

## 二方向ケブラー繊維シートで下面補強した損傷床版の疲労耐久性

### Fatigue Durability of Damaged RC Slab Strengthened with Cross Textile Kevlar Sheet

三上浩\*、柑本哲哉\*\*、鍋島益弘\*\*\*、堀川都志雄\*\*\*\*

Hiroshi MIKAMI, Tetsuya KOUJIMOTO, Masuhiro NABESHIMA and Toshio HORIKAWA

\*工博 三井建設(株)技術研究所 主席研究員(〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

\*\*工修 住友ゴム工業(株)産業品事業部(〒651-0072 神戸市中央区脇浜町 3-6-9)

\*\*\*大成ロテック(株)関西支社 技術分室(〒569-0034 大阪府高槻市大塚町 4-23-1)

\*\*\*\*工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科(〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

In this paper, a new strengthening method for damaged RC slab bonding cross textile Kevlar sheet on the bottom surface is proposed and the fatigue durability is experimentally discussed. The test was conducted by using the wheel-load testing machine at Public Research Institute of Ministry of Construction. Comparing the proposed method using the cross textile to the method of cross bonding one-dimensional textile sheets, the former can expect a better stress distribution and bonding capacity than the latter method. And also, the former can cut the working process of the latter method in half. From the experiment, following results are obtained; 1) The strengthened RC slab is failed with punching shear at the 346,000 cycles (314kN wheel-load); 2) This is almost the same result to that of the RC slab designed based on the newest standard; 3) Under 157kN wheel-load, the displacement of slab center is kept a constant value up to 320,000 cycles; 4) Checking the strain of the Kevlar sheet, it is confirmed that the sheet can effectively strengthened RC slab up to the ultimate stage.

Key Words : cross textile Kevlar sheet, strengthening method, RC slab, punching shear

#### 1. はじめに

近年、自動車交通量の増加や車両の大型化に伴い、道路橋の鉄筋コンクリート床版(以後、RC床版)の早期劣化が問題となっている。また、車輛総重量の規制緩和や設計自動車荷重の増大により、RC床版のさらなる劣化進行が懸念され、早急な補強対策の実施が強く望まれているところである。

従来、床版の補強工法として、増厚工法や鋼板接着工法あるいは炭素繊維シート貼付け工法などが採用されてきた。また、最近では下面に補強材を敷設し、それを無機系の吹き付け材料で既設床版と一体化させる工法なども試みられている。しかし、増厚工法の場合は耐力向上策としては極めて優れた工法であるものの供用しながらの施工が難しくまた死荷重が増大する、鋼板接着工法の場合は施工が煩雑で耐食性が懸念されるなど、欠点も指摘されている。また、下面から無機系材料を吹き付ける工法では、施工および養生期間が極めて長くなるなどの欠点がある。一方、炭素繊維シートを床版下面に貼付ける工法は比較的欠点の少ない工法であるが、床版を補強するためには一方向強化繊維シートを直交して貼付ける

必要があり、さらなる工期短縮およびコスト縮減が望まれていた。

このような背景から、本研究ではRC床版の新しい下面補強工法として、軽量で施工性に優れた二方向ケブラー繊維シートによる方法を提案し、その補強効果について実験的に検討した。なお、実験は建設省土木研究所との共同研究の一環として、同所の輪荷重走行試験機を用いて行った。

本工法は、繊維束を直交二方向に編上げた二方向ケブラー繊維シート(以後、二方向シート)を床版下面に接着するもので、従来の繊維シート工法と異なり一回の施工で二方向補強が可能となり、施工期間が短くなるという特徴がある。さらに、硬化時間の早い含浸樹脂を使用しているため特別な養生期間を必要としないなどの特徴を併せ持っている。また、繊維束を直交二方向にて直接床版下面に接着できるため、優れた接着性能および応力分配性能が期待できるものと考えられる。なお、本実験に使用した87タイプの二方向シートは一方向の目付量が435g/m<sup>2</sup>、二方向では870g/m<sup>2</sup>と重いため、あらかじめ所要量の樹脂をシートに含浸した後に貼付ける事前含浸法によって上向き施工を実施している。

