

## R C床版の炭素繊維シートによる補強に関する考察

### Study on Reinforced Concrete Deck Strengthened by Carbon Fiber Sheets

林 秀侃\*、林田充弘\*\*、及川じゅん\*\*\*

Hidenao HAYASHI, Mitsuhiro HAYASHIDA and Jun OIKAWA

\*阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課 課長 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-3-1)

\*\*阪神高速道路公団 保全施設部保全技術課 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-3-1)

\*\*\*日本構造技術㈱ 大阪支社技術部 課長補佐 (〒550-0005 大阪市西区西本町 1-8-14)

The existing reinforced concrete (RC) decks on highway bridges are suffered from increasing active load and deterioration due to fatigue. Besides, carbon fiber (CF) has been developed recently as a new construction material to improve workability and to give a lighter dead load to superstructures.

Authors have been studied about RC decks strengthened by CF sheets through some experiments and analysis. It was clarified that only a few sheets of CF bonded underneath a deck could prolong fatigue lifetime of the deck effectively. It couldn't expressed by usual RC design method because CF was thought to make effects not by acting as a reinforcement but by restricting tiny cracks on the surface of concrete. So it was concluded that the behavior of cracks has to be solved in the future to design a fatigue lifetime of deck strengthened with CF sheets.

key words : carbon fiber, fatigue test, behavior of crack, FEM analysis

## 1. まえがき

道路橋のRC床版の補強工法として、従来工法である鋼板接着工法、増桁工法等に加えて炭素繊維シート（以下CFシートと略称）接着工法が注目されている。阪神高速道路公団では、実橋のRC床版を再現した供試体を用いて、輪荷重くり返し走行試験機による実験的検討を重ね、CFシート接着補強床版の疲労耐久性が大幅に向上することを確認している<sup>1),2),3)</sup>。

これは、CFシートによりコンクリートのひび割れの動きが抑制されることによると考えられた。しかし、版の供試体ではひび割れ幅等の挙動を計測することは難しいため、梁の供試体を用いて、静的および繰返し載荷試験を行い、ひび割れ開口量等コンクリートの基本的力学性状を把握した<sup>4)</sup>。

また、梁（二次元）モデルについて、有限要素法により、コンクリートひび割れの非線形解析を行い、梁の静的載荷試験結果の数値計算によるシミュレーションを試みた。

以上の版および梁の載荷試験結果と数値解析に基づき、CFシート補強床版の挙動について考察を行った。

## 2. 版モデルによる基礎研究の概要

### (1) 床版疲労実験

実橋の点検において報告されるRC床版の多くの劣化・損傷は、主筋および配力筋に平行な格子状のひび割れから亀甲状のひび割れに至り、さらに進むとコンクリートの角落ち、スリット化へと進展し、ついにはコンクリートの抜け落ちに至る経過をたどる。これらの劣化過程を実橋に近い形で再現し、CFシート接着工法の疲労耐久性を検証するため、輪荷重走行試験装置を用いた疲労実験を行った。

供試体は、無補強1体、CFシート量を変えた補強3体の合計4体である。供試体諸元を表-1に示す。試験は、あらかじめ打設時の桁拘束および低荷重により初期ひび割れを発生させた供試体に、漸増くり返し荷重を載荷した。載荷荷重を表-2に示す。

### (2) 疲労実験結果

#### a) 破壊およびたわみ

無補強供試体は、疲労試験開始後比較的早く急激なたわみ増加を示し破壊に至った。一方、補強供試体のたわみ増加はかなり緩やかで、無補強供試体の4倍以上の荷重履歴に対しても破壊に至っていない（図-1）。ただし、HE-C1供試体は試験後の供試体切断面から、ほぼ破壊直前の状態であると確認された。また、無補強供試体のたわみ量は、破壊前で補強供試体の約1.5倍であった。

#### b) 鉄筋およびCFシートの応力

疲労試験直後の鉄筋ひずみは無補強供試体と補強供試

表-1 供試体諸元 (版モデル)

供試体名	床版厚 (cm)	鉄筋量		かぶり (cm)	支間 (cm)	CFシート ( )内はCFシート目付量	初期ひび割れ密度 (m/m)
		主筋方向	配筋方向				
HE-N	19.4						3.91
HE-C1	19.8	D16cto100	D16cto125	3.0	200	1層 (150 g/m)	4.97
HE-C2	19.5					1層 (300 g/m)	3.02
HE-C3	19.2					1→2→4層 (300 g/m)	4.57

