

論文

[1175] 鋼繊維補強コンクリートの曲げ疲労特性

水越 陸視*1・島内 洋年*2・鹿熊 文博*3・松井 繁之*4

1. はじめに

近年、損傷を受けた道路橋RC床版に対する補修工法として、床版増厚工法が多く採用されている。この工法では単に増厚による断面抵抗の増大を計るだけでなく、増厚部コンクリートに鋼繊維を混入したSFRCを用いることにより、正のモーメント領域において、局部ひび割れの発生を抑制し、疲労耐久性が大きく向上することが明らかにされている[1]。

一方、増厚前の母床版を観察すると、主桁近傍のハンチ止端部付近の床版上面に負の曲げによる橋軸方向のひび割れが発生していることがあり、この部位でのひび割れの抑制、ひいては雨水の浸透を防ぐ必要がある。しかし、この現象については実験的に検証されていない。また、実橋の補修に用いるSFRCにおいても、自動車荷重による曲げひび割れを完全に防ぐことは不可能である。このような観点から、負のモーメント領域でのSFRCの曲げ疲労に対する抵抗特性を明らかにし、ひび割れ深さ等に着眼した基準によって使用限界を定義することを目的に、早強セメントを用いたSFRC標準小型供試体による曲げ疲労試験を行った。

さらに、増厚工法施工時の交通停止という欠点を解消すべく早期交通開放を目的とし、交通停止期間を短縮するために超早強コンクリートによるSFRCを用いた場合の初期載荷疲労特性についても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用したコンクリートは、鋼繊維混入量を体積百分率で1.0%を中心に0.6%, 1.5%と変化させた3種類のSFRCであり、比較のために鋼繊維を混入しない普通コンクリートも使用した。これらの配合を表-1に示す。s/aは鋼繊維混入量の増減に対して、

表-1 コンクリートの配合

セメントの種類	鋼繊維混入量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						
					水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	鋼繊維	混和剤
早強	1.5	13	44.7	56.0	181	365	40	891	737	118	5.26
	1.0			52.0	170	340	40	860	834	80	4.94
	0.6			50.7	159	316	40	868	888	47	4.91
	0			42.0	153	302	40	737	1071	-	3.82
超早強	1.0			52.0	170	340	40	860	834	80	4.56

注) 目標スランプ:5.0cm、目標空気量:5.0%

所要のワーカビリティが得られるように決定した。なお、中心となる鋼繊維混入量は、日本道路公団が床版増厚工法の増厚コンクリートとしてよく使用していることから採用した。

セメントは早強ポルトランドセメント(比重:3.13)、超早強型セメント(比重:3.11)を使用し、骨材は細骨材には海砂(比重:2.56、吸水率1.58、粗粒率:2.71)を、粗骨材には碎石1305

*1 大阪セメント(株)中央研究所研究員、工修(正会員)

*2 大阪セメント(株)中央研究所

*3 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*4 大阪大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

(比重:2.69、吸水率:0.79%、粗粒率:6.78、Gmax:13mm)を使用した。また、乾燥収縮を緩和するために膨張材(比重:2.75)を、混和剤には単位水量を減じるために高性能AE減水剤を使用した。鋼繊維にはφ0.6mm×30mmの分散機不要ファイバーを使用した。鋼繊維の特性を表-2に示す。

表-2 鋼繊維の特性

長さ L (mm)	質量 M (mg)	換算断面積 S (mm ²)	換算直径 D (mm)	引張強度 σ _t (N/mm ²)	化学成分(%)			
					C	Mn	P	S
30.0	70.6	0.300	0.618	1239	0.05	0.27	0.016	0.01

2.2 供試体の作成

コンクリートの練混ぜには二軸強制練りミキサーを用い、最初はプレーンコンクリートとして練混ぜ、鋼繊維を分散させながら投入し練混ぜた。供試体は全て寸法10×10×40cmの無筋の梁供試体とし、締めめには振動台を使用した。脱型はコンクリート打設翌日に行い、試験に供するまで20℃気中養生とした。表-3にフレッシュコンクリートの性質を示す。

