

## ECCによる鋼床版上面増厚補強の合成効果に関する解析的検討

An analytical study on the composite effect of steel deck with ECC overlay reinforcement

角間恒\*, 松本高志\*\*, 林川俊郎\*\*\*, 何興文\*\*\*\*

Ko Kakuma, Takashi Matsumoto, Toshiro Hayashikawa, Xingwen He

\* 修(工), 北海道大学大学院, 工学研究科環境創生工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 西 8)

\*\* Ph.D., 北海道大学大学院准教授, 工学研究科環境創生工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 西 8)

\*\*\* 工博, 北海道大学大学院教授, 工学研究科環境創生工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 西 8)

\*\*\*\* 博(工), 北海道大学大学院助教, 工学研究科環境創生工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 西 8)

This study conducts static and fatigue loading simulations of bridge steel deck which is overlay-reinforced by Engineered Cementitious Composite (ECC), and the composite effect is analytically evaluated. The fatigue model of ECC is developed based on micromechanics, the concept of the material design of ECC, and flexural fatigue analysis is carried out in order to show the validity. As a result of FEM analysis of the composite deck, deflection and deck strain decrease due to the reinforcement effect of ECC, and it is shown that the high tensile resistance of ECC can improve the fatigue durability of steel deck. Furthermore, it is expected that the controlled crack opening displacement of ECC is beneficial to prevent the structural degradation caused by environmental influences.

*Key Words: ECC, fatigue degradation, composite deck, composite effect*

キーワード: ECC, 疲労劣化, 合成床版, 合成効果

## 1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites) の一種である ECC (Engineered Cementitious Composite) は, ひび割れ面での繊維による応力伝達と複数ひび割れの分散発生により, 一軸引張応力下において擬似ひずみ硬化挙動を示し, 高い変形性能およびエネルギー吸収性能を有する (図-1). また, 一軸直接引張試験での平均ひび割れ幅が 0.2mm 以下で定義され<sup>1)</sup>, ひび割れ幅が制御されることから, 構造物の劣化を促進する物質の透過を抑制できる. 以上の特長より, ECC は既設構造物の補修・補強に適用されることが期待されており, その一つに道路橋床版の増厚補強がある.

道路橋鋼床版では, 部材接合部において自動車荷重の繰り返し作用による疲労損傷が多く報告されている. 平成 14 年の道路橋示方書の改訂<sup>2)</sup>では, 疲労に関する項目が追加されているが, 改訂以前に設計された橋梁では疲労対策が必要となっている. 鋼床版の疲労対策工法の一つに, アスファルト舗装の一部をセメント系材料に置き換えることで剛性を向上させる上面増厚工法があり,

最近では, 鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete, 以下, SFRC) を用いるケースが見られる<sup>3)</sup>. SFRC では, ひび割れ面での繊維の応力伝達により普通コンクリートと比較して応力解放が緩やかとなり靱性が向上するが, ひび割れ幅が制御されず, 繊維自体の腐食も問題となると考えられる. 一方, ECC では, 前述のようにひび割れ幅の抑制が可能であり, エネルギー吸収性により優れた疲労耐久性を示すことから, より高い補強効果が期待できる. 実橋梁において ECC による増厚補強

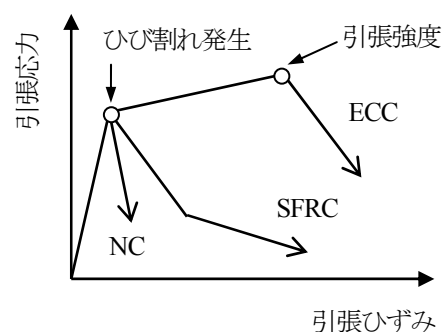


図-1 ECC の応力-ひずみ関係 (模式図)

がなされた例も存在している<sup>4)</sup>。

ECC の疲労特性に関しては、引張疲労試験<sup>5)</sup>や曲げ疲労試験<sup>6)</sup>により材料および部材レベルでの検討が行われているが、材料と構造物の疲労設計は静的耐荷力に基づいて考慮されているのが現状であり、疲労劣化メカニズムを考慮した材料設計手法の開発および部材・構造物の疲労寿命予測手法の提案が必要となっている。

ECC の疲労劣化はひび割れ面での繊維伝達応力の減少（架橋応力の劣化）が支配的なメカニズムであり、著者らはこれまでの研究において、その劣化要因に着目した ECC の架橋応力劣化モデルの構築を行ってきた<sup>7, 8)</sup>。本研究では、ECC 梁の曲げ疲労解析により提案する疲労モデルの妥当性を確認した後に、ECC-鋼合成床版の定点疲労解析を行った。得られた結果について、補強前および SFRC-鋼合成床版の解析結果と比較することで、ECC による合成効果を評価した。

## 2. ECC の疲労劣化モデル

### 2.1 架橋則と疲労劣化要因

ECC は、マイクロメカニクスと破壊力学に基づく配合設計により特有の挙動である擬似ひずみ硬化挙動を得る<sup>9)</sup>。その中で重要な関係が、架橋則と呼ばれるひび割れ面での架橋応力とひび割れ開口幅との関係である。架橋則は複合材料を構成する繊維、マトリクスおよび両者の界面に関するマイクロメカニクスパラメータにより導かれる関係であり、ECC の引張強度や破壊エネルギーといった材料特性を評価できる。ECC の疲労劣化は架橋応力の劣化により生じ、マイクロメカニクスパラメータの変化を架橋則に導入することで、疲労劣化のモデル化を行うことが可能である。ECC の曲げ疲労試験<sup>6)</sup>によると、架橋応力劣化はひび割れ面を架橋する繊維の破断とマトリクスからの繊維引抜けにより生じ、それらの卓越状況は補強用繊維の特性により異なる。繊維強度に対して繊維-マトリクス界面の付着力が大きいポリビニルアルコール繊維を用いた ECC（以下、PVA-ECC）では繊維の破断が卓越し、繊維強度に対して界面付着力が小さいポリエチレン繊維を用いた場合には繊維の引抜けが支配的となる。これらの劣化要因を表すマイクロメカニクスパラメータとして繊維強度および摩擦付着強度が挙げられ、载荷回数の増加に伴う繊維強度および摩擦付着強度の低減を考慮することで、それぞれ繊維破断および繊維引抜けによる架橋応力劣化を表すことができる。

本研究では、PVA-ECC をモデル化の対象とし、疲労荷重下での ECC の架橋応力劣化が繊維破断のみにより生じると仮定し、次節で述べる破断判定式を架橋則に導入する。なお、本研究での架橋則には、短繊維補強複合材料の基礎的力学モデルである繊維引抜きモデル<sup>10)</sup>を基に著者らが構築した数値モデル<sup>7)</sup>を用いている。

