

炭素繊維シートによる床版補強に関する研究

Study on RC Slabs Strengthened by Carbon Fiber Sheets

板野次雅*、松井繁之**

Tsugumasa ITANO and Shigeyuki MATSUI

*工学 大阪大学大学院生 工学研究科博士前期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

**工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

For the innovated method for strengthening the deteriorated highway bridge slabs, an attaching method carbon-fiber sheets on the bottom surface of the slab is developed in this decade. Recently, there is a tendency that the reduction of the number of sheets to attach is required by increasing the elastic modulus of the sheet for shortening the repairing cost. In this study, fatigue tests using the wheel running machine were carried out with full scale slab specimens by changing the attaching carbon sheets. The experimental parameters are the young's modulus and the sort of the carbon sheet products. From the fatigue tests, a clear linear relation between the increase of fatigue life and the increase of Young's modulus was recognized on the products from one company. But the products of two company did not showed a good relation. The epoxy resin seems to have a key role for the performance of the carbon sheet attaching method.

Key words: strengthening slabs by carbon sheet attaching, fatigue durability, wheel running machine, Young's modulus

1. まえがき

昭和40年代初頭より道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)の陥没事故が発生し、道路管理者には大きな問題となってきた。このような事故の原因は自動車の走行によるもので広義の疲労現象であると認識されるようになり、床版損傷機構の解明や損傷への対応、補強方法に関する研究が行われている。

これまでに明らかにされたRC床版の損傷機構は、まず車両の走行によってRC床版下面で橋軸直角方向にひび割れが発生する。ただし、このひび割れにはコンクリートの乾燥収縮の影響も考えられる。その結果、橋軸方向への荷重の分配作用が低下し、橋軸直角方向への荷重分担率が増加し、橋軸方向のひび割れも発生する。同時に、RC床版上面ではねじりモーメントによって橋軸直角方向にひび割れが発生する。さらに、車両の走行によるねじりモーメント、せん断力の交番繰り返しによってひび割れ面の磨耗が進行。やがて、橋軸直角方向の上面および下面からのひび割れがつながり貫通ひび割れとなると、RC床版は連続版からあたかも橋軸直角方向のはりを並べたものようになる。これがはり状現象である。この結果、橋軸直角方向の荷重分担率は増加し主鉄筋断面でせん断疲労破壊する。

このようなRC床版の損傷機構に対してこれまでに確

立された補強方法は大きく次の3つに分けることができる。①増桁工法 ②鋼板接着工法 ③上面増厚工法 ①はRC床版の支持間隔を短くすることにより、曲げモーメントを低減し耐久性を引き延ばすことを目的とした工法である。②はRC床版の下面に鋼板をエポキシ樹脂を用いて接着することにより断面剛性を回復させ耐久性を確保しようとするものである。この2つは交通規制をを必要としない工法として開発されたものである。③はRC床版の上面に鋼繊維を混入した高強度のコンクリートを打ち足すことにより曲げ剛性、せん断剛性を増大させるものである。また、橋面防水工としての役割も担う。これらの工法は損傷を完全にカバーする例も多いが、しばしば再損傷が発生するケースもあり、RC床版特有のひび割れ損傷に対する信頼性はまだ十分であるとはいえない。加えて、近年の現場技術者の不足、床版下面での作業性、交通事情などの問題もある。このような状況でRC床版の新しい補強方法として炭素繊維シート接着工法が注目されている。

本研究では実験に3社の炭素繊維シート(以下、CFシート)を用い、弾性係数、引張強度を変え、あらかじめひび割れを発生させたRC床版を補強し輪荷重走行疲労試験によりその補強効果の違いを確認した。

