

[49] 鋼繊維補強コンクリートのせん断特性

正会員 ○峰 松 敏 和 (日本大学 大 学 院)  
 正会員 小 林 一 輔 (東京大学 生産技術研究所)  
 正会員 魚 本 健 人 (東京大学 生産技術研究所)

1. ま え が き

コンクリートに鋼繊維を混入すると、そのせん断特性が著しく改善されることはよく知られており、この特性をNATMによって掘進するトンネルの1次ライニングや鉄筋コンクリート梁におけるせん断補強等に活用して効果をあげることが期待されている。しかし、鋼繊維補強コンクリートのせん断特性に関する組織的な研究は極めて少なく、従ってせん断特性に及ぼす各種要因の影響もほとんど明らかにされていない。本研究は鋼繊維補強コンクリートのすぐれたせん断特性を活用することを目的とし、せん断強度に及ぼすコンクリートマトリックスの品質並びに繊維自体の品質の影響とせん断変形に及ぼす繊維種類の影響を調べた結果をとりまとめたものである。

本実験に用いたせん断強度試験方法は、図-1に示すような改良を加えた直接二面せん断強度試験方法で、常に一定条件で荷重試験が実施できるような治具を使用した。この試験方法によって得られるせん断強度は二軸応力状態で求めた純せん断強度と良く対応し、さらに破壊性状は、曲げ応力による影響が小さくせん断すれれ変形破壊となることが確かめられている。<sup>1)</sup>

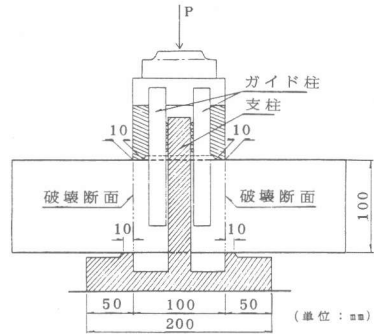


図-1 直接二面せん断強度試験方法

2. 使用材料及び供試体作製方法

実験に用いた繊維は表-1に示す11種類の鋼繊維とポリエチレン繊維の計12種類で、鋼繊維とポリエチレン繊維を混合使用した場合についても検討した。なお、表-1に示した付着強度( $\tau_f$ )はブリケット供試体による繊維の引き抜き試験によって求め、硬度(Hv)はマイクロビッカース硬度計によって求めた。また、鋼繊維のせん断強度( $\sigma_f$ )を図-2に示すような方法によって求めた。

表-1 使用繊維の諸元

繊維の種類	記号	形状寸法 (mm)	引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	付着強度 $\tau_f$ (kg/cm <sup>2</sup> )	硬 度 Hv	せん断強度 $\sigma_f$ (kg/mm <sup>2</sup> )	形状図及び特徴
せん断 繊維	A	0.5×0.5×30	56	19	233.1	58.5	ストレート型
	B	0.35×0.7×30	56	20	223.7	57.2	先端に突起
	C	0.5×0.5×30	70	27	207.4	56.0	両端変形
	D-1	0.5×0.5×30	45	16	244.5	51.7	ストレート型
	D-2		30	16	124.2	36.4	
	カット ワイヤー	E-1	φ0.5×30	123	41	294.6	93.8
E-2		φ0.6×60					
F-1		φ0.4×30	120	—	325.0	85.2	両端にフック
F-2		φ0.6×60					
切羽 繊維	G-1	0.3×1.1×30	105	—	367.0	70.4	表面に複数の線状
	G-2		70	—	—	51.5	
ポリエチレン 繊維	H	φ0.8×40	20	—	—	—	凹変形

セメントは早強ポルトランドセメントを用いたが、空気量の影響を調べる実験に関しては普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材は川砂、粗骨材は最大寸法15mmの碎石を用いた。

コンクリートの配合は、スランプは8±2cmとなるようにこれを定め、細骨材率による影響を調べる場合には

単位水量を一定として細骨材率のみを変化させたのでスランプは一定となっていない。荷重試験を実施した試験材令は早強ポルトランドセメントの場合を2週、普通ポルトランドセメントの場合を4週とし、養生は全て試験材令まで20℃の水中養生を行った。

3. コンクリートマトリックスの品質がせん断強度に及ぼす影響

図-3はせん断強度と繊維混入率との関係を水セメント比別に

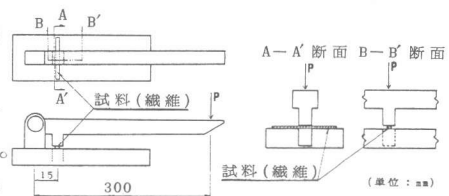


図-2 繊維のせん断強度試験方法

示したものである。この図より明らかなように、いずれの水セメント比においてもせん断強度は繊維混入率の増加に伴って増大し、水セメント比の小さいコンクリートほど繊維による補強効果は大きく、繊維混入率の大きいコンクリートほど水セメント比の変化に伴うせん断強度の増減も大きくなっている。また、繊維混入率の単位増分当りの補強効果は繊維混入率の小さい領域で大きく、繊維混入率が大きくなるに従って小さくなっている。

