

論文 SFRC の曲げ疲労ひび割れ進展寿命の評価

水越睦視*¹・松井繁之*²・東山浩士*³・内田美生*⁴

要旨: SFRC の静的強度特性に関する研究は多数報告されているが, SFRC の曲げ疲労に関する研究は極めて少ない。そのため, SFRC の疲労特性に関する十分なデータが得られていないので疲労設計を行うことはまだできない現状である。また, SFRC では普通コンクリートと異なり, SF 混入の効果が発揮される疲労ひび割れ発生後の挙動がとりわけ重要となる。本研究では汎用的な SFRC の曲げ疲労試験を多数の供試体について実施し, 最終破壊に至るまでの疲労ひび割れ進展状況を測定した。その結果をもとに SFRC の曲げ疲労ひび割れ進展を考慮した寿命評価を試みた。

キーワード: SFRC, 曲げ疲労, ひび割れ進展, 疲労寿命, S-N 曲線

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート (SFRC) は普通コンクリート (PL) に比べ優れた曲げ疲労抵抗性を有していることは, 筆者らをはじめ幾つかの報告^{1),2),3),4)}がなされている。したがって, 道路橋床版の負のモーメント領域など曲げ疲労荷重を受ける部材への SFRC の適用が考えられ, コンクリート部材の長寿命化に対しても期待してよいと推察される。

しかしながら, 既往の報告^{3),4)}は SF 混入効果を荷重の繰返しに伴う変形状や AE 特性等の測定結果から定性的に述べたものである。すなわち, その効果を部材設計に導入するための疲労寿命の評価には至っていない。

一方, 普通コンクリートについては, わが国でも「セメントコンクリート舗装要綱」⁵⁾の中に実験データに基づき設計用疲労曲線が定義されている。これは最終破壊に対して疲労寿命の変動を考慮し安全側に設定されたものである。

SFRC の場合, 同一繰返し荷重を受ける場合でも疲労寿命の変動が普通コンクリートに比べ

大きくなること, 疲労破壊の進行過程が普通コンクリートと異なることが考えられる。

このような観点から, 本研究では同一配合の SFRC, 比較用の普通コンクリートについて, 疲労ひび割れの進展過程に着目した曲げ疲労実験を行い, 同一応力下での疲労寿命の変動およびひび割れ進展状況を考慮した疲労寿命の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の種類と作製

実験に用いた供試体は, SF 混入量が 1.27 % の SFRC と繊維無混入の PL の 2 種類である。

SFRC の繊維混入率 (体積百分率 V_f) は, 筆者らの既往の研究¹⁾から V_f が 1.0 % を超えると疲労抵抗性が顕著に大きくなること, および施工面を考慮し現行の汎用的な使用量である 1.27 % に決定した。また, 今回の実験の SF には, わが国で汎用的に使用されているものの中から波形せん断品を選択した。

実験に用いたコンクリート供試体の示方配合

*¹ 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所研究員 工修 (正会員)

*² 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)

*³ 近畿大学助手 理工学部 土木工学科 博 (工) (正会員)

*⁴ 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所副主任研究員 博 (工) (正会員)

を表-1に、使用材料を表-2に示す。

コンクリートの練混ぜは 20℃ 恒温室にて二軸強制練りミキサ (容量 100 l) を用い、1 バッチ当たりの練混ぜ量は 80 l とした。30 秒間の空練り後、水、混和剤を投入し 120 秒間プレーンコンクリートとして練り混ぜた後、SF を分散させながら投入し 60 秒間練り混ぜを行った。なお、フレッシュコンクリートの品質は全バッチで、スランプ $5 \pm 1.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ の目標範囲内であることを試験により確認した。

2.2 実験方法

実験概要を図-1に示す。載荷試験は曲げひび割れの発生位置が予測しやすい中央集中載荷の方法により、早強セメントを用いたコンクリートの強度が安定する材齢 14 日以降に実施した。疲労試験は油圧式疲労試験機 (容量: 動的 20ton) を用い、正弦波形の繰返し荷重を載荷速度 5Hz で与えた。載荷荷重の上限値は静的強度の比率によって 60 ~ 95 %