## 2. 実験の概要

実験は先ず図-1 に示すような昭和 39 年道路橋示方書（以後、39 年道示）に準拠した RC 床版を製作し、損傷を模擬するための初期载荷として载荷重 157kN にて 4 万回走行した。その結果、床版の中央変位が目標とする損傷度Ⅱ<sup>リ</sup>の変位量（8mm）に達することが難しいと判断されたため、荷重を 176kN に増加させて 17 万回の走行試験を実施した。これにより、床版中央変位量は 7mm 弱と目標値以下であったものの床版上面に発生した貫通クラックは橋軸直角方向に横断し、目標とする損傷度Ⅱの状態に達した。

その後、幅 1m、長さ 2.2m の二方向シートを用いて橋軸方向の継手長を 10cm として床版下面に 1 日 1 層の手順で 2 層接着した。なお、継手位置が重ならないように 2 層目の貼付けは 1 層目の左右反転とした。また、貼付け期間が短いため貼付け中の载荷は行っていない。本工法では、供用開始を樹脂が硬化する貼付け終了後 6 時間と設定しているため、貼付け終了後特別な養生期間を設けず計測機器取付けが完了した後すぐに本载荷を開始した。本载荷は 157kN から 4 万回づつ 20kN 刻みで荷重を増加させる段階载荷にて行っている。

表-1 に実験に用いた材料の性能を示す。87 タイプの二方向シートの設計厚さは 0.24/0.24mm であり、これを 2 層接着した。なお、シートの引張試験および建研式接着試験はともに 2 層成形品を用いて行った。本载荷開始後材齢 1 日での接着強度は 3.9N/mm<sup>2</sup> であり、一般的な織

表-1 材料の性能

コンクリート	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	
	37.6	3.00	2.76×10 <sup>4</sup>	0.155	
鉄筋	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	
	D10	381	543	1.83×10 <sup>5</sup>	24.6
	D13	380	547	1.86×10 <sup>5</sup>	24.7
	D16	374	570	1.89×10 <sup>5</sup>	21.4
二方向シート	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	接着強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性伸び (%)	
	2,490	3.9	1.39×10 <sup>5</sup>	1.79	

維シート補強における基準接着強度である 1.5N/mm<sup>2</sup> の 2 倍以上と高く、二方向シートは優れた接着性能を有することが分かる。

## 3. 実験結果と考察

### (1) 初期载荷

初期载荷における試験体中央部の変位と走行回数との関係を図-2 に示す。図から 157kN の载荷初期に载荷時および徐荷時変位が急増していることが分かる。この変位量の急増は曲げひびわれの発生・進展によるものであると考えられる。しかしながら、4 万回走行終了時点での载荷時変位は 4mm 強、徐荷時変位は 2mm 程度といま

