

論文 CFRC の曲げ疲労寿命の評価

水越睦視*¹・松井繁之*²・東山浩士*³・手塚光晴*⁴

要旨: SFRC 代替の CFRC の適用性について開発研究を行ってきた。今回は曲げ疲労試験を行い CFRC の疲労寿命を検討した。筆者らは、既に SFRC については疲労寿命をひび割れ発生寿命とひび割れ進展寿命に分けて考えることを提案した。今回はこの評価方法を CFRC に適用して曲げ疲労寿命を検討し、さらに SFRC、普通コンクリートとの比較検討も実施した。その結果、CFRC は SFRC 同等以上の疲労抵抗性を有していることを明らかにした。

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

1. はじめに

炭素繊維 (CF) は高強度・高弾性であり、かつ優れた耐化学薬品性と耐腐食性を有している。筆者らは、この高性能材料である CF をコンクリートの短繊維補強材として適用することを検討し、汎用的な鋼繊維補強コンクリート (SFRC) と同等以上の静的力学性能を有する炭素繊維補強コンクリート (CFRC) を開発した¹⁾。

SFRC では普通コンクリート (PL) に比べ優れた曲げ疲労抵抗性を発揮することは、筆者らの研究を含め幾つかの報告^{2),3),4),5)}で見られる。また、筆者らは SFRC の曲げ疲労破壊の進行過程から、その疲労寿命は、ひび割れ発生までの寿命とその後のひび割れ進展寿命に分けることができる⁶⁾と考えた。

したがって、CFRC が曲げ疲労を受けても同様な挙動をすると考えられる。しかし、CFRC の曲げ疲労抵抗性のデータは皆無の状態であり、CFRC の曲げ疲労実験を実施した。そして、その試験結果を、試験条件と W/C が同一である実施済みの SFRC および PL の試験結果⁶⁾

と比較し、CFRC の疲労抵抗性を評価した。

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、繊維混入率 (体積百分率 Vf) を 0.5%, 1.0% とした。比較用の SFRC (Vf=1.27%) と繊維無混入の PL を含めて、各供試体の配合と使用材料を表-1, 表-2 に示す。

CFRC の繊維混入率は、一般に構造部材に使用される SFRC (Vf=1.27%) とほぼ同等の静的力学性能を有する Vf=1.0%, および経済性を考慮した Vf=0.5% に決定した。また、SF の種類は、わが国における汎用品の一つである波形せん断品を選択した。試験体は、100 × 100 × 400mm の角柱で、打設翌日に脱型し、その後 13 日間以上 20℃ 気中養生を行い、早強コンクリートの曲げ強度が安定した時点で試験に供した。

繊維補強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 リットル) を用い、1 バッチ当たりの練混ぜ量は 80 リットルとした。セメント、膨張材、細骨材、粗骨

* 1 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 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 三菱化学産資(株) 商品研究所研究員

材を 30 秒間空練りし、水、混和剤を投入し 120 秒間練り混ぜた後、繊維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で行った。

疲労試験は油圧式疲労試験機（容量:動的 196kN）を用い、正弦波形で載荷速度 5Hz で行った。載荷荷重の上限値は静的強度の 60 ~ 95 % の範囲で数水準を選び、下限値は下面の引張応力が 0.29N/mm^2 となる一定値とした。また、図-1 に示すように供試体側面の下面より供試体の 1/2 高さまでの距離を 10 等分した点に、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下面から上面に進展するひび割れ深さと繰返し回数の関係を求めた。このひび割れ進展の測定は両側面で行った。また、 π ゲージ（基長 50mm）を用いてひび割れ幅も測定した。

3. 静的実験結果と考察

3.1 曲げ強度特性

疲労試験の開始直前に、各バッチで静的強度試験を JCI-SF4「繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」⁷⁾ に準拠し最低 4 体行うこととし、4 ~ 6 体の試験体を抜き取り実施した。表-3 に静的試験の各バッチの曲げ強度試験結果を示す。この曲げ強度は中央集中載荷により測定したが、実際の破壊断面は繊維混入のばらつきのため載荷断面の最大曲げモーメント位置とはならず若干ずれることがある。このような場合、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

