

## 格子配置された炭素繊維シートによる床版補強効果

Stiffening Effect with CFRP Sheets Arranged in Grid Pattern on RC Decks.

岡田昌澄\*, 大西弘志\*\*, 松井繁之\*\*\*, 小林 朗\*\*\*\*

Masasumi OKADA, Hiroshi ONISHI, Shigeyuki MATSUI and Akira KOBAYASHI

\*首都高速道路公団 保全施設部保全技術課 課長補佐 (〒100-8930 千代田区霞ヶ関 1-4-1)

\*\*工修 大阪大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 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 吹田市山田丘 2-1)

\*\*\*\*炭素繊維補修・補強工法技術研究会 (〒103-0024 中央区日本橋小舟町 3-8)

The structures of the Tokyo Metropolitan Expressway have been exposed to the severe traffic conditions and with the passage of time certain parts have begun to show a sign of deterioration. In particular, there has arisen an anxiety that the defects of existing decks, which are directly influenced by live loads, will increase.

The proper maintenance of the decks is an important issue. Then the development of a new strengthening method for decks, which is more effective than conventional methods, has been required. The authors have studied carbon fiber sheet reinforcement for the purpose of establishing a new repair and reinforcing method for the decks. In this paper, the results of the fatigue test of RC decks reinforced with carbon fiber sheet are introduced and rational design methods for carbon fiber sheet bonding method are discussed.

Key Words: RC deck, fatigue, carbon fiber sheet bonding, grid arrangement

キーワード: RC 床版, 疲労, 炭素繊維接着工法, 格子配置

### 1. はじめに<sup>1), 2)</sup>

近年、わが国においても社会基盤の劣化現象が大きな社会問題として注目を集めている。その中でも重要な基盤である道路交通網を形成する構造である道路橋の劣化問題は特に重要な問題として認識されている。道路橋の中でも床版は劣化・損傷が多く認められる部材であると同時に、その損傷が橋梁の機能喪失・橋梁架け替えに直結する、きわめて重要な部材である。特に、最近の傾向としては合理的な橋梁構造として、第二東名・名神高速道路における橋梁構造に代表されるような、少数主桁橋梁が数多く採用され、床版が負担すべき機能が増大している。このような状況にあっては、床版の健全性を維持することは橋梁の機能を維持する上で重要な要素であり、床版の置かれている現況を鑑みると、最優先で取り組むべき問題のひとつであると考えられる。

このような状況を背景として、床版の維持管理において、これまでに様々な補修・補強工法が提案・実施されている。そのうち代表的なものとしては、上面増厚工法に代表される、床版中のコンクリート圧縮領域の増加を目的としたものと、鋼板接着工法や炭素繊維接着工法のように床版下面に補強材を貼り付け、見かけの引張側鉄筋量を増やしてやることで床版内の引張側主鉄筋の応力振幅 (=ひび割れ開閉量) の大幅な低減を目指すものが挙げられる。これらの工法の中でも炭素繊維接着工法は下面からの補修・補強であるので橋面上の交通に影響を与えることなく施工できることや補強材の炭素繊維の施工性のよさから特に有望な工

法であると注目されている工法である。しかしながら、この工法

- 1) 補修後の床版の状況を確認する技術が確立されていない
  - 2) 床版上面から進入した雨水等の水分が炭素繊維層によってせき止められ、床版内に水分が蓄積されてしまう
- という問題点があると指摘されており、この問題を解決する必要がある。本研究ではこれらの問題点を解決する方法として短冊状にした炭素繊維を格子状に貼付し、床版下面に床版の観測と水抜きができる「窓」を設けることを考えた。この炭素繊維の配置と

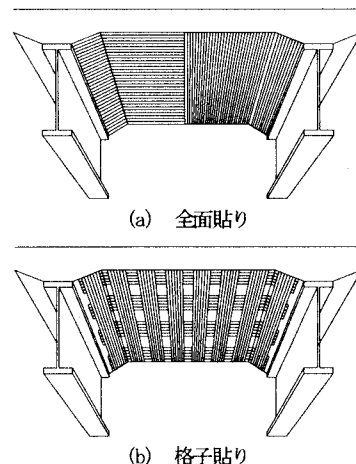


図-1 炭素繊維の配置

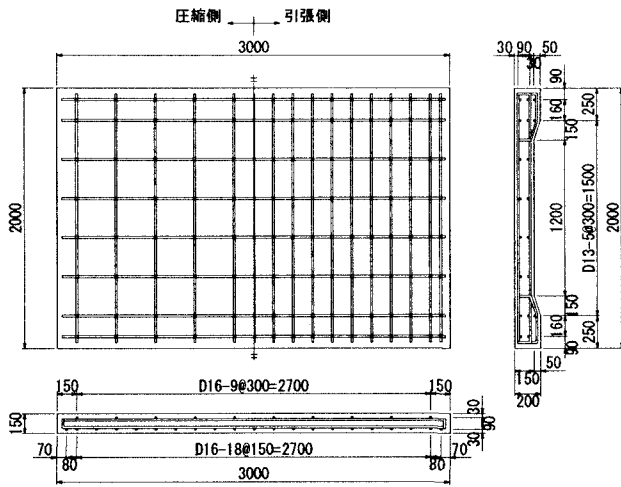


図-2 供試体床版 (15cm厚床版モデル)