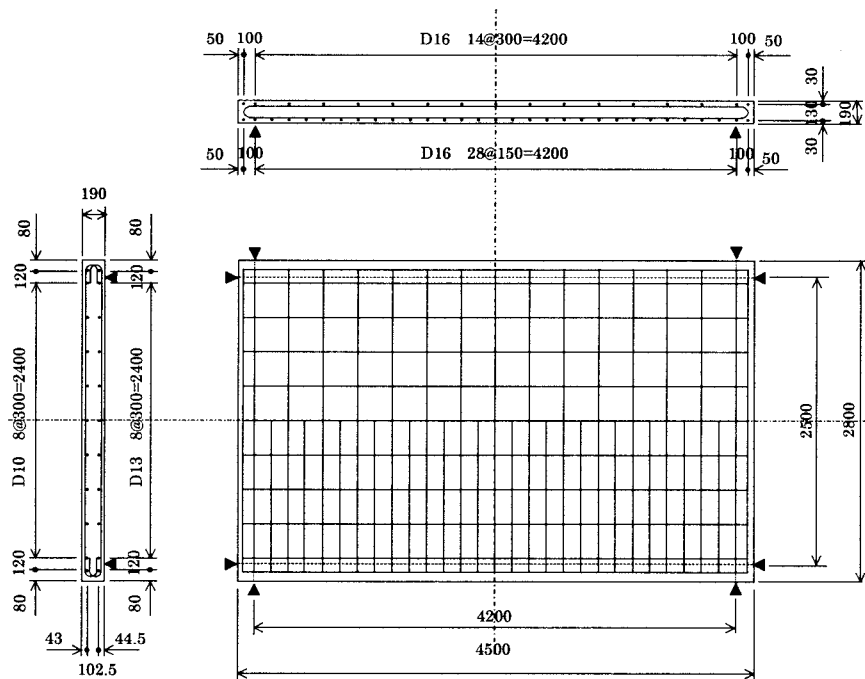


図-1 試験体寸法および配筋

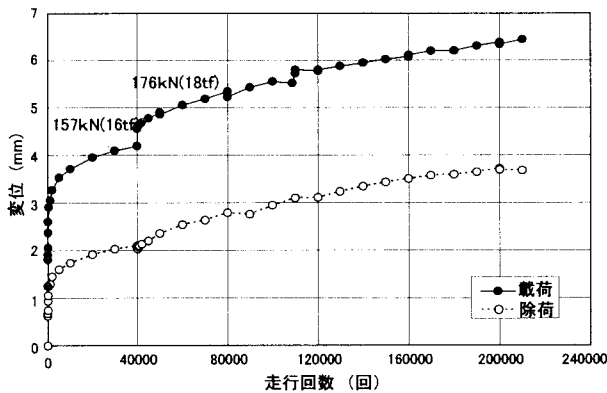


図-2 初期損傷時の変位-走行回数

だ少ない。載荷重を 176kN に増加することで載荷時および徐荷時変位は増大したが、増加傾向はさほど顕著ではなかった。176kN で 17 万回（合計 21 万回）を走行した時点で床版上面の橋軸直角方向に貫通ひびわれが横断したため目標の損傷度Ⅱに達したものと判断した。なお、この時点での床版中央の載荷時変位は 6.5mm 程度、徐荷時変位は 4mm 弱であった。

図-3 に初期載荷終了時における床版下面のひびわれ状況を示す。ひびわれは床版下面全域にわたって密に多数発生しており、床版中央部近傍では亀甲状を呈し、支点近傍のひびわれは床版中央に向かって進展している。

