

[2] 鋼繊維補強コンクリートのせん断強度に関する検討

正会員 河野 清 (徳島大学工学部)
 正会員 ○堀井 克章 (徳島大学工学部)
 正会員 雪本 清浩 (栄和設計事務所)
 五藤 康人 (五藤建設)

1. まえがき

鋼繊維補強コンクリートは、コンクリートの引張強度、曲げ強度、靱性、衝撃抵抗性、ひびわれ抵抗性などを改善するので、これらの特性を生かして、トンネルライニング、舗装コンクリート、オーバーレイ、ショットクリートなどに実用されている。しかし、構造材料としてより一層実用化を進めるためには、せん断強度、耐久性、すりへり抵抗性、疲労特性などの十分に究明されていない諸性質を明らかにし、また、これらの特性を評価する試験方法を確立する必要がある。

したがって、市販の2種の鋼繊維を用いて、今迄に比較的研究結果の少ないせん断強度を取りあげ、まず、一面せん断試験法と二面せん断試験法とについて比較を行ったのち、試験の容易な二面せん断試験法を用いて、粗骨材の最大寸法、繊維混入率、アスペクト比などの諸要因がせん断強度に及ぼす影響を調査した。また、同時に求めた曲げ強度、圧縮強度なども比較し、両者の関係についても考察を行った。

2. 実験の概要

(1) 使用材料

鋼繊維は、主として円形断面のカットワイヤー(記号CW)と比較用に矩形断面のせん断ファイバー(SF)を用いた。繊維長はカットワイヤーが20, 30, 40 mmの3種、せん断ファイバーは25 mmとした。(表-1参照)

表-1 使用鋼繊維の品質

種類	寸法 (mm)	引張強度 (kgf/mm ²)	比重	アスペクト比
カットワイヤー(CW)	φ0.5 x 20, 30, 40	124	7.85	40, 60, 80
せん断ファイバー(SF)	□0.21 x 0.60 x 25	120	7.85	62.4

セメントは、普通ポルトランドセメント(比重=3.16, ブレーン比表面積=3120 cm²/g, 28日圧縮強さ=408 kgf/cm²)を用いた。使用細骨材は、徳島県吉野川産の川砂(比重=2.64, 吸水率=1.76%, 粗粒率=3.22)とし、粗骨材としては、最大寸法10 mmの吉野川砂利(比重=2.65, 吸水率=1.23%, 粗粒率=6.00)を主として用い、最大寸法の影響を調査する場合には、大麻町産の玉砕石(比重=2.65, 吸水率=1.64%, 最大寸法=25 mm)を10, 15, 20, 25 mmふるいでふるい分けて使用した。なお、ワーカビリティを改善し、単位水量を低減するためにリグニスルホン酸塩系のAE減水剤を用いた。

(2) コンクリートの配合

繊維混入率をかえた場合、表-2に示すようにスランブ一定およびマトリックス一定の2種のグループの配合を用い、混入率はカットワイヤーとせん断ファイバーともに1.0%volおよび2.0%volとした。また、カットワイヤーを用いマトリックス一定の場合について、粗骨材の最大寸法とアスペクト比をかえた配合の概略値は表-3のとおりである。なお、すべての配合とも、AE減水剤をセメント量に対して0.25%添加した。

表-2 鋼繊維の種類と繊維混入率をかえたコンクリートの配合

実験シリーズ	配合の種類	粗骨材最大寸法 (mm)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
							W	C	S	G	SF	AE-WR Agent
繊維混入率 (スランブ一定の場合)	PL	10	8	5	55	65	192	350	1110	600	0	0.875
	CW 1.0	10	8	5	57	65	200	350	1079	583	78.5	0.875
	CW 2.0	10	8	5	63	65	220	350	1028	556	157	0.875
	SF 1.0	10	8	5	58	65	203	350	1074	581	78.5	0.875
	SF 2.0	10	8	5	65	65	228	350	1014	548	157	0.875
繊維混入率 (マトリックス一定の場合)*	PL	10	15	5	57	65	200	350	1097	593	0	0.875
	CW 1.0	10	8	5	57	65	198	347	1087	587	78.5	0.867
	CW 2.0	10	2	5	57	65	196	343	1075	581	157	0.858
	SF 1.0	10	8	5	57	65	198	347	1087	587	78.5	0.867
	SF 2.0	10	2	5	57	65	196	343	1075	581	157	0.858