2. 実験概要

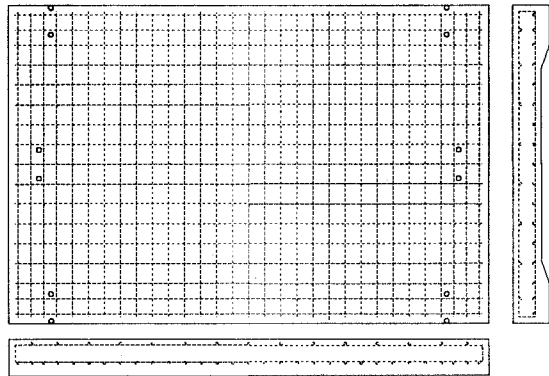


図-1 配筋図

実験に用いたRC床版は床版厚18cm、主鉄筋方向200cm、配力鉄筋方向300cmとし、主鉄筋方向両端部にハンチを設けた。(図-1)ハンチの高さは5cmとしてある。鉄筋は全てSD295AのD16を使用し、引張側主鉄筋は10cm間隔、引張側配力鉄筋は12.5cm間隔で配置した。圧縮側鉄筋は引張側鉄筋の50%とした。コンクリートは設計基準強度 $2.45 \times 10^2 \text{kgf/cm}^2$ のレディーミックストコンクリートを使用した。供試体は全10体で、そのうち1体はCFシート補強供試体と比較するために無補強のまままで荷重を行なった。表-1に本実験で使用したCFシートの物性を示す。実験にはA社の製品を3種3体、B社の製品を4種5体、C社の製品を1体使用した。弾性係数をパラメータ的に変化させてあり、鉄筋とほぼ同等のもの、2倍のもの、3倍のものとなっている。

CFシートの貼付前にCFシート貼付予定の床版供試体9体に対して予備荷重を行なった。これは床版にひび割れを発生させて、RC床版の疲労状態を再現するためのものである。予備荷重には本荷重と同じく輪荷重走行試験機を使用し、荷重は18tfで50000回の走行とした。この荷重は過積載車両を考慮して決定された。予備荷重時のたわみ回数曲線を図-2に示す。

CFシート貼付工程は、まずRC床版下面においてケレン・下地処理を行ない続いてプライマーを塗布、その後不陸をなくすために部分的にパテ処理を施して接着樹脂を塗布、CFシートを貼りつけた後さらに接着樹脂の上塗りとなる。本実験では現場での施工を再現するために以上の工程を死荷重作用下で上向きに行なった。また、本研究室において過去に行なった実験結果より、CFシートは2

表-1

CFシート	弾性係数 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	厚さ (mm)
A-1	6690000	30300	0.143
A-2	4830000	30700	0.143
A-3	2350000	40100	0.167
B-1-1, 2	6560000	26500	0.142
B-2	5290000	28000	0.144
B-3	3850000	37640	0.165
B-4	2460000	43500	0.167
C-1	2350000	35000	0.167

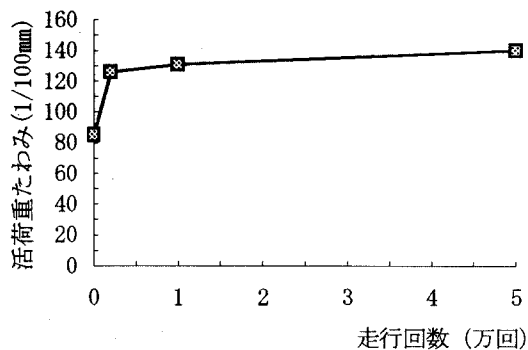


図-2 たわみ回数曲線 (予備荷重)