表-2 載荷荷重および疲労試験結果 (版モデル)

供試体名	載荷荷重 / 載荷回数				破壊
	10tf 10万回	18tf 24.4万回	20tf 100万回	シートカット後に18tf 66万回	
HE-N					破壊
HE-C1	10tf~19tf 8万回	15tf 10万回	18tf 100万回	20tf 20万回	破壊せず
HE-C2		15tf 10万回	18tf 100万回	シートカット後に18tf 66万回	破壊
HE-C3		1層で18tf 20万回	2層で18tf 20万回	4層で18tf 60万回	破壊せず

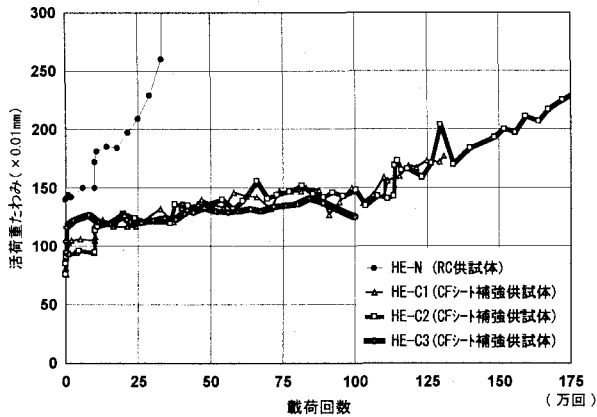


図-1 床版中央における活荷重たわみ図 (版モデル)

体との大きな差は認められなかったが、載荷回数に比例して無補強供試体の応力増が顕著となった。またCFシート量と鉄筋応力の関係は、傾向としてCFシート量が多いほど鉄筋応力は減少したが、HE-C3供試体(4倍補強)の鉄筋応力減少率はHE-C2供試体(通常補強)に比べわずかなものであり補強量に比例した補強効果は得られなかった。

c) たわみ量の理論値

無補強供試体のたわみ量が補強供試体の約1.5倍であることの検証を、数値計算により試みた。モデル諸元はHE-NからHE-C3と同様であるが、支間200cm、有効幅100cmの単純梁としてB活荷重の輪荷重としてP=10tfを載荷した時のたわみ量を算出した。その結果を表-3に示す。なお計算は平面保持を前提としたRC断面で行った。算式は下記の通りである。

$$\delta = \frac{P\ell^3}{48EI}$$

$$I = I_C' + I_S' + I_S + I_F$$

$$I_C' = \frac{b}{3}x^3$$

$$I_S' = n \cdot A_S'(x-d)'^2$$

$$I_S = n \cdot A_S(d-x)^2$$

$$I_F = n_F \cdot A_F(h-x)^2$$

ここに、E: コンクリートの弾性係数 (=3.20×10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>)

I: 換算断面2次モーメント (cm<sup>4</sup>)

I<sub>C</sub>', I<sub>S</sub>', I<sub>S</sub>, I<sub>F</sub>: 中立軸に対するコンクリート, 鉄筋およびCFシートの断面2次モーメント (cm<sup>4</sup>)

A<sub>S</sub>, A<sub>S</sub>', A<sub>F</sub>': 引張, 圧縮鉄筋量およびCF量 (cm<sup>2</sup>)

x: 部材上縁から中立軸までの距離 (cm)

n, n<sub>F</sub>: 鉄筋およびCFシートのコンクリートに対する弾性係数比

表-3 たわみ量の理論値

供試体名	A <sub>F</sub>	x	I	δ	δ(HE-N)/δ
HE-N	—	5.38	21,907	0.238	—
HE-C1	0.815	5.63	24,439	0.213	1.12
HE-C2	1.630	5.79	25,878	0.201	1.18
HE-C3	6.520	6.73	36,547	0.143	1.66

実験では無補強供試体の健全時のたわみ量が他の供試体の約1.5倍であったことに対し、HE-C3供試体は概ね近い値であるものの、HE-C1およびHE-C2においては約1.1~1.2倍の比率となり、実験結果とかなりの差異を生じた。これは計算上の断面剛性(EI)の差異が小さいことと関連する。

(3) 考察

実験の結果、CFシート補強供試体は無補強供試体に比べたわみ増加速度が非常に遅いことが確認できた。これはCFシートがひび割れの動きを抑制することで劣化速度が無補強に比べ大幅に遅延されたためと考えられる。