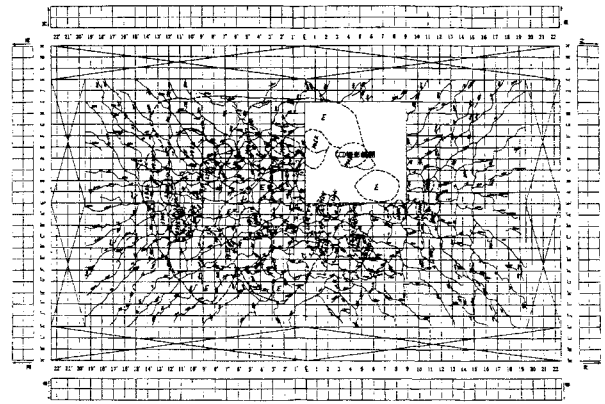


図-3 初期損傷時のひび割れ発生状況（床版下面）

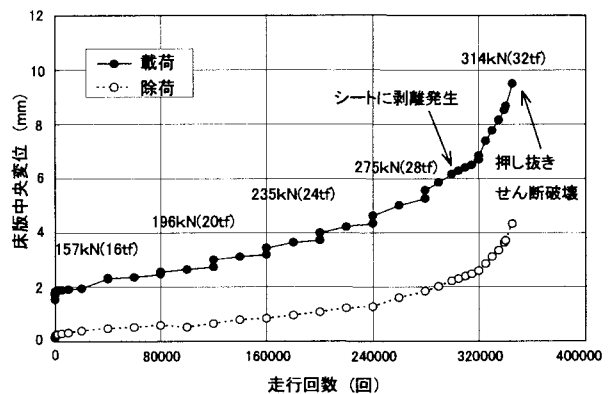


図-4 変位-走行回数の関係

## (2)本載荷

### 1) 破壊状況

本載荷における床版中央変位と走行回数の関係を図-4 に示す。また、試験終了後の床版切断面のひびわれ状況と二方向シートの剥離状況を図-5 に示す。図-4 から、床版中央の載荷時および徐荷時変位は走行回数 24 万回程度、載荷重 255kN 程度まではほぼ線形に増加していることが分かる。その後、載荷重（走行回数）の増加とともに変位の増加勾配が徐々に大きくなり、載荷重 314kN、走行回数約 34.7 万回にて押し抜きせん断破壊に至った。なお、走行回数 30 万回、載荷重 294kN において始めて二方向シートに円形状の剥離が発生し、剥離箇所は載荷重および走行回数の増加に伴って増加・散在した。

図-5 に示す床版切断面（B-B、C-C 断面）のひびわれ状況から、橋軸直角方向に押し抜きせん断断面が明瞭に形成されていることが分かる。一方、二方向シートの剥離箇所は破壊直前には図中白抜きで示すように散在し、押し抜きせん断破壊時には各剥離部分が連結している。また、剥離は主として床版下面の押し抜きせん断によるひびわれ位置近傍で発生していることが分かる。このように、破壊直前の 294kN（走行回数約 30 万回）までは二方向シートに剥離が全く見られなかったことから、シートとコンクリートの付着状態は良好であったと考えられる。なお、破壊時にシートの破断は認められなかった。

### 2)変位と走行回数の関係

図-6 に各載荷段階の床版中央の活荷重変位と走行回数の関係を示す。各載荷段階の計測は各段階載荷終了後一旦徐荷した後、それ以前の段階載荷における載荷重を静的に載荷して行った。ここで、活荷重変位は載荷時変位から徐荷時変位を差し引いた変位とした。図中、各載荷段階の最も大きな変位を連ねた線が、段階載荷における活荷重変位と走行回数の関係である。

段階載荷に着目すると、載荷初期の活荷重変位は約 1.5mm であり、活荷重変位は載荷初期から走行回数 32 万回程度までほぼ線形に増加していることが分かる。なお、この時点の活荷重変位は 4mm 程度であり、その後変位が急激に増大して押し抜きせん断破壊に至ったことから、活荷重変位 4mm 程度がこの床版の限界変位であるものと考えられる。

一方、各載荷重ごとに着目すると、載荷重が低い場合は載荷初期から走行回数 32 万回程度まで活荷重変位がほぼ一定であることが分かる。載荷重が大きくなると活荷重変位は増大する傾向にあるが、この傾向は載荷重が大きいくほど顕著である。しかし、変位勾配が最も顕著に増大したのは 32 万回以後の載荷重が 314kN の段階であり、これから、活荷重変位および床版の破壊は走行回数よりも載荷重の大きさに強く影響されているものと考え