2.3 試験方法

実験概要を図-1に示す。載荷試験は中央集中載荷の方法により、早強セメントの場合コンクリート打設後14日以降に、超早強コンクリートの場合、打設翌日に実施した。なお、疲労試験は、油圧式疲労試験機(容量:動的25tonf)を用い、正弦波形の繰返し荷重を載荷速度5HZで与えた。載荷荷重は供試体下面の引張応力の下限値を3.0kgf/cm²に、上限値は静的強度の比率によって設定し、各シリーズ毎の静的破壊強度を基にして決定した。また、供試体の側面(図-1参照)に貼付したクラックゲージにより曲げひび割れの進展長さを動的に測定した。

3. 結果と考察

3.1 静的試験結果

表-4に静的試験結果の平均値を示す。従来の研究において、普通コンクリート

表-3 フレッシュコンクリートの性質

セメントの種類	鋼繊維混入量(%)	プレーンコンクリート		SFRC	
		スランプ(cm)	空気量(%)	スランプ(cm)	空気量(%)
早強	1.5	19.5	6.2	4.1	4.8
	1.0	17.0	5.5	4.2	4.5
	0.6	18.5	5.0	4.5	4.3
	0	5.0	5.2	-	-
超早強	1.0	16.5	6.5	4.0	4.0

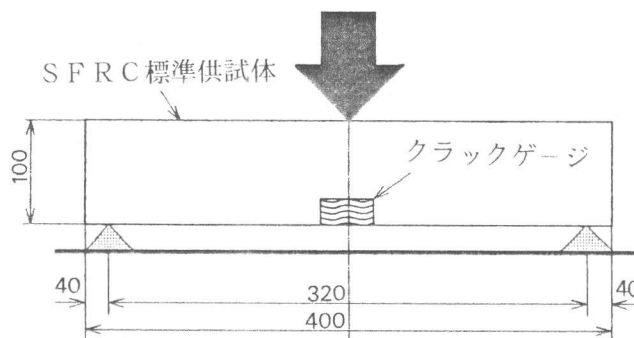


図-1 実験概要

表-4 静的試験結果

セメントの種類	鋼繊維混入量(%)	曲げ強度(kgf/cm ²)	圧縮強度(kgf/cm ²)	静弾性係数(×10 ⁵ kgf/cm ²)
早強	1.5	119	501	3.02
	1.0	102	553	3.00
	0.6	89.1	591	3.24
	0	62.6	538	3.16
超早強	1.0	72.3	362	2.61

に比べ、SFRCの圧縮強度は同程度であるが、曲げ強度は大きくなることが報告されている[2]。これは、やはり鋼繊維のひび割れ拘束によるものであると理解できる。本実験においても、同様の結果となっており、曲げ強度は普通コンクリートの1.4~1.9倍程度大きくなっている。また、鋼繊維混入量の多いものほど曲げ強度は大きくなっており、鋼繊維混入による効果が認められる。

3. 2 疲労試験結果

(1) 疲労寿命と鋼繊維混入量

図-2に疲労試験結果(応力比と疲労寿命の関係)を示す。なお、図中→のプロットはその回数に達しても破壊に至らず、その時点で疲労試験を中止したものである。一般に、SFRCの疲労強度は鋼繊維の混入のばらつきによって変動が大きくなるが、本実験においても大きな変動が見られた。そこで、試験後の供試体の破断面における鋼繊維本数を数え、疲労寿命との相関を調べた。図-3に一例として、上限応力85.2%の時の単位面積当たりの鋼繊維量と疲労寿命の関係を示す。図より、疲労寿命は全断面の鋼繊維量よりも引張側の下面から1cmの層に入っている鋼繊維量に依存する傾向にある。

さらに鋼繊維の配向性についても調べる必要があるが、現在検討中である。なお、図-3において、最右側の供試体では、この層の鋼繊維量が少なくにもかかわらず疲労寿命が大きいのは、この供試体の破壊位置が荷点よりも