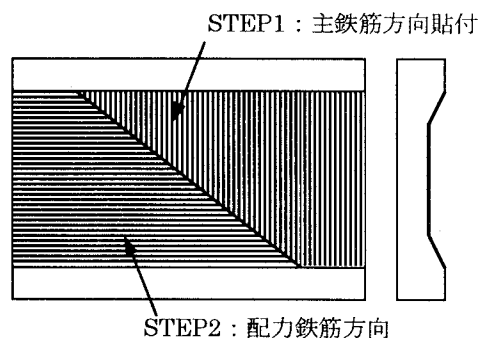


図-3 CFシート貼付図

枚重ね貼りとし、主鉄筋方向に貼りつけた後に2枚目を配力鉄筋方向に貼り付けた。貼り付け範囲はハンチの傾斜下部までとした。貼付概要を図-3に示す。なお、貼付に際してひび割れへの樹脂注入などは行なっておらず、C-1は炭素繊維が2方向に織り込んであるので1枚貼りとした。本荷重の荷重は予備荷重と同様に18tfを基準としたが、荷重開始時には供試体の細かな変化を捉えることを目的として荷重を15tfとした。およそ5万回の走行の後18tfに上げ、100万回ほど走行させても破壊の傾向が見られない場合はさらに荷重を21tfに上げて破壊に至るまで荷重を継続した。輪荷重走行試験機の諸元を以下に示す。

- 荷重能力 : 10~30tf
- 荷重移動範囲 : 床版中央から±100cm
- 走行速度 : 28往復/分 (最大速度 12.2km/h)

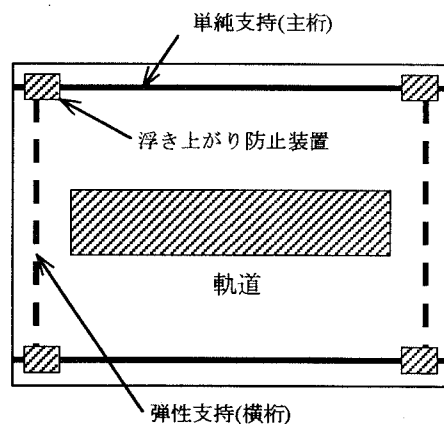


図-4 支持概要

表-2 本載荷走行回数

供試体	疲労試験
無補強	15tf、5万回+18tf、23万回
A-1	15tf、10万回+18tf、80万回+21tf、14.8万回
A-2	15tf、10万回+18tf、90万回+21tf、23.6万回
A-3	15tf、12万回+18tf、95.4万回
B-1-1	15tf、10万回+18tf、90万回+21tf、3.6万回
B-1-2	15tf、10万回+18tf、80万回+21tf、14.8万回
B-2	15tf、5万回+18tf、95万回+21tf、2.5万回
B-3	15tf、2万回+18tf、98万回+21tf、6万回
B-4	15tf、5万回+18tf、65.2万回
C-1	15tf、5万回+18tf、33.2万回

車輪の径と幅 : 500mm、300mm

床版供試体の支持は長辺方向を単純支持、短辺方向を弾性支持とした。このようにしたのは、2辺単純支持、2辺自由支持とすると自由端から破壊が始まってしまうからである。また、一般的に矩形床版において床版中央に荷重をかけると4隅に浮き上がりが生じる。これを防止するために床版4隅に浮き上がり防止装置を設置した。(図-4参照)

3. 実験結果

表-2に輪荷重走行回数の概要を示す。全供試体において破壊まで載荷を継続することを原則としたが、A-1補強床版は21tfで14.8万回の載荷を行なっても破壊する気配が見られず、試験機の都合もあって未破壊のまま載荷を終了した。他の供試体は全て破壊するまで載荷を継続した。破壊形式は全てせん断破壊であった。

また、B-2補強床版においてはCFシートの破断が見つかった。これについては後で述べる。せん断破壊後の供試体は一樣に図-5のような剥離が見られたが、これはせん断破壊によって抜落ちる床版中央部の強制変位によって引き起こされたものである。また、床版中央部および軌道直下等に小さな範囲ではあるが、細長い剥離が見られた。これはRC床版に発生したひび割れによってCFシートの付着効果がなくなったためと思われる。

