

# 論文 破壊力学的手法に基づく短繊維補強材料の疲労寿命モデル

松本高志<sup>\*1</sup>・Victor C. Li<sup>\*2</sup>

要旨：破壊力学的手法による短繊維補強材料の疲労寿命モデルを開発した。実験により計測された短繊維補強コンクリートの疲労ひび割れ進展と繰返し応力-疲労寿命曲線をモデルによる計算値と比較することにより開発されたモデルの適用性を検討し、また疲労荷重下でのひび割れ開口幅変化に対する繊維架橋と梁断面低減の影響についてモデル計算を行い検討した。

キーワード：疲労ひび割れ進展, S-N 曲線, 疲労ひび割れ幅, 短繊維補強材料, 破壊力学

## 1. はじめに

長期間に渡る社会基盤の蓄積に伴い、耐用年数を迎える多数の既設構造物には、補修、補強、または置き換えが必要とされる。一方で、こうした事態の再発を避ける為、新設構造物には以前よりすぐれた耐久性能が要求される。本研究で取り扱う短繊維補強コンクリート(FRC)は構造物の耐久性を向上させ得る有力な材料である。短繊維補強コンクリートは、ひび割れ面においてランダムに配置された短繊維が架橋応力を発現し、ひび割れの進展・開口を抑制する。架橋応力によって抑制されたひび割れの進展は、繰返し荷重下での疲労寿命の向上につながり、また繊維架橋されたひび割れは環境要因によるコンクリートの剥離・分解を防ぎ、抑制されたひび割れ開口幅は鉄筋への有害物質の浸透を減少させ鉄筋の腐食を遅らせる事になる。短繊維補強コンクリートの疲労寿命に対しては実験的計測とそれに伴う統計的モデル化が行われてきたが、このような要求性能を満たすための材料設計には力学的モデルが重要な役割を果たす。本研究では破壊力学的手法による短繊維補強材料の疲労寿命モデルを開発した。このモデルは短繊維補強材料の微視的構造によって表現されており、材料設計に必要な検討をモデル計算で行

うことができる。開発されたモデルは既往の実験で計測された短繊維補強コンクリートのひび割れ進展と繰返し応力-疲労寿命曲線に対して比較・検討された。また、疲労寿命下でのひび割れ開口幅変化に対する繊維架橋と梁断面低減の影響についてモデル計算を行い検討した。

## 2. 短繊維補強材料の疲労寿命モデル

破壊力学に基づいた本モデルは繊維架橋された疲労ひび割れの進展を取り扱う。モデルは、基質材料の疲労ひび割れ進展則、架橋応力のひび割れ進展に対する影響、そして架橋応力の劣化、これら3つの要素から構成されている。

基質材料の疲労ひび割れ進展則には Paris 則を用いた。Paris 則はひび割れ進展速度  $da/dN$  がひび割れ先端における応力拡大係数振幅値  $\Delta K_{ip}$  に支配されると仮定しており、疲労寿命  $N_f$  は次の式により求まる。

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K_{ip})^n} da \quad (1)$$

ここに  $a_i$  : 初期ひび割れ長,  $a_f$  : 限界ひび割れ長,  $C, n$  : Paris 定数。  $a_f$  は応力拡大係数  $K_{ip}$  が破壊靱性  $K_c$  に達するときのひび割れ長である。

繊維補強材料において  $\Delta K_{ip}$  は次のように表

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院助手 工学系研究科社会基盤工学専攻

M.S.E. (正会員)

<sup>\*2</sup> ミシガン大学教授 工学部土木・環境工学科

Ph. D

わされる。

$$\Delta K_{ip} = \Delta K_a + \Delta K_b \quad (2)$$

ここに $\Delta K_a (>0)$ : 繰返し荷重による応力拡大係数振幅,  $\Delta K_b (<0)$ : 架橋応力による応力拡大係数振幅減少である。ひび割れ架橋による応力伝達効果により, これがない場合と比較して,  $\Delta K_{ip}$  は減少する。 $\Delta K_b$  は繰返し荷重下における架橋応力とひび割れ開口幅の関係 $\Delta\sigma_b(\Delta\delta)$ の関数であり<sup>1)</sup>, 繊維, 骨材の双方による架橋応力( $\Delta\sigma_f$ と $\Delta\sigma_m$ )の足しあわせで得られる。

$$\Delta\sigma_b = \Delta\sigma_f + \Delta\sigma_m \quad (3)$$

$\Delta\sigma_f(\Delta\delta)$ はマイクロメカニクスに基づき導出されており, 使用繊維・基質材料とその界面の附着性状に依存する<sup>2)</sup>。 $\Delta\sigma_m(\Delta\delta)$ とともにその詳細は他にゆずる<sup>3)</sup>。