従来の配置方法の模式図を図-1に示す。この図に示すように格子状に配置した場合には上記の1)、2)の問題点は解消されるものの、炭素繊維を離散的に配置することや橋軸方向に配置した炭素繊維の接着状態が部位ごとに異なることから、炭素繊維を配置したことによる効果が確保できるかどうかを確認する必要がある。そこで、本研究では実際に炭素繊維を格子状に配置した供試体を作成し、輪荷重走行疲労試験を実施し、炭素繊維を格子状に配置した場合の効果について検討を加えることにした。

## 2. 実験概要

### 2.1. 供試体概要

#### 1) 床版

本研究で使用した床版の形状の一例を図-2に示す。本研究で使用した床版は長さ(橋軸方向)3000mm×幅(橋軸直角方向)2000mmで床版支間は1800mmに統一している。床版厚は15cm、18cm、22cmの3通りに設定し、それぞれ3体(No.2~4)、2体(No.5、6)、1体(No.1)製作した。これらのうち、床版厚22cmと床版厚15cm厚のもののうち一体については炭素繊維補強を実施せず、無補強時の比較用のデータの収集のみを行なった。供試体の配筋は表-1で示すように設定した。15cm厚の床版はS39道路橋示方書で規定される床版、22cm厚の床版はH8道路橋示方書で規定される床版を想定している。使用した鉄筋は床版厚15cm、18cm厚のものではSD295A、22cmのものではSD345としている。鉄筋がかりは圧縮側・引張側で同じとし、床版厚22cmの床版で45mm、それ以外の床版で30mmとした。また、コンクリートの圧縮強度、弾性係数はそれぞれ35.6N/mm<sup>2</sup>、26.6kN/mm<sup>2</sup>(床版厚15cm、22cm)、36.2N/mm<sup>2</sup>、28.6kN/mm<sup>2</sup>(床版厚18cm)であった。

#### 2) 炭素繊維の配置

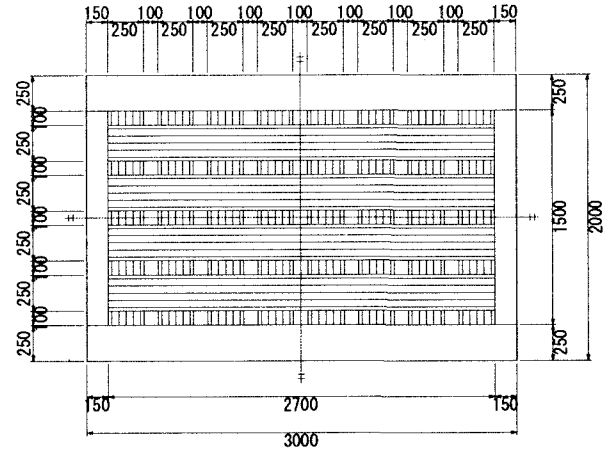


図-3 炭素繊維配置例(間隔100mm)

表-1 床版鉄筋配置(カッコ内は圧縮側で変化させた場合)

床版厚	主鉄筋		配力筋	
	使用鉄筋	配置間隔	使用鉄筋	配置間隔
15cm	D16	150mm (300mm)	D13	300mm
18cm	D16	150mm (300mm)	D13	140mm (280mm)
22cm	D19	150mm (300mm)	D16	150mm (300mm)

本研究では炭素繊維を格子配置した時の補強効果について確認するため、炭素繊維の配置として図-3に示すような格子配置を採用した。今回の配置では、炭素繊維シートの幅を250mmとし、シート間の設置間隔は100mm(床版厚15cm)又は150mm(床版厚18cm)に設定した。また、炭素繊維の種類は中弾性タイプ(E=4.4×10<sup>9</sup>N/mm<sup>2</sup>)のものを使用した。炭素繊維の目付け量は400g/m<sup>2</sup>(t=0.220mm)、470g/m<sup>2</sup>(t=0.259mm)とし、目付け量の違いによる挙動の変化も確認することにした。(表-3参照)

### 2.2. 実験方法

今回の実験は大阪大学保有の輪荷重走行試験機を用いて実施した。床版の支持条件は、床版長辺(支持桁直上)を単純支持、床版短辺を端横桁による弾性支持とした。炭素繊維で補強を行なう床版については表-2に示すような予備載荷を実施し、事前に損傷を与えた後に補強を行い、輪荷重走行試験を実施することにした。輪荷重走行試験時の荷重載荷プログラムを表-3に示す。今回の試験では、床版の耐力に応じて載荷荷重の大きさと往復回数を決定し、試験を実施した。