図-6、7にたわみ回数曲線を示す。この図から無補強の床版とCFシート補強床版を比較するとC-1補強床版

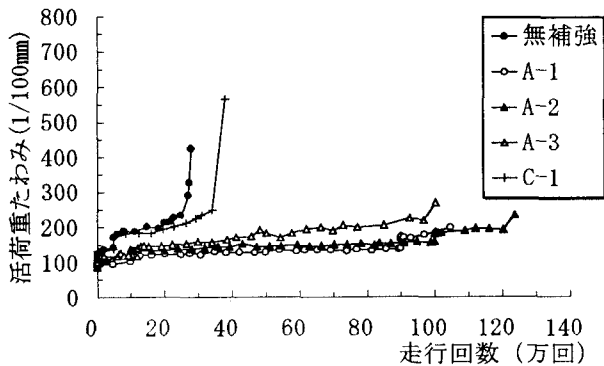


図-6 たわみ回数曲線-1

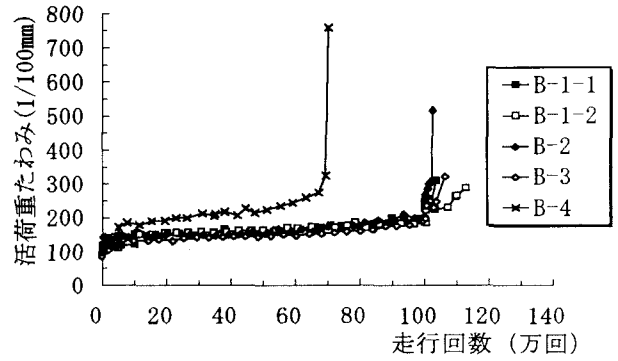


図-7 たわみ回数曲線-2

に関してはあまり補強効果が見られないが、その他の補強床版に関しては十分に効果が得られたといえる。Aシリーズにおいては弾性係数の高いCFシートで補強した床版ほどたわみの値が小さく、18tf 載荷の範囲におけるたわみの増加も低いことが確認できる。Bシリーズにおいては弾性係数の上位3種で補強した床版4体に関しては非常に似たたわみの推移を示し、またせん断破壊に至った回数もほぼ同じであるために補強効果の差はわからない。しかし、最も弾性係数の低いCFシートで補強したB-4補強床版の補強効果がやはり一番低かった。

次に図-8に主鉄筋方向ひび割れの開きの動的振幅を示す。測定位置および、ひび割れの方向が全ての床版で完全に一致していないため単純に比較することはできないが、無補強の床版と比べるとCFシートで補強した床版のひび割れの開きは大幅に低減されている。これによりCFシートの特徴と言われているひび割れの開閉運動を抑制し

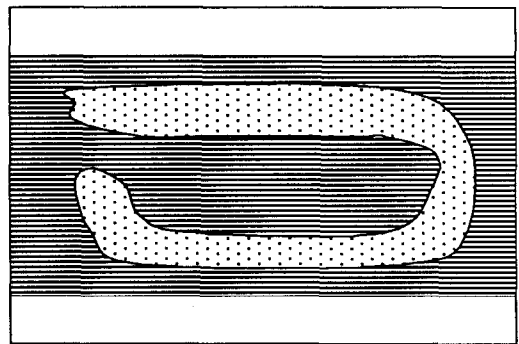


図-5 剥離箇所

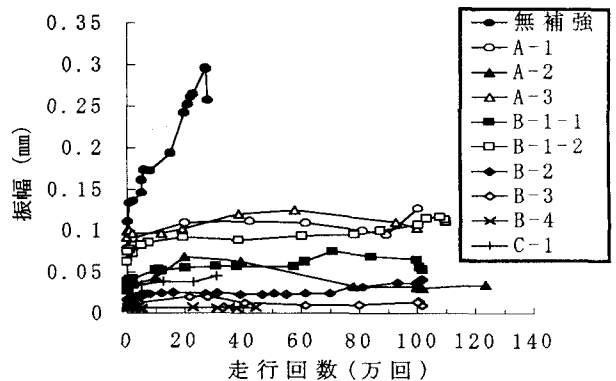


図-8 動的振幅(開き)