図-4は鋼繊維補強コンクリートのせん断強度と細骨材率との関係を示したもので、コンシステンシーに基づいて求められた最適細骨材率を採用した場合のせん断強度も同時に示した。この図より、普通コンクリートのせん断強度は細骨材率によって変化し、その値が70%の場合に最大値を示す。

一方、鋼繊維補強コンクリートでは繊維混入率の増加に伴って細骨材率の影響は小さくなるのがわかる。即ち、繊維混入率が大きくなるのに伴って繊維が効果的に働く細骨材率の領域が広がり、40%以上の細骨材率であれば十分なせん断補強効果が期待される。

鋼繊維補強コンクリートのコンシステンシーの面から定まる最適細骨材率に基づく配合を実施してもせん断強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図-5は鋼繊維補強コンクリートのせん断強度と空気量との関係を示したものである。この図より明らかなように、空気量がせん断強度に及ぼす影響は普通コンクリートの場合と同様、鋼繊維補強コンクリートの場合にも認められ、空気量の増加に伴ってせん断強度は減少するが、その程度は普通コンクリートの場合と大差ないことがわかる。即ち、鋼繊維補強コンクリートのせん断強度に及ぼす空気量の影響は普通コンクリートの場合と同程度と考えるとよいと考えられる。

#### 4. 繊維の品質がせん断強度に及ぼす影響

図-6は、表-1において示した繊維の種類が同一で、形状寸法のみ異なる繊維B及びFシリーズを用いた場合のせん断強度と繊維長さとの関係を示したものである。この図より明らかなように、本実験の範囲内においては繊維長さはせん断強度にあまり大きい影響をあたえないこと、及び、繊維Bは繊維Fより相対的に高いせん断強度が得られることがわかる。なお、繊維の種類による強度差に関しては後述の繊維自体の剛性と密接な関係があると思われる。

図-7は繊維とマトリックスの付着強度( $\tau_f$ )とせん断強度との関係を示したものである。この図から明らかなように、鋼繊維補強コンクリートのせん断強度は繊維の付着強度と密接な関係を有しており、付着強度の大きい繊維を用いるほど高いせん断強度が得られている。しかし、繊維とマトリックスの付着強度が同一であっても繊維の剛性が異なる繊維D-1及びD-2においては剛性が大きいD-1の方が高いせん断強度が得られている。

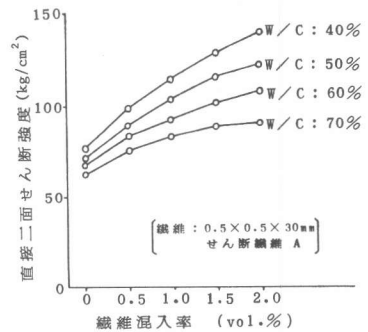


図-3 水セメント比がせん断強度に及ぼす影響

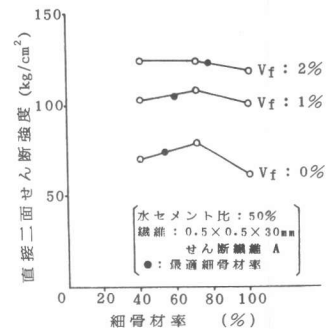


図-4 細骨材率とせん断強度との関係

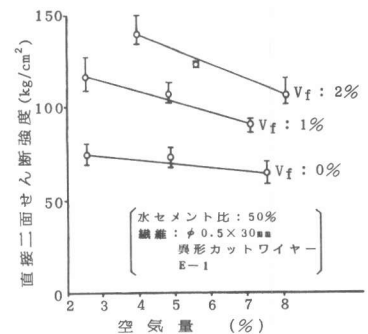


図-5 空気量とせん断強度との関係

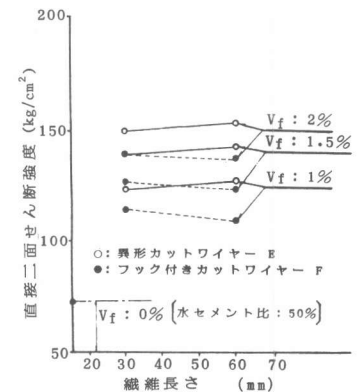


図-6 繊維長させん断強度との関係

図-8及び図-9は繊維の剛性の影響を明らかにするため、繊維の硬度(Hv)及び繊維のせん断強度( $\sigma_f$ )と直接二面せん断強度との関係を示したものである。これらの図より明らかなように、硬度及びせん断強度の大きい繊維を用いた鋼繊維補強コンクリートほど高いせん断強度が得られている。