表-2 予備載荷プログラム

床版名	予備載荷1		予備載荷2	
	荷重(kN)	往復回数	荷重(kN)	往復回数
No.3	147.0	200	98.0	800
No.4	98.0	10000		
No.5	137.0	32000		
No.6	137.0	30000		

表-3 荷重載荷プログラム

床版名	試験ステップ1		試験ステップ2		試験ステップ3		備考
	荷重(kN)	往復回数	荷重(kN)	往復回数	荷重(kN)	往復回数	
No.1	147.0	50000	176.4	350000	205.8	100000	22cm厚RC床版(平成8年道示準拠)
No.2	98.0	50000	117.6	450000			15cm厚RC床版(補強なし)
No.3	98.0	50000	117.6	50000	147.0	400000	15cm厚RC床版(中弾性-目付け470-間隔100)
No.4	98.0	50000	117.6	50000	147.0	400000	15cm厚RC床版(中弾性-目付け400-間隔100)
No.5	147.0	50000	176.4	350000	205.8	100000	18cm厚RC床版(中弾性-目付け470-間隔150)
No.6	147.0	50000	176.4	320000	205.8	130000	18cm厚RC床版(中弾性-目付け400-間隔150)

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1. 概要

今回実施した一連の輪荷重走行試験の結果の概要を図-4に示す。今回の試験では、床版厚 22cm の No. 1 は荷重走行 1,000,000 回に到達しても破壊しなかったものの、他の供試体は全て破壊した。床版厚 15cm の供試体では補強されていない供試体である No. 2 が 410,000 回 (117.6 kN)、補強を施した供試体 No. 3、No. 4 がそれぞれ 342,000 回 (147 kN)、436,000 回 (147 kN) で押し抜きせん断破壊を生じ、床版厚 18cm の供試体では、No. 5 が 941,600 回 (205.8 kN)、No. 6 が 884,000 回 (205.8 kN) で押し抜きせん断破壊により破壊した。

#### 3. 2. たわみ発生状況

図-5に今回の実験で得られた床版中央における活荷重たわみ (98kN 換算値) の経時変動を示す。この図を見ると明らかのように、活荷重たわみの発生量の絶対値は床版の厚さ・補強の有無で明確に分かれる傾向にあり、同一のグループに入る供試体間での違いはあまり明確にできていない。これは各供試体で押し抜きせん断耐力 (P<sub>sx</sub>) が大きく異なることによる影響が現れた結果、補強の程度による違いが確認できなくなったためであると考えられる。そこで、本研究では供試体間の P<sub>sx</sub> による影響を除いて評価するために、活荷重たわみの発生量を評価するための指標として劣化度を導入することにした。ここで、劣化度は以下の定義により計算される指標である。

$$D = (d - d_1) / (d_2 - d_1) \times 100 \quad (1)$$

ただし、D: 劣化度 (%)

d: 実験から得られる活荷重たわみ

d<sub>1</sub>: 全断面有効時の活荷重たわみ

d<sub>2</sub>: 引張側コンクリート無視時の活荷重たわみ

この定義の中の全断面有効時、引張側コンクリート無視時の活荷重たわみは計算により与えられる値を用いて劣化度の計算を行っている。劣化度を用いた表現により得られる供試体の経時変動を図-6に示す。この図を見ると、供試体 No. 1 (床版厚 22cm) が劣化度 25%~75%の範囲を緩やかに増加の傾向を示しながら変動していることを除くと、試験開始時に劣化度が 50~75%付近に