表-1 マイクロメカニクスパラメータ

|                       |                              |
|-----------------------|------------------------------|
| 繊維長; $L_f$            | 12 mm                        |
| 繊維径; $d_f$            | 0.04 mm                      |
| 繊維弾性係数; $E_f$         | 21.8 kN/mm <sup>2</sup>      |
| 繊維強度; $\sigma_{fu}^n$ | 806 (1343) N/mm <sup>2</sup> |
| 繊維混入率; $V_f$          | 2.1 vol%                     |
| 摩擦付着強度; $\tau_i$      | 2.01 N/mm <sup>2</sup>       |
| 化学付着強度; $\tau_s$      | 31.3 N/mm <sup>2</sup>       |
| スナビング係数; $f$          | 0.5                          |
| 繊維強度低減係数; $f'$        | 0.3                          |

\* ( )内の数字は4章で用いる値である。

### 2.2 繊維破断の判定式

提案モデルでは、繊維破断判定式を架橋則に導入することで繊維破断を表現している。架橋応力は個々の繊維に作用する引張応力を、繊維配置と配向のランダム性を考慮して足し合わせることで計算される。複合材料中の各繊維に作用する引張応力 ( $\sigma_N^i$ ) と繊維強度 ( $\sigma_{fu}^n$ ) との比 ( $\sigma_N^i / \sigma_{fu}^n$ ) が判定式を満たした場合に繊維の疲労破断が生じるものとし、破断繊維を引張応力の線形和から除外している。破断判定式は、载荷回数 ( $N$ ) の関数として次式で定義した。

$$\frac{\sigma_N^i}{\sigma_{fu}^n} = \begin{cases} 1 + k_1 \log(N) & (\text{for } 0 \leq N < 10^3) \\ k_2 + k_3 \log(N) & (\text{for } 10^3 \leq N) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $k_1$ 、 $k_2$  および  $k_3$  はパラメータである。PVA 繊維単体の疲労特性に関するデータが十分でないことから、金属材料で見られる S-N 関係を参考にしたバイリニア型の関数で破断条件を定義し、応力比 0.9 で 1000 回、応力比 0.5 で 100 万回の疲労寿命となるよう、パラメータにはそれぞれ 0.033、1.3 および 0.133 を用いた。なお、疲労限は設定していない。

### 2.3 応力劣化関数

表-1 のマイクロメカニクスパラメータを用いて、载荷回数毎の架橋応力とひび割れ開口幅の関係を算出した。結果を図-2 に示す。図-2 からは、载荷回数の増加に伴う架橋応力の劣化が確認できる。载荷回数 1000 回までは見掛けの繊維強度の低下が小さいため、架橋応力の劣化がほとんど生じていない。見掛け上の繊維強度の低下が顕著となる载荷回数 1000 回以降では、架橋応力の急激な劣化が見られる。ひび割れ幅が大きくなるほど载荷回数 1 回目に対する応力劣化の割合が大きくなっているが、これはひび割れ開口幅が大きくなるほど繊維の引抜き荷重が大きくなることにより繊維破断が促進されるためであり、ECC に生じる引張ひずみが大きくなるほど疲労劣化が進行しやすいことを表している。

図-3 には、ひび割れ開口幅 0.005 および 0.015mm における载荷回数  $N$  回目の架橋応力 ( $\sigma_N$ ) と载荷回数 1

回目の架橋応力 $\sigma_1$ の比（以下、応力比）を載荷回数との関係で示している（図中の◇と△）．以下の疲労解析では、図-3 の関係を次式で表し、ひび割れ開口幅（ $\delta$ ）に応じて応力比を計算している．

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_1}(\delta, N) = \exp\{-(z_0 + z_1 \delta^{z_2})(\log N)^{z_3}\} \quad (2)$$

ここで、 $z_0, z_1, z_2, z_3$  はパラメータであり、図-2 から求められる応力比を再現する値として、用いるマイクロメカニクスパラメータに応じて設定している．図-3 にはそれぞれ 0.0006, 0.009, 1.0 および 4.0 とした場合の関係を併せて示している．

## 2.4 疲労荷重下での材料構成則

本研究の疲労解析では、ECC のひび割れ挙動を分布ひび割れモデルによりモデル化し有限要素解析に適用する．前節までに述べた架橋応力の劣化関係は、ひび割れ面での局所的な劣化を表すものであり、本節では疲労解析に用いる ECC の応力-ひずみ関係について説明する．

静的載荷時の ECC の応力-ひずみ関係は図-4 で定義し、引張側はトリリニア型、圧縮側は圧縮強度までは放物線型、圧縮強度に達した後は応力が一定となる関係としている．ひび割れモデルには回転ひび割れモデルを採用し、圧縮側は von Mises 規準に基づく弾塑性モデルとしている．疲労荷重下での応力-ひずみ関係を決定する手順を図-5 に示す．応力劣化量は各要素に発生する最大引張ひずみの値（ $\varepsilon_{max}$ ）に応じて決まるものとし、解析においてはひび割れ開口幅（ $\delta_{co}$ ）に変換して用いる（経路 A→A'）．得られたひび割れ開口幅を式(2)に適用することで応力比（ $\sigma_N/\sigma_1$ ）を算出し（経路 A'→B'），ひび割れが生じていない応力-ひずみ関係の応力を $\sigma_N/\sigma_1$  倍することで次の載荷ステップでの応力-ひずみ関係を低下させる（経路 A→B）．

## 3. 曲げ疲労解析

### 3.1 解析概要

前章で説明した疲労モデルを用いて ECC 梁の曲げ疲労解析を行い、その妥当性を検討する．解析対象は供試体寸法 100x100x400mm、曲げスパン 100mm を有する PVA-ECC の 4 点曲げ疲労試験<sup>6)</sup>であり、2 次元アイソパラメトリック要素によりモデル化を行っている．

図-6 に疲労解析の流れを示す．初期載荷時にはすべての要素が疲労劣化を考慮していない応力-ひずみ関係を構成則としており、ひび割れが生じた要素では 2.4 節で示した手順により応力劣化を考慮する．式(2)中の載荷回数（ $N$ ）には、ひび割れ後に受ける見掛けの載荷回数をを用いている．ひび割れが生じていない要素については、応力の劣化が生じないものとし、また、圧縮側ではひび割れの有無に関わらず疲労劣化を考慮していない．

