

論文 繰返し载荷を受ける ECC 梁の有限要素解析と曲げ疲労特性の評価

角間 恒*1・松本 高志*2・林川 俊郎*3・何 興文*4

要旨: 本研究では、高靱性繊維補強セメント複合材料 ECC の疲労劣化モデルを構築し、疲労解析により ECC 梁の曲げ疲労特性を評価した。ECC の疲労劣化モデルは架橋則に基づいており、ひび割れの開閉量をパラメータとすることで载荷履歴を考慮できるようにした。曲げ疲労解析では、既往の実験のたわみ変化および S-N 線図を再現できることを確認したほか、荷重条件に着目したパラメトリック解析により、静的強度に対する最大および最小曲げ応力比を用いて疲労破壊までに要する载荷回数を推定できること、その推定式が片側繰返し载荷時と正負交番繰返し载荷時に区別して定義されることを示した。

キーワード: ECC, 繊維伝達応力劣化モデル, 疲労解析, 曲げ疲労特性

1. はじめに

繊維補強コンクリート (Fiber Reinforced Concrete, 以下, FRC) に代表される従来のひずみ軟化型繊維補強セメント複合材料に対し、近年開発されたひずみ硬化型セメント複合材料 (Strain Hardening Cement-based Composites, 以下, SHCC) では、引張変形の増加に伴い複数ひび割れが分散して形成されることでひずみ硬化特性が示される¹⁾。大きな変形性と靱性に加え、引張終局時のひび割れ幅が最大でも 0.2mm 以下とひび割れ幅抑制効果を有する SHCC は、断面修復材や表面被覆材、鋼材と組み合わせた部材等への利用が期待されている¹⁾。

SHCC の一つである高靱性繊維補強セメント複合材料 (Engineered Cementitious Composite, 以下, ECC) は、マイクロメカニクスと破壊力学を配合設計原理とすることでひずみ硬化挙動を実現した材料であり、道路橋床版の増厚補強²⁾や農業用水路の補修³⁾への適用が試みられている。一方で、前者では自動車荷重、後者では温度応力が繰返し作用する疲労環境下に置かれるにも関わらず、ECC の疲労特性に関する研究例は少なく、疲労破壊機構に基づく疲労損傷評価手法の開発が必要である。

著者らはこれまでの研究において、マイクロメカニクスの手法により ECC の疲労劣化メカニズムである繊維伝達応力劣化をモデル化し⁴⁾、梁部材の曲げ疲労試験⁵⁾を再現できることを確認している⁶⁾。しかしながら、同モデルでは、ECC の疲労劣化度を定めるパラメータの少なからずから载荷履歴の影響を考慮できず、その適用は実験の範囲内に限られていたと言わざるを得ない。

そこで本研究では、载荷履歴を考慮するパラメータとしてひび割れ架橋繊維の総変位量 (ひび割れ開閉量の総和) を加えた ECC の疲労劣化モデルを新たに提案し、梁

部材の曲げ疲労解析を実施した。疲労解析では、曲げ疲労試験結果との比較により提案モデルの妥当性を確認したほか、パラメトリック解析により荷重条件が ECC の曲げ疲労特性に及ぼす影響を評価した。

2. ECC の繊維伝達応力劣化モデル

2.1 概要

ECC は、マイクロメカニクスと呼ばれる材料の微小要素の挙動を数式化した力学モデルに基づき設計され、材料挙動の推定が可能である⁷⁾。その根幹となるのが架橋則と呼ばれる繊維伝達応力とひび割れ幅との関係であり、複合材料を構成する繊維、母材および両者の界面特性に関する微視的材料定数から導かれる⁸⁾。疲労による架橋性能の低下は、微視的材料定数の変化を考慮することで架橋則による評価が可能であり、著者らが構築している疲労劣化モデル⁴⁾は、最大ひび割れ幅に着目した繊維疲労破断判定式を導入することで、繊維破断による伝達応力の劣化を表すものである (図-1)。一方で、繊維の疲