表-1 示方配合

種類	W/(C+EX) (%)	Gmax	s/a (%)	Vf (%)	(kg/m ³)					繊維	C × (%) SP
					W	C	EX	S	G		
CF-0.5	45	20	58	0.5	172	342	40	984	743	9.5	1.0
CF-1.0		20	66	1.0	185	371	40	1073	576	19	1.0
SF-1.27		13	58	1.27	172	342	40	972	734	100	1.0
PL		13	43	0	153	302	40	737	1071	—	1.0

注) Vf: 繊維混入率(体積百分率), EX: 膨張材

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, 密度 $=2.93\text{g/cm}^3$
細骨材(S)	野洲川産川砂, 密度 2.59g/cm^3 , 粗粒率 2.90
粗骨材(G)	高槻産砕石, 最大寸法 13mm, 20mm, 密度 2.70g/cm^3 , 吸水率 0.60%
炭素繊維(CF)	フィラメント寸法: 繊維径 $7\mu\text{m}$, 繊維長 40mm , 密度 $=1.90\text{g/cm}^3$ 引張強度 $=4710\text{N/mm}^2$, ヤング率 $=235\text{KN/mm}^2$
鋼繊維(SF)	波形せん断品, 寸法 $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$, 密度 7.85g/cm^3 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

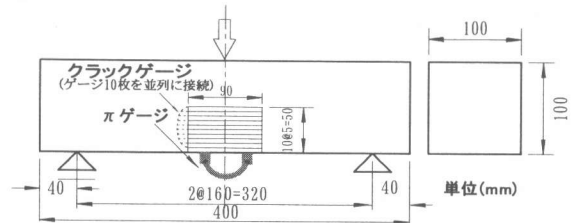


図-1 実験概要

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 (%)	バッチ間の 分散分析結果
CF-0.5	0.5	1	7.67	0.43	5.7	F値: 7.431 P値: 0.002 (p<0.05)
		2	7.13	0.59	8.2	
		3	8.48	0.80	9.5	
		4	8.57	0.40	4.7	
		平均	7.96	0.56	7.0	
CF-1.0	1.0	1	8.64	0.66	7.6	F値: 6.232 P値: 0.014 (p<0.05)
		2	9.52	0.96	10.1	
		3	10.4	0.83	8.0	
		平均	9.52	0.82	8.6	
SF-1.27	1.27	1	10.0	0.66	6.6	F値: 3.491 P値: 0.042 (p<0.05)
		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	F値: 1.022 P値: 0.385 (p>0.05)
		2	6.40	1.07	16.8	
		3	6.96	0.55	8.0	
		平均	6.50	0.76	11.7	

曲げ強度を採用した。ただし、破壊位置のずれ量は両側面とその値が異なるため両側面の平均値を採用した。表-3 より、CFRC の曲げ強度のばらつきは小さいとは言えない。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。その結果、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、CFRC、SFRC では有意差が認められた。

3.2 破壊性状

曲げ試験時に測定した代表的な荷重-スパン中央たわみ曲線を図-2 に示す。PL はひび割れ発

生と同時に荷重が低下し破壊に至るのに対し繊維補強コンクリートでは概してひび割れ発生以降も荷重は増加し、最大荷重以降も荷重は変形の進行とともに徐々に低下している。CFRCでは、繊維混入率の増加とともに最大荷重以降の変形に対する荷重の低下割合が小さくなった。JCI-SF4 規準⁷⁾による曲げタフネス (T_b) は、CF-0.5 で $T_b=20.3$ (J) と、SF-1.27 の $T_b=26.1$ (J) に比べると 20 % 程度小さかったが、CF-1.0 では $T_b=31.0$ (J) となり、SFRC よりも 1.19 倍大きな曲げじん性を示した。

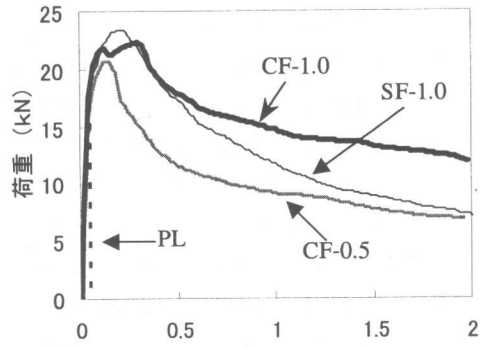
4. 疲労実験結果と考察

4.1 疲労寿命の分布とそのばらつき

図-3 は CFRC の疲労試験結果を上限荷重比で表現した S-N 結果である。ここで、上限荷重比 (S) は、分散分析の結果から各バッチでの個々の平均値を静的基準強度として求めた。