以上に述べた繊維の付着強度及び剛性とコンクリートのせん断強度との関係を総合的に把握するため、 $Hv \cdot \tau_f$ 、または $\sqrt{\sigma_f \cdot \tau_f}$ 、とせん断強度との関係を示したものが図-10及び図-11である。これらの図より、鋼繊維補強コンクリートのせん断強度はいずれの指標とも相関性があり、特に、後者の場合に相関が高いことがわかる。即ち、せん断強度は付着強度 $\tau_f$ と硬度Hvまたは繊維のせん断強度 $\sigma_f$ との間に $\tau \propto Hv \cdot \tau_f$ または $\tau \propto \log \sqrt{\sigma_f \cdot \tau_f}$ という関係が存在する。

なお、上式で示される繊維自体の特性とせん断強度との関係は、付着強度及び剛性が繊維のどの部分でも均一である場合のみ適用され、例えば、繊維Fのように繊維全体としての付着強度は大きいながらも部分的な付着強度の小さい場合にはこのような明確な関係は成立しない。

図-12は鋼繊維Bとポリエチレン繊維Hによって混成補強した場合のせん断強度特性を示したものである。なお、ここで示した推定値は各々の繊維によるせん断強度の補強増分を加えたものである。この図より明らかなように、異なった種類の繊維を同時に用いることによって得られたせん断強度は各々のせん断強度の増加分を加え合わせた推定値より高いせん断強度が得られている。これは前図に示したようにせん断強度が繊維の付着強度と剛性によって影響されることに起因すると考えられる。即ち、繊維の剛性は大きいが付着強度が小さい鋼繊維と、剛性は小さいが付着強度が大きいポリエチレン繊維を同時に用いることによって混成効果が得られたものと考えられる。

### 5. 繊維の種類がせん断変形に及ぼす影響

図-13は各種繊維を用いた繊維補強コンクリートのせん断荷重-変形曲線の1例を示したものである。なお、この場合のせん断変形は図-1に示した試験方法において治具全体の変形からコンクリートの

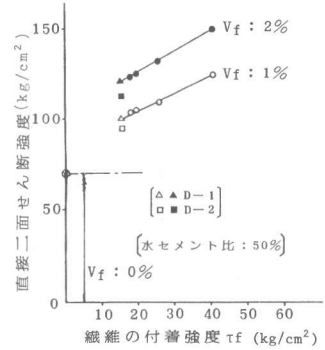


図-7 繊維の付着強度とせん断強度との関係

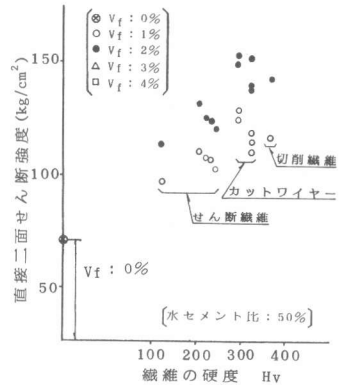


図-8 繊維の硬度とせん断強度との関係

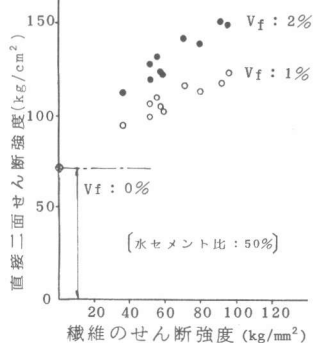


図-9 繊維のせん断強度とせん断強度との関係

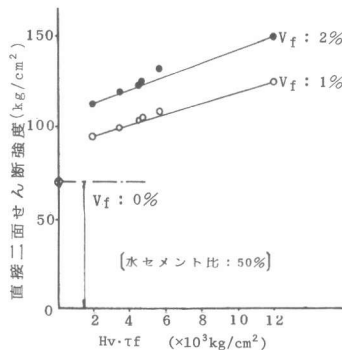


図-10  $Hv \cdot \tau_f$ とせん断強度との関係

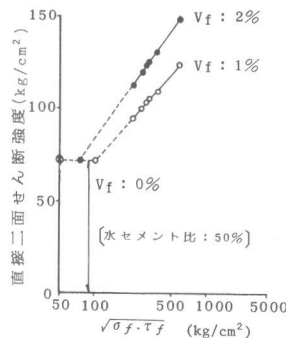


図-11  $\sqrt{\sigma_f \cdot \tau_f}$ とせん断強度との関係

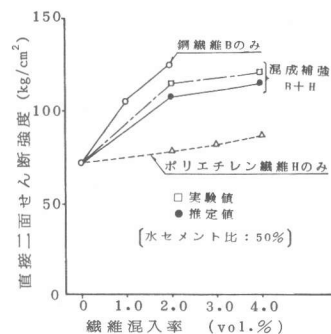


図-12 混成補強がせん断強度に及ぼす影響

みのせん断変形量を求める方法によって測定した。

また、図-14は繊維補強コンクリートの曲げタフネスの評価方法として梅山によって提案されているタフネス指数の考え方を導入して算出したせん断タフネス指数と繊維混入率との関係を示したものである。