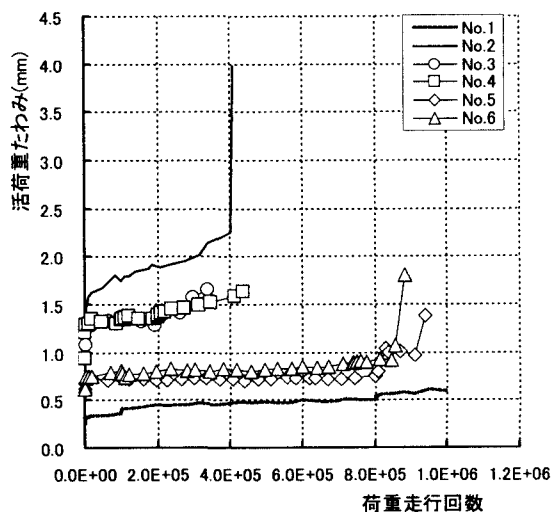


図-5 活荷重たわみの経時変動

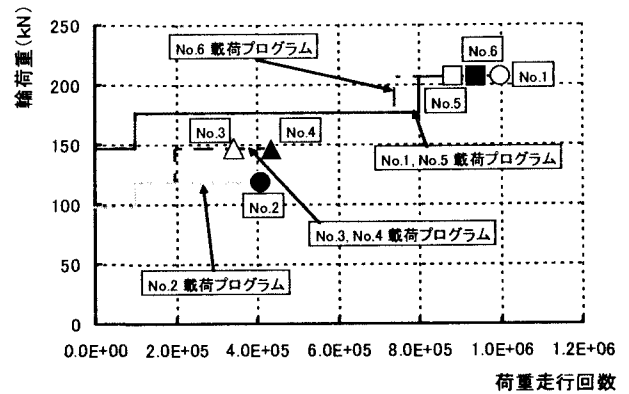


図-4 輪荷重走行試験結果の概要

あったものが増加し、劣化度が 100%を超えるか、100%近くになった時点から著しい劣化度の増加を示し、破壊に至っている。このことは一般に「劣化度 D=100%の時点が使用限界にあたる」とされていることと合致しており、本研究の試験結果においても劣化度を用いた評価が可能であることを示しているものと考えられる。

また、今回の試験では、試験時の荷重が供試体ごと、試験時期ごとに異なっているためその影響を考慮するために次に示す等価荷重走行回数を導入して耐久性の評価を適正に行うことを考えた。ここで、等価荷重走行回数とは、既往の研究成果により与えられる RC 床版の S-N 曲線に基づき、以下の式により与えられる量である。

$$N_{eq} = (P/P_0)^{11.21} \times N \quad (2)$$

ただし、N<sub>0q</sub>: 基準荷重 P<sub>0</sub> に換算した等価荷重走行回数

N: 実荷重 P での走行回数

本研究では使用された荷重の最小値である 98kN に換算した等価荷重走行回数を用いて評価を行うことにした。等価荷重走行回数と劣化度を用いて供試体床版中央のたわみの経時変動を表現した結果を図-7に示す。この図を確認すると、劣化度の増加傾向が一番顕著であるのは No. 2 供試体 (床版厚 15cm、無補強) であり、これに次いで No. 3、No. 4 供試体 (床版厚 15cm、補強あり)、No. 1 供試体 (床版厚 22cm)、No. 5、No. 6 供試体 (床版厚 18cm、補強あり) の順になっている。ただし、等価繰返し回数が 10,000 回を経過した後から劣化度が 100%付近に至り、破壊の過程に入っ

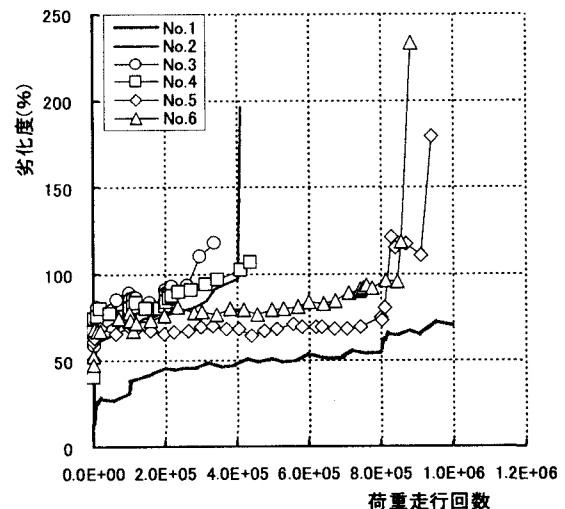


図-6 劣化度の経時変動

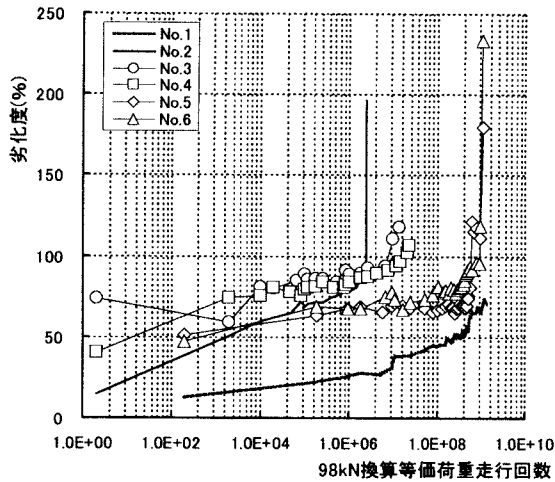


図-7 劣化度—等価荷重走行回数曲線

たとえられるまでの区間においては、No. 3、No. 4 供試体と No. 1 供試体の劣化度の増加速度はほぼ同じである。No. 5、No. 6 供試体では等価荷重走行回数が1,000,000回を超過するまでは劣化度の増加が極めて緩やかであり、炭素繊維接着の効果が現れていると判断できる。しかし、図-7では劣化度の変動の傾向が変化し破壊に向かう時期が床版劣化課程のどの位置に当たるのかが明瞭ではないので、等価荷重走行回数にかわり、新たな指標として等価疲労劣化度 ( $N_{eq}/N_{eq, total}$ ) を提案し、劣化進行状況の変化点を確認することにした。ここで、疲労等価劣化度の分母は試験中に与えられた等価荷重走行回数の合計であり、 $N_{eq}/N_{eq, total} = 1$  となったときが破壊または試験終了を示すという指標である。この指標と劣化度の関係を図-8に示す。この図を見ると供試体No. 2~No. 4では  $N_{eq}/N_{eq, total} = 0.975 \sim 1.0$  の間で傾向の変化が現れていることがわかる。供試体 No. 5、No. 6 では一見すると傾向の変化のタイミングが他のものより早まっているように見えるが、これは試験の終盤に与えられた荷重が大きかったためにデータ間隔があい