注) * 一面せん断および二面せん断試験にも使用

(3) コンクリートの練りませと供試体の作製

鋼繊維補強コンクリートの練りませには、容量50ℓの強制練りミキサを用いた。最初に細骨材とセメントを入れ、水を加えながら攪拌し、同時にファイバー散布機で鋼繊維を投入して1分間モルタルを練りませた。ミキサを止めて粗骨材を投入し、さらに1分30秒間練りませを行った。ミキサから排出後、スランブおよび空気量の試験を行った。

二面せん断強度、曲げ強度および圧縮強度試験用供試体の作製には、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ はり型枠を、一面せん断強度試験用供試体の成形には $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}$ 立方型枠を用い、一層に詰めて棒形振動機を用いて締固めを行った。締固め成形後、型枠のまま20℃恒温室に移して表面仕上げを行ったのち、翌日脱型して、所定材令の28日まで20℃水中養生に移した。

(4) コンクリートのせん断強度、曲げ強度および圧縮強度試験

材令28日で水槽より取り出した供試体は、まず中央集中荷重法による曲げ強度試験を行ったのち、長い方はり折片を二面せん断試験装置にセットして、図-1(1)のような状態でせん断試験に供した。また、短い方はり折片は、 $10 \times 10 \text{ cm}$ の正方形載荷板を上、下面にあてて、圧縮強度試験を行った。

また、一面せん断供試体は、図-1(2)のように段のある面を上下とし、L型の鋼板をかぶせてその周囲に鋼帯を取り付け、ネジで固定し、万能試験機で荷重試験を行ってせん断強度を求めた。なお、供試体数は1種につき3個とし、それらの平均を試験値とした。

3. 実験結果とその考察

カットワイヤーおよびせん断ファイバーについて、これらの混入率を0.1.0および $2.0 \text{ }^{\circ}/\text{vol}$ にかえ、さらにカットワイヤーについてはアスペクト比を3種にかえた配合のコンクリートについて、一面せん断および二面せん断試験を行い、前者の強度を縦軸に後者を横軸にとって示すと、図-2のとおりである。両者の強度は、ほぼ直線上にプロットされており、同程度の値である。また、相関係数も高い値を示しており、いずれの試験法によってもせん断強度に及ぼす要因の影響の評価が可能である。

また、3個の測定値の変動係数を求めると、表-4に示したように両者ほぼ同程度の値であり、ばらつきが比較的小さく良好な結果が得られたのは、粗骨材の最大寸法が10mmであること、とくに一面せん断試験でも良い結果を示しているのは供試体寸法の大きいことも影響していると思われる。試験方法としてどちらを用いてもよいが、二面せん断用のはり供試体は成形が容易であり、せん断試験装置を用いると試験もきわめて簡単である。魚木ら¹⁾も直接二面せん断試験法を用いるのがよいと報告しており、以下の諸要因の影響の考察は二面せん断試験による値によって行った。

表-3 粗骨材の最大寸法とアスペクト比の実験に用いたコンクリートの配合

実験シリーズ	最大寸法 (mm)	アスペクト比	スラブ (cm)	繊維混入率 ($^{\circ}/\text{vol}$)	W/C (%)	q/a (%)	W (kg)	C (kg)	SF (kg)	AE-WR Agent (kg)	
粗骨材の最大寸法 (CW)	10	60	8±2	0,1.0,2.0	54,57,63	65	190,200,220	350	0,78.5,157	0.875	
	20		10±2	0,1.0,2.0	54,57,63	65	190,200,220	350	0,78.5,157	0.875	
	30		12±2	0,1.0,2.0	54,57,63	65	190,200,220	350	0,78.5,157	0.875	
	40		14±2	0,1.0,2.0	54,57,63	65	190,200,220	350	0,78.5,157	0.875	
アスペクト比 (CW)	**	10	40	14±2	1.0,2.0	57,63	65	200,220	350	78.5,157	0.875
	60		8±2	1.0,2.0	57,63	65	200,220	350	78.5,157	0.875	
	80		5±2	1.0,2.0	57,63	65	200,220	350	78.5,157	0.875	