同一荷重を受ける場合でも、SFRC の疲労寿命は SF の分散、配向といった繊維の混入特性により大きくばらつくが²⁾、CFRC においても大きな変動が見られた。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。

SFRC の曲げ疲労寿命の分布は、既往の研究^{2),3),6)}では、対数正規分布に従うことが報告されている。CFRC においても対数正規分布へのあてはめを考え検討した。対数正規分布の場合、生存確率 $P(N)$ と N の関係を次式のように線形化できる⁸⁾。



スパン中央たわみ (mm)
図-2 荷重-たわみ曲線

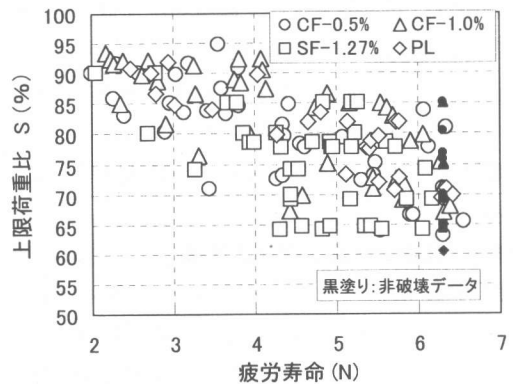


図-3 疲労試験結果 (S-N 結果)

$$t = A \cdot \log N + B, \quad t = \Phi^{-1}(1 - P(N)) \quad (1)$$

ここに、 t は標準正規変量で、生存確率 $P(N)$ は次式で与えられる。

$$P(N) = 1 - r / (L + 1) \quad (2)$$

ここに、 N は疲労寿命、 r と L は同一条件で試験した供試体の疲労寿命を小さい順に並べたときの序数と供試体総数である。

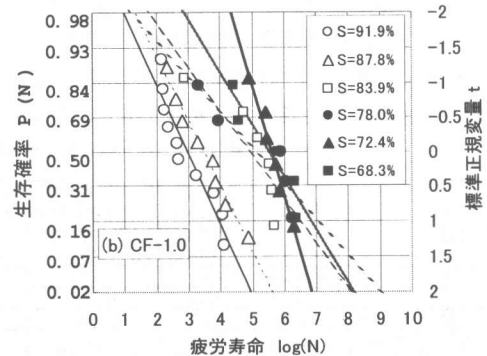
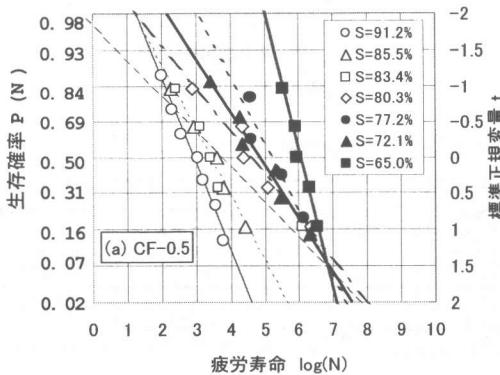


図-4 $P(N) - N$ 曲線

図-4 (a), (b) に各々 CF-0.5, CF-1.0 について各上限荷重比毎の P(N)-N 曲線を示した。上限荷重比のグループ分けは 6% 毎とした。また 200 万回で破壊しなかった供試体は途中打ち切りデータとし、破壊したもののみを検討対象とした。図より、CF-0.5, CF-1.0 のいずれの上限荷重比においてもほぼ直線近似することができ、CFRC の疲労寿命分布は、SFRC および PL 同様対数正規分布に従うことがわかる。また、回帰直線の傾きも SFRC と同程度であることがわかった。上限荷重比に着目すると、静的載荷時のひび割れ発生荷重付近である 80% 前後の荷重比における最終破壊疲労寿命のばらつきが大きい。これは、SFRC 同様に全寿命で表現したものであり、疲労寿命をひび割れ発生寿命とひび割れ進展寿命に分けて考える必要性を示唆している。

