図-8から、W/Bが小さい方が短繊維によるせん断強度への補強効果が大きい。短繊維混入率を大きくするほどせん断強度も大きくなるが、普通鋼繊維を用いた場合、W/B=30%では短繊維混入率1.5%程度で頭打ちとなった。高強度鋼繊維および極細鋼繊維では短繊維混入率0.5%~1.0%または1.5%まで直線的にせん断強度も増加しているが、W/B=25%の方がその割合が大きく、高強度鋼繊維1.5%、極細鋼繊維1.0%で、短繊維を混入しないコンクリートの2倍以上のせん断強度が得られることがわかった。モルタル配合では、短繊維の種類および混入率が同一のコンクリートと比べて若干せん断強度が低下した。このことから粗骨材がコンクリートのせん断強度に寄与していることが推察されるが、鋼繊維による補強効

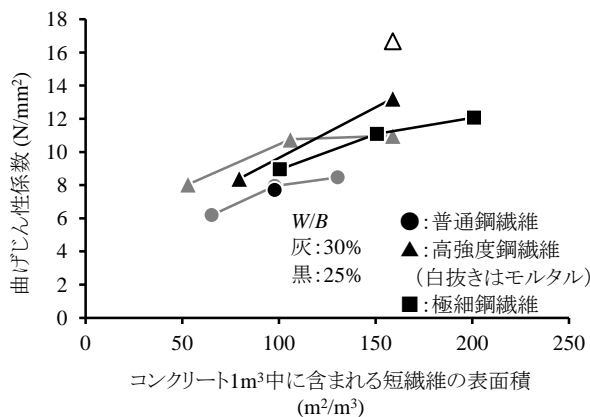


図-9 コンクリート 1m³ 中に含まれる短繊維の表面積と曲げじん性係数の関係

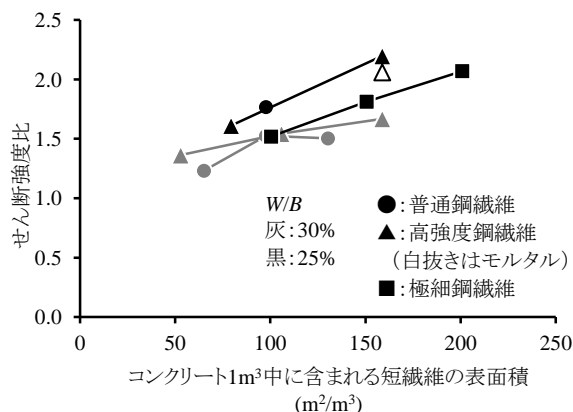


図-10 コンクリート 1m³ 中に含まれる短繊維の表面積とせん断強度比の関係

果に比べれば、その影響は小さい。

3.2 コンクリート 1m³ 中に含まれる短繊維の総表面積が力学特性に与える影響

図-5および図-8において、同一の短繊維混入率で比較すると、繊維径の小さい短繊維ほど補強効果が高いようである。そこで、繊維径と短繊維混入率を併せて考慮するため、コンクリート 1m³ 中に含まれる短繊維の総表面積（以下、表面積）を用いて整理を行った。図-9に表面積と曲げじん性係数の関係を、図-10に表面積とせん断強度比の関係を示す。

図-9より、表面積が大きいほど曲げじん性係数が大きくなるのがわかるが、任意の表面積における曲げじん性係数は、高強度鋼繊維、極細鋼繊維、普通鋼繊維の順に大きい。普通鋼繊維に比べて極細鋼繊維、高強度鋼繊維のほうが曲げじん性係数が大きいのは、短繊維自体の引張強度が影響していることが考えられる。さらに、高強度鋼繊維はフック加工がされているのに対し、極細鋼繊維は表面に付着を高めるような加工はされておらず、このようなコンクリートとの付着力との差が曲げじん