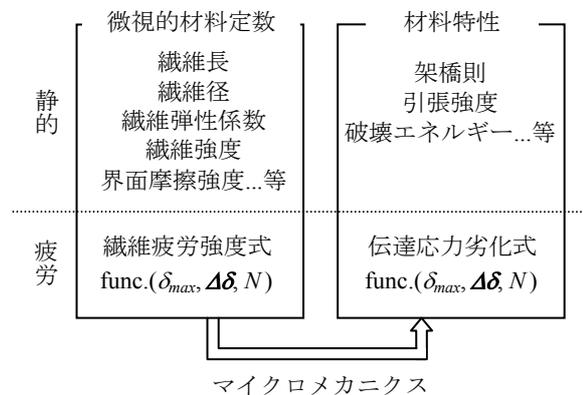


図-1 疲労劣化モデルの概念図

*1 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻 修(工) (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門准教授 Ph.D. (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門教授 工博 (正会員)

*4 北海道大学大学院 工学研究院北方圏環境政策工学部門助教 博(工)

劣強度は応力振幅により変化する。また、PVA-ECC の一軸交番疲労試験⁹⁾では、一軸引張疲労試験¹⁰⁾に対し応力劣化が促進されることが、DFRCC (Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite) 梁の曲げ試験¹¹⁾では、片側繰返し載荷時に対し正負交番繰返し載荷時に架橋性能が低下しやすいことが明らかになっている。つまり、応力劣化過程は載荷履歴により異なることが示されているわけである。Li らが提案している FRC の繊維伝達応力劣化モデル¹²⁾では、繊維-母材間の界面特性に関して、ひび割れ開閉量の積算値を用いることで界面摩擦強度の劣化を評価しているが、本研究では同様のパラメータを用いることで、載荷履歴の影響を考慮し得る繊維の疲労破断判定式を定義する。

2.2 繊維の疲労強度式

ECC の繊維伝達応力劣化の主要因には、繊維の疲労破断、繊維の引抜けおよび圧縮力作用時の繊維座屈が挙げられるが、PVA 繊維使用時には破断に対し引抜けの影響が小さいこと、繊維-母材界面の平滑化(埋込み端部の境界条件の変化)により繊維座屈の直接的なモデル化が困難であることから、本研究では応力劣化をすべて繊維の疲労破断で表す。具体的には、次式で定義する繊維の疲労強度式を架橋則に導入する。

$$\frac{\sigma_{fu}^n}{\sigma_{fu}^0} = A + \frac{1-A}{\{1+0.2 \cdot \Delta\delta \cdot (N-1)\}^{0.4}} \quad (1)$$

ここに、 σ_{fu}^n =繊維の引張疲労強度、 σ_{fu}^0 =繊維の引張強度、 $\Delta\delta$ =ひび割れ振幅、 δ_{max} =最大ひび割れ幅、 N =載荷回数、 $A=-0.51(\Delta\delta\delta_{max})+0.51$ である。関数形式および係数は PVA-ECC の引張および交番疲労試験^{9),10)}により決定しており、右辺第 2 項のひび割れ開閉量 $\Delta\delta \cdot N$ により疲労強度の低下度合いを決める。式(1)は繊維自体の疲労強度を表すものではなく、すべての疲労劣化要因を疲労破断でモデル化するために定義した見掛けの疲労強度式であり、繊維破断型の応力劣化を示す PVA-ECC にのみ適用可能な式である。

2.3 応力劣化関数

図-2 に、応力比 $\tilde{\sigma}$ と載荷回数の関係の例として、 $\delta_{max}=0.04\text{mm}$ 、 $\Delta\delta=0.01$ および 0.02mm としたときの結果を示す。図中の実線は解析結果のフィッティングカーブであり、 δ_{max} および $\Delta\delta$ を変数としたパラメトリック解析に基づき次式で定義した。

$$\tilde{\sigma} = a + \frac{1-a}{\{1+b \cdot \Delta\delta \cdot (N-1)\}^c} \quad (2)$$