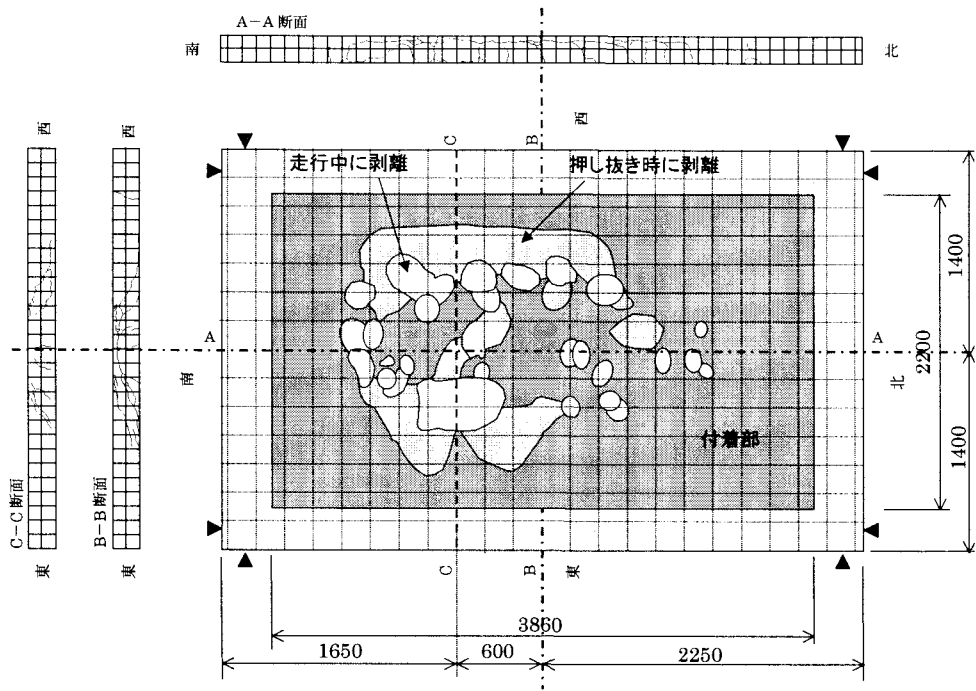


図-5 破壊状況とシートの剥離状況

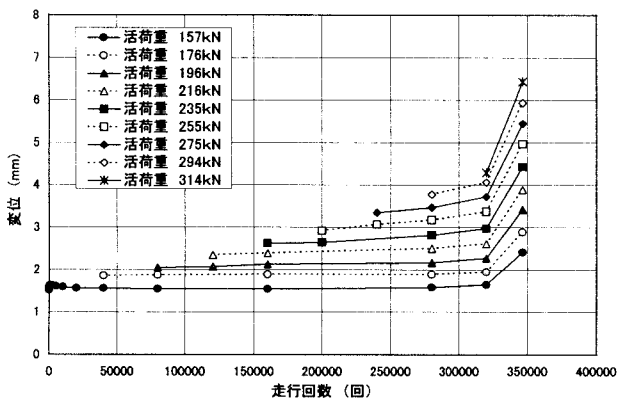


図-6 各载荷段階での活荷重変位-走行回数関係

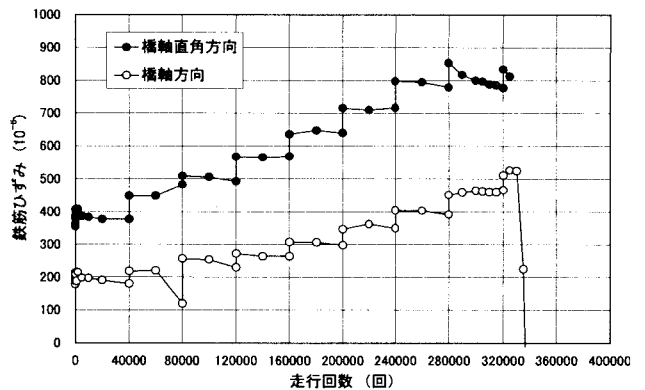


図-7 鉄筋の活荷重ひずみ-走行回数関係

られる。

### 3) 鉄筋のひずみと走行回数関係

床版中央の下端主鉄筋および配力筋の活荷重ひずみ（载荷時ひずみ-徐荷時ひずみ）と走行回数関係を図-7に示す。主鉄筋の活荷重ひずみは载荷初期から走行回数28万回程度まではほぼ線形に増加し、その後減少、増加を繰り返しているが、28万回でのひずみが最大で約860 $\mu$ であった。なお、载荷初期のひずみは390 $\mu$ 程度であり、28万回走行時には载荷初期のひずみから470 $\mu$ 程度増加している。