架橋応力の繰返し荷重下における劣化現象は実験的研究<sup>4)</sup>によって確認されている。その挙動は, 比較的早期に(<100cycles)初期強度の80-90%まで減少し, その後長期にわたって徐々に減少し続け, 最小で50%(10,000cycles)にまで減少する。この実験結果に従い, 架橋応力劣化を以下のように仮定する。繊維架橋応力劣化は附着強度の劣化によって起こると考え, 附着強度 $\tau$ は次の式に従うものとする。

$$\frac{\tau}{\tau_i} = \max \text{ of } \left\{ \begin{array}{l} 1.0 + D_1 \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i(x) \\ B + D_2 \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i(x) \end{array} \right\} \quad (4)$$

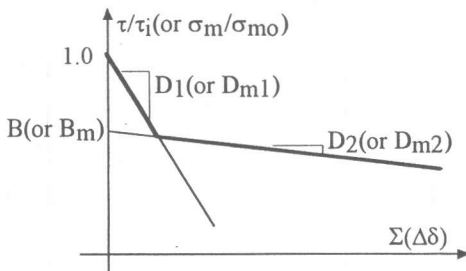


図-1 架橋応力劣化モデル

ここに $\tau_i$ : 初期附着強度。B,  $D_1$ ,  $D_2$  は図-1に定められている。附着強度劣化は

$$\sum_{i=1}^N \Delta\delta_i(x) = \text{累積ひび割れ開口幅変化} \quad (5)$$

によって測られており, この量は開口幅変化 $\Delta\delta$ と荷重繰返し数Nの両方の履歴に依存する。xはひび割れ開口部から先端へ向けて測られ, 累積ひび割れ開口幅変化は開口部で最大値をとり, 先端でゼロとなる。附着強度劣化度は実験結果を近似する2直線モデル(式(4))に従い, 同様に開口部で最大, 先端でゼロとなる。骨材架橋応力 $\sigma_m$ も同様な挙動を仮定し,

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_{m0}} = \max \text{ of } \left\{ \begin{array}{l} 1.0 + D_{m1} \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i(x) \\ B_m + D_{m2} \sum_{i=1}^N \Delta\delta_i(x) \end{array} \right\} \quad (6)$$

に従うとする。ここに $\sigma_{m0}$ : 初期引張強度。B<sub>m</sub>, D<sub>m1</sub>, D<sub>m2</sub>は同様に図-1に定められている。

以上の3要素によって構成された疲労寿命モデルにより, 任意の短繊維補強材料の疲労寿命が計算できる。疲労寿命は与えられた荷重下において疲労破壊が起こる繰返し载荷数で定義される。疲労ひび割れの進展と疲労破壊は以下のようにまとめられる。

$\Delta K_{ip}$ と $K_{ip}$ は疲労ひび割れが進展するにつれ値が変化する。序盤においては, ひび割れ進展に伴う架橋領域の発達により,  $\Delta K_{ip}$ は減少し疲労ひび割れは減速しながら進展する。中盤では伸長し続けるひび割れは加速しようとするが, 架橋領域発達による減速とつりあい, 定速度で進展する。しかし終盤では架橋応力の劣化によりつりあいは破れ, ひび割れは加速を始める。そして $K_{ip}$ が $K_c$ に達した時に疲労破壊を迎え, ひび割れは不安定に進展し耐荷力は失われる。