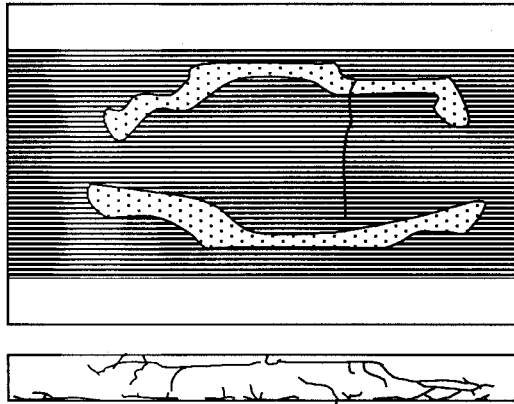


図-9 破断箇所

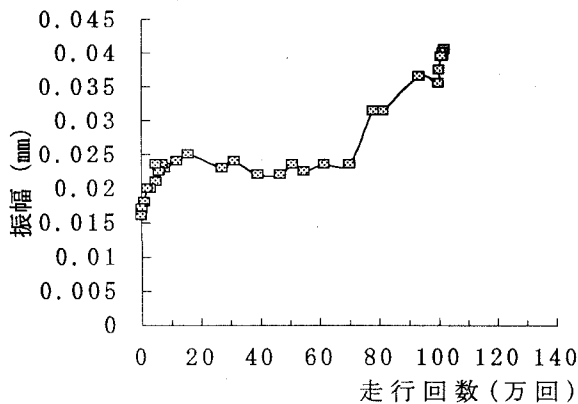


図-10 動的振幅(破断箇所ひび割れ)

て劣化進行を止める効果が現れるものと言える。

また、前述したB-2補強床版におけるCFシートの破断であるが、図-9に破断箇所および破断箇所付近で床版を切断したときのひび割れの発生状況を示す。これを見ると破断箇所直下にひび割れが発達しているが、このひび割れは予備載荷後に発生していたもので、最終的なせん断破壊によって生じたものでないことがわかっている。このひび割れの開き幅を動的に測定したものを図-10に示す。これは先に示したものと同様に動的振幅と走行回数のグラフであるが、およそ70万回を超えたあたりから急に開きの振幅が増加している。このことから、ここでCFシートが破断したのではないかと予想できる。破断の原因として、発達したひび割れの開閉の繰り返しによってCFシートに局部的な引張繰り返しが働いたためと思われる。

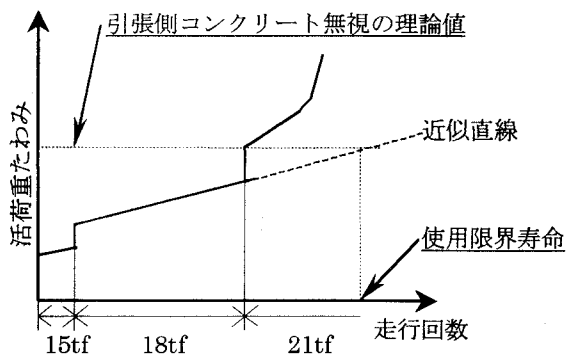


図-11 使用限界寿命推定図

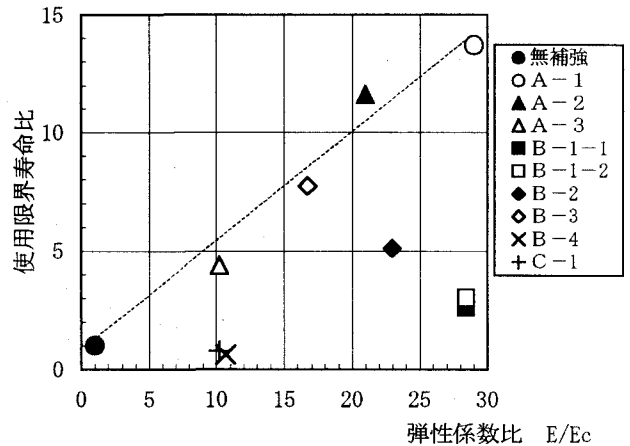


図-12 寿命推定結果

表-3 推定結果比較

	使用限界寿命 (推定) L	18 t f 換算 L_0	L/L_0
無補強	108640	149291	0.73
A-1	1490400	969432	1.54
A-2	1262400	1120040	1.13
A-3	478000	458298	1.04
B-1-1	284200	313019	0.91
B-1-2	329250	358380	0.92
B-2	557000	624595	0.89
B-3	842800	900445	0.94
B-4	68500	69291	0.99
C-1	83200	85291	0.98