ここに、

$$a = \begin{cases} 0 & (\text{for } \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} > 1) \\ a_0 - a_0 \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \right) \left(2 - \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \right) & (\text{for } \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \leq 1) \end{cases}$$

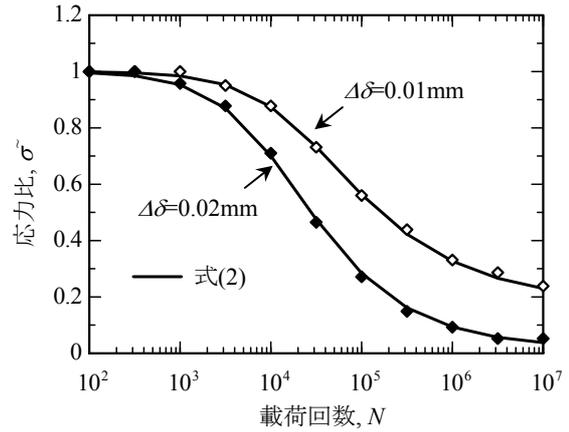


図-2 応力比変化の例 ($\delta_{max}=0.04\text{mm}$)

$$b = \begin{cases} -0.004 \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} - 1 \right) + 0.005 & (\text{for } \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} > 1) \\ 0.005 & (\text{for } \frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \leq 1) \end{cases}$$

$$c = 0.71 \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \right)^3 - 0.71 \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \right)^2 + 0.35 \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta_0} \right) + 0.37$$

$$a_0 = 1 - (0.29 \text{Log}_e \delta_{max} + 1.45)$$

$$\Delta\delta_0 = 0.37 \delta_{max} + 0.01$$

である。関数形式は繊維の疲労強度式と同様としており、係数 a は応力比の下限値を、 $\Delta\delta_0$ は a の値が 0 となる最小のひび割れ振幅を表す。次章以降の疲労解析では、式(2)の応力劣化関数を有限要素解析に適用することで、ECC の引張応力低下を考慮する。

3. ECC 梁の曲げ疲労解析

以下では、構築した ECC の疲労劣化モデルを用いて梁部材の 2 次元曲げ載荷解析を実施する。解析結果は、静的および疲労載荷時について Suthiwarapirak らが実施した曲げ載荷試験⁵⁾と比較するほか、パラメトリック解析により荷重条件が ECC の曲げ疲労特性に及ぼす影響を解析的に評価する。

3.1 解析条件と手順

解析対象とする曲げ載荷試験は、寸法 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体の 3 等分点曲げ載荷試験⁵⁾であり、静的単調載荷試験および繰返し載荷試験により、静的曲げ強度および破壊までに要する載荷回数が得られている。

解析モデルは対称性を考慮した 1/2 モデルとし、梁の軸方向に 40 分割、高さ方向に 20 分割とした。ECC には 4 節点平面応力要素を用い、分布ひび割れモデルによりひび割れ分散性を表現する。

表-1 に解析ケースをまとめる。繰返し載荷は供試体中央下縁の見掛けの曲げ応力により制御し、静的曲げ強度の実験値を基準とした最大曲げ応力比 S_{max} と最小曲げ

ここに、 $\delta_{max}^i=i$ サイクル目での最大ひび割れ幅、 $\Delta\delta^i=i$ サイクル目でのひび割れ振幅、 Δn^i =材料構成則の更新間隔である。式中の δ_{max}^i および $\Delta\delta^i$ は、有限要素解析から得られるひび割れ直交方向応力と架橋則より求めており、ひび割れ直交方向応力が繊維伝達応力と等しくなるときのひび割れ幅を取得し、除荷開始時の値(図-4中、 δ_A)を δ_{max}^i 、除荷開始時と再載荷開始時の値との差(図-4中、 $\delta_A-\delta_B$)を $\Delta\delta^i$ とする。