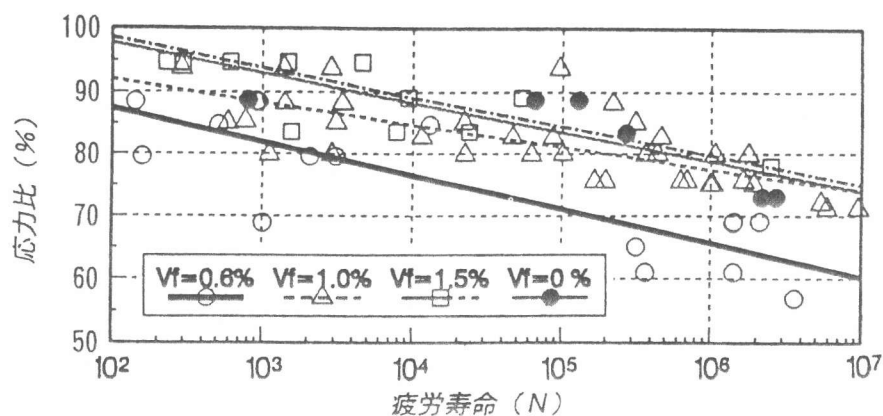


図-2 疲労試験結果

4.1cmと大きく離れたためである。すなわち、この部位での作用応力比に換算すると約67.6%となり、応力比が低下したためである。

(2) 応力比と平均疲労寿命の関係

同一応力比における疲労寿命にばらつきがみられたこと、および供試体本数が少ないことから順序統計量の理論を適用し、応力比毎の生存確率を算出し平均疲労寿命Nを求めた。なお、鋼繊維混入量1.0%における生存確率と疲労寿命の関係を図-4に示す。図より、SFRCの疲労寿命は対数正規分布に適合することがわかる。

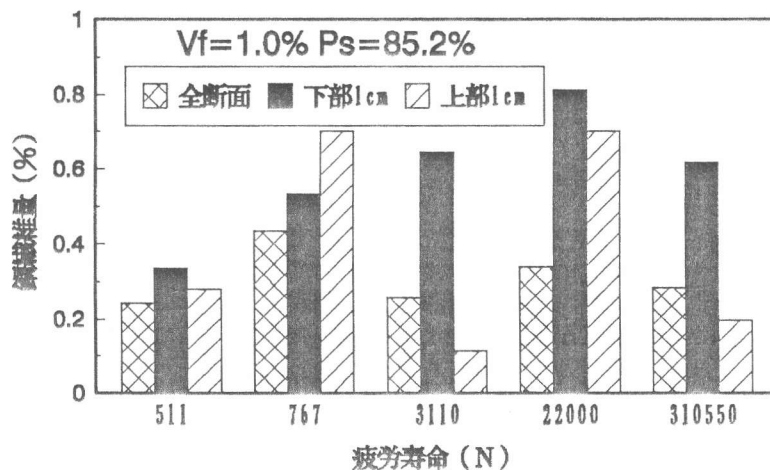


図-3 鋼繊維量と疲労寿命の関係

応力比と平均疲労寿命の関係（S-N線図）を図-5に、これらの関係式を表-5に示す。図より、本実験の範囲では、SFRCの200万回疲労強度は鋼繊維混入量が0.6%で上限応力62%、1.0%で上限応力72%、1.5%で上限応力75%となっている。また、蘇ら[3]の実験では鋼繊維混入量が0.5%、1.0%、1.5%の時、200万回疲労強度は各々、71%、74%、78%となっており、鋼繊維混入量の比較的少ない0.6%を除けば、本実験より得られた疲労強度に近い値となっている。なお、普通コンクリートの200万回疲労強度は75%となり、このような表現によれば、鋼

繊維混入による効果が認められない結果となる。しかしながら、普通コンクリートの静的強度はSFRCの約53~70%であり、実応力で考えると、当然ながらSFRCの方が疲労強度は大幅に向上している。