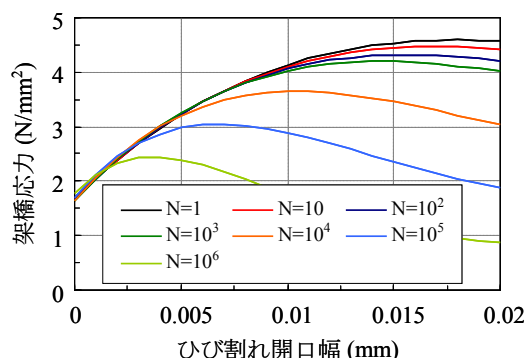


図-2 架橋応力とひび割れ開口幅の関係

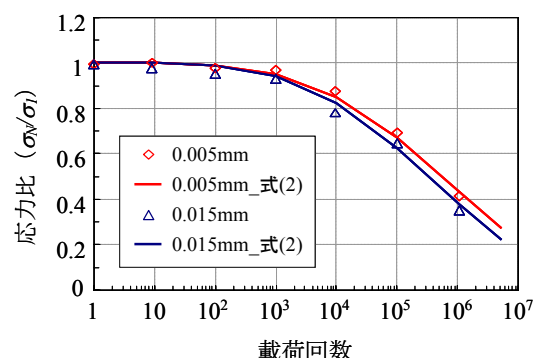


図-3 応力劣化関数

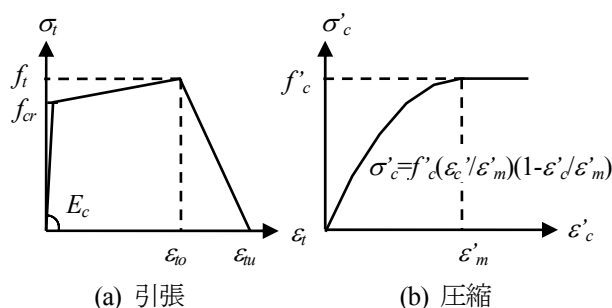
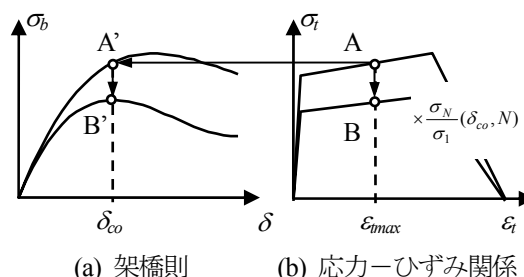


図-4 ECC の応力-ひずみ関係



A→A': 最大引張ひずみをひび割れ幅に変換  
A'→B': 応力劣化量の決定  
A→B: 次のステップの構成則決定

図-5 疲労モデル

表－2 には解析に用いる材料特性値を示す．単調載荷解析により得られた曲げ強度は  $9.8\text{N/mm}^2$  であり，疲労解析は，曲げ強度に対して曲げ応力比 0.9, 0.85, 0.75 および 0.6 の計 4 ケースについて行った．

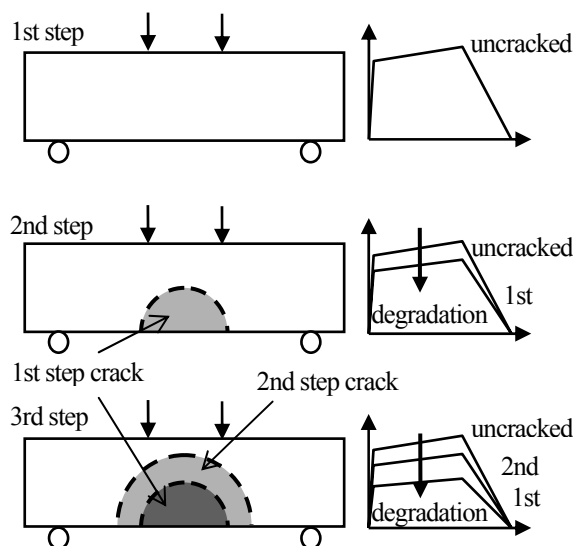
### 3.2 解析結果

図－7 は各曲げ応力比における載荷回数と中央たわみの関係であり，実験結果<sup>6)</sup>を併せて示す．解析では，すべてのケースにおいて載荷回数の増加に伴いたわみが徐々に増加し，疲労破壊に至っている．各曲げ応力比での疲労破壊時の載荷回数は 5750 回，1.4 万回，4.5 万回，24.3 万回であり，実験と同程度の疲労寿命が得られている．曲げ応力比 0.9, 0.85 および 0.75 では，実験結果と同様のたわみ増加過程を示し，特に曲げ応力比 0.85 および 0.75 のケースではたわみの値をよく再現できている．曲げ応力比 0.6 では，載荷回数 1 万回辺りまでは実験結果と一致しているが，実験では 1 万回以降においても小さなたわみが保たれた後に破壊時に急増しており，たわみを大きく見積もる結果となった．

図－8 は曲げ応力比 0.9 および 0.6 における初期載荷時および疲労破壊直前の主ひずみ分布であり，分布図の下限値および上限値は，それぞれひび割れ発生時レベルおよび引張強度時レベルを表している．曲げ応力比 0.9 では，初期載荷時に引張領域の広い範囲でひび割れが生じており，ECC のひび割れ分散性が発揮されていることが確認できる．破壊時には供試体中央の下面で引張ひずみが引張強度時レベル ( $\varepsilon_u$ ) に達している．初期載荷時と破壊直前でのひび割れ領域を比較すると，両者の面積に大きな差は見られていない．これより，疲労載荷中にひび割れ本数および長さがほとんど変化せず，たわみの増加がひび割れ面での架橋応力劣化のみにより生じていることが，解析結果から推測される．曲げ応力比 0.6 では，曲げ応力比 0.9 の場合と比較して初期載荷時のひび割れ領域が小さくなっている．疲労破壊時には初期載荷時と比較してひび割れ領域の横幅に変化はないが，高さ方向に領域が拡大している．これは疲労載荷中にひび割れの本数は増加しないが，初期ひび割れが進展することを示唆しており，曲げ応力比 0.6 では，架橋応力劣化とともにひび割れ進展がたわみ増加の要因となっている．

図－9 は疲労試験にて観察された供試体下面のひび割れ分布<sup>6)</sup>である．曲げ応力比 0.9 では，供試体下面でひび割れが分散して発生しており，ひび割れ発生領域に関して，解析と実験との整合性が見られる．一方，曲げ応力比 0.6 では，下面でのひび割れ領域が曲げ応力比 0.9 と同程度である解析に対して，実験では特定の領域にひび割れが集中している．図－7 において曲げ応力比が小さくなるほど誤差が見られているのは，このひび割れ分布の違いにあると考えられ，過大なひび割れを見込む解析においてたわみが大きくなる結果となっている．

図－10 は曲げ応力比と疲労破壊が生じるまでの載荷

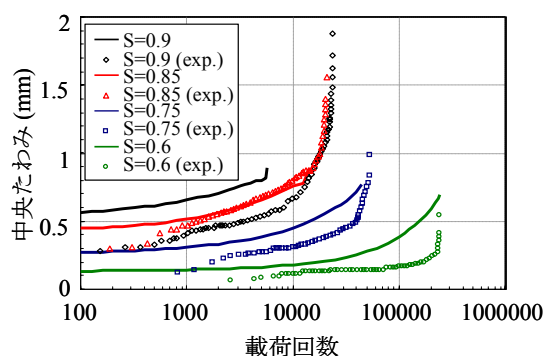


図－6 疲労解析の流れ

表－2 材料特性

|                            |                              |
|----------------------------|------------------------------|
| ヤング係数; $E_c$               | $18\text{ kN/mm}^2$          |
| ひび割れ強度; $f_{cr}$           | $3.2\ (4.4)\text{ N/mm}^2$   |
| 引張強度; $f_t$                | $4.2\ (5.2)\text{ N/mm}^2$   |
| 引張強度時ひずみ; $\varepsilon_o$  | $0.0067\ (0.012)$            |
| 引張終局ひずみ; $\varepsilon_u$   | $0.012\ (0.04)$              |
| 圧縮強度; $f'_c$               | $32.1\ (48.6)\text{ N/mm}^2$ |
| 圧縮強度時ひずみ; $\varepsilon'_m$ | $0.004$                      |
| ポアソン比; $\nu$               | $0.23$                       |