の範囲で数水準を選び、下限値は供試体の下面の引張応力が 0.29N/mm^2 となる値で一定とした。また、図-1に示すように供試体の両側面に下面より供試体高さの 5% (5mm) 毎に 50% (50mm) までひずみゲージを 10 枚貼付しこれらを並列に接続しゲージの抵抗値を連続的に測定した。その抵抗値の変化より各ゲージの破断した繰返し回数を求め、下面から上面に進展するひび割れ深さと繰返し回数との関係を求めた。

3. 実験結果と考察

3.1 静的試験結果

疲労試験の開始直前に、各バッチで製作した

表-1 示方配合

種類	W/C (%)	s/a (%)	Vf (%)	(kg/m ³)						C× (%)	
				W	C	EX	S	G	繊維	SP	
SFRC		58	1.27	172	342	40	972	734	100	1.0	
PL	45	43	0	153	302	40	737	1071	—	1.0	

表-2 使用材料

セメント(C)	早強ポルトランドセメント、密度 3.13g/cm^3
膨張材(EX)	CSA系、比重=2.93
細骨材(S)	野洲川産川砂、比重2.59、粗粒率2.90
粗骨材(G)	高機産砕石、最大寸法13mm、比重2.70、吸水率0.60%
鋼繊維(SF)	波形せん断品、寸法 $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$ 、比重7.85 引張強度 736N/mm^2 、ヤング率 206kN/mm^2
高性能AE減水剤(SP)	ポリカルボン酸系

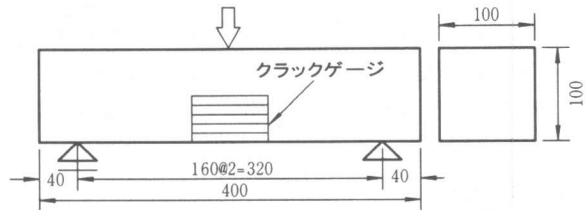


図1 実験概要

表-3 静的曲げ試験結果

種類	繊維混入率 (vol. %)	バッチ No.	曲げ強度 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)
SFRC	1.27	1	10.0	0.66	6.6
		2	9.57	0.81	8.4
		3	11.0	1.07	9.8
		4	8.83	1.46	16.5
		平均	9.85	1.00	10.3
PL	0	1	6.14	0.64	10.5
		2	6.40	1.07	16.8
		3	6.96	0.55	8.0
		平均	6.50	0.76	11.7

供試体から 4 体以上を抜き取り静的曲げ試験を実施した。表-3に静的試験の各バッチの曲げ強度の平均値、標準偏差および変動係数を示す。なお、曲げ強度は中央集中載荷により測定したが、実際の破壊断面はスパン中央の最大曲げモーメント位置とはならず繊維混入のばらつきのため若干ずれる。したがって、弾性理論に基づき破壊位置でのモーメントを求め、これより算出した曲げ強度を静的強度として採用した。なお、破壊位置のずれ量は両側面ですれ量が異なるため両側面の平均値を採用した。表-3より、SFRC、PL の曲げ強度のばらつきは小さいとはいえない。したがって、各バッチの曲げ強度の

平均値に有意差があるかどうかを分散分析によって検定した。分散分析結果を表-4に示す。有意水準5%でPLの静的強度の平均値に有意差が認められないが、

表-4 分散分析表

種類	要因	自由度	平方和	平均平方	F値	p値
SFRC	主効果(バッチ間)	3	11.972	3.991	3.491	0.042 (p<0.05)
	誤差	15	17.146	1.143		
	全体	18	29.118	5.134		
PL	主効果(バッチ間)	2	1.561	0.780	1.022	0.385 (p>0.05)
	誤差	14	10.687	0.763		
	全体	16	12.247	1.544		

SFRCでは有意差が認められた。したがって、疲労試験時の上限荷重の決定に際しては各バッチでの個々の平均値を採用することとした。

3.2 疲労試験結果

(1) 疲労寿命の分布とそのばらつき

SFRCの疲労試験結果を表-5に示す。

なお、静的試験同様に疲労試験においても、破壊した最弱部に着目すべきであると考え、静的強度と同様の破壊位置での修正を施した。したがって、完全な等価上限応力比でのグループ分けが困難となった。そこで、各ブロックにおいて平均値からの応力比の差が3%以内に収まるように分割した。