そこで、上限応力と平均疲労寿命の関係（ $\sigma-N$ 関係）で整理してみると、図-6のようになる。これより、本実験の範囲では $\sigma-N$ 関係は直線とみなすことができ、上限応力度を60kgf/cm²とした場合の疲労寿命は、普通コンクリートで3000回程度であるが、鋼繊維混入量が1.0%、1.5%においては破壊回数が200万回以上に達しており、鋼繊維混入による疲労抵抗性の増大が伺える。

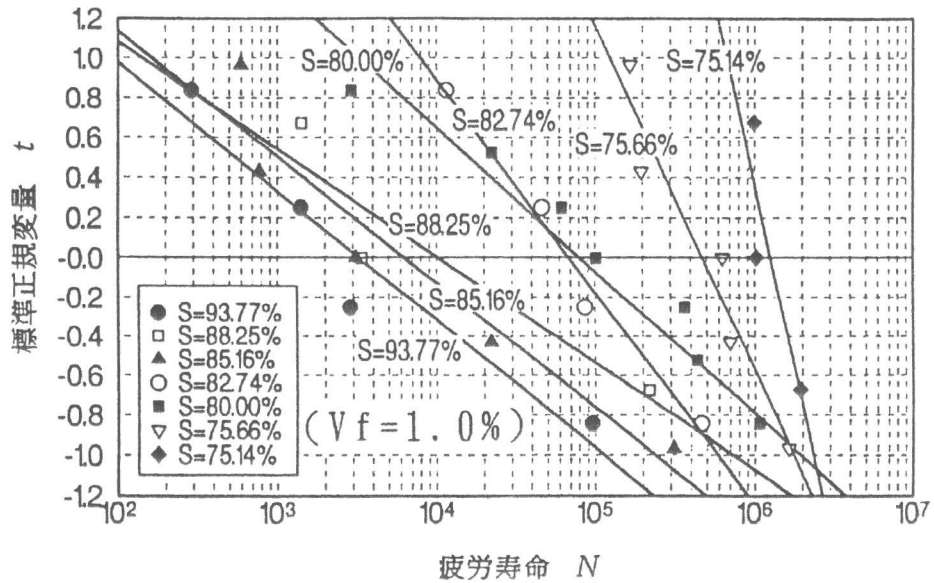


図-4 生存確率と疲労寿命の関係

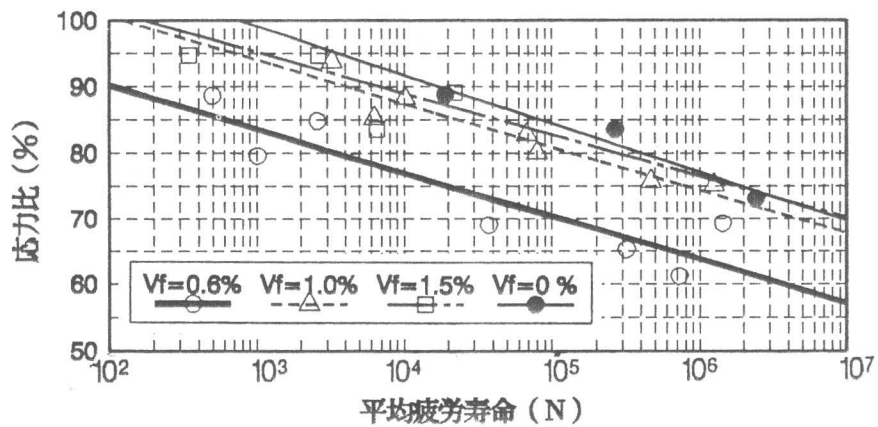


図-5 応力比と平均疲労寿命の関係

表-5 応力比~平均疲労寿命の関係

セメントの種類	鋼繊維混入量 (%)	(S-N線式)
早強	1.5	-6.234logN+113.930
	1.0	-6.564logN+113.747
	0.6	-6.606logN+103.404
	0	-7.341logN+121.163