\* ( )内の数字は 4 章で用いる値である．



図－7 載荷回数と中央たわみの関係

回数の関係であり，実験結果<sup>6)</sup>を併せて示している．解析により得られた S－N 関係は実験により得られているものと同様にバイリニア型で定義でき，その関係はよく一致していることから，本研究で提案する疲労モデルにより PVA－ECC の疲労寿命を予測できることが確認された．実際の複合材料における架橋応力劣化は，繊維破断と繊維引抜けにより生じ，PVA－ECC の疲労破断面では繊維破断が支配的となることを 2.1 節で述べたが，疲

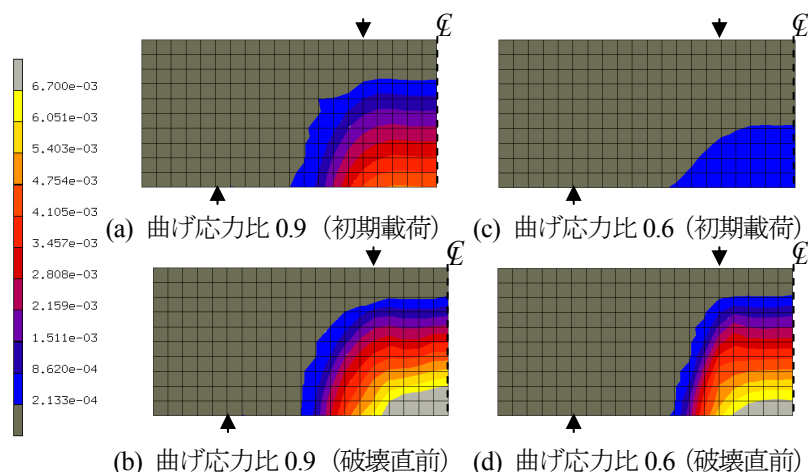


図-8 主ひずみ分布

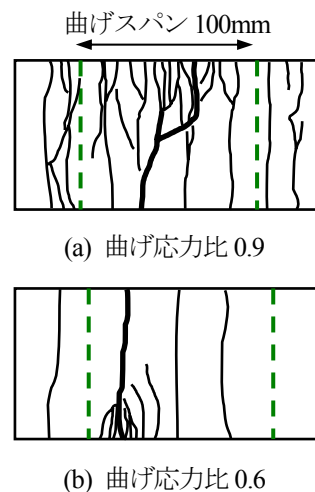


図-9 ひび割れ分布<sup>6)</sup>

劣化に至る過程においては、繊維の疲労破断に対して繊維-マトリクス界面の平滑化が先行して生じ、载荷回数が増加するにつれて繊維破断による劣化が卓越するようになり、パイリニア型に近い架橋応力の劣化過程を示すとされる<sup>11)</sup>。本研究では繊維破断のみで架橋応力劣化を表現しているが、以上のような架橋応力の劣化過程を表す繊維の疲労特性として、式(1)の破断判定式は適切な関係であった。解析と実験との差について言及すると、図-10では解析により得られたS-N関係が、実験結果の危険側を再現している傾向が見られる。これは、本研究での疲労モデルが最大引張ひずみに応じて応力劣化量を決定しているためであると考えられる。荷重制御による疲労载荷では、载荷回数の増加とともに引張ひずみが増加していくが、増加した後のひずみにより応力比を決定しているため、劣化量を大きく見積もる結果となっている。今後のモデルの改善点として、積算ひずみあるいは積算ひび割れ開口幅を導入した応力劣化関数の検討も必要であると考えられる。

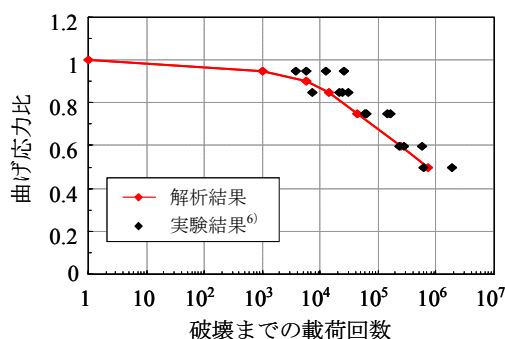


図-10 S-N 関係

#### 4. 合成床版の疲労解析

##### 4.1 解析概要

ECCの実構造物への適用例に道路橋鋼床版の上面増厚補強がある。三田村らは、ECC-鋼合成床版の定点疲労载荷試験および輪荷重走行試験を行い、合成効果の検討を行っている<sup>12)</sup>。ここでは、同合成床版の静的および定点疲労解析を行い、ECCによる合成効果を解析的に評価する。

解析対象とする構造を図-11に示す。図-11は、三田村らが実施した部分パネル試験<sup>12)</sup>の供試体を参考にしたものであり、ECC、鋼床版、主桁および縦梁からなる構造である。ECCおよび鋼床版の厚さはそれぞれ40mmおよび12mmであり、ずれ止めには薄層でも設置可能なFRP製のプレート型ジベル(図-12)が用いられている。

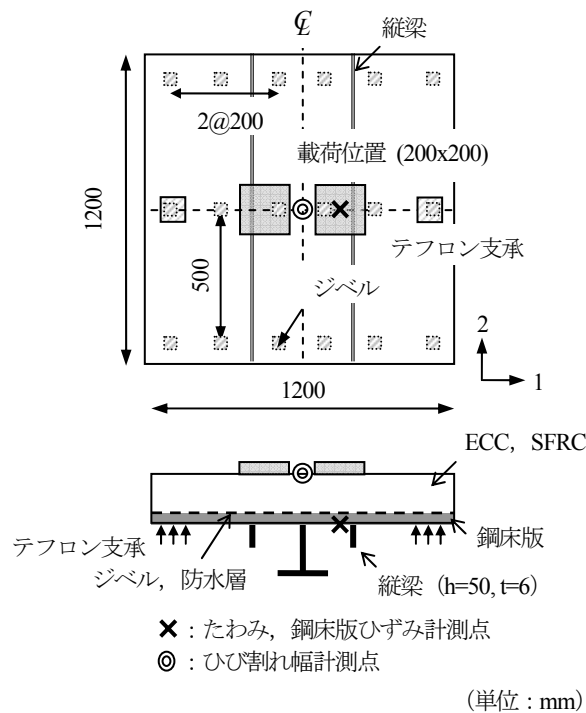


図-11 合成床版の構造

ジベルを設置しない部分には、引張強さ  $15\text{N/mm}^2$ 、伸び率 400%以上、酸素透過性  $1.3\text{g/m}^2 \cdot 24\text{h}$  を有するポリウエアを用いた防水層が設けられている。荷重作用位置は、ECC に局所的な引張応力が作用する場合を想定して、主桁を跨ぐように作用させている。ECC が鋼床版の疲労対策に適用されることが期待されている要因の一つに、引張力負担による負の曲げモーメントに対する抵抗性があり、本解析ではその効果について検討することとなる。