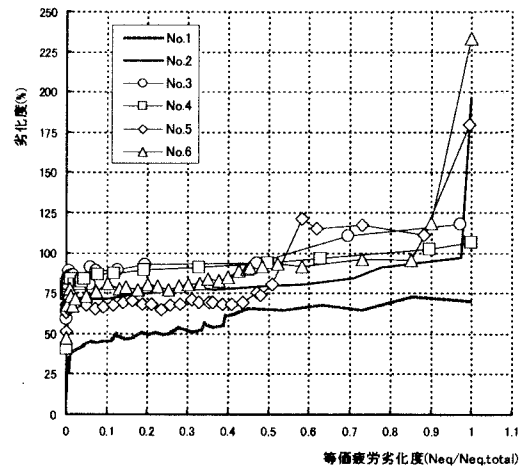
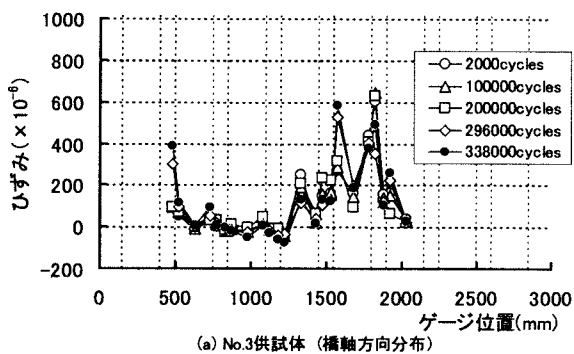


図-8 劣化過程の変化のタイミング

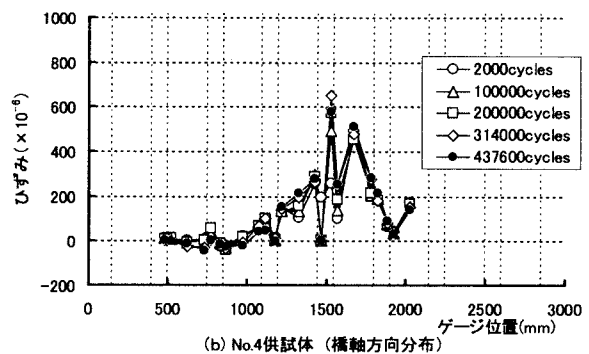
てしまったためであり、No. 5 に関しては  $N_{eq}/N_{eq, total} = 0.89 \sim 1.0$ 、No. 6 に関しては  $N_{eq}/N_{eq, total} = 0.85 \sim 1.0$  の間に変化点があるとしきれない。また、供試体No. 5では  $N_{eq}/N_{eq, total} = 0.43 \sim 0.60$  の間に劣化度の急激に上昇し、0.6付近で劣化度が停留する現象が確認できたので、この原因について検討が必要である。

### 3. 炭素繊維におけるひずみの発生状況

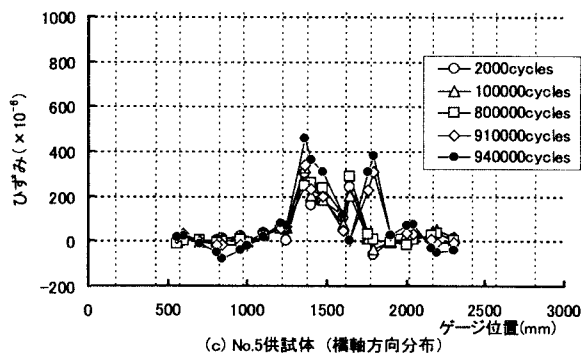
今回の実験で計測された炭素繊維シート上のひずみの橋軸方向分布を図-9に、橋軸方向分布を図-10に示す。なお、図中の鉛直方向の点線は炭素繊維シートの接着範囲の境界を示している。また、荷重の載荷点は橋軸方向、橋軸直角方向とも床版中央（橋軸方向：1500mm、橋軸直角方向：1000mmの位置）である。これらの図に示された測定結果において、全体的な傾向としては、走行試験の期間を通じて、ひずみの発生・分布状態に大きな変動が見られず、図-9(d)、図-10(c)、(d)などに見られるように破壊の直前に至って始めてひずみの分布状態が変化してい