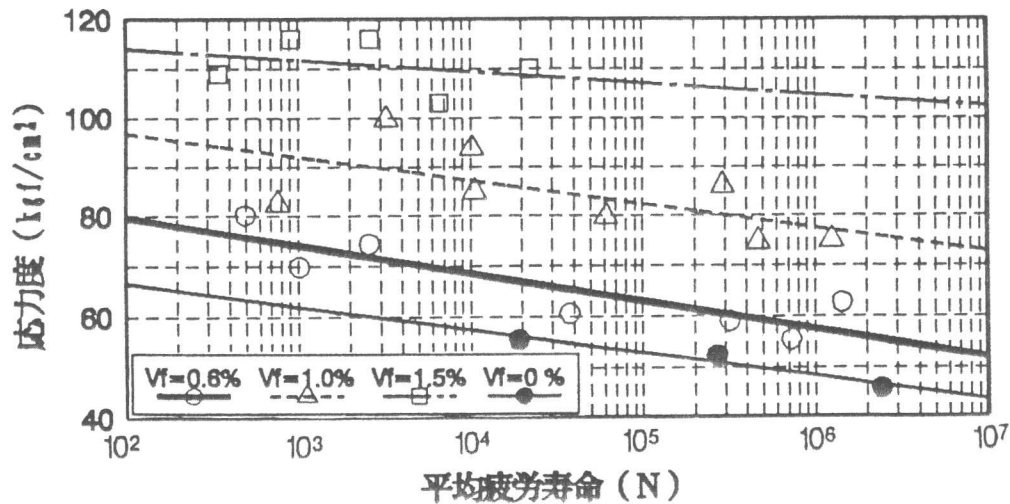


図-6 上限応力と平均疲労寿命の関係

(3) 疲労破壊の進展状況

図-7はクラックゲージより動的に測定したひび割れの進展状況の一例を示したものである。図より、普通コンクリートでは、底面にひび割れが生じると急激に破壊に至るのに対し、SFRCでは一気にあるいは連続的に進展するのではなく、進展と停滞を繰り返して最終破壊に至ることがわか

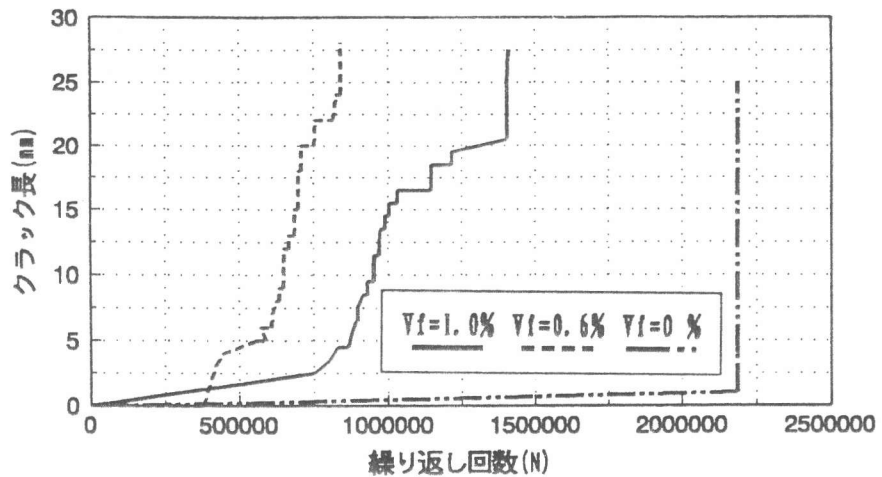


図-7 ひび割れの進展状況

表-6 ひび割れ深さと寿命の関係

鋼繊維混入量 (%)	ひび割れ深さ 5mmの回数 N5mm	破壊回数 Nf	N5mm/Nf (%)
0.6	500	947	52.8
	660	1020	64.7
	2700	3090	87.4
	570500	1414770	40.3
	1318800	1436070	91.8
1.0	2300	3100	74.2
	29800	62000	48.1
	162995	165531	98.5
	1222400	1774000	68.9
	877140	1930000	45.4