またCFシート量の違いによる差は応力でわずかに認められたが、補強量に比例した効果は認められなかった。これらのことから以下のことがいえる。

- ① CFシート補強工法は、ひび割れの動きを抑えることで劣化速度を大幅に遅延させ、耐久性を向上させる。
- ② CFシート量は寡層(1層, 目付量300g/m<sup>2</sup>)で十分効果が期待できる。
- ③ CFシート補強によるたわみ量の変化を、平面保持を前提としたRC断面計算で評価することは困難である。

### 3. 梁モデルによる基礎研究の概要

#### (1) 梁モデルによる静的およびくり返し載荷実験

前述のCFシート補強実験は、裏面を全面シート貼りした版実験であったため、ひび割れ幅等の計測が困難であった。そこで、ひび割れ幅を計測し、かつコンクリートの基本的力学性状を把握することを目的として、梁による実験を行った。

#### a) 供試体

供試体は、無補強、1層補強、2層補強の3補強タイプに対し、それぞれ初期ひび割れを与えたものと与えないもの、計6種類を作成した。供試体諸元を図-2、表-4に示す。

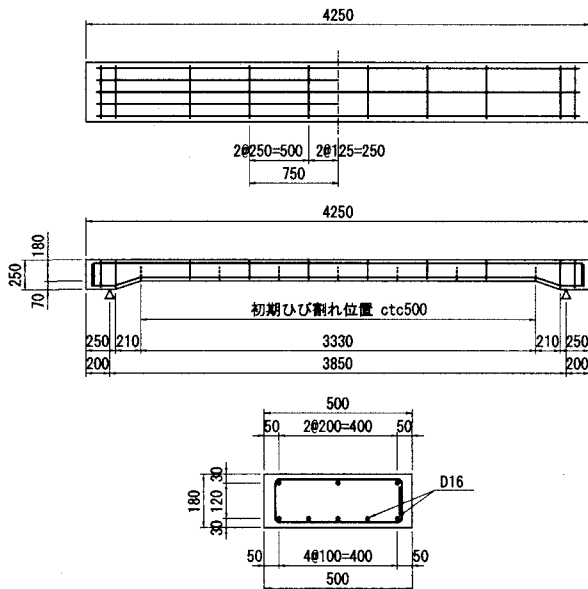


図-2 供試体 (梁モデル)

表-4 供試体諸元 (梁モデル)

供試体名	初期ひび割れ	CFシート (300g/m <sup>2</sup> )	板厚 (cm)	主鉄筋量	かぶり (cm)	支間 (cm)
S-0-B	無	—	18.0	D16ctc100 (SD295A)	3.0	385
S-0-CW	有	—				
S-1-B	無	1層				
S-1-CW	有	1層				
S-2-B	無	2層				
S-2-CW	有	2層				

#### b) 初期ひび割れの再現方法

初期ひび割れは、コンクリート打設時にあらかじめスリット材 (t=1.0 mm, h=120 mm) を型枠内に挿入しておき、片面にグリースを塗布することで、荷重載荷時に片面が開く構造とした。

### (2) 実験結果

#### a) たわみ

静的荷重載荷時 ( $P=1.6$  tf) における支間中央のたわみを表-5に示す。

表-5 実験結果 (梁モデル)

補強	初期ひび割れ	供試体名	たわみ (mm)
無補強	無	S-0-B	5.51~5.74
	有	S-0-CW	6.38
1層補強	無	S-1-B	3.42~4.46
	有	S-1-CW	4.49
2層補強	無	S-2-B	3.51~3.95
	有	S-2-CW	4.19

たわみ量は、無補強→1層補強→2層補強の順に減少している。ただし、無補強供試体と補強供試体との差異に比べ、補強量の差によるたわみ量の差異は小さい。また、補強供試体において、初期ひび割れの有無によるたわみ量の差異はわずかなものであった (図-3)。

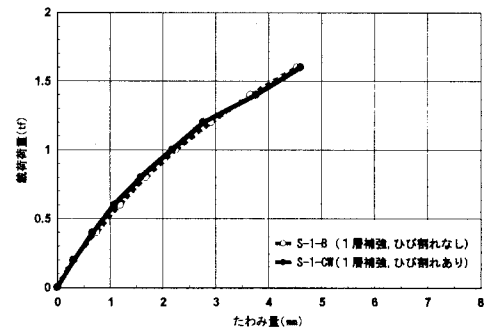


図-3 荷重とたわみの関係

#### b) ひずみ

各供試体の載荷荷重とコンクリート上縁ひずみ、引張鉄筋のひずみとの関係は、載荷荷重とたわみの関係でみられた性状とほぼ同様であり、無補強供試体と補強供試体とで差はみられるものの、補強量の差による顕著な差異はみられなかった。