### 3. 計算結果

疲労寿命モデルの適用性を実験と比較することによって検討した。

図-2にひび割れ進展長計算値と計測値との比較を示す。計測値はStangら<sup>5)</sup>によって得

られたもので、フック付鋼繊維(HS)1%とポリプロピレン繊維(PP)1%の二種類で補強された Hybrid FRC の疲労ひび割れ進展を 3 点疲労曲げ試験によって計測している。供試体寸法は幅 50mm 高さ 100mm 長さ 350mm(スパン 345mm)の直方体である。最大荷重対限界荷重比は 90%( $S_{max}=90\%$ )、最小対最大荷重比は 20%( $R=0.2$ )である。試験開始時、90%までの単調載荷において、ひび割れは 55mm まで成長し、以後の繰返し載荷では安定的に成長した。計算用の主な入力材料定数は表 1-4 にまとめられており、Hybrid 効果は $\Delta\sigma_f$ (HS)と $\Delta\sigma_f$ (PP)を足し合わせて式(3)に代入することで考慮されている。モデルによる計算値は計測されたひび割れ進展挙動を捕え、終盤での急速なひび割れ進展を再現している。

図- 3は繰返し応力-疲労寿命曲線(S-N 曲線)の計算値と計測値との比較を示している。用いられた 5 種類の材料は、無筋コンクリート(PLC)、鋼繊維 1%FRC(SS1)、フック付鋼繊維 1%FRC(HS1)、フック付鋼繊維 2%FRC(HS2)、フック付鋼繊維 1%+ポリプロピレン繊維 1% FRC(HYB)である。計算用の主な入力材料定数は上と同様に表 1-4 のものが使われている。

表 1 Paris 定数<sup>6)</sup>

Paris 定数	C	n
	$9.03 \times 10^{-6}$	3.12

表 2 コンクリートの材料定数<sup>7)</sup>

弾性定数 GPa	初期引張強度 MPa	破壊靱性 MPa $\sqrt{m}$
35	5.4	0.5

表 3 繊維の材料定数<sup>8)</sup>

繊維	長さ mm	弾性定数 GPa	直径 $\mu\text{m}$
SS	25	210	400
HS	30	210	500
PP	12	12	48

表 4 界面付着強度<sup>9, 10)</sup>

界面	初期付着強度 MPa
SS	4.5
HS	6.0
PP	0.8

計算値は一般に疲労試験で観察される繰返し応力の低減による疲労寿命の増加を再現している。しかしながら、PLC と HS2 において計算値は計測値とほぼ一致しているが、他の 3 材料については一致していない。これには二つの理由が考えられる。第一に、実験における 90-95%の最大応力対強度比は曲げ強度分布の範囲内であることより、実験で計測された疲労寿命も広範囲に分布していることが考えられる。第二に、モデルで用いた架橋応力劣化の係数( $B$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ )はすべての FRC で同じと仮定されているが、実際には繊維と基質の組み合わせによって異なるものと考えられる。

図- 4は図- 3で仮定された架橋応力劣化モデルを Zhang らの実験<sup>4)</sup>による架橋応力劣

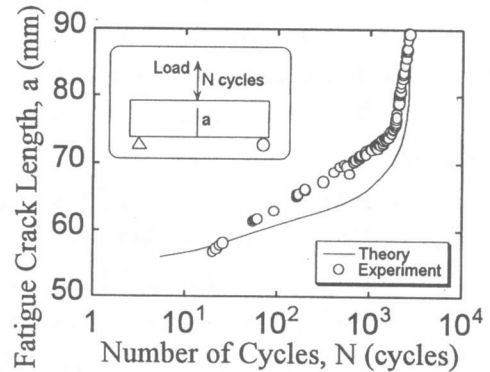


図- 2 ひび割れ進展長計算値<sup>3)</sup>と計測値<sup>5)</sup>との比較

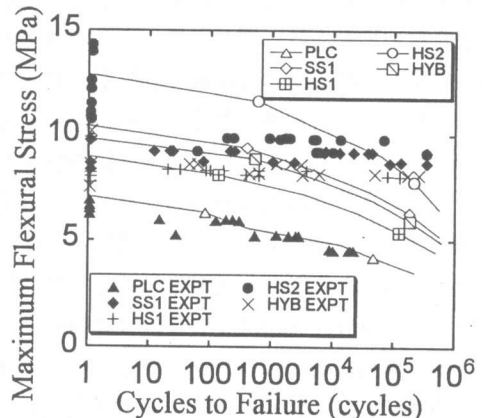


図- 3 繰返し応力-疲労寿命曲線の計算値<sup>11)</sup>と計測値<sup>8)</sup>との比較

化計測と比較してみたものである。架橋応力劣化は直方体の鋼繊維補強コンクリート供試体を用い、直接繰返し引張り下で計測されている。実験では繰返し载荷開始時のひび割れ開口幅  $w$  の違いにより劣化への影響も調べられており、 $w=0.2\text{mm}$  で劣化はもっとも顕著となることが示されている。図-4は S-N 曲線の比較で同定された係数( $B, D_1, D_2$ )と( $B_m, D_{m1}, D_{m2}$ )が、別に行われた実験の架橋応力劣化計測値を良好に近似することを示している。この比較は劣化モデルの妥当性を示しているが、仮定された劣化モデルは累積ひび割れ開口幅変化のみに依存しており、繰返し载荷開始時のひび割れ開口幅への依存性も考慮されるべきものと考えられる。