以上について、静的荷重および定点疲労荷重による有限要素解析を行う。同時に、ひずみ軟化型のセメント系材料を増厚材に用いたケースおよび一般的なアスファルト舗装を想定したケースについて静的解析を行い、合成效果の比較を行う。載荷荷重は設計荷重に相当する  $150\text{kN}$  を基準として決定した。静的解析では、最大荷重を設計荷重の 4 倍である  $600\text{kN}$  とした。疲労解析は、 $150\text{kN}$ 、 $300\text{kN}$ 、 $450\text{kN}$  の 3 ケースについて行い、載荷回数の上限を 200 万回とした。なお、疲労解析は ECC 合成のケースのみの実施である。

## 4.2 解析モデル

図-13 は解析モデルであり、対称性を考慮して 1/4 モデルとした。ECC および鋼床版には 8 節点ソリッド要素を、縦梁には 4 節点シェル要素を用いている。主桁のモデル化は行っておらず、主桁位置の鋼床版下面の鉛直変位を拘束している。支承部は弾性支持とし、パラメータ解析によりばね剛性を決定した。ECC と鋼床版との間にはインターフェース要素を挿入することで界面特性を考慮している。インターフェース要素の構成則は、法線方向を剛と仮定し、すべり方向には防水層が抵抗しないとして非常に小さな剛性を与えている。ジベルの直接的なモデル化は行っていないが、ジベル箇所インターフェース要素の剛性を大きくすることで ECC と鋼床版の一体化を表現している。ジベル箇所を表すインターフェース要素の大きさは、プレート型ジベルの円筒部の寸法を考慮した  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$  である。

ECC の材料特性値には表-2 を用いる。式(2)中のパラメータには表-1 のマイクロメカニクスパラメータを用いて決定した値として表-3 を用いる。ここでは軟化挙動時の応力劣化も考慮しており、ひび割れ幅に応じてパラメータを変化させている。鋼材の応力-ひずみ関係は von Mises 規準に基づく弾完全塑性モデルとし、降伏応力を  $280\text{N/mm}^2$  としている。

合成效果の比較対象となるひずみ軟化型のセメント系材料を用いた合成床版およびアスファルト舗装を想定したケースに関しては、次のようなモデルとした。ひずみ軟化型材料の応力-ひずみ関係は図-14 で定義し、SFRC を想定した材料特性値を入力パラメータとしている。ひび割れ強度 ( $f_t$ ) は ECC と同値とし、軟化挙動はひび割れ幅  $1.5\text{mm}$  までの引張軟化曲線下の面積から求められる破壊エネルギーを用い<sup>13)</sup>、図中の斜線部の面積

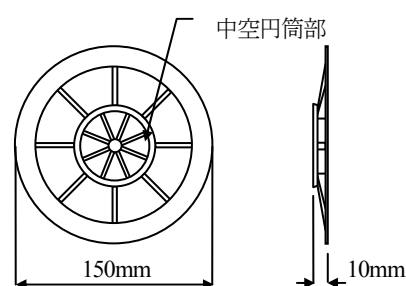


図-12 プレート型ジベル

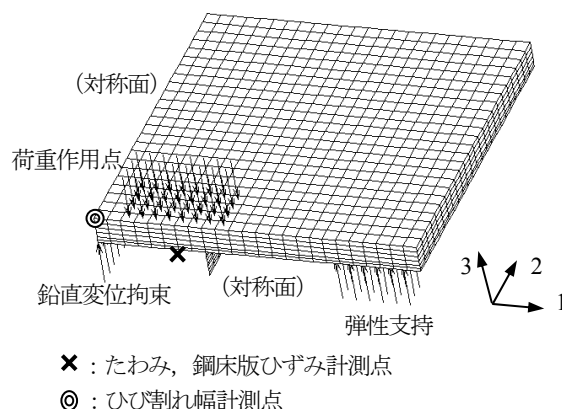


図-13 解析モデル

表-3 応力劣化関数パラメータ ( $\delta: \text{mm}$ )

|       | $0 < \delta \leq 0.04$ | $0.04 < \delta \leq 0.3$ | $0.3 < \delta$ |
|-------|------------------------|--------------------------|----------------|
| $z_0$ | -0.0001                | 0.04                     | 0.005          |
| $z_1$ | 0.02                   | 0                        | 0.022          |
| $z_2$ | 1.2                    | 0                        | 1.00           |
| $z_3$ | 4.6                    | 2.1                      | 2.4            |

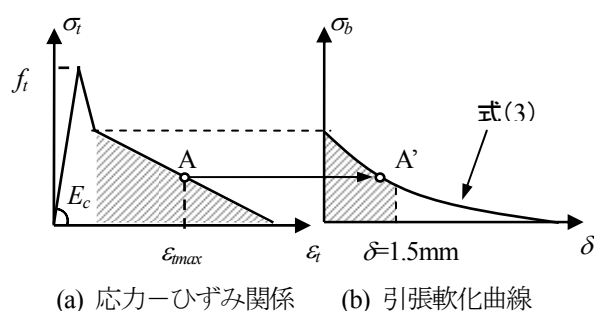


図-14 SFRC の応力-ひずみ関係と引張軟化曲線

が等価となるようにした。引張軟化曲線には次式<sup>10)</sup>を用いており、式中のパラメータは表-4 とした。

$$\tilde{\sigma}_b = g \{1 - (\tilde{\delta} - \tilde{\delta}^*)^2\} \quad (3)$$

ここに、 $\tilde{\sigma}_b = \sigma_b / \sigma_0$ 、 $\sigma_0 = V_f \tau (L_f / d_f) / 2$ 、 $g = 2 / (4 + f^2) (1 + e^{\pi f/2})$ 、 $\tilde{\delta} = \delta / (L_f / 2)$ 、 $\tilde{\delta}^* = 2 \tau L_f / (E_f d_f)$  である。

圧縮挙動は図-4(b)と同様であり、圧縮強度は ECC と

同値とし、 $\varepsilon'_m$ の値はECCとSFRCの弾性係数の違いを考慮して0.002とした。ここでは、増厚材特性の違いのみに着目した合成効果の比較を目的とし、一体化の方法はECC合成の場合と同様としている。アスファルトは弾性係数1000N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比0.3の弾性体でモデル化し、鋼床版との界面は完全剛結としている。

また、以下の解析結果で示すたわみは図-11中×点での値、鋼床版ひずみは同点での1方向ひずみの値、ひび割れ幅は図中○点の1方向ひずみから図-5あるいは図-14中の経路A→A'を用いて換算した値である。