なお、圧縮およびせん断挙動では疲労の影響を考慮していない。

4. 解析結果

4.1 静的解析

図-5は、静的単調載荷時の曲げ応力と中央たわみの関係である。解析では、曲げ応力 2.9N/mm^2 でひび割れが生じた後、ひび割れの増加とともに接線剛性が小さくなり、 8.8N/mm^2 で引張下縁が引張強度に達する。最大曲げ応力は 9.0N/mm^2 であり、実験結果 ($8.2\text{--}9.6\text{N/mm}^2$) の範囲内にあることを確認した。解析結果は曲げ強度時およびポストピーク挙動のたわみを小さく見積もる結果となっているが、これは軟化勾配を決定する破壊エネルギーを小さく設定したことによるものと考えられる。

4.2 Case1の解析

Case1の解析により構築した疲労劣化モデルの検証を行った。図-6は、 $S_{max}=0.9$ および 0.75 とした場合の中央たわみと載荷回数との関係であり、図中の矢印は、解析において引張下縁で引張強度に達する要素が現れた載荷回数を指している。両ケースとも、たわみがほぼ一定のまま載荷回数が増加し、破壊時の載荷回数 N_f に対し $N=0.25N_f$ 程度からたわみの漸増が始まる。その後 $N=0.5N_f$ 程度で下縁が引張強度に達するとたわみの増加勾配が大きくなり、最終的な曲げ疲労破壊に至る。これらのたわみ変化の過程は実験結果とよく一致しており、本研究で提案する ECC の疲労劣化モデルにより PVA-ECC 梁の曲げ疲労挙動を再現できることがわかる。一方、解析では実験でたわみの急増が開始する辺りで破壊が生じ変形能を過小評価しているが、これは前述の破壊エネルギーの影響に加え、荷重増分等の解析条件の影響により引張強度後の不安定現象を十分に追跡できないことが原因の一つであると考えられる。

図-7は S_{max} と $\text{Log}_{10}N_f$ の関係である。解析により得られる S-N 関係は、片対数プロット上で次式により直線近似でき、凡そ実験結果の下限と整合することがわかる。

$$S_{max} = -0.219\text{Log}_{10}N_f + 1.771 \quad (6)$$

4.3 Case2の解析

Case2では、 S_{min} を変数としたパラメトリック解析を行い、荷重条件が曲げ疲労特性に及ぼす影響を解析的に評

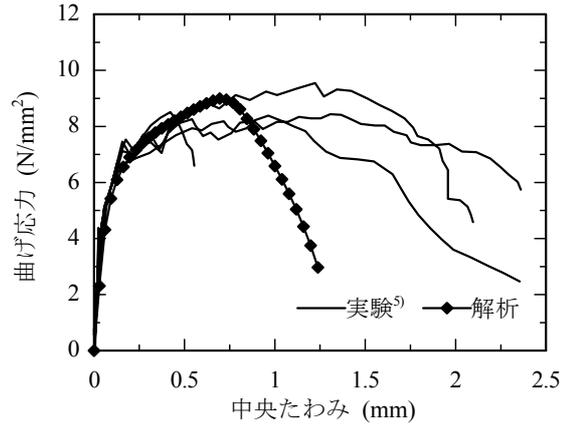


図-5 静的解析結果

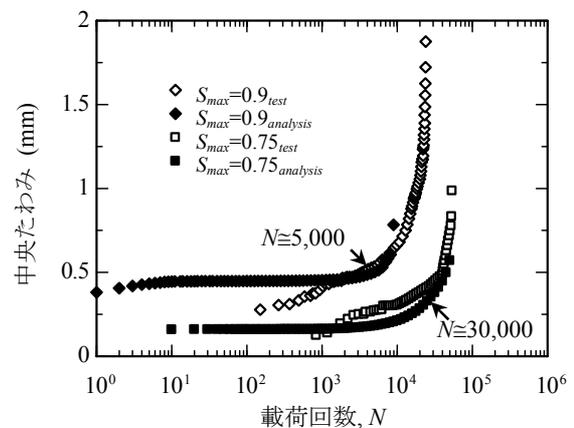


図-6 中央たわみの変化⁵⁾ ($S_{max}=0.9, 0.75$: Case1)