さらに、同一応力を受ける場合でもコンクリートの疲労寿命は大きく変動する。したがって、得られた疲労試験結果を統計的に処理する必要がある^{1), 2)}。図-2(a), (b)は各々SFRC, PLについて各上限応力比毎に疲労寿命(N)と生存確率P(N)との関係を対数正規紙上に示したものである。また、200万回の载荷でも破壊に至らなかった供試体は途中打ち切りデータとし、

表-5 SFRCの疲労試験結果

順序 r	上限応力比 S(%)	平均S(%)	疲労寿命 N	順序 r	上限応力比 S(%)	平均S(%)	疲労寿命 N
1	89.7	89.6	115	1	74.5	72.5	6,030
2	89.4		626	2	70.3		21,333
1	82.6	82.1	494	3	72.0		27,450
2	84.7		4,729	4	70.7		34,568
3	80.4		8,868	5	74.4		158,205
4	81.4		10,176	6	70.9		718,910
5	84.9		71,670	7	75.0		1,270,965
6	81.4		82,171	1	65.7		20,730
7	80.8		88,686	2	69.0		27,647
8	80.9		155,351	3	65.2		66,094
9	82.2		407,468	4	67.4	92,272	
10	81.3		539,281	5	65.2	146,268	
1	77.0	77.3	1,845	6	66.6	1,458,397	
2	77.9		7,355	1	60.3	37,064	
3	79.2		18,213	2	60.1	83,668	
4	79.8		27,624	3	63.4	219,923	
5	75.7		34,087	4	62.0	270,194	
6	75.2		52,422	5	62.7	357,079	
7	75.3		166,603	6	65.0	1,137,396	
8	77.9		187,593				

破壊したもののみを検討対象とした。

$$P(N) = 1 - r / (L + 1) \quad (1)$$

ここに、rは同一条件で試験した供試体総数Lの疲労寿命の小さい順に並べたときの序数である。

図-2(a), (b)より、SFRC, PLのいずれの上限応力比もほぼ直線近似することができ、SFRCの疲労寿命分布はPL同様、対数正規分布に従うことがわかる。また、SFRCではSFの分散や配向の影響により疲労寿命のばらつきも大き

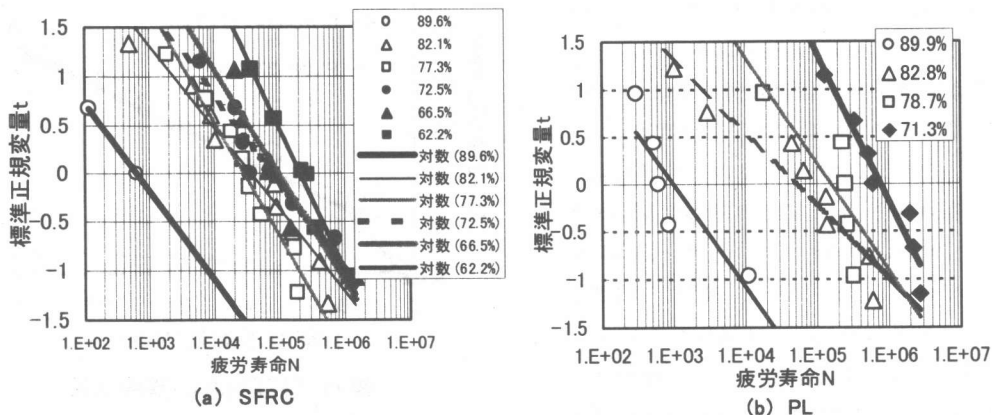


図-2 生存確率と疲労寿命の関係

くなると思われたが、回帰直線の傾きより評価される疲労寿命のばらつきは PL と同程度であることがわかる。

(2) 最終破壊寿命の評価

上限応力比(S)と平均疲労寿命(\bar{N})の関係を図-3に示す。これは図-2における回帰式の生存確率 50%(標準正規変量 $t=0$)における疲労寿命を最小二乗法によって直線近似したものである。本実験の SFRC(SF混入量 $V_f=1.27\%$,粗骨材最大寸法 $G_{max}13mm$,静的強度 $f_i=9.85N/mm^2$)の200万回疲労強度は54.2%となった。本実験と同一の下限応力,W/C, SFを用いた伊吹山²⁾らの実験での SFRC($V_f=2.0\%$, $G_{max}10mm$, $f_i=10.21N/mm^2$)の200万回疲労強度は55.0%であった。SF混入量は異なるがほぼ近い値となった。