一方、配力筋の活荷重ひずみも走行回数8万回で多少の変化があったものの28万回程度まではほぼ線形に増加し、その後も走行回数（载荷重）の増加とともに多少増大した。最大ひずみは終局直前で530 $\mu$ 程度であり、

初期には190 $\mu$ 程度であったことから、ひずみの増分は約340 $\mu$ である。このように、床版中央の鉄筋の活荷重ひずみは絶対量もひずみ増分も主鉄筋の方が配力筋よりも大きい。

### 4) 二方向シートのひずみと走行回数関係

床版中央における二方向シートの橋軸直角および橋軸方向の活荷重ひずみと走行回数関係を図-8に示す。シートの橋軸直角方向の活荷重ひずみは载荷初期から終局まで、走行回数8万回で多少の変化があったもののほぼ線形に増加している。载荷初期のひずみは600 $\mu$ 程度であり最大ひずみは約1,200 $\mu$ である。

一方、シートの橋軸方向のひずみは8万回の計測値を除いて24万回程度まではほぼ線形に増加した後一旦減少し、载荷重314kNでほぼ回復した後さらに大きな増加・

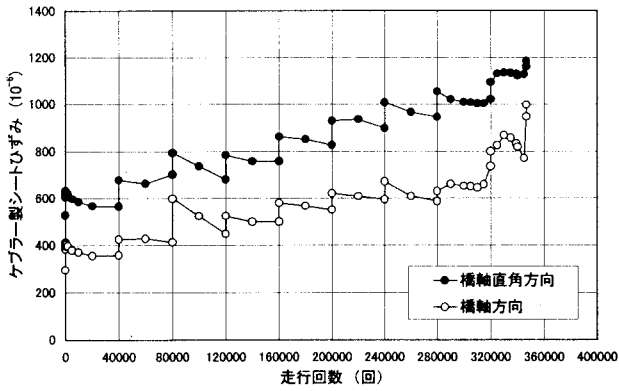


図-8 シートの活荷重ひずみ-走行回数の関係

減少を繰り返して破壊に至っている。終局近傍においては橋軸直角方向に押し抜きせん断面が形成されつつあるものと思われ、これがシートの橋軸方向のひずみ性状にも影響を与えたことが考えられる。なお、シートの橋軸方向のひずみは載荷初期で  $400\mu$  弱、終局近傍で  $800\sim 1,000\mu$  程度であった。このように、二方向シートの橋軸直角方向のひずみは載荷初期から終局まで橋軸方向のひずみよりも大きい。これは、主鉄筋と配力筋のひずみの大小関係と同様である。

曲げに立脚した設計法を適用する場合、本床版では橋軸直角方向に比べて橋軸方向の配筋量が著しく少ないため、より大きな応力（ひずみ）が橋軸方向の配力筋やシートに発生するものと考えられる。しかるに、破壊は押し抜きせん断によるものであり、載荷初期から終局まで橋軸直角方向の主鉄筋および二方向シートの応力（ひずみ）が橋軸方向よりも大きいなど、曲げに立脚した設計法の適用は合理的でないものと考えられる。