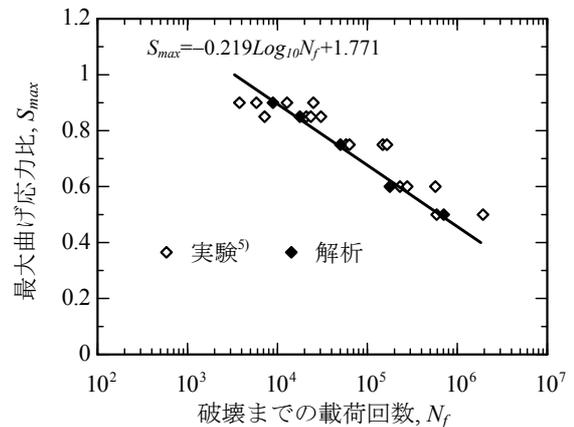


図-7 S-N 線図 (Case1)

価した。以下では、片側繰返し載荷と正負交番繰返し載荷に分けて結果をまとめる。

(1) 片側繰返し載荷 ($S_{min} \geq 0$)

図-8中の黒塗りのプロットは、片側繰返し載荷時の S-N 関係である。得られる関係は、 S_{min} ごとに片対数プロット上で直線近似でき、静的載荷時 ($S_{max}=1.0, N_f=1.0$) を考慮すると、本検討の範囲外である $0.9 \leq S_{max} < 1$ に折れ曲がり点を持つバイリニア型の S-N 線図を定義できる

ものと考えられる。図中には $S_{max}=0.9$ で折れ曲がる回帰線 ($S_{max}=a \cdot \text{Log}_{10}N_f+b$) を図示しており、それらの係数を表-3 にまとめている。 S_{min} に着目して図-8 および表-3 を見ると、 S_{min} が大きいほど破壊までの載荷回数が増加し、S-N 線図の勾配は緩やかとなる。これは、 S_{min} の増加に伴い荷重振幅（ひび割れ振幅）が小さくなることで疲労劣化が抑制されるためである。

図-9 中の黒塗りのプロットは、片側繰返し載荷時の $\text{Log}_{10}N_f$ と $(1-S_{max})/(1-S_{min})$ の関係であり、次式により近似できる。

$$\text{Log}_{10}N_f = k_1 \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} + k_2$$

$$= \begin{cases} 36.5 \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} & (\text{for } \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} \leq 0.1) \\ 4.58 \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} + 3.26 & (\text{for } \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} > 0.1) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 k_1 、 k_2 は係数である。静的載荷時を考慮すると、解析結果はバイリニア型に定義でき、図には $(1-S_{max})/(1-S_{min})=0.1$ を折れ曲がり点とする関係を示した。実験結果は概ね回帰線上に位置しており、 $\text{Log}_{10}N_f$ と $(1-S_{max})/(1-S_{min})$ の関係からも曲げ疲労試験の再現性が確認できる。また、圧縮疲労下にある普通コンクリートでは、圧縮強度に対する最大および最小圧縮応力比 S_{max} および S_{min} を用いて、 $k_1=17$ 、 $k_2=0$ としたときに圧縮疲労強度が表される¹⁷⁾が、ECC の曲げ疲労載荷においても同形式の疲労強度式を定義できると考えられる。

(2) 正負交番繰返し載荷 ($S_{min}<0$)

図-8 中の白抜きのプロットは、正負交番繰返し載荷時の S-N 関係であり、片側繰返し載荷時からの疲労耐久性の低下がわかる。特に S_{max} が大きいほど $\Delta\delta$ が大きくなるため繊維伝達応力の劣化が顕著となり、本検討の範囲内でバイリニア型の S-N 線図が確認される。