注) * 繊維混入率 $0^{\circ}/\text{vol} \rightarrow \text{W/C} = 54\% \rightarrow \text{W} = 190 \text{ kg}$, 目標空気量 = 5.0%
** 一面せん断および二面せん断の試験にも使用

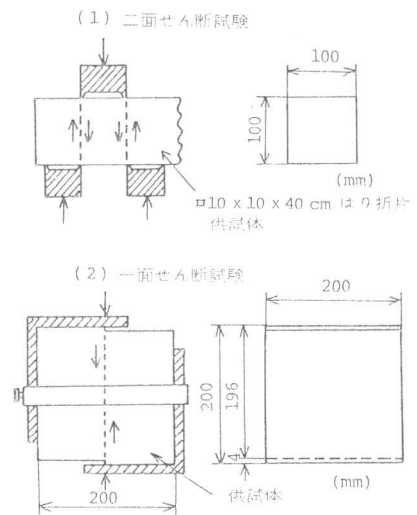


図-1 せん断強度試験方法と供試体

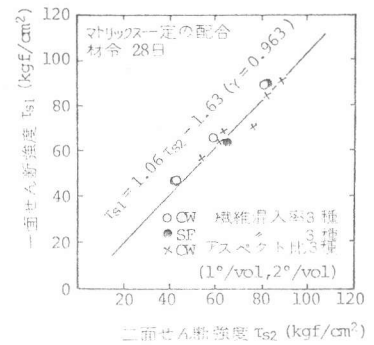


図-2 一面せん断強度と二面せん断強度との比較

表-4 試験値の変動係数 (%)

種類	範囲	平均値
一面せん断強度	0.3 ~ 6.5	4.1
二面せん断強度	1.5 ~ 7.8	4.2

(2) 粗骨材の最大寸法の影響

粗骨材の最大寸法とせん断強度との関係を示した図-3にみられるように、最大寸法 10 mm と 15 mm とでは、差が小さいが、最大寸法が大となるにつれてせん断強度は低下する傾向がある。これは、粗骨材最大寸法が大となると繊維間隔が広がること、マトリックス一定なのでコンクリートのスランブが最大寸法とともに大となることなどの影響と考えられる。同一スランブを得るために最大寸法とともに単位水量を低減した場合、15 mm での強度が最大となる結果が得られている。²⁾

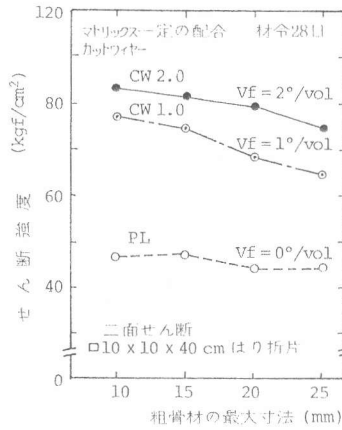


図-3 粗骨材最大寸法とせん断強度

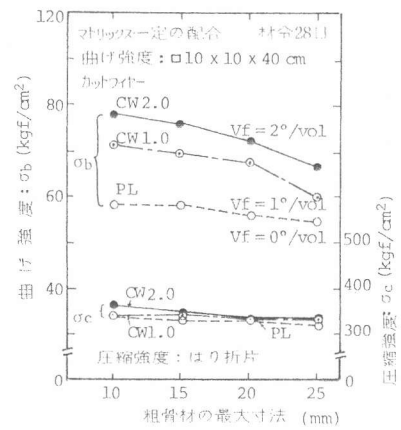


図-4 粗骨材最大寸法と曲げ強度および圧縮強度

図-4のように、曲げ強度に対する粗骨材の最大寸法の影響は、せん断強度の場合とほぼ同様であり、圧縮強度も低下の傾向がみられるがその割合はきわめて少ない。せん断強度や曲げ強度に与える影響、繊維の分散などを考えるとACI Committee 541³⁾の推奨しているように10mmとするか大きくしても15mm程度が適当といえる。