図-5と図-6は5種類の材料の疲労破壊までのひび割れ開口幅の変化を表している。図-5は  $S_{max}(=90\%)$  を等しくした場合であり、図-6は応力振幅  $\Delta\sigma(=\sigma_{max}-\sigma_{min}=6.3-1.3\text{MPa})$  を等しくした場合である。 $S_{max}$  が等しい場合には曲げ強度(図-3)が高い FRC ほど開口幅が広くなり、 $\Delta\sigma$  が等しい場合には曲げ強度が高い FRC ほど開口幅が狭く疲労寿命が長くなることが示されている。これは曲げ強度が高い FRC ほど強度発現をひび割れ発生後の架橋領域発達に依存しており、ゆえに  $S_{max}$  が高い場合には繰返し载荷開始時に既にひび割れが発生・開口しているからである。一方で  $\Delta\sigma$  が等しい場合には繰返し载荷開始時のひび割れはどの材料においてもほぼ同じであり、曲げ強度の高い FRC ほど架橋効果は高くひび割れ開口は押さえられ、疲労破壊も遅らされることになる。

一般に繊維の混入に伴い曲げ強度は増加する。曲げ強度の高い繊維補強材料の利用として、断面積を低減し構造物における材料費用と死荷重を減らしつつ、ひび割れを繊維架橋して開口幅を抑え鉄筋腐食に有害な物質の侵入を抑制することが考えられる。モデルを用いて、断面積低減のひび割れ開口幅変化に対する影響を PLC, HS1, HS2 の3材料について検討してみた。図-7は繰返し荷重と疲労寿命の関係を示して

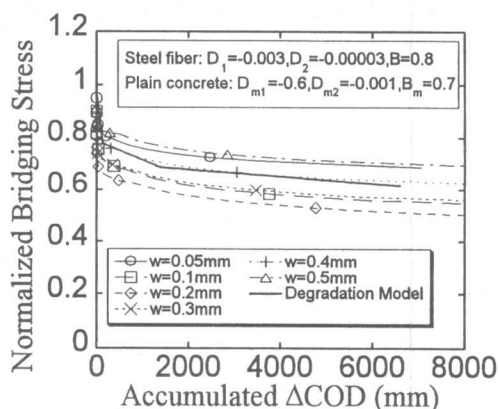


図-4 累積ひび割れ開口幅変化—架橋応力の計算値と計測値<sup>4)</sup>との比較

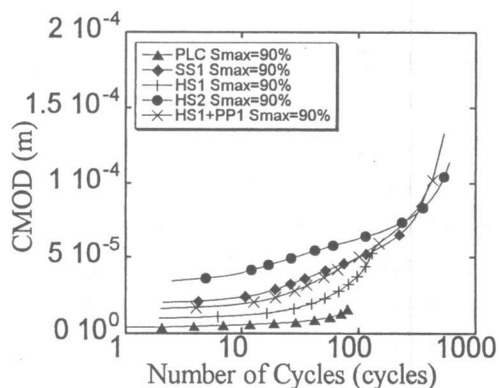


図-5 ひび割れ開口幅変化(最大応力対強度比が同じ場合)

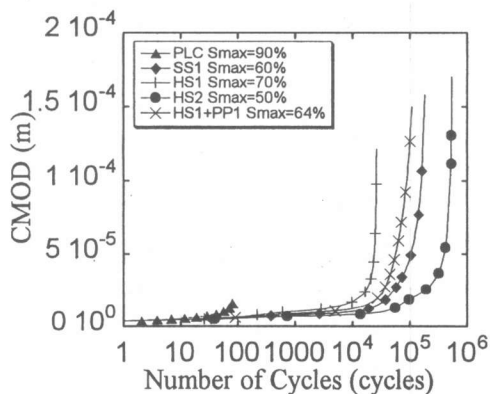


図-6 ひび割れ開口幅変化(応力振幅が同じ場合)