図-9 中には、 $S_{min}<0$ とした場合の $\text{Log}_{10}N_f$ と $(1-S_{max})/(1-S_{min})$ の関係を図示している。正負交番繰返し載荷時の解析結果は、式(8)により片側繰返し載荷時と同様の形式で近似できるが、破壊までの載荷回数は 1/3 程度となっており、 S_{min} の符号により関係式が区別されることがわかる。

$$\text{Log}_{10}N_f = \begin{cases} 20.0 \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} & (\text{for } \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} \leq 0.17) \\ 4.20 \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} + 2.78 & (\text{for } \frac{1-S_{max}}{1-S_{min}} > 0.17) \end{cases} \quad (8)$$

なお、本項で行った正負交番繰返し載荷解析の結果は、パラメトリック解析による推測結果であり、今後、実験との比較による検証が必要であると思われる。

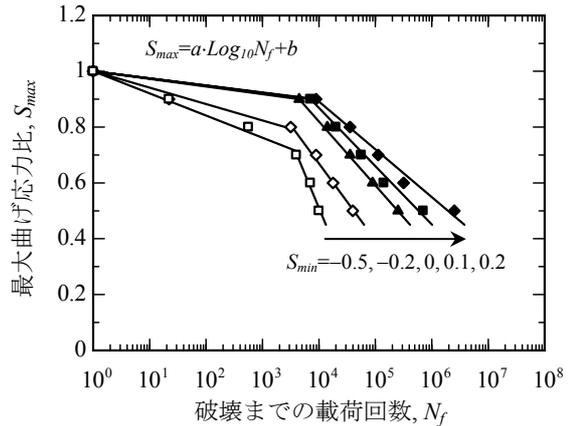


図-8 S-N 線図 (Case2)

表-3 S-N 線図の係数 ($S_{max}=a \cdot \text{Log}_{10}N_f+b$)

S_{min}	a	b	範囲
0.2	-0.025	1.0	$N_f \leq 8,900$
	-0.168	1.556	$N_f > 8,900$
0.1	-0.026	1.0	$N_f \leq 7,100$
	-0.204	1.675	$N_f > 7,100$
0	-0.027	1.0	$N_f \leq 4,500$
	-0.232	1.754	$N_f > 4,500$
-0.2	-0.056	1.0	$N_f \leq 3,600$
	-0.276	1.774	$N_f > 3,600$
-0.5	-0.081	1.0	$N_f \leq 3,800$
	-0.490	2.469	$N_f > 3,800$

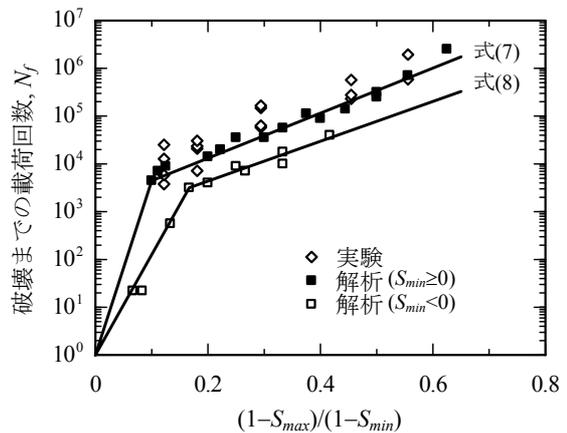


図-9 $\text{Log}_{10}N_f$ と $(1-S_{max})/(1-S_{min})$ の関係

5. おわりに

本研究では、ひずみ硬化型繊維補強セメント複合材料の一つである ECC について、架橋則に基づき繊維伝達応力の疲労劣化モデルを構築し、梁部材の曲げ疲労解析を行った。その内容は以下の通りである。