(3) 繊維混入率の影響

繊維混入率がせん断強度、曲げ強度および圧縮強度に及ぼす影響を混入率ゼロの場合を1として、1.0°/vol と 2.0°/vol の場合の相対強度を求め、マトリックス一定とスランブ一定の配合について、そ

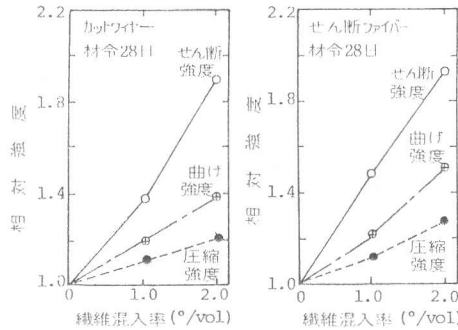


図-5 マトリックス一定の配合における繊維混入率とせん断強度、曲げ強度および圧縮強度

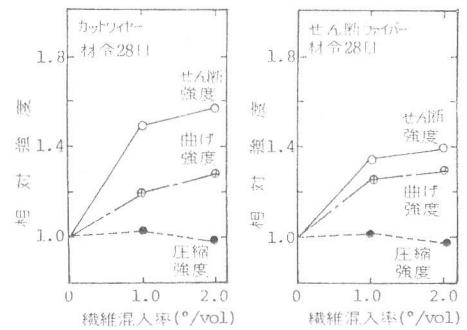


図-6 スランブ一定の配合における繊維混入率とせん断強度、曲げ強度および圧縮強度

れぞれ図-5および図-6に示した。これらの図から明らかなように、他強度に比べてせん断強度の増加率が最大であり、鋼繊維の混入はせん断強度の改善にきわめて効果的であることを示している。マトリックス一定の配合では、繊維混入率とともにスランブが小となるので圧縮強度についても強度増加がみられている。しかし、スランブ一定の配合にすると混入率とともに単位水量が増し、水セメント比が大となるので、せん断強度、曲げ強度とも増加率が低くなり、とくに繊維混入率 2.0°/vol の配合の場合、増加率が低下する傾向がみられ、圧縮強度は混入率ゼロのものより低くなっている。現場における構造物の種類、施工条件等によって所要のスランブは異なるが、鋼繊維を用いると普通コンクリートに比べてスランブはやや大き目の値が推奨されており⁴⁾、配合の経済性や施工性を考えると繊維混入率は1.0°/vol程度か多くても1.5°/volまでが適当と思われる。

なお、繊維混入率の試験で、種類の異なる2種の鋼繊維を使用したので、両者のせん断強度、曲げ強度などを比較すると、図-5と図-6にそれぞれ見られるように大差ない値を示している。

(4) アスペクト比の影響

繊維の長さを容易にかえることのできるカットワイヤーを用いて、その長さを 20, 30, 40 mm にとり、アスペクト比を 40, 60, 80 の3種にかえて、せん断強度に及ぼす影響を調べた結果を図-7に、曲げ強度と圧縮強度を求めた結果を図-8に示した。図-7のようにアスペクト比が大きくなるにつれて、せん断強度は明らかに増加し

ており、これはマトリックスとの付着強度が増し、引抜けに対する抵抗性が大きくなるためと思われる。しかし、繊維混入率が $2.0\%_{vol}$ と多い場合、アスペクト比 80 の繊維を用いると、スランプが小となり、ワーカビリティが劣るので、単位水量を増加し、スランプを大きくすると、強度増加率の低下が予測される。

図-8 のようにマトリックス一定の配合では、曲げ強度も明らかに増加の傾向を示し、圧縮強度は増加率がきわめて低い。

結局、ワーカビリティと施工性を考慮すれば、アスペクト比は 60 かそれよりやや大きい値が適当といえる。

(5) せん断強度と曲げ強度、圧縮強度との関係

同一配合で得られたせん断強度を縦軸に、曲げ強度を横軸にとって両者の関係を示すと、図-9 のとおりである。比較的良い相関がみられ、一次式で示すことが可能であり、曲げ強度からせん断強度の概略値を推定することができる。