4.2 最終破壊疲労寿命の評価

P(N)-N 曲線の結果から得られる上限荷重比 (S) と平均疲労寿命 (\bar{N}) の関係を図-5 にプロットした。そして、S を独立変数、 \bar{N} を目的変数として最小二乗法によって直線回帰した結果を示した。図より、CFRC の S- \bar{N} 曲線は、SFRC の既往の研究⁶⁾と同様、PL の下方に位置した。この上限荷重比による表現では直感的に CF 混入による疲労抵抗性の向上効果の評価することができない。しかし、実際には上限荷重比の基となる静的強度は CFRC, SFRC の方が PL よりも大きいことを考慮すべきである。そこで、例えば表-4 のような評価を行った。S- \bar{N} 曲線式より各供試体の 200 万回破壊時の上限荷重比①を求め、PL の静的強度に対する各供試体の静的強度の比②を乗じ、③を求めた。③は PL

の静的強度を基準に求めた、各供試体が 200 万回で破壊する時の上限荷重比である。よって、④は PL の 200 万回疲労強度に対する各供試体の疲労強度比となり、繊維混入による疲労抵抗性の向上が窺える。また、⑤は③の各供試体の上限実荷重比による PL の破壊寿命であり、繊維補強コンクリートの 200 万回破壊時の上限荷重比では PL は 200 万回よりも相当に少ない回数で破壊に至ることがわかる。したがって、⑤の PL の疲労寿命 (200 万回) に対する各供試体の逆比をもって効果評価することにした。結果は⑥のようになる。これより、PL に対する換算寿命伸び率は、CF-0.5 で約 20 倍、SF-1.27 で約 70 倍、CF-1.0 では実に約 6000 倍となり CFRC の疲労抵抗性は大きく向上していることがわかった。

4.3 ひび割れ進展寿命の評価

以上の検討は全断面破壊を対象としたものである。本節では、ひび割れ進展長さを疲労進展

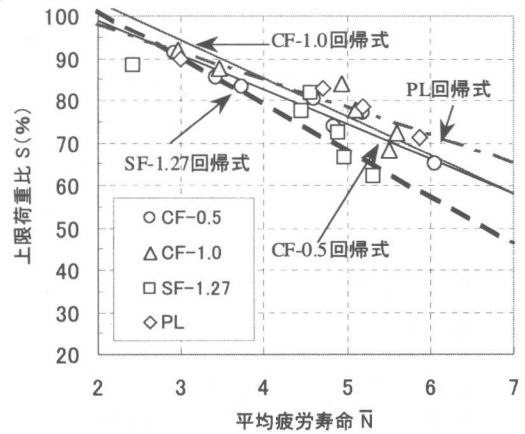


図-5 S- \bar{N} 曲線

表-4 各種コンクリートの静的強度差を考慮した疲労寿命算定

コンクリートの種類	S- \bar{N} 曲線式 S(%)	200万回破壊時の上限荷重比 ① (%)	PLの静的強度に対する各供試体の静的強度比 ②	PLの静的強度を基準に換算した上限実荷重比 ③=①×②(%)	③のPLに対する疲労強度比 ④	③の各上限荷重比によるPLの疲労寿命 ⑤	PLに対する換算寿命伸び率 ⑥ (倍)
CF-0.5	$S=115.18-8.12\log\bar{N}$	64.0	1.224	78.3	1.115	113,500	18
CF-1.0	$S=121.66-8.99\log\bar{N}$	65.0	1.464	95.2	1.356	300	6,667
SF-1.27	$S=123.52-10.99\log\bar{N}$	54.3	1.515	82.3	1.172	27,700	72
PL	$S=111.31-6.53\log\bar{N}$	70.2	1	70.2	1.000	2,000,000	1