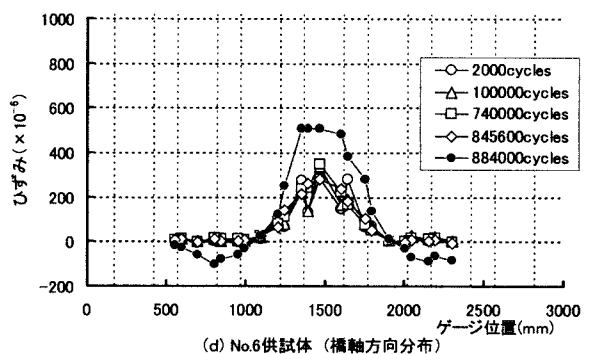
(a) No.3供試体 (橋軸方向分布)



(b) No.4供試体 (橋軸方向分布)



(c) No.5供試体 (橋軸方向分布)



(d) No.6供試体 (橋軸方向分布)

図-9 炭素繊維シート上のひずみ分布 (橋軸方向分布、98kN載荷時)

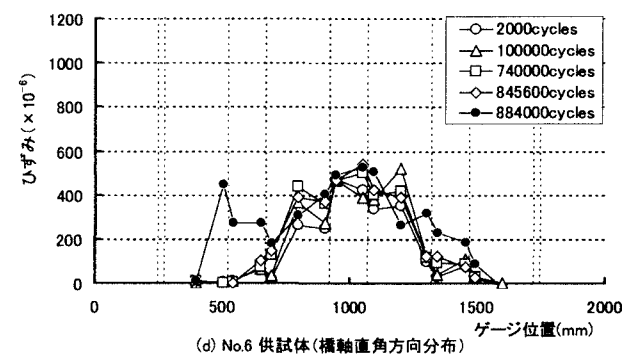
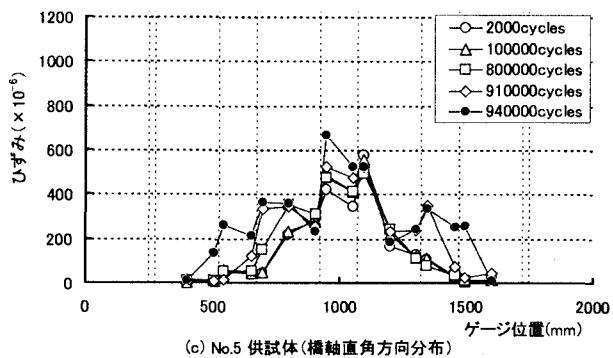
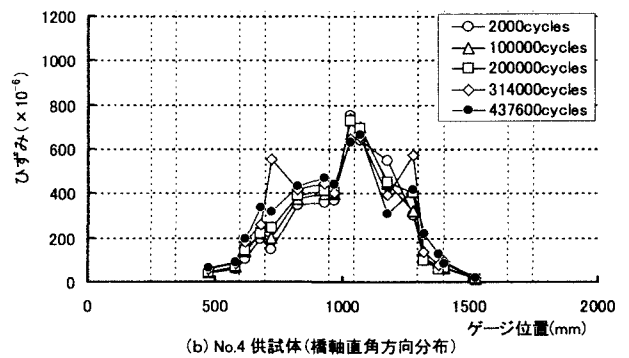
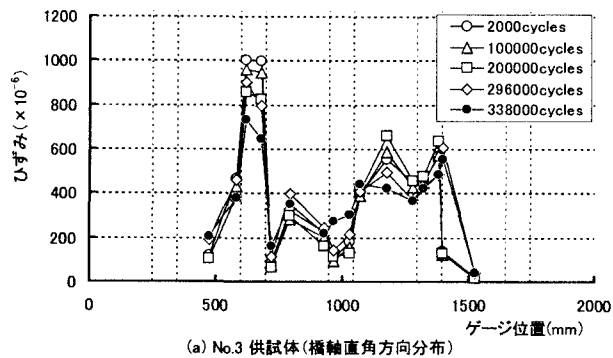


図 - 10 炭素繊維シート上のひずみ分布 (橋軸直角方向分布、98kN 載荷時)

ることがあげられる。また、ひずみの分布形状を確認すると、No.3 供試体ではひずみの最大値が床版中央から離れたところで確認されるという現象が確認されているが、他の3体の供試体では荷重載荷点直下でひずみの最大値が記録される傾向にある。これはNo.3 供試体だけが走行試験開始直後の劣化度が75%と高い値を示し、他の供試体の劣化度(50%前後)と大きく異なっていることに原因があるものと考えられる。また、No.4~6の結果を比較すると、橋軸直角方向のひずみ分布では、炭素繊維の補強量、配置、補強対象の床版の構造に関係なく、床版中央から約500mmの範囲でひずみが発生しており、床版のかなり広い範囲で力を分担していることがわかる。これに対し、橋軸方向の分布を見てみると、床版の厚さによってひずみの分布範囲が異なっていることが判る。このような現象が見られる原因としては、補強対象である床版の構造上の特性の違い、特に異方性度の違いによる可能性が高いと考えられる。