ここで疲労試験におけるひずみから応力度を換算してみた。供試体は1層補強の初期ひび割れを導入したものである。支間中央におけるひずみ分布を図-4に示す。

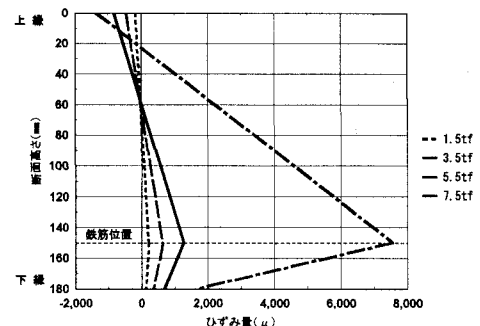


図-4 ひずみ分布図

コンクリート上縁，鉄筋，CFシートの  $P=5.5\text{ tf}$ ， $7.5\text{ tf}$  載荷時の各ひずみおよび応力度を表-6に示す。なお，降伏以前の応力度は（ひずみ）×（弾性係数）で求めた。

表-6 ひずみと応力度

	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	P=5.5tf		P=7.5tf	
		ひずみ ( $\mu$ )	応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ひずみ ( $\mu$ )	応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
コンクリート	$2.85 \times 10^5$	828	236	1,375	340 (降伏応力)
鉄筋	$2.1 \times 10^6$	1,269	2,665	7,537	3,000 (降伏応力)
CFシート	$2.4 \times 10^6$	682	1,637	1,677	4,025

その結果  $P=5.5\text{ tf}$  載荷時においては，コンクリートおよび鉄筋それぞれが降伏荷重に達していないが，破壊荷重の  $P=7.5\text{ tf}$  載荷時においては鉄筋が降伏荷重をはるかに上回る値となっており，この時点ですでに降伏後かなり経過していることが分かる。またコンクリートについても降伏荷重を上回る値となっている。その後9.5万回後に破壊したことから推定すると，CFシート位置でのひずみが小さいことから分かるように，CFシートのひび割れ抑制効果が高いため，鉄筋等の降伏状態～終局状態が遅延し，コンクリートの圧縮破壊が起きるまでコンクリートとCFシートのつり合いのみで形状保持していると考えられる。実際の破壊も鉄筋の破断とコンクリートの圧縮破壊が同時期に発生し，シートのはく離を生じ破壊に至っていた。

c) ひび割れ開口量

静的載荷によるひび割れ開口量を図-5に示す。これら供試体はすべて初期ひび割れを導入したものである。設計荷重相当時でのひび割れ開口量の測定結果は，無補強供試体が0.067~0.088mm，1層補強供試体が0.030~0.037mm，2層補強供試体が0.020~0.034mmであった。このようにCFシートで補強された供試体では無補強供試体に比べて，ひび割れ開口量が約40%に低減された。一方，補強量の差によるひび割れ開口量の差異は顕著にはみられなかった。

また残留ひび割れ量は，補強供試体に比べて無補強供試体は約2倍となっていた。

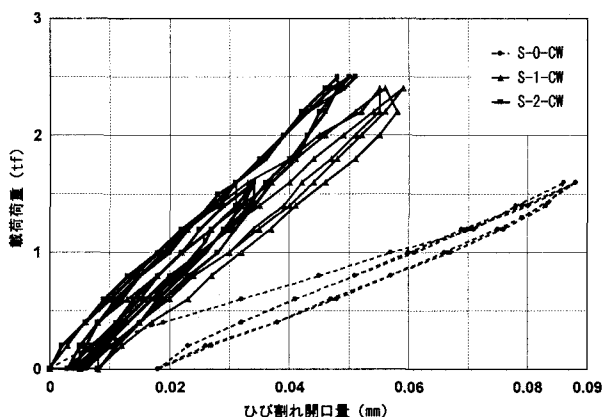


図-5 荷重とひび割れ開口量の関係 (梁モデル)