4. 使用限界寿命による供試体の比較

疲労寿命と各CFシートとの相関を考察する。通常、疲労寿命に関して考察する場合はマイナー則を用いて単一荷重での走行回数を決定し、S-N曲線上で比較する。しかし、CFシートで補強された床版のS-N曲線がまだ無いことから、未破壊のままで試験を終了してしまったA-1補強床版のデータを取り込むことができない。また、供試体数も各CFシートについて1体ずつと非常に少ないことから、本研究においては以下に示すようにグラフから使用限界寿命を図式的に推定することとした。

たわみ回数曲線は模式的に表すと図-11の使用限界寿命推定図のようになる。本研究では過積載車両を考慮して載荷荷重に18tfを基準としているのでまず、たわみ回数曲線の18tfの範囲についてたわみの安定増加領域に直線を当てはめ、18tfでの引張側コンクリート無視の理論値に達するときの走行回数を使用限界寿命と想定した。このような考えはこれまでの床版実験の経験に基づくものであり、最低、破壊が床版の押し抜き破壊による場合に適用できるものと考えている。こうすることによって未破壊のA-1補強床版の疲労寿命を推定することができた。また、他の供試体についても同様の作業を行なった。図-12、表-3にその結果をまとめたものを示す。縦軸には無補強床

版の推定使用限界寿命を1として使用限界寿命比を、横軸にはコンクリートの弾性係数を1としてCFシートとの弾性係数比をとってある。この結果を見るとAシリーズが非常にきれいな線形的相関を見せている。しかし、Bシリーズに関してはB-3補強床版のみがAシリーズの相関直線上に乗るが、それ以外はかなり低めとなった。しかも、前述のたわみ回数曲線ではB-4補強床版はC-1補強床版の2倍ほどもっているのに、この図では推定使用限界寿命がほとんど同じである。この原因は、ここで使った推定方法が活荷重たわみが線形補完された直線のように使用限界状態まで進行すると仮定するためである。実際にたわみ回数曲線を見てみると、この理論値を超えてもたわみが安定している範囲があるということに注意する必要がある。床版の何を以って使用限界を規定するのかということは非常に難しい問題であり、まだまだ検討の必要があるだろう。しかし、今回のようにS-N曲線が存在せず破壊もしていないような供試体の疲労寿命を比較する場合には非常に有効な手段であると思われる。

5. 補強効果の定量的評価

CFシート貼付による補強効果について、CFシート貼付前後の断面剛性の変化で表現することを試みた。断面剛性の変化を捉えるために断面剛性の推定を行う。

一般に、直行異方性版の変形挙動は次に示すような偏微分方程式によってあらわされる。

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y)$$

ここに、 D_x ：主鉄筋断面の版剛性

$$= \frac{E_c}{1-\nu_c^2} \{I_{cx} + (n-1)I_{sx}\}$$

D_y ：配力鉄筋断面の版剛性

$$= \frac{E_c}{1-\nu_c^2} \{I_{cy} + (n-1)I_{sy}\}$$

H ：有効ねじり剛性

$$= D_1 + 2D_{xy} = \nu_c \sqrt{D_x D_y} + 2 \cdot \frac{1-\nu_c}{2} \sqrt{D_x D_y} = \sqrt{D_x D_y} \quad \dots\dots (1)$$

$$D_1 = \nu_c \sqrt{D_x D_y} \quad , \quad D_{xy} = \frac{1-\nu_c}{2} \sqrt{D_x D_y}$$