以上のことから、格子状配置された炭素繊維シートに発生する

ひずみの分布形状は接着対象の床版の状態により変化し、橋軸方向に配置されたシートよりも橋軸直角方向に配置された炭素繊維シートのほうが多くの荷重を分担している可能性が高いことがわかる。

### 3. 4. 床版中立軸位置の変動

本研究では床版内の同一断面内に位置する圧縮側・引張側の双方の主鉄筋に貼付されたひずみゲージの出力値から中立軸の位置を推定し、炭素繊維シートを格子状に接着した場合の挙動を確認することにした。図 - 11 に炭素繊維シート接着前後の中立軸位置の比較を、図 - 12 に輪荷重走行試験時の中立軸位置の変動を示す。まず炭素繊維シートの接着による中立軸の移動状況を確認すると、炭素繊維シートを接着した供試体No. 3~6のすべてにおいて中立軸の位置が下方に移動していることがわかる。その移動量は3~15mm程度であり、シート接着直前の中立軸位置と比較すると、圧縮域が8~50%程度増加していることがわかる。これは

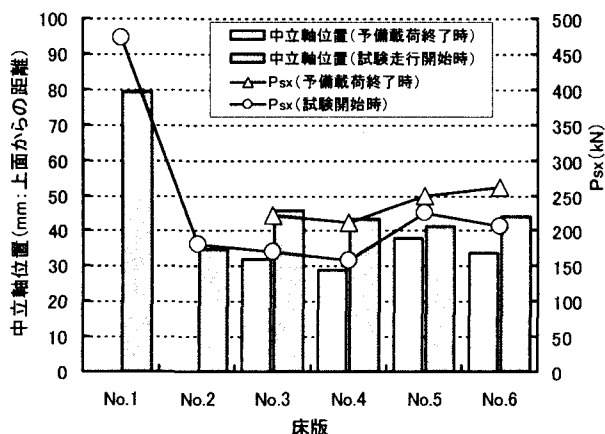


図 - 11 炭素繊維接着による中立軸の移動

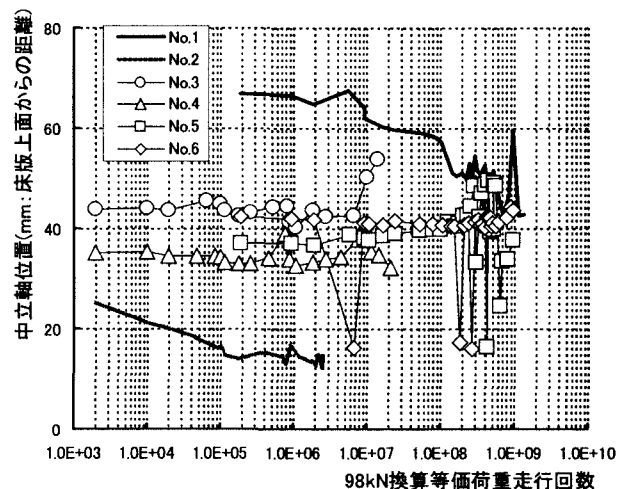
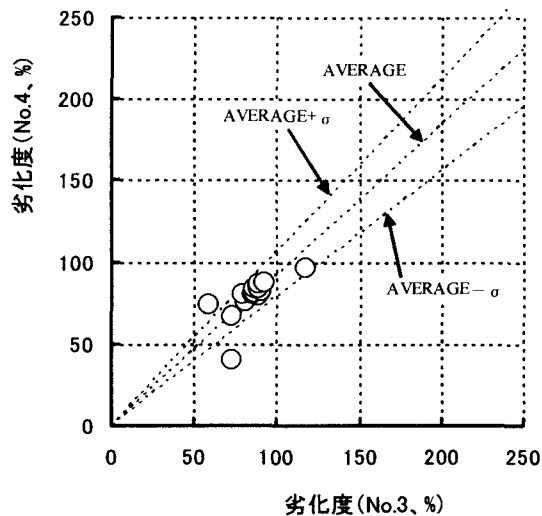
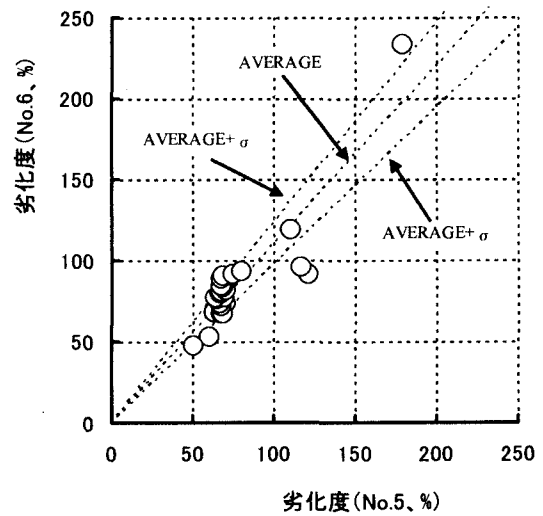