(3) まとめ

以下に本実験で得られた結果をまとめ，今後の課題を記す。

- ① 補強供試体の初期ひび割れ有り無しとで比較を行った結果，静的載荷時のたわみ量にはほとんど差はない。
- ② 引張鉄筋が降伏しても，高い弾性率を持つCFシートがその後もひび割れ開口を抑制しているため，終局時（鉄筋の破断，コンクリートの圧縮破壊）までの疲労寿命が延びる。
- ③ 設計荷重相当時において，CFシート補強供試体のひび割れ開口量は無補強供試体に対して約40%に低減した。
- ④ 補強供試体の残留ひび割れ幅は無補強供試体の約半分であり，CFシートのひび割れ進行抑制効果がわかった。
- ⑤ 補強量1層と2層と比較すると，ひび割れ開口量抑制効果に顕著な差はみられなかった。

なお，本実験はハンチを含まない平坦部のみにCFシートを貼ったため，曲げ荷重に対する補強効果の確認にとどまった。今後，ハンチ部までシートを貼った供試体でせん断補強効果の確認も行う必要がある。

4. 有限要素法によるコンクリートひび割れの非線形解析

梁の供試体による載荷試験結果を数値解析でシミュレートするために，図-6に示す解析モデルを用いて非線形解析を行った。解析には，オランダのTNO（オランダ応用科学研究機関）で開発された汎用非線形解析プログラム「DIANA」を使用した。なお，本プログラムは，強制変位を与えて荷重に換算する「たわみ制御方式」である。

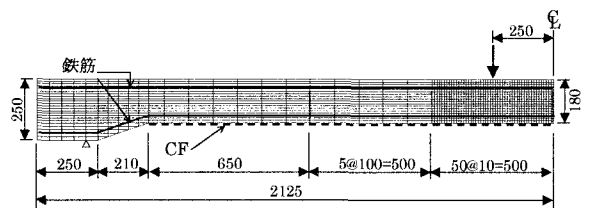


図-6 解析モデル (はりの左半分)

計算ケースは表-7に示すように解析モデルA（供試体S-0-CWに相当），B（供試体S-1-CWに相当），C（供試体S-1-Bに相当），D（高弾性タイプのCFシートを想定）の4ケースである。

載荷位置は前記梁の曲げ載荷試験と同様，支間中央より左右25cmの対象位置に2点載荷とし，モデルAは0tf~2tf，モデルB，C，Dは0tf~3tfまで載荷した。

表-7 解析モデルの諸元

各モデルの共通諸元

スパン： $l = 3850\text{mm}$   
 断面寸法： $180\text{mm(H)} \times 500\text{mm(B)}$   
 鉄筋量：圧縮側  $A'_s = 5.958\text{cm}^2$ ，  
 引張側  $A_s = 9.93\text{cm}^2$   
 コンクリートの圧縮強度： $\sigma_{ck} = 400\text{ kgf/cm}^2$   
 コンクリートの応力-ひずみ曲線：  
 コンクリート標準示方書による

$$\sigma^t_c = 0.85 \sigma_{ck} \cdot \frac{\epsilon^t_e}{0.002} \left( 2 - \frac{\epsilon^t_e}{0.002} \right)$$

〔鉄筋の降伏点： $\sigma_{sy} = 3,000\text{ kgf/cm}^2$   
 鉄筋の弾性係数： $E_s = 2.1 \times 10^6\text{ kgf/cm}^2$ 〕

解析モデル	初期ひびわれの位置・深さ	CFシートの諸元		
		カーボン量 $A_F$ ( $\text{cm}^2$ )	引張強度 $\sigma_{FK}$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )	弾性係数 $E_F$ ( $\text{kgf/cm}^2$ )
モデルA	①, ②, ③ $h=120\text{mm}$	CFシート補強のないRC断面		
" B	①, ②, ③ $h=120\text{mm}$	0.825	40,000	$2.4 \times 10^6$
" C	① $h=20\text{mm}$	"	40,000	$2.4 \times 10^6$
" D	①, ②, ③ $h=120\text{mm}$	"	37,000	$4.3 \times 10^6$

(注) 初期ひび割れの位置

- ① ; スパン中央,
- ②, ③ ; スパン中央から左 500mm および 1000mm の位置 (左右対称位置)