る。これはひび割れの進展断面に存在する鋼繊維がひび割れの発生に伴って引張応力を分担し抵抗するが、コンクリートとの付着が限界に達するとコンクリートからの抜けが生じるためであると考えられる。実験後、供試体の破断面を観察すると破断した鋼繊維はほとんどなく、コンクリートからの引き抜けによるものばかりであった。また、鋼繊維混入量が多くなるほど、スパン中央に発生したひび割れの進展を鋼繊維が止めようとするため、他の位置でもひび割れが形成され、破壊に至る場合が多くみられた。実際に、増厚床版の効果評価には、ひび割れ深さが急増する点を使用限界と考える必要があり、図-7からひび割れ深さが

5mmに達する寿命によるS-N曲線を使用すべきであると考えられる。そこで、クラックゲージによるひび割れ進展速度の測定データの解析が可能な全供試体について、ひび割れ深さが5mmに達す

る寿命、破壊寿命および、その比をまとめると表-6のようになる。このような結果から、本実験の範囲では増厚工法に対する効果評価には、図-5のS-N線図、あるいは図-6の σ -N線図において、鋼繊維混入量が0.6%の場合は疲労寿命を約67.4%に縮め、鋼繊維混入量が1.0%の場合は疲労寿命を約67.0%に縮める必要がある。なお、鋼繊維混入量が1.5%のものについてはデータが非常に少ないので省略する。

(4) 超早強SFRCの早期交通開放への適用性

超早強SFRCの材令1日における試験結果は表-7に示す通りである。超早強コンクリートを用いた場合、材令1日で圧縮強度が362kgf/cm²、静的曲げ強度が70kgf/cm²と良好な強度発現を示している。材令1日で交通開放した場合、一般の舗装における設計基準強度に相当する

表-7 超早強SFRCの疲労試験結果

静的強度 (kgf/cm ²)	上限応力 (kgf/cm ²)	上限応力比 (%)	破壊回数 (回)
68	47.6	70.0	200万以上
78	54.6	70.0	200万以上
71	49.7	70.0	200万以上
71	49.7	70.0	200万以上

50kgf/cm²程度の応力を想定し、上限応力を静的強度の70%とし、疲労試験を行った。その結果、4体すべての供試体が200万回の載荷でも破壊に至らず、200万回以上の疲労寿命を有することがわかった。また、200万回載荷後においても可視的なひび割れは全く認められなかった。

これらのことより、超早強コンクリートを用いたSFRCを増厚工法に適用し、1日後に交通荷重を受けても十分な疲労強度を有すると思われる。さらに、この超早強コンクリートを用いた疲労強度特性を求めるため、引き続き実験中である。

4. まとめ

本実験より得られた結論をまとめると以下のようなになる。

- (1) 同一応力下においては、SFRCの疲労強度は普通コンクリートに比べ大きくなる。特に、鋼繊維混入量が1.0%以上の場合、疲労抵抗性は著しく向上する。
- (2) SFRCの200万回疲労強度は、鋼繊維混入量が0.6%で上限応力62%、1.0%で上限応力72%、1.5%で上限応力75%である。
- (3) SFRCにおける疲労破壊は、普通コンクリートのように急激に生じるのではなく、ひび割れは進展と停滞を繰り返し最終破壊に至る。
- (4) 超早強コンクリートを用いたSFRCを増厚工法に適用し、1日後に交通荷重を受けても十分な疲労強度を有すると思われる。

今後、さらに疲労試験データを蓄積し、増厚工法に用いた場合のSFRCの使用限界をひび割れ進展長さ等に着眼した基準によって定義する必要があるとともに、設計上の安全性を考え、95%生存確率でのS-N線図を提示する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 松井繁之・木村元哉・蓑毛 勉：増厚工法によるRC床版補強の耐久性評価、構造工学論文集、Vol. 38A、PP1085-1096、1992.3
- 2) 小林一輔：繊維補強コンクリート、オーム社、PP. 2-4、1981
- 3) 蘇玄 昌・孫 永現・沈 玉鎮：鋼繊維補強コンクリートの曲げ疲労挙動に関する実験的研究：コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、PP. 959-962、1993