せん断強度と圧縮強度との関係は、図-10 のように測定値がばらつき、明瞭な傾向を得ることが困難である。

4. むすび

鋼繊維補強コンクリートを用いてせん断強度試験方法について検討し、粗骨材の最大寸法、繊維混入率、アスペクト比などのせん断強度に及ぼす影響、せん断強度と曲げ強度との関係などについて調査した結果を要約すると、本実験の範囲内で次のことがいえる。

- (1) 一面せん断試験によるせん断強度と二面せん断試験による値とに大差なく、いずれの試験によっても繊維混入率、アスペクト比などの諸要因の影響を求めることができる。
- (2) マトリックス一定の配合で、粗骨材の最大寸法を大きくするとせん断強度および曲げ強度は低下する傾向がみられ、最大寸法は 10~15 mm と小さくするのがよい。
- (3) 繊維混入率によるせん断強度の増加率は、曲げ強度に比べていちじるしく大となり、コンクリートのせん断強度の向上に繊維補強はきわめて効果的である。
- (4) 鋼繊維のアスペクト比が大となると、せん断強度は曲げ強度と同様に増加する。しかし、ワーカビリティの低下することを考慮するとアスペクト比は 60 程度かこれよりやや高い値が適当である。
- (5) せん断強度と圧縮強度との関係は明瞭でないが、せん断強度と曲げ強度の間には比較的良い相関がえられており、両者の関係を一次式で示すことが可能である。

参考文献

- 1) 魚本, 峰松, "コンクリートのせん断強度試験方法に関する基礎的研究", コンクリート工学 Vol. 19, No. 4, pp. 106~117 (Apr., 1981).
- 2) 河野, 吉本, 小林, "鋼繊維補強コンクリートのせん断強度に対する諸要因の影響", 土木学会第35回年次学術講演会講演要集第5部, pp. 129, 130 (Sept. 1980).
- 3) ACI Committee 544, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", Proc. Am. Conc. Inst., Vol. 70, pp. 729~744 (1973).
- 4) 河野, "繊維補強コンクリートについて", 材料 Vol. 26, No. 290, pp. 1061~1071 (Nov., 1977).

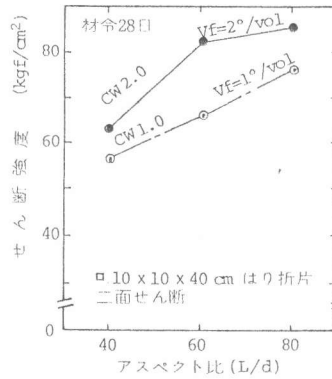


図-7 アスペクト比とせん断強度

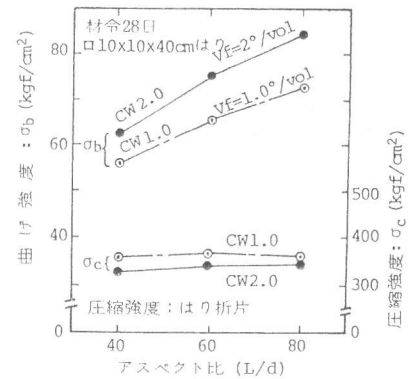


図-8 アスペクト比と曲げ強度、圧縮強度

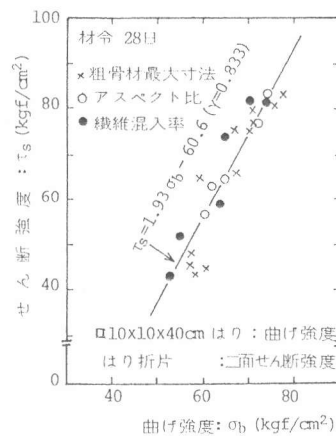


図-9 せん断強度と曲げ強度との関係

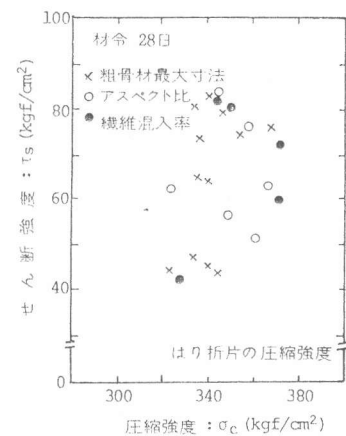


図-10 せん断強度と圧縮強度との関係