梁の支間中央のたわみについて試験結果と比較したものが図-7である。

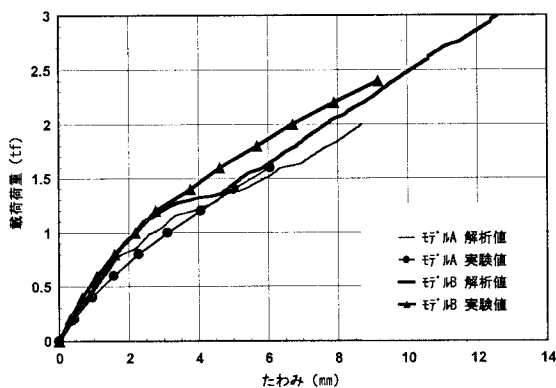


図-7 荷重とたわみの関係

支間中央のひび割れ開口量について比較したものが図-8である。

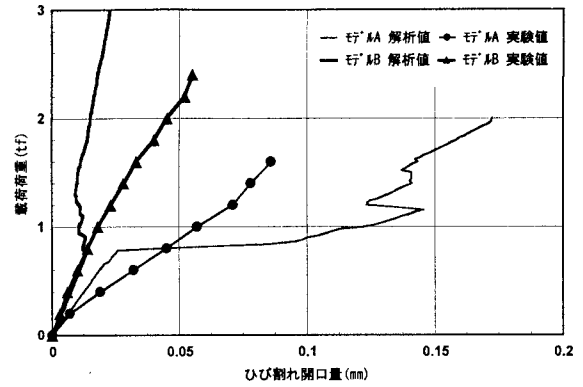


図-8 荷重とひび割れ開口量の関係 (非線形解析)

モデルB (CFシート補強梁) については、たわみ・ひび割れ開口量ともに  $P \approx 0.8\text{ tf}$  まで試験結果とよく一致している。  $P \approx 0.8\text{ tf}$  以降については、初期ひび割れの近傍に新たに計算上のひび割れが発生し、それによって応力が再分配されることにより、着目する初期ひび割れ部の開口量が他のひび割れに分散されるため、着目点のひび割れが進展しなくなったものと考えられた。

この一方で、初期ひび割れを与えていたにも関わらず無補強供試体であるモデルAが初期の段階から解析値と合わないことから、無補強の場合にはマイクロなひび割れの分散が初期の段階から全長にわたり生じていると考えられる。すなわちCFシートを接着することにより、健全であったコンクリート表面はひび割れの発生しにくい状態となり、初期ひび割れがある程度進展するまでは他の部位に新たにひび割れは生じなかったといえる。

図-9に、モデルAとBそれぞれの最終載荷時におけるひび割れ分布図を示す。この解析結果からは、引張鉄筋まで到達したひび割れに着目した場合、ひび割れ幅の大きいモデルAの方がひび割れ間隔が大きく、モデルBのそれが小さいことがわかる。

コンクリート示方書によれば、ひび割れ幅  $w$  は (ひび割れ間隔  $l$ )  $\times$  (鋼材の歪み) で表される。この関係からいえることは、モデルAの鉄筋の歪みとモデルBのCFシートの歪みに大きな差がないことを考えれば、両モデルのひび割れ開口量の差はひび割れ間隔に大きく左右されることを意味し、図-8の解析結果と符合する。

深さ 12cm の初期ひび割れを有するモデルBと初期ひび割れのない (厳密には、ひび割れ位置を確定するために深さ 2cm のひび割れを挿入) モデルCのたわみを比較したのが図-10である。

解析モデルが、コンクリート要素を均一材料で想定しているのに対して、実際のコンクリートは細骨材、粗骨材等で混合された不均一材であり、ひび割れ開口量や発生箇所のようなマイクロの部分については、構成則が複雑化するため、本解析手法の精度を上げることにより、実務設計に反映することは非常に困難であると思われた。