基準としてとらえることの方が合理的と考え、所定のひび割れ深さに達する繰返し回数を求め、各深さ毎の上限荷重比と疲労寿命の関係を検討した。

(1) ひび割れ発生寿命

CF-0.5, CF-1.0, SF-1.27 のひび割れ深さ 5mm 毎の上限荷重比 (S) と平均疲労寿命 (\bar{N}) の関係と、最終破壊寿命における生存確率 $P=95\%$ の $S-N$ 曲線を各々図-6 (a), (b), (c) に示す。ここで、例えば 5mm の $S-\bar{N}$ 曲線は、ひび割れ深さが 5mm に達したときの寿命から $P(N)=0.5$ の時の疲労寿命を求め作成したもので、他のひび割れ深さの場合も同様にして作成した。試験では、ひび割れは供試体下縁に発生すると直ちに 5mm まで進展した。これより、ひび割れ深さ 5mm の寿命を CFRC および SFRC のひび割れ発生寿命と考えた。このひび割れ深さ 5mm の $S-N$ 結果 (5mm 実寿命) は、いずれの供試体においても、非常に寿命のばらつきが大きい。そして、その $S-N$ 結果の下限値は $P=95\%$ の $S-N$ 曲線とほぼ一致する。また、図-6 (c) より、SF-1.27 では、最終破壊に対する $P=95\%$ の $S-N$ 曲線はひび割れ深さ 5mm の $S-\bar{N}$ 曲線の 0.5 ~ 1 オーダー左方に位置している。よって、安全側として $P=95\%$ の $S-N$ 曲線でひび割れ発生寿命を求めてよいと考えることにした⁶⁾。CFRC の場合、図-6 (b) より、CF-1.0 で $S=53\%$ 以下でやや危険側の評価となるが、 $P=95\%$ の $S-N$ 曲線で求めてよいであろう。CF-0.5 では安全側となる。

(2) ひび割れ進展限界寿命

図-7 は、図-6 の $S-\bar{N}$ 曲線を用いて上限応力 $\sigma=5.20\text{N/mm}^2$ 作用時の各ひび割れ進展段階の寿命を求め作成したひび割れ進展図である。これより、PL はひび割れが発生するとすぐに破壊に至っており、CF-0.5, SF-1.27 でも繰返し回数の増加に伴いほぼ直線的にひび割れは進展している。それに対し、CF-1.0 では破壊はひび割れの進展と停滞を繰返ししながら進行していることがわかる。