おり、HS1 と HS2 については PLC と同等の疲労耐力を維持できる梁高さ  $d$  にまで低減した。 $d=100\text{mm}$  の PLC に対し、HS1 は  $85\text{mm}$ 、HS2 は  $70\text{mm}$  にまで低減しても、曲げ耐力と曲げ疲労耐力が PLC と同等の値であることが示されている。図-8 と 9 はそれぞれ最大荷重対限界荷重比( $F_{\max}$ )=60, 80%におけるこれら 3 材料のひび割れ開口幅変化を表したものである。 $F_{\max}$  が 60% の時には PLC と HS1 はほぼ同じ開口幅となっているが、HS2 はおよそ 2 倍以上の開口幅となる。 $F_{\max}$  が 80% にあがると PLC に対する開口幅の違いは顕著となり、HS1 は約 2 倍、HS2 は約 4 倍の開口幅を生ずる。これもさきほどと同じ理由で、同じ  $F_{\max}$  下においても、HS1 と HS2 はひび割れ発生強度を上回る繰返し応力で載荷されている為である。開口幅変化の違いは、ほぼ疲労寿命全期間に渡る傾向であり、高い曲げ強度の FRC の利用による断面低減はひび割れ開口幅の増加につながることが示されている。ひび割れ開口幅の増加は鉄筋腐食要因の侵入増加を招くこともあり、FRC の利用による断面低減には注意が必要とされる。

#### 4. 結論

- 1) 短繊維補強材料の疲労ひび割れ進展メカニズムを 3 つの要素に大別したモデル化により、短繊維補強コンクリートの疲労ひび割れ進展の計算を行った。計算値は計測されたひび割れ進展挙動を捕らえ、特に終盤での急速なひび割れ進展を再現している。
- 2) モデルによって計算された S-N 曲線を計測された曲線と比較した。無筋コンクリートとフック付鋼繊維 2%FRC については一致が見られたが、鋼繊維 1%FRC、フック付鋼繊維 1%FRC、フック付鋼繊維 1%+ポリプロピレン 1%FRC については一致が見られなかった。個々の材料における架橋応力劣化係数( $B$ ,  $D_1$ ,  $D_2$ )を計測しモデルに入力することにより、計算値は計測値に近づくものと思われる。

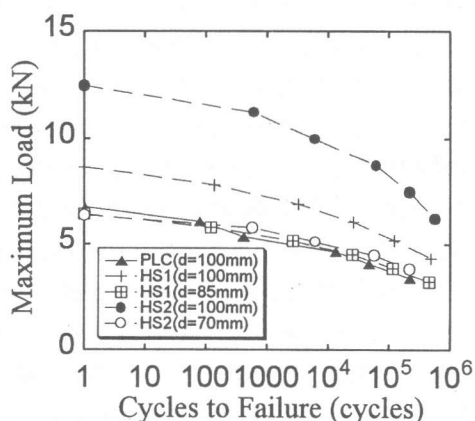


図-7 繰返し荷重-疲労寿命曲線

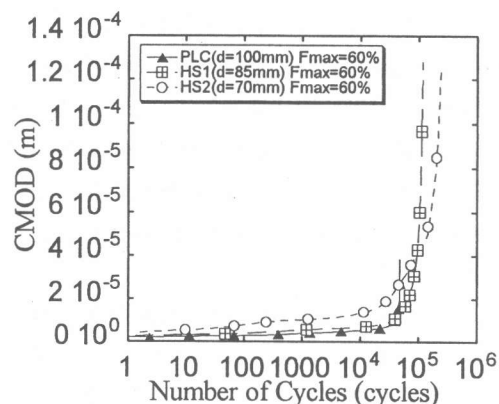


図-8 ひび割れ開口幅変化(最大荷重対限界荷重比=60%)