E_c, ν_c ：コンクリートの弾性係数、ポアソン比

I_{cx}, I_{sx} ：主鉄筋断面の中立軸に関するコンクリート、鉄筋の断面2次モーメント

I_{cy}, I_{sy} ：配力鉄筋断面の中立軸に関するコンクリート、鉄筋の断面2次モーメント

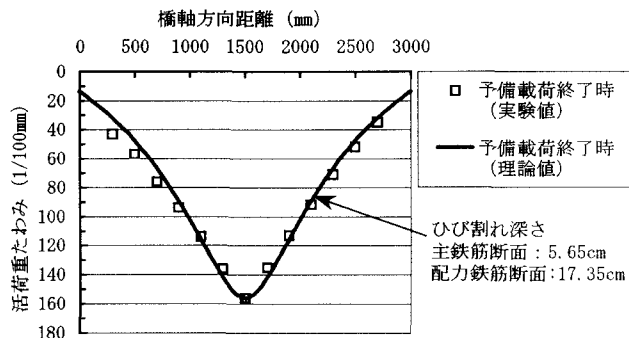


図-13 断面量推定例

$$\alpha = \frac{D_y}{D_x}$$

最初に異方性度 α を決定する。異方性度はたわみ分布曲線の形状に大きく影響するので、まず断面剛性を推定したいデータにおいて床板中央もしくはその隣のダイヤルゲージでのたわみを1としてたわみ分布曲線を作る。これと各異方性度におけるたわみ分布曲線とを比べて異方性度 α を決定する。次に床板中央部のたわみが実験データと等しくなるような主鉄筋断面の剛性を与えてやれば、異方性度 α から配力鉄筋断面の剛性も決まり断面剛性の推定が出来る。この一例を図-13に示す。しかし、この方法だと配力鉄筋断面のひび割れ深さが17cmを越し、結果として適当でない。

予備載荷後の床版は、輪荷重の走行によって曲げひび割れが進み主鉄筋断面に比べて配力鉄筋断面の剛性が低下していると予想されるが、さらに曲げモーメントだけでなくねじりモーメントに対しても抵抗力が落ちていることも考えられる。よって、(1)式に示されるねじり剛性に低減係数 β を導入し、通常この値が1.0であるとされていることから、これを0.25から1.0まで0.25刻みのパラメータとして床版のねじり剛性の低下を考慮した。

$$H = \beta \sqrt{D_x D_y}$$

また、四通りの β を一通りに絞りこむために主鉄筋ひずみの理論値と実験値とを比較した。主鉄筋及び配力鉄筋のひずみは次のとおりである。

$$\epsilon_x = -Z_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad , \quad \epsilon_y = -Z_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

この、 Z_x, Z_y は中立面から鉄筋までの距離である。また、直交異方性版の曲げモーメントは次の2式で与えられるから、

$$M_x = -\left(D_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_1 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

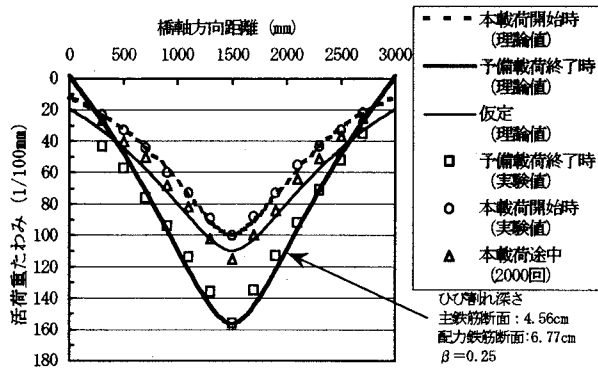


図-14 推定結果例 (A-3)

$$M_y = -\left(D_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)$$

ひずみは、次式で表わされる。

$$\varepsilon_x = \frac{z_x}{D_x(1-\nu_c^2)} \left(M_x - \frac{\nu_c}{\sqrt{\alpha}} M_y\right)$$

$$\varepsilon_y = \frac{z_y}{D_y(1-\nu_c^2)} \left(M_y - \nu_c \sqrt{\alpha} M_x\right)$$