一方, PLの200万回疲労強度は70.2%となり,この図ではSF混入による効果を表現できない。しかしながら, PLの静的強度はSFRCの65%程度であり,実応力で考えるとSFRCの疲労抵抗性は非常に優れているといえる。

通常設計時に使用するS-N曲線は,疲労寿命のばらつきも考慮し破壊に対してより安全側に設定する必要がある,一般に95%生存確率($t=1.645$)を用いて決定されることが多い。本研究より得られたP-S-N曲線を全試験結果のプロットとともに図-4に示す。「セメントコンクリート舗装要綱」⁵⁾の設計疲労曲線はPLのデータに対して安全側にあることがわかる。また, SFRCではP=95%のS-N曲線は,ひび割れ深さ5mmまでの寿命を表すS-N曲線(P=50%)の0.5~1オーダー左方に位置している。後述するが, SFRCでは比較的早い繰返し回数でひび割れ深さが5mmに達することを考慮すると,全破壊データに対して安全側となる式(2)の95%生存確率でのS-N曲線により, SFRCのひび割

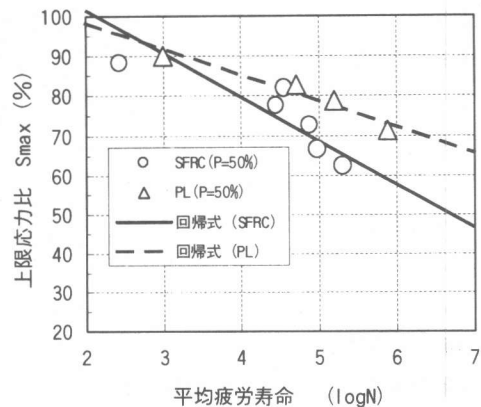


図-3 上限応力比Sと平均疲労寿命Nの関係

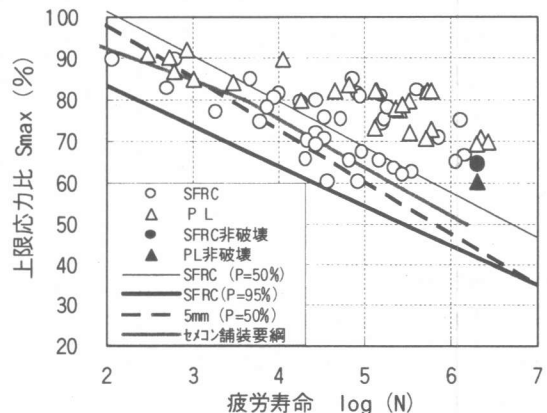


図-4 P-S-N曲線 (SFRC)