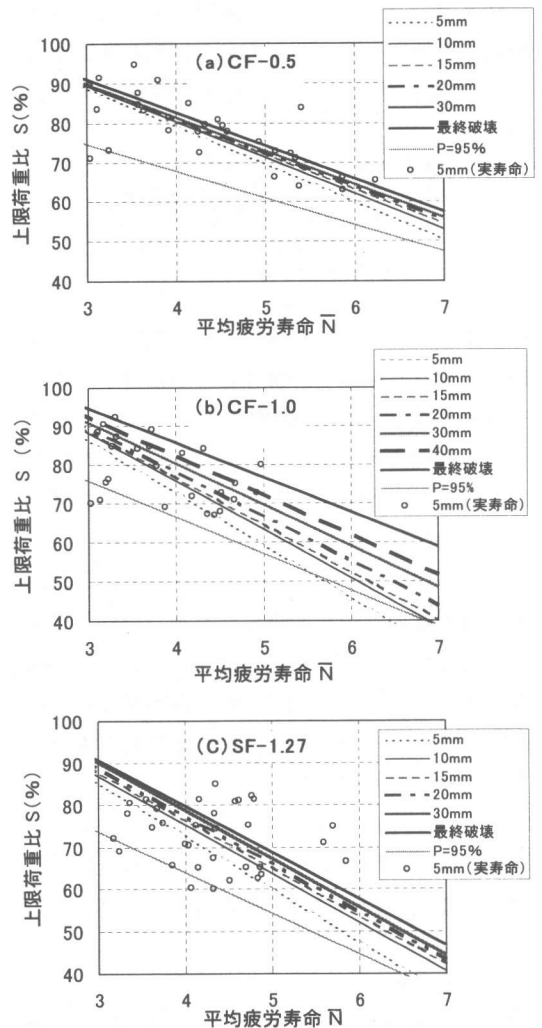


図-6 ひび割れ深さ毎の $S-\bar{N}$ 曲線

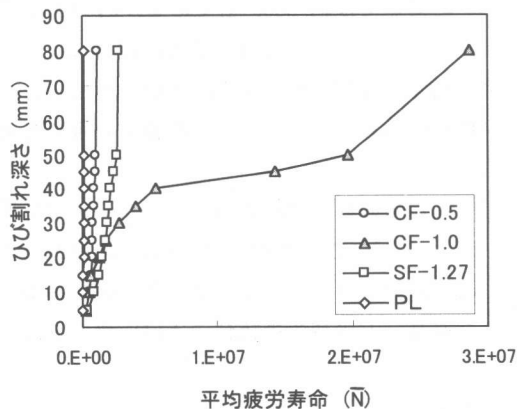


図-7 ひび割れ進展図

図-8 はひび割れ深さ 50mm に達するまでの応力拡大係数範囲 (ΔK) と疲労ひび割れ進展速度 (a/N) の関係である⁶⁾。 ΔK の定義を示す⁶⁾。

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

ここに、 σ_{max} : 上限応力 (N/mm²)

σ_{min} : 下限応力 (N/mm²)

a : ひびわれ深さ (mm)

F : 補正係数

同一 ΔK においても、 a/N は CFRC, SFRC では PL よりも小さく、CF-1.0 では他のコンクリートと異なり、 ΔK の増加に伴い a/N が小さくなる傾向を示した。これより、ひび割れが進展し ΔK が大きくなっても CF がひびわれ面で引張応力を分担していると考えられる。

図-7 の結果から、各コンクリートのひび割れ進展速度の違いが明確になった。ひび割れ深さ 50mm に達すると破壊が急速に進むことが理解できる。よって、本実験の範囲内ではこの 50mm に達する寿命をひび割れ進展限界寿命と考えてよいと提案したい。

以上より CF を 1.0 % 混入することによりひび割れ進展限界寿命は非常に長くなり、疲労ひび割れ進展の抑制効果が顕著であると言える。

5. まとめ

- (1) CF-1.0 の疲労抵抗性は汎用的な SF-1.27 よりも優れており、その疲労寿命伸び率は、SF-1.27 に対して約 90 倍、普通コンクリートに対しては約 6000 倍である。CF-0.5 では普通コンクリートに対して 18 倍となる。
- (2) CFRC のひび割れ発生寿命は SF-1.27 と同様に生存確率 95 % の S-N 曲線より求めてよい。
- (3) 本実験の供試体断面 (100 × 100mm の矩形断面) では、ひび割れ深さ 50mm に進展した時の疲労寿命で比較すると、各種繊維補強コンクリートの疲労抵抗性の差は明確になる。

参考文献

- 1) 水越睦視, 松井繁之, 手塚光晴, 内田美生,

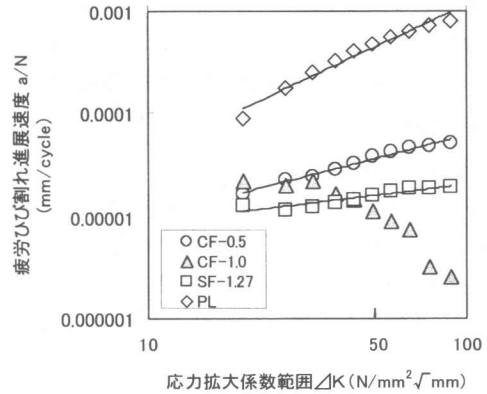


図-8 ΔK と a/N の関係

粟田満：コンクリート用 CF の開発と CFRC の基礎的性状，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 81-92，1998

- 2) 水越睦視，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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) Zhang J., and Henrik S. : Fatigue Performance in Flexure of Fiber Reinforced Concrete, ACI Material Journal ,pp. 58 ~ 67, Jan.-Feb. 1998
- 6) 水越睦視，松井繁之，東山浩士，内田美生：SFRC の曲げ疲労ひび割れ進展寿命の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 1. 22，No. 3，pp. 199-204，2000
- 7) (社) 日本コンクリート工学協会：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準 JCI-SF，pp. 11-14，1984
- 8) 井上正一，西林新蔵，吉野 公：コンクリートの圧縮疲労特性と疲労強度の特性値に関する研究，土木学会論文集，No. 451/V-17，59-67，1992