M_x , M_y はたわみと同様に、有限要素法による数値解析で求まる。

これらの方法による断面剛性の推定によって得られたたわみ分布曲線を図-14 に示す。この図に、CFシートの貼付に際してひび割れに対して特に樹脂の注入などは行っていないことから、「RC床版とCFシートが完全合成で剛性を発揮するが、ひび割れ深さは予備載荷のときと変わっていない」と仮定した場合の理論たわみ分布曲線（図中、仮定（理論値））も載せている。これらのたわみ分布曲線から、CFシートで補強した直後の床版のたわみ

表-4 断面2次モーメントの変化 ($\times 10^4 \text{m}^4$)

	貼付前	貼付後	比	1/比
A-1	140	84	0.60	1.67
A-2	159	85	0.53	1.87
A-3	156	100	0.64	1.56
B-1-1	168	107	0.64	1.57
B-1-2	154	94	0.61	1.64
B-2	150	101	0.67	1.49
B-3	157	85	0.54	1.85
B-4	152	116	0.76	1.31
C-1	159	111	0.70	1.43

表-5 活荷重たわみの変化

	貼付前	貼付後	比
A-1	3.275	5.540	1.69
A-2	3.243	5.093	1.57
A-3	3.306	4.642	1.40
B-1-1	3.070	4.334	1.41
B-1-2	3.115	4.679	1.50
B-2	3.213	4.271	1.33
B-3	2.918	5.093	1.75
B-4	3.544	3.993	1.13
C-1	3.243	3.664	1.13

表-6 β の変化

	貼付前	貼付後
A-1	0.5	1.0
A-2	0.25	1.0
A-3	0.25	1.0
B-1-1	0.25	1.0
B-1-2	0.5	0.75
B-2	0.25	1.0
B-3	0.5	1.0
B-4	0.25	1.0
C-1	0.25	1.0

は上記の仮定理論たわみよりも小さくなっていることがわかる。この理由として、ひび割れ面への樹脂の浸入や、CFシートによるひび割れ挙動の抑制からひび割れ面の骨材の干渉が起こり、ねじり剛性が大きく回復したことなどが考えられる。

表-4にCFシート貼付前後の主鉄筋断面の断面2次モーメントと比を示し、表-5に同様に実測たわみの変化状況を示す。それぞれ貼付前後の値の比を取ってみると、断面2次モーメントの貼付前後の比が、貼付前後のたわみの値の逆比に非常に似通っていることに気付く。したがって、CFシートを貼付した床版の曲げ剛性は上記仮定による合成理論で説明することができる。しかし、図-14で見られたように本載荷開始時の実たわみ分布は仮定理論値より小さくなっている。そこで、ねじり剛性の低減係数 β を1.0に戻すことにした。その結果、理論たわみは本載荷開始時理論値となり実験値とほぼ完全に一致するようになった。よって、炭素繊維シート接着工法は曲げ剛性だけでなくねじり剛性の回復にも効果があることがわかる。CFシート貼付前後の β の値の変化状況を表-6に示す。

6. まとめ

CFシートの弾性係数をパラメータ的に扱って輪荷重走行試験の結果を考察してきたが、概して弾性係数の高いCFシートのほうが補強効果も高くなる傾向がある。よって、高弾性CFシートを使用することによって疲労耐久性向上の期待が大きくなる。しかし、この効果はシートと樹脂の組み合わせによっては期待できないことも判明した。

さらにCFシート貼付によって、ひび割れ面のせん断分担力も回復し、床版のねじり剛性の回復ももたらす。

一般に炭素繊維シート接着工法は、ひび割れの動きを抑制して疲労耐久性の延長を図るものであるが、床版との合成効果によって断面剛性の増大も期待できる。この効果率は完全合成理論で説明できる。

参考文献

- ・前田幸雄、松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋RC床版の疲労に関する研究、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984
- ・松井繁之：移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について、第9回コンクリート工学年次論文報告集、1987
- ・高井剣、松井繁之：炭素繊維シートによる床版補強に関する研究、修士論文、1997