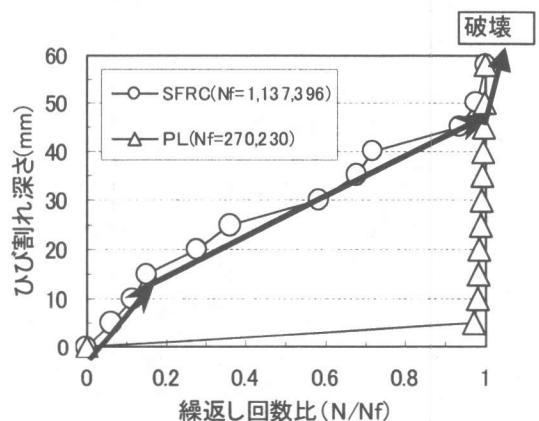


図-5 ひび割れの進展状況

れ発生寿命を求めることを推奨したい。

$$S = 102.76 - 9.69 \log N \quad (2)$$

また、伊吹山ら²⁾、Zhang ら⁴⁾によっても確認されている S-N 表現による図-3 のような現象は、SFRC と PL ではひび割れ発生応力および疲労破壊過程に違いがあるためと考えられる。PL では静的ひび割れの発生応力と静的強度はほぼ一致する。しかし、SFRC の静的ひび割れ発生応力は静的強度の 80 ~ 90 % であり、疲労試験時に上限応力比によっては PL と異なり载荷初期ですでにひび割れが発生するものもある。また、図-5 に示すように、PL はひび割れの発生とはほぼ同時に脆性的な破壊を示すが、SFRC では初期ひび割れ発生からある深さまで徐々に進展する段階と、その後ひび割れが急に成長し破壊に至る段階に分けられる。したがって、SFRC の曲げ疲労寿命を評価する場合、ひび割れ発生までの寿命に加え、ひび割れ発生後 SF がひび割れの進展を抑制する特性を考慮した疲労寿命評価を行うべきであると考えられる。

(3) ひび割れ進展寿命の評価

前節で検討した S-N 曲線は全断面破壊を対象とした最終破壊に基づくものである。本節では、ひび割れ進展長さ（ひび割れ深さ）を使用限界基準としてとらえ、所定のひび割れ深さに達する繰返し回数をそれぞれ求め、各段階における応力比と疲労寿命の関係を検討した。

SFRC の各ひび割れ進展段階における上限応力比(S)と平均疲労寿命(\bar{N})の関係を図-6 に示す。図より、SFRC では、ひび割れが発生しても、曲げ応力 6.0N/mm^2 程度の応力比 $S=60\%$ では約 10^2 倍の余寿命があることがわかる。また、ひび割れ深さ 5mm から 15mm までの進展寿命は、5mm までの余寿命の約 10 倍ある。しかし、その後、ひび割れ進展速度は上昇し、30mm に達すると短期間で破壊に至っている。これより、SFRC の使用限界は 15mm と考えるのが妥当である。

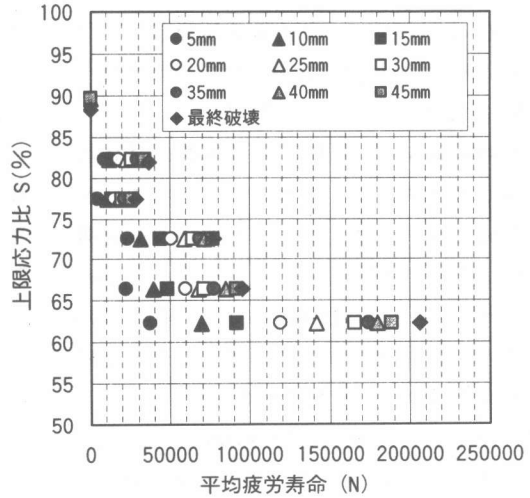


図-6 各ひび割れ進展段階のS-N曲線

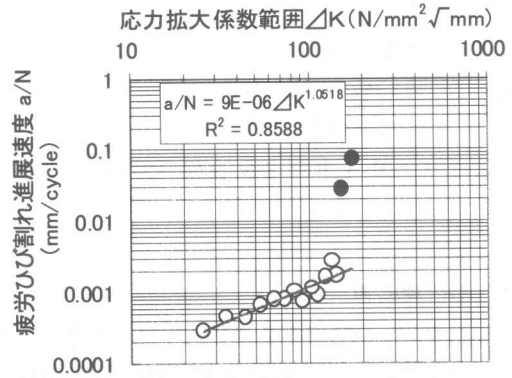


図-7 ΔK - a/N 線図(P=50%)

次に、ひび割れ進展寿命を算定する新たな方法として、Bazant ら⁶⁾が普通コンクリートに対して Paris 則の適用を試みている。図-7 は応力拡大係数範囲(ΔK)と疲労ひび割れ進展速度(a/N)の関係を示したものである。

$$\Delta K = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) (\pi a)^{1/2} F \quad (3)^7$$

ここに、 σ_{max} : 上限応力 (N/mm^2)

σ_{min} : 下限応力 (N/mm^2)

a : ひびわれ深さ (mm)