#### 4.3 静的解析結果

図-15は単調載荷時の荷重とたわみの関係であり、実験結果<sup>12)</sup>を併せて示している。ECC合成では、28kN時に主桁直上に初期ひび割れが生じるが、ひび割れ後のひずみ硬化挙動により引張応力を負担するため、剛性の低下は見られない。その後、ひずみの増加とひび割れ領域の拡大により徐々に剛性が低下し、380kN時には軟化点に到達する要素が現れ、荷重-たわみ関係の接線剛性はアスファルト舗装時と同程度となっている。570kN時には荷重位置の鋼床版の降伏が生じるが、その後も荷重は増加しており、設計荷重の4倍に当たる600kN時においても破壊に至っていない。150kNおよび600kN時のたわみはアスファルト舗装時の43%および78%であり、アスファルトの割れを考慮していないため600kN時にはたわみの低減が小さくなっているが、ECC補強によるたわみの低減が確認された。SFRC合成では、29kN時に主桁直上に初期ひび割れが生じ、550kN時に荷重位置直下の鋼床版が降伏域に達したが、ECC合成と同様、破壊には至らず、増厚補強によるたわみの低減が見られる。150kNおよび600kN時のたわみはアスファルト舗装時の34%および87%であった。ECC合成とSFRC合成を比較すると、ECCの弾性係数がSFRCの弾性係数の半分程度であることから載荷初期においてはSFRC合成とした場合に剛性が高く、150kN時にはECC合成のたわみがSFRC合成の場合の1.26倍となっている。しかしながら、載荷荷重が大きくなるにつれてひずみ軟化型のSFRC合成では剛性の低下が顕著となり、350kN時にはECC合成のたわみがSFRC合成の場合を下回る。以上より、ひび割れ後の引張抵抗性に優れるECCを用いることで、本解析のように増厚材に大きな引張力が作用する載荷ケースにおいて高い合成効果が期待できる。

なお、解析結果は実験結果より剛性が大きくなっているが、これはジベルのモデル化が原因であると考えられる。三田村らはジベルを設置しない供試体について同様の載荷試験を行っているが、本研究ではその結果との比較から支承部弾性支持のばね剛性および防水層の構成則を決定しており、ジベルを設置した供試体についてはジベル箇所を完全剛結に近い状態としているために、合成効果を大きく見積もる結果となっている。したがって、

表-4 SFRC パラメータ

|                |                        |
|----------------|------------------------|
| 繊維長; $L_f$     | 25 mm                  |
| 繊維径; $d_f$     | 0.5 mm                 |
| 繊維弾性係数; $E_f$  | 210 kN/mm <sup>2</sup> |
| 繊維混入率; $V_f$   | 1.5 vol%               |
| 摩擦付着強度; $\tau$ | 4.5 N/mm <sup>2</sup>  |
| スナビング係数; $f$   | 0.8                    |

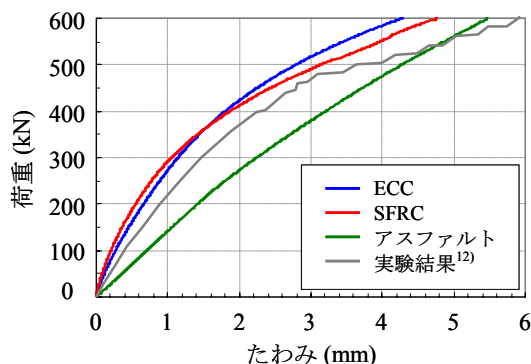


図-15 荷重とたわみの関係

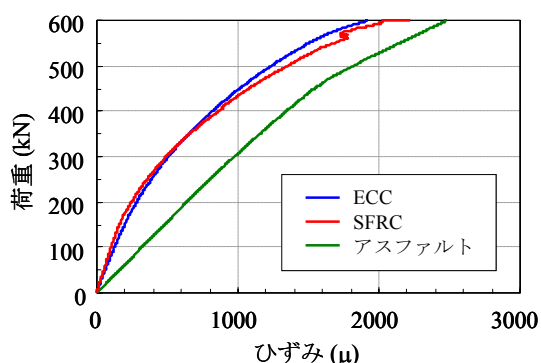


図-16 荷重と鋼床版ひずみの関係

本研究で対象としている合成構造のより詳細な評価には、FRPおよび中詰めECCを考慮したジベルのモデル化が必要であるとされる。

図-16は荷重と鋼床版ひずみの関係である。ECC合成、SFRC合成ともにアスファルト舗装時と比較して鋼床版ひずみの低減が確認できる。たわみと同様、載荷初期ではSFRCでひずみの低減が大きく、150kN時にはECC合成とSFRC合成でそれぞれアスファルト舗装時の41%および33%であるのに対し、600kN時では78%および89%とひずみの低減効果が逆転している。

図-17は150kNおよび450kN時の合成床版上面の主ひずみ分布であり、ひび割れが生じている領域を表している。150kN、450kN時ともにECC合成とSFRC合成でひび割れ領域はほぼ同程度であるが、分布の性状に違いが見られる。150kN時には、ひび割れの先端側でSFRC合成に対してECC合成で分布幅が広がっている(図-17中A)。また450kN時にはSFRC合成で主桁上全長に

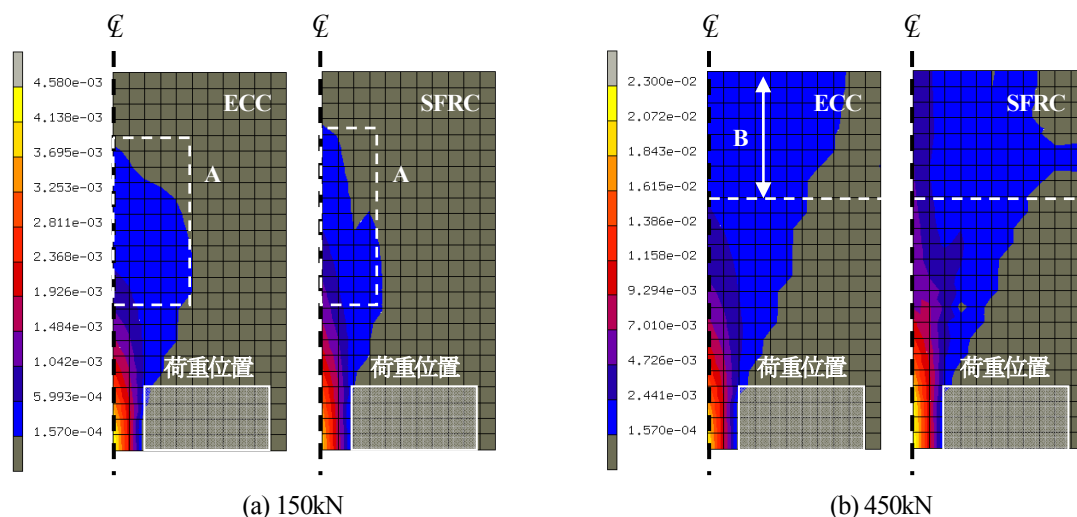


図-17 主ひずみ分布（合成床版上面）

渡ってひずみが分布しているのに対し、ECC 合成ではそのような分布が見られていない（図-17 中 B）。ひずみ軟化型である SFRC では初期ひび割れの進展および拡大が早期に生じ、主桁上のひび割れに損傷が集中しやすいのに対し、ECC では分散発生したひび割れによりエネルギーが吸収され、特定のひび割れに損傷が集中しにくいことが解析においても示されている。

#### 4.4 疲労解析結果

載荷荷重 150kN、300kN および 450kN として疲労解析を行った。それぞれの載荷荷重について、たわみの変化、鋼床版ひずみの変化および合成床版上面のひび割れ幅に関して、SFRC 合成あるいはアスファルト舗装としたケースの静的解析結果と併せて、以下に示す。