図 - 12 輪荷重走行試験中の中立軸の変動



(a) 床版厚 15cm



(b) 床版厚 18cm

図 - 13 補強量の違いが劣化度に与える影響

炭素繊維シート接着工法の特徴である、炭素繊維シートによる曲げ応力の分担とひび割れ開口変位の拘束の効果により、床版の変形が全体的に減少し、鉄筋のひずみもまた、減少したことによるものと考えられる。また、走行試験中の中立軸位置の変動を見ると、補強していない No. 1、No. 2 供試体では試験の進行とともに中立軸が上方へ移動しているのがわかるが、炭素繊維シートで補強された供試体では破壊に至る直前までそのような傾向は認められず試験開始当初の状態を保持し続けていることがわかる。このことから、今回の格子状配置による炭素繊維シート接着補強は良い耐久性を示したといえる。しかし、破壊直前まで劣化の進行が確認できない可能性も高いことから、余寿命の推定方法について検討する必要がある。

### 3. 5. 炭素繊維シートの目付け量の違いによる影響

各床版厚で炭素繊維シートの目付け量が床版劣化度にどのような影響を与えているのかを比較した結果を図 - 13 に、目付け量が劣化度の変動にどのような影響を与えているのかを劣化度比 ( $D/D_0$ 、 $D$ :劣化度、 $D_0$ :試験開始時の劣化度) を導入して調べた結果を図 - 14 に示す。まず、炭素繊維シートの目付け量が劣化度に与える影響を見てみると、床版厚 15cm の供試体では炭素繊維の目付け量が  $400\text{g}/\text{m}^2$  の供試体 (No. 4) の劣化度が  $470\text{g}/\text{m}^2$  の供試体 (No. 3) の 92%程度に収まっている。床版厚 18cm の供試体での比較結果は目付け量が  $400\text{g}/\text{m}^2$  の供試体 (No. 6) の劣化度が  $470\text{g}/\text{m}^2$  の供試体 (No. 5) の 110%程度になっており、ちょうど逆の結果となっている。このような現象が見られた原因としては、No. 3 の初期損傷が大きかった (炭素繊維シート接着後で劣化度 75%) ことがあるが、このことを勘案したとしても、目付け量の増加による劣化度の抑制効果が明確に現れているとは言い難いと思われる。また、炭素繊維シートの目付け量が劣化度の変動にどのような影響を与えているのかを確認すると、床版厚 15cm では目付け量による影響は全く確認されなかったが、床版厚 18cm では目付け  $400\text{g}/\text{m}^2$  で補強した供試体よりも  $470\text{g}/\text{m}^2$  で補強した供試体のほうが劣化度の増加速度が 30%弱大きいという結果になっている。

以上のことから、今回の炭素繊維シートの格子配置に関する試験の結果からは炭素繊維シートの目付け量として  $400\text{g}/\text{m}^2$  と

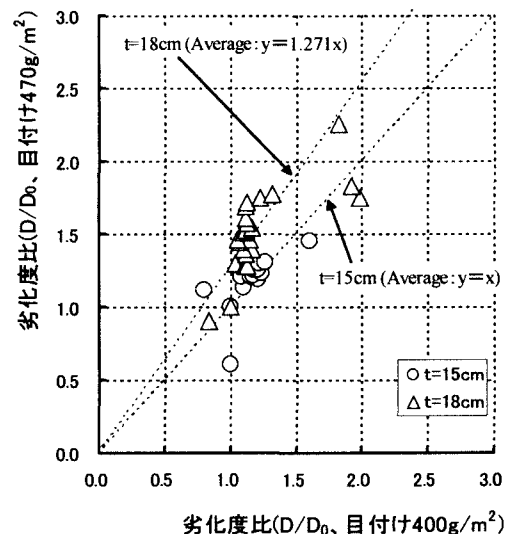


図 - 14 補強量が劣化度の増加速度に与える影響  
 $470\text{g}/\text{m}^2$  のいずれが適切なのか、さらに検討を加える必要がある。

## 4. 結論

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 炭素繊維シートを格子状に配置して補強した場合でも、床版の変形や内部の応力状態を改善する効果は十分にあり、補強方法として有効である。
- 格子状配置で橋軸直角方向に配置された炭素繊維シートは橋軸方向に配置されたものよりもより多くの荷重を分担している。また、炭素繊維シートに発生するひずみの量は補強対象となる床版により決定される条件により大きく影響される。

## 参考文献

- 例えば、建設省土木研究所：道路橋床版の輪荷重走行試験機における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書 (その 1)、共同研究報告書第 221 号、1999.3
- 例えば、建設省土木研究所：ミニマムメンテナンス橋に関する検討、土木研究所資料 No. 3506、1997、6