これらの図から明らかのように、繊維補強コンクリートのせん断変形特性は用いる繊維によって大きく異なり、例えば、繊維長さの短い繊維A、E-1、G-1はせん断変形に伴う荷重の低下が大きく、特に繊維A及びG-1はいずれの繊維混入率においても急激な荷重の低下が認められている。また、これらの繊維を用いた場合のタフネス指数は繊維混入率によって大きく影響されることが明らかである。

一方、繊維長さが長く付着強度が大きい鋼繊維E-2、F-2やポリエチレン繊維及び混成補強の場合は、いずれも最大せん断荷重以後の急激な荷重の低下は認められず、また、せん断タフネス指数は繊維混入率によってほとんど影響されないことが明らかとなった。即ち、これらの結果に基づくと、繊維補強コンクリートのせん断変形特性に及ぼす繊維の品質の影響としては繊維長さ及び付着強度の影響が大きいと考えられ、繊維長さの長いものほど、付着強度の大きいものほどすぐれたせん断変形特性を有すると考えられる。

## 6. ま と め

本実験によって得られた結果をとりまとめて以下に示す。

- i) 鋼繊維補強コンクリートのせん断強度に及ぼすコンクリートマトリックスの影響としては水セメント比による影響が卓越しており、水セメント比の小さいコンクリートほど繊維の混入によるせん断強度の増加が顕著にあらわれる。
- ii) 鋼繊維補強コンクリートのせん断強度は繊維とマトリックスの付着強度並びに繊維の剛性によって大きく影響される。
- iii) 繊維補強コンクリートのせん断変形は繊維の長さや繊維とマトリックスの付着強度によって大きく影響される。

## 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(論文), 1981. 4
- 2) 梅山, 岡村, 小林: 鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性の評価方法, 第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1980

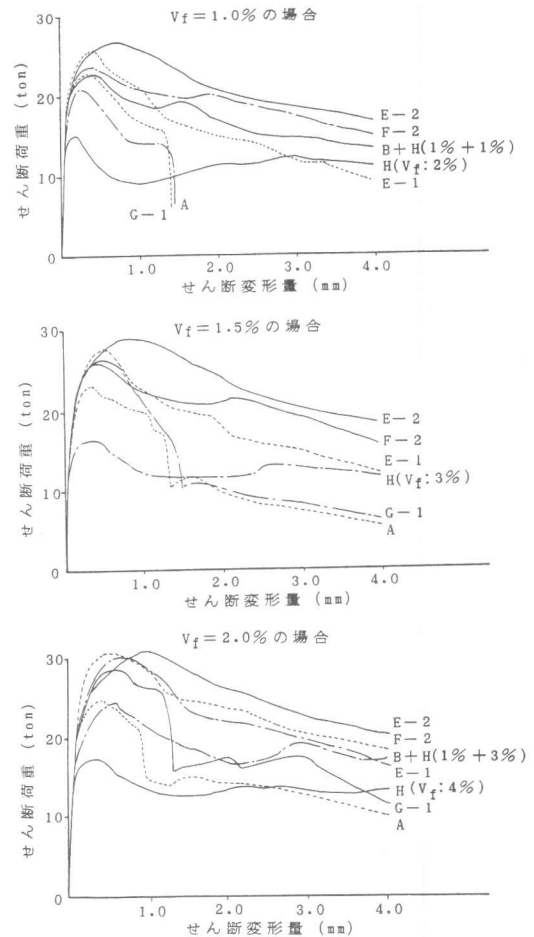


図-13 繊維種類がせん断変形曲線に及ぼす影響

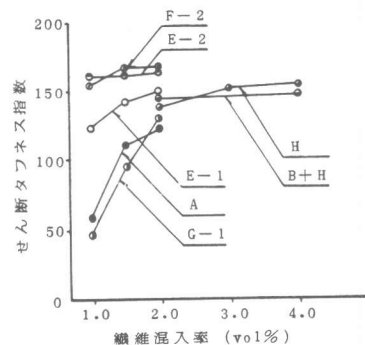


図-14 繊維種類がせん断タフネス指数に及ぼす影響