##### （1）150kN 載荷

図-18(a)に、150kN 載荷時の載荷回数とたわみの関係を示す。初期載荷から載荷回数 10 万回までにたわみの増加が見られるが、その後は載荷回数 200 万回に至るまでたわみの増加量はわずかである。初期載荷時および 200 万回載荷時のたわみは、アスファルト舗装時のそれぞれ 42%、52%であり、載荷荷重が設計荷重程度の場合には、ECC に生じる引張ひずみが引張強度レベル（ $\epsilon_{tu}$ ）に対して小さいため、合成効果が低下することなく、高い疲労耐久性が得られている。

図-18(b)は載荷回数と鋼床版ひずみとの関係である。200 万回の載荷を通して一定の勾配でひずみが増加しているが、たわみと同様、その増加量は小さい。200 万回載荷時には、アスファルト舗装時の 51%となっており、鋼材の降伏レベル（1400 $\mu$ 程度）と比較しても小さい値に保たれている。

図-18(c)は載荷回数とひび割れ幅の関係である。ECC 合成では初期載荷時のひび割れ幅 0.026mm に対して、200 万回載荷時では 0.027mm であり、ひび割れ幅はほとんど変化していない。SFRC 合成としたケースのひび割

れ幅は 0.42mm であり、ECC 合成とした場合にひび割れ幅が小さく、疲労以外の環境的要因による構造物の劣化に対しても高い抵抗性が期待できる結果となった。

##### （2）300kN 載荷

図-19(a)および(b)は 300kN 載荷時の載荷回数とたわみおよび鋼床版ひずみの関係である。両者とも 150kN 載荷時と比較すると疲労載荷に伴う増加量が大きく、200 万回の載荷を通して一様に増加している。ECC 合成とアスファルト舗装との比は、初期載荷時の 50%および 51%に対し、200 万回載荷時には 82%および 82%であった。150kN 時と比較して主桁上 ECC に生じる引張ひずみが大きくなるため、引張応力の劣化が大きく、剛性の低下が顕著となる。しかしながら、ここでも 200 万回載荷時にも荷重位置直下の鋼床版は降伏に至っておらず、荷重を設計値の 2 倍とした場合においても、十分な疲労耐力を有することが確認された。

図-19(c)に載荷回数とひび割れ幅の関係を示す。載荷回数 80 万回までは主桁上 ECC の引張ひずみが引張強度時レベルを下回っており、ひずみ硬化挙動により引張力を負担できる状態にある。この間のひび割れ幅は 0.04mm 以下であり、ECC のひび割れ幅抑制効果が確認されている。載荷回数 80 万回では、主桁上に引張ひずみが引張強度レベルを超え軟化域に達する要素が現れるため、ひび割れ幅の急増が生じている。その後はひび割れ幅の増加勾配が大きくなり、200 万回載荷時には 0.11mm となったが、SFRC 合成時の 0.85mm に対して小さい値に保たれている。コンクリートに関する文献 14 によると、ひび割れ幅 0.1mm 以下は、耐久性の観点から見てひび割れの補修を要さないレベルであるとされている。これを参考にすると、300kN の載荷では、載荷回数 168 万回までこの値を下回っており、200 万回載荷時でも 0.1mm を大きく超過しておらず、設計荷重の 2 倍の疲労載荷であっても、ECC による鋼床版の長期耐久性の向上が期待できる。