- 1) 最大ひび割れ幅およびひび割れの開閉量をパラメータとした繊維の疲労強度式を架橋則に導入することで、ECC の繊維伝達応力劣化式を定義した。

- 2) 1)を用いた曲げ疲労解析結果は、PVA-ECCの曲げ疲労試験のたわみ変化およびS-N線図を再現でき、提案するモデルによりECCの疲労挙動を追跡できることを示した。
- 3) 荷重条件を変数としたパラメトリック解析から、静的曲げ強度に対する最大および最小曲げ応力比を用いて曲げ破壊までの载荷回数を推定できることがわかった。また、その推定式は、片側繰返し载荷時と正負交番繰返し载荷時、すなわち最小曲げ応力比の符号により区別されることが示唆される。

今後の展望として、载荷ケースを追加した実験および解析による、提案する疲労劣化モデルのより詳細な精度検証と曲げ疲労強度式の検討が挙げられる。

謝辞

本研究は、科研費・基盤研究(C) (課題番号 21560498) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)，2007
- 2) 三田村浩，須田久美子，坂田昇，平石剛紀，赤代恵司：鋼床版への高靱性繊維補強セメント複合材料ECCを用いた補強工法の適用・美原大橋における施工，橋梁と基礎，Vol.39，pp.88-91，2004
- 3) 平石剛紀，藤代勝，福田一郎，巴史郎，関田徹志，坂田昇：高靱性セメント複合材料を用いた吹付け補修工法の農業用水路への適用，鹿島技術研究年報，第54号，2006
- 4) 角間恒，松本高志，林川俊郎，何興文：引張疲労荷重を受けるECCの応力-ひずみ関係の推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.277-282，2009
- 5) Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T. and Kanda, T.: Multiple Cracking and Fiber Bridging Characteristics of Engineered Cementitious Composites under Fatigue Flexure, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.16, No.5, pp.433-443, 2004
- 6) Kakuma, K., Matsumoto, T., Hayashikawa, T. and He, X.: Flexural Fatigue Analysis of PVA-ECC Beams Based on Micromechanics Approach, Proceedings of CODE2009, pp.250-252, 2009
- 7) Kanda, T. and Li, V. C.: Effect of Apparent Strength and Fiber-Matrix Interface Properties on Crack Bridging in Cementitious Composites, Journal of Engineering Mechanics, Vol.125, No.3, pp.1-10, 1999
- 8) Li, V. C. and Leung, K. Y.: Steady-state and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites, Journal of Engineering Mechanics, Vol.118, No.11, 1992
- 9) Matsumoto, T., Wangsiripaisl, K., Hayashikawa, T. and He, X.: Uniaxial Tension-Compression Fatigue Behavior and Fiber Bridging Degradation of Strain Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites, International Journal of Fatigue, Vol.32, No.11, pp.1812-1822, 2010
- 10) Matsumoto, T., Chun, P. and Suthiwarapirak, P.: Effect of Fiber Fatigue Rupture on Bridging Stress Degradation in Fiber Reinforced Cementitious Composite, Proceedings of FraMCoS-5, pp.653-660, 2004
- 11) 鬼塚由佳，金久保利之：DFRCCの曲げ性能に及ぼす繰返し载荷の影響の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.1315-1320，2009
- 12) Li, V. C. and Matsumoto, T.: Fatigue Crack Growth Analysis of Fiber Reinforced Concrete with Effect of Interfacial Bond Degradation, Cement and Concrete Composites, Vol.20, pp.339-351, 1998
- 13) 松本高志，Suthiwarapirak, P., 浅本晋吾：ECCの疲労解析モデルの構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.237-242，2002
- 14) Rots, J. G. and Blaauwendraad, J.: Crack Models for Concrete: Discrete or Smeared? Fixed, Multi-Directional or Rotating?, HERON, Vol.34, No.1, pp.1-59, 1989
- 15) 渡部憲，白井信明，大岡督尚，白都滋：各種繊維補強モルタル試験体の曲げ変形挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.355-360，2001
- 16) 篠原保二，金子葉：コンクリートの破壊進行領域における圧縮せん断挙動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.525，pp.1-6，1999
- 17) 土木学会：コンクリート標準示方書・構造性能照査編，2002