F : 補正係数

なお、図-6 は全供試体について $a=50\text{mm}$ までの ΔK - a/N 関係を計算し、図-8 のように Δ

Kを $10\text{N/mm}^2\text{mm}^{1/2}$ 毎のブロックに分け各範囲における a/N は対数正規分布に従うものとし、 $t=0$ の場合の a/N を求めプロットしたものである。図-7より、 $\Delta K=150\text{N/mm}^2\text{mm}^{1/2}$ 程度を境に急激にひび割れが進展することがわかる。それより小さい ΔK における ΔK - a/N 関係は直線関係にあるといえる。よって、 σ_{\max} , σ_{\min} , a が与えられれば図-6中に示した関係式により深さ 15mm までの疲労ひび割れ進展寿命を求めることが可能である。

例えば、 $\sigma_{\max}=6.0\text{N/mm}^2$, $\sigma_{\min}=0.29\text{N/mm}^2$, $S=60.9\%$ の場合のひび割れ発生までの寿命 N_0 を式(2)より求め、その後 $a=15\text{mm}$ までのひび割れ進展寿命 N_{15} を図-7中の関係式より求めると、最終破壊寿命 N_f は

$$\begin{aligned} N_f &= N_0 + N_{15} \\ &= 2,397 + 46,369 \\ &= 48,766 \text{ 回} \end{aligned}$$

となり、図-4中の $S-\bar{N}$ 曲線 ($P=50\%$) のやや下方にプロットされる。

4. まとめ

- (1) SFRC の疲労破壊過程は普通コンクリートとは異なり、その結果 SFRC ($V_f=1.27\%$) の疲労強度は静的強度比で普通コンクリートよりも低下する。
- (2) SFRC ($V_f=1.27\%$) のひび割れ深さを基準にした場合の使用限界は断面の 15% (15mm) と考えて妥当である。
- (3) ΔK - a/N 関係により、SFRC の曲げ疲労ひび割れ進展寿命を推定できる。
- (4) SFRC のひび割れ発生寿命を 95% 生存確率での $S-N$ 曲線より求め、それ以後の使用限界ひび割れ深さまでの寿命は ΔK - a/N 関係により求めることを推奨する。

さらに今後、繊維補強コンクリートのひび割れ進展に影響を及ぼすと考えられる部材の寸法効果についても検討する必要がある。

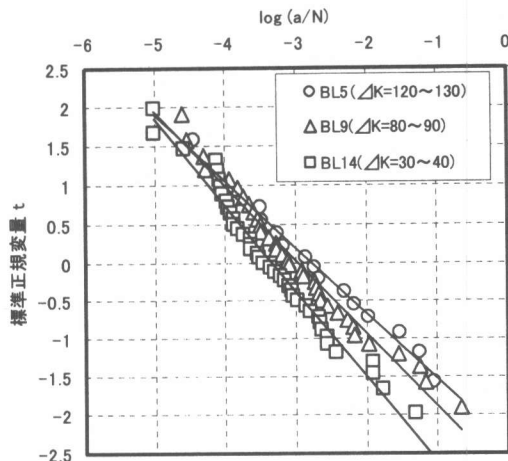


図-8 生存確率と a/N の関係

参考文献

- 1) 水越陸視, 鹿熊文博, 松井繁之, 島内洋年: 鋼繊維補強コンクリートの曲げ疲労性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.1055-1060, 1994
- 2) 伊吹山四郎, 国分修一, 大島朋之: 鋼繊維補強コンクリートの曲げ疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.1, pp.421-424, 1979
- 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
- 4) Zhang J., and Henrik S.: Fatigue Performance in Flexure of Fiber Reinforced Concrete, ACI Material Journal, pp.58 ~ 67, Jan.-Feb.1998
- 5) (社)日本道路協会: セメントコンクリート舗装要綱, 1984.2
- 6) Bazant, Z. and Xu, K.: Size Effect in Fatigue of Concrete, ACI Material Journal, pp.390 ~ 399, July.-Aug.1991
- 7) 岡村弘之: 線形破壊力学入門 (破壊力学と材料強度講座 1), 培風館, 1976