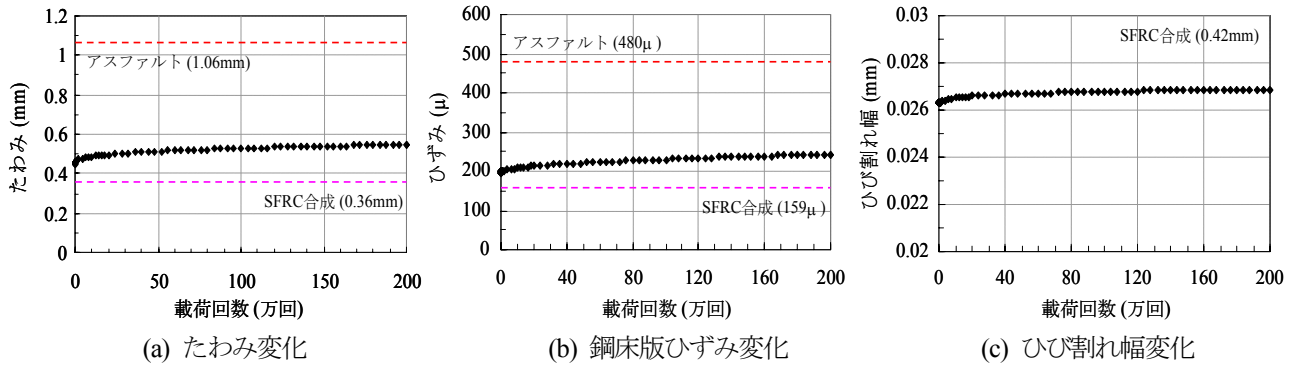


図-18 疲労解析結果（載荷荷重 150kN）

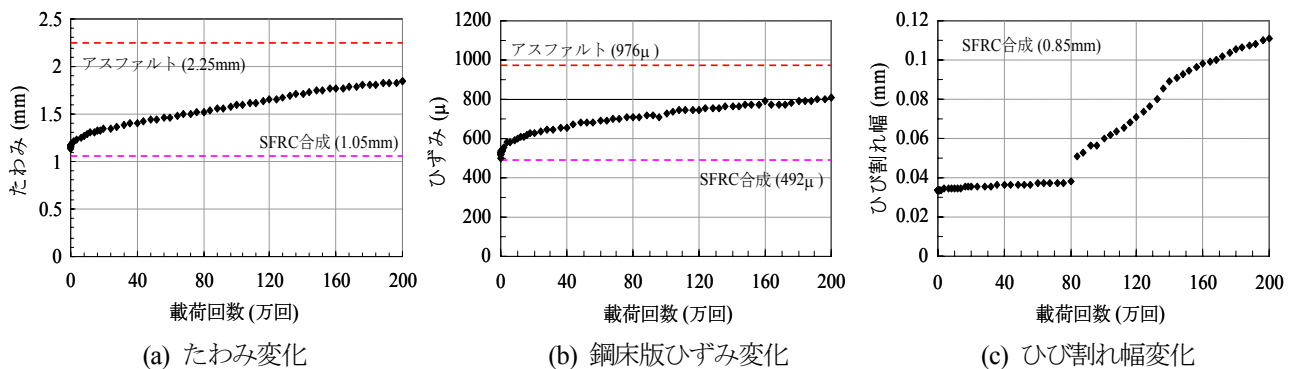


図-19 疲労解析結果（載荷荷重 300kN）

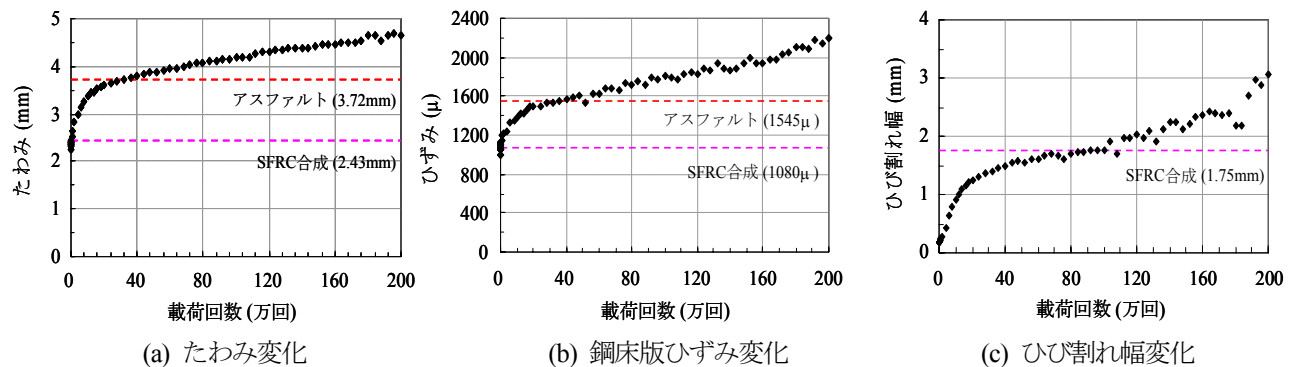


図-20 疲労解析結果（載荷荷重 450kN）

### (3) 450kN 載荷

図-20(a)および(b)は 450kN 載荷時の載荷回数とたわみおよび鋼床版ひずみの関係である。450kN では初期載荷時に主桁上 ECC の引張ひずみが引張強度時レベルを超えるため、たわみおよび鋼床版ひずみは疲労載荷開始時においてアスファルト舗装時の 60%、64%と低減効果が小さい。また、ひび割れが生じる要素の数が多く、ひずみ増大に伴い個々の要素での応力の劣化が生じやすいため、たわみおよびひずみの増加勾配も大きい。載荷回数 12 万回では、載荷点直下の鋼床版で降伏レベルを超えるひずみが生じているが、塑性ひずみの発生は確

認されず、200 万回の載荷によっても破壊には至らなかった。しかし、載荷回数 36 万回では、たわみ、鋼床版ひずみともにアスファルト舗装時の値を上回り、200 万回載荷時には 1.25 倍および 1.35 倍となるなど、合成効果を期待できない状態である。

図-20(c)は載荷回数とひび割れ幅の関係であり、200 万回の載荷を通してひび割れ幅が大きく、初期載荷時で 0.17mm、200 万回載荷時で 2.5~3.5mm と、ECC のひび割れ幅抑制効果が発揮されていないことがわかる。

### (4) まとめ

以上から、たわみ、鋼床版ひずみおよびひび割れ幅の

検討により、引張抵抗性に優れる ECC を用いた鋼床版上面増厚補強によって、局所的な引張応力が作用するケースにおいて、設計荷重の 2 倍程度までは高い合成効果あるいはひび割れ幅抑制効果が得られることを確認した。

上記検討項目以外に関して、疲労載荷初期に荷重直下ジベル部に作用するせん断力は、載荷荷重 150kN, 300kN, 450kN でそれぞれ 42.2kN, 53.7kN, 54.6kN であり、ECC の疲労に伴い減少していくことを確認している。防水層がすべりに抵抗しないと仮定しているため大きめのせん断力が作用する傾向があることに注意しなければならないが、これらの値は既往の一面せん断試験<sup>12)</sup>での最大荷重 (40kN 程度) を超えており、付着特性の検討も必要であると考えられる。

## 5. 結論

本研究では、ひずみ硬化型繊維補強セメント複合材料である ECC の疲労解析モデルを提案し、ECC 梁の曲げ疲労解析および ECC により上面増厚補強された鋼床版の疲労解析を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 繊維の疲労破断を架橋則に導入した疲労モデルを用いて ECC 梁の曲げ疲労解析を実施した。その結果、既往の PVA-ECC の曲げ疲労試験により得られているたわみ変化および S-N 関係を再現でき、繊維単体の S-N 関係に着目することで PVA-ECC 梁の疲労寿命を予測できることを示した。
- 2) ECC-鋼合成床版および SFRC-鋼合成床版に関して、増厚材に局所的な引張応力が生じるケースを想定した静的解析を行い、増厚材の特性に着目した合成効果の比較を行った。ひび割れ後のひずみ硬化挙動による高い引張性能に期待する ECC では、一般的なコンクリートより弾性係数が小さいため、設計荷重程度ではひずみ軟化型の SFRC より合成効果が小さくなるが、載荷荷重が大きい場合には ECC の引張抵抗性により SFRC 合成と比較して高い合成効果が発揮される。
- 3) ECC-鋼合成床版の定点疲労解析を実施した。設計荷重 150kN の繰り返し載荷では、ECC の応力劣化が小さく、200 万回の載荷後であつてもたわみ、ひずみの低減効果が期待できることがわかった。また、ひび割れ幅の抑制効果も示されるため、環境作用による構造物劣化に対しても高い抵抗性を期待できることがわかった。

今後の検討事項として、移動荷重を想定した疲労解析による合成床版の疲労耐久性の評価が挙げられる。

## 参考文献

- 1) 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，土木学会，2007。

- 2) 道路橋示方書・同解説，日本道路協会，2002。
- 3) 牛越裕幸，下里哲弘，弓削太郎，児玉孝善：実橋における既設鋼床版への SFRC 補強効果確認計測，第 62 回土木学会年次学術講演会，2007。
- 4) 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.88-91，2005。
- 5) Matsumoto, T., Chun, P., and Suthiwarapirak, P.: Effect of Fiber Fatigue Rupture on Bridge Stress Degradation in Fiber Reinforced Cementitious Composite, Proceedings of FRAMCOS-3, pp.653-660, 2004。
- 6) Suthiwarapirak, P., and Matsumoto, T.: Fiber Bridging Degradation Based Fatigue Analysis of ECC under Flexure, Journal of Applied Mechanics, Vol.6, pp.1179-1188, 2003。
- 7) 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，pp.277-282，2009。
- 8) Kakuma, K., Matsumoto, T., Hayashikawa, T., and He, X.: Flexural Fatigue Analysis of PVA-ECC beams Based on Micromechanics Approach, Proceedings of the 1st International Conference on Computational Design in Engineering, pp.250-253, 2009。
- 9) Li, V. C.: From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, Vol.10, No.2, pp.37-48, 1993。
- 10) Li, V. C.: Post-Crack Scaling Relation for Fiber-Reinforced Cementitious Composites, ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.4, No.1, pp.41-57, 1992。
- 11) 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。
- 12) 三田村浩，須田久美子，福田一郎，今野久志，松井繁之：高靱性繊維補強セメント複合材料による鋼床版上面増厚補強に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，pp.356-357，2006。
- 13) Kurihara, N., Uchida, Y., Kamada, T., Arakawa, T., and Rokugo, K.: Evaluation of Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete by means of Tension Softening Diagrams, Proceedings of FRAMCOS-3, pp.465-476, 1998。
- 14) コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，日本コンクリート工学協会，2003。

(2009 年 9 月 24 日受付)