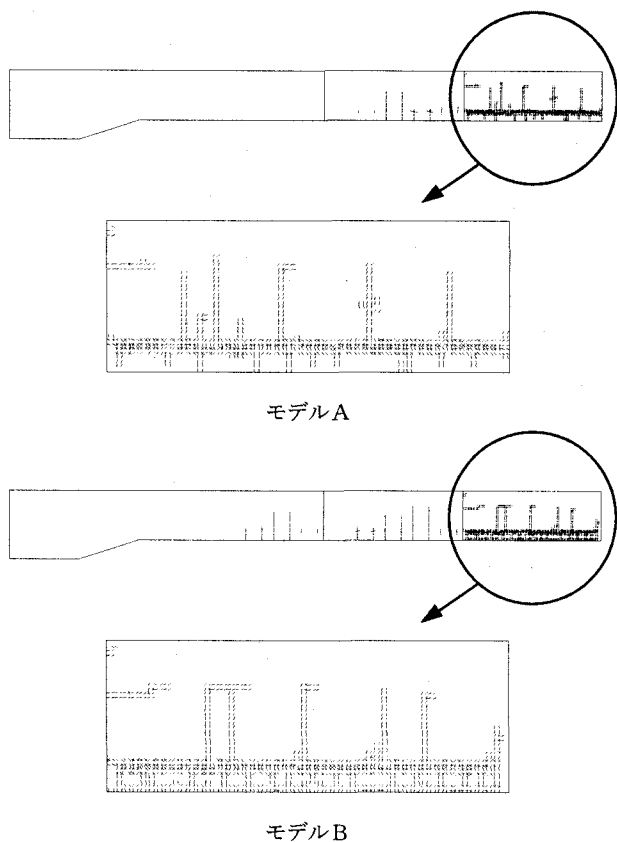


図-9 ひび割れ解析図 (スパン中央より左 50cm までの範囲)

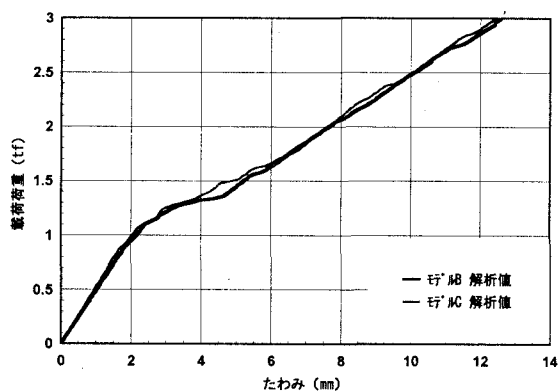


図-10 たわみ量の比較 (モデルB, Cの解析値)

しかしながら、図-10によれば、梁供試体の試験結果と同様、両者のたわみ性状にほとんど差異が見られない。このことから、初期ひび割れの有無やひび割れ箇所の分散に関わらず、梁モデルの全体たわみ量を適切な方法で求めることにより、補強性能を評価できるのではないかと考えた。

## 5. まとめ

版供試体によるくり返し走行試験結果、梁供試体による載荷試験結果、および梁モデルの数値解析結果から、以下

のことがいえる。

- ① CFシート補強効果は、応力度の低減ではなく、床版下面のひび割れの動きを抑制することである。
- ② CFシート補強断面のひび割れ幅はRC断面の約4割と小さい。
- ③ ひび割れの大きさは、鋼材およびCFシートのひずみ量よりも、ひび割れ間隔に大きく影響される。
- ④ 実験におけるコンクリート上縁、鉄筋、CFシートのひずみ量からは、一般的なRCのような平面保持は成立していないと考えられる。
- ④ CFシートによる補強効果の指標としては、たわみ量を用いることが、今後の設計計算方法を検討する上で、有効と考えられる。

今後の課題としては、床版高さ方向のひずみ分布を解明し、床版全体のたわみ量の評価に結びつける設計手法を検討することが望まれる。また一方では、ひび割れを有するコンクリートとCFシートとの付着性能について検証を行う必要がある。

謝辞：本実験検討についてご審議頂きました、阪神高速道路公団「コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会・床版補強法検討部会（主査：園田教授）」の委員の皆様方には、本誌面をお借りして御礼申し上げます。また解析プログラムを用いるにあたりましては、日本電子計算機(株)の須田氏ほか多くの関係各位にご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 阪神高速道路公団, 阪神高速道路管理技術センター: 道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性, 1991
- 2) 阪神高速道路公団, (財) 災害科学研究所: 炭素繊維シートによる床版補強法に関する研究業務 (その2), 1997
- 3) 高井剣, 松井繁之, 林田充弘: 炭素繊維シートによる床版補強に関する研究, 土木学会第52回年次学術講演会 (平成9年9月), 土木学会, pp.368-369.
- 4) 阪神高速道路公団, (財) 大阪市立大学後援会: 炭素繊維補強RCはりのひびわれ特性の実験業務, 1998
- 5) 宇治公隆, 西川和廣, 内田賢一, 松尾伸二: 炭素繊維シートによる道路橋床版の補強に関する研究, コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像, CONCRETE ENGINEERING SERIES 28, 土木学会, pp. II-109