性係数の差異に表れている可能性がある。また、普通鋼繊維および高強度鋼繊維に着目すると、 W/B の影響は、短繊維の種類の影響に比べると小さいようである。

せん断強度についても、図-10より、表面積が大きいほどせん断強度比も大きくなるのがわかる。普通鋼繊維および高強度鋼繊維に着目すると、曲げじん性係数とは反対に、短繊維の種類による影響は小さく、 W/B ごとに表面積とせん断強度比の間に相関がみられる。しかし、 $W/B=25\%$ における極細鋼繊維を使用した場合については、任意の表面積におけるせん断強度比は普通鋼繊維および高強度鋼繊維に比べて小さい。これは、図-9の曲げじん性係数の場合と同様に、機械的な付着を高める加工の有無が、せん断強度へ影響を与えていると推察される。

4. まとめ

本実験では設計規準強度 $80\sim 100\text{N/mm}^2$ に相当する高強度コンクリートの力学特性に与える鋼繊維の影響について検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 鋼繊維の混入率が圧縮強度や静弾性係数へ与える影響は小さいが、単位粗骨材絶対容積の低減により静弾性係数は低下する傾向にある。
- (2) 圧縮じん性係数は短繊維混入率を高めてもほとんど増加せず、低下する場合もある。
- (3) 曲げ強度は短繊維混入率の増加により大きくなるが、曲げひび割れ発生強度へ与える鋼繊維の影響は小さい。鋼繊維の混入に伴いひび割れ発生後の荷重増加が大きくなり、曲げ強度および曲げじん性係数が大きくなる。
- (4) 極細鋼繊維は粗骨材の最大寸法に比べて繊維長が若干短い、十分な補強効果が期待できる。
- (5) 短繊維を用いないコンクリートではせん断強度に与える W/B の影響は小さいが、鋼繊維の混入によるせん断強度の増加は、 W/B が小さい方が大きい。
- (6) コンクリート 1m^3 中に含まれる短繊維の表面積に着目すると、短繊維の表面積が大きいほど曲げじん性係数およびせん断強度は大きくなる。そのうえで、 W/B および鋼繊維の種類の影響については、曲げじん性係数においては鋼繊維の種類の影響が、せん断強度においては W/B の影響が、それぞれ卓越する

ことがわかった。

参考文献

- 1) 長田光司, 柳井修司: 高速道路橋における高強度コンクリートの製造・施工 (中部地方), コンクリート工学, Vol.48, No.1, 2010.1
- 2) 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), 2004.9
- 3) 石井精一, 西村一博, 児山裕樹, 一宮利通: 超高強度繊維補強コンクリートの道路橋への適用事例, 第15回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.13-16, 2006.10
- 4) 土木学会: 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針 (案), 1983.3
- 5) 鋼材倶楽部: 鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル (トンネル編), 1995.8
- 6) 牛田耕悟, Nasir, S, 上原匠, 梅原秀哲: 高強度コンクリートの鋼繊維補強に対する繊維形状および混入率の影響, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp13-23, 2004.5
- 7) 佐々木亘, 谷口秀明, 樋口正典: PVA 短繊維を用いた早強コンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp250-255, 2012.7
- 8) 佐々木亘, 谷口秀明, 樋口正典, 宮川豊章: 高強度コンクリートの力学特性に及ぼす各種短繊維の影響, 第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.549-554, 2012.10
- 9) 佐々木亘, 谷口秀明, 樋口正典, 宮川豊章: アラミド短繊維を用いた高強度繊維補強コンクリートの力学特性および収縮性状, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第12巻, pp215-222, 2012.11
- 10) 河上浩司, 西本好克: $F_c100\text{N/mm}^2$ 級の高強度コンクリートの強度発現に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp369-374, 2002
- 11) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】, 2008.3 谷口秀明: テストハンマーによる構造体コンクリートの強度推定法に関する研究, 筑波大学学位論文, 2007.3