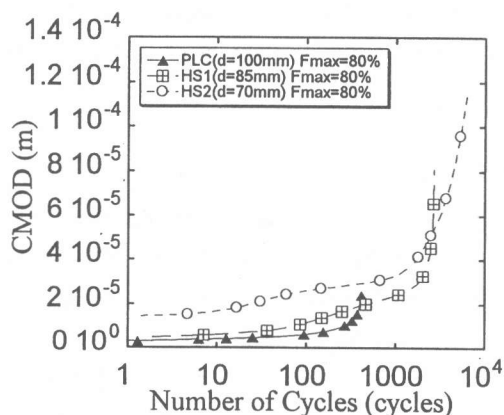


図-9 ひび割れ開口幅変化(最大荷重対限界荷重比=80%)

- 3) S-N 曲線の計算で仮定された架橋応力劣化が、別に行われた実験の計測値を良好に近似することは、架橋応力劣化が短繊維補強材料の疲労メカニズムの重要な一因であることを示している。仮定された劣化モデルは累積ひび割れ開口幅変化のみに依存しているが、実験に即して繰返し载荷開始時のひび割れ開口幅への依存性も考慮されるべきものと考えられる。
- 4) 疲労荷重下のひび割れ開口幅変化を最大応力対強度比( $S_{max}$ )が等しい場合と応力振幅( $\Delta\sigma$ )が等しい場合とで無筋コンクリートと4種のFRCについてモデル計算により比較した。前者の場合曲げ強度の高いFRCほど開口幅が広くなり、後者の場合は逆に開口幅が狭く疲労寿命が長くなることが示された。
- 5) 高曲げ強度のFRCを用いて断面を低減した場合のひび割れ開口幅変化に対する影響をモデル計算により検討した。最大荷重対限界荷重比が等しい場合、FRCは無筋コンクリートに比べ2-4倍のひび割れ開口を生じることが示された。
- 6) 上記の結果よりFRCをひび割れ発生強度を上回る応力下で载荷する際にはひび割れ開口幅の増加に注意を払うことが必要と思われる。

#### 謝辞

本研究を行うに当たり、Dr. B. N. Cox(Rockwell International Science Center)とDr. H. Stang(Technical University of Denmark)に御協力を頂いたことをここに深く感謝します。

#### 参考文献

- 1) Cox, B. N., and Marshall, D. B.: Stable and Unstable Solutions for Bridged Cracks in Various Specimens, *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 39, pp. 579-589, 1991
- 2) Matsumoto, T., and Li, V. C.: Uniaxial Cyclic Behavior of Discontinuous Fiber Reinforced Composites, In ASCE 4th Materials Engineering Conference, Vol. 1, pp. 426-435, 1996

- 3) Li, V. C., and Matsumoto, T.: Fatigue Crack Growth Analysis of Fiber Reinforced Concrete with Effect of Interfacial Bond Degradation, Accepted for publication in *Journal of Cement and Concrete Composites*, 1997
- 4) Zhang, J., and Stang, H.: Bridging Behaviour and Crack Growth in Fibre Reinforced Concrete under Fatigue Loading, In *Brittle Matrix Composites 5*, pp. 143-153, 1997
- 5) Stang, H., and Zhang, J.: Experimental Determination of Fatigue Crack Growth in Fiber Reinforced Concrete, In *Recent Advances in Experimental Mechanics*, pp. 1347-1352, 1994
- 6) Baluch, M. H., Qureshy, A. B., and Azad, A. K.: Fatigue Crack Propagation in Plain Concrete, In *Fracture of Concrete and Rock*, pp. 80-87, 1987
- 7) Zhang, J., and Stang, H.: Experimental Study on Bridging Stress of Fiber Reinforced Concrete under Uniaxial Fatigue Tensile Load, in preparation, 1998
- 8) Zhang, J., and Stang, H.: Fatigue Performance in Flexure of Fiber Reinforced Concrete, Accepted for publication in *ACI Materials Journal*, 1996
- 9) Li, V. C., and Stang, H.: Interface Property Characterization and Strengthening Mechanisms in Fiber Reinforced Cement Based Composites, *Journal of Advanced Cement Based Composites*, Vol. 6, pp. 1-20, 1997
- 10) Li, V. C., Stang, H., and Krenchel, H.: Micromechanics of Crack Bridging in Fiber Reinforced Concrete, *Materials and Structures*, Vol. 26, pp. 486-494, 1993
- 11) Matsumoto, T., and Li, V. C.: Fatigue Life Analysis of Fiber Reinforced Concrete with a Fracture Mechanics Based Model, Submitted to *Journal of Cement and Concrete Composites*, 1998