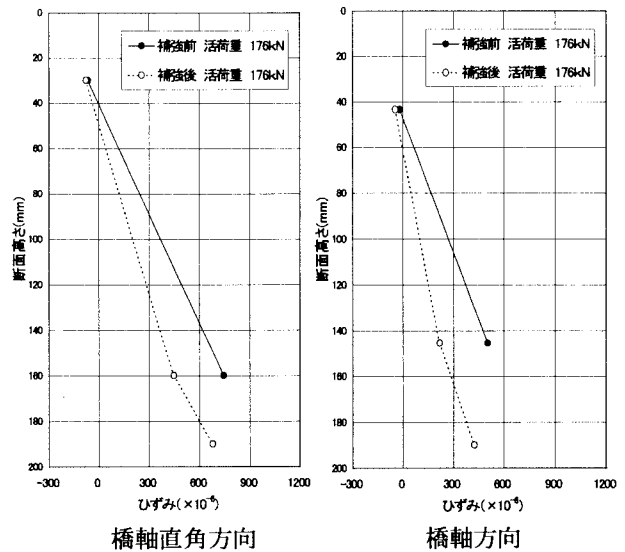
### 5) 断面内ひずみ分布

二方向シートと既設床版の一体性を検討するため、床版中央での橋軸直角および橋軸方向の断面内ひずみ分布を図-9に示した。なお、ひずみ分布は上端筋、下端筋および二方向シートの3計測点で示している。(a)では補強前後の断面内ひずみ分布を載荷重 176kN において比較し、(b)では各載荷重ごとのひずみ分布を比較した。

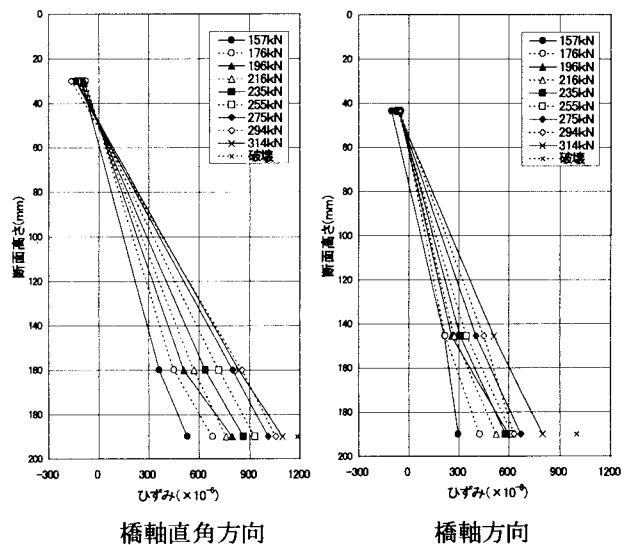
(a)より、二方向シート補強によって下端主筋および配力筋に生じるひずみが補強前と比較して  $300\mu$  程度減少し、平面保持の仮定も概ね成立していることが分かる。(b)より、橋軸直角および橋軸方向ともに載荷重の大きさによらず破壊直前まで平面保持の仮定がほぼ成立し、二方向シートと既設床版が一体となって載荷重に抵抗していることが分かる。

### 6) 実験結果の位置付け

既往の研究成果を基に本実験結果の位置付けを行った。本実験に用いた母床版はコンクリート強度が  $37.6\text{N/mm}^2$  と高いことなどもあって、通常の39年道示床版よりも耐荷



(a) 補強前後の比較



(b) 断面内ひずみ分布の載荷重による影響

図-9 断面内ひずみ分布

力が高いものと思われ、これを考慮した補正が必要であると考えられる。そこで、176kNの初期載荷における荷重-変位関係を基に床版中央の載荷時変位が8mmとなる走行回数を図-10のように対数で予測した。その結果、走行回数は93.4万回となった。ただし、176kN載荷前に157kN載荷(4万回走行)を行っているので、これを176kN載荷に換算した走行回数を加算することとした。換算走行回数  $N_0$  は文献2)に示されている(1)式を基に算出した。

$$40,000 = (176/157)^{12.763} \times N_0 \quad \dots\dots (1)$$

換算走行回数は0.9万回程度となり、合計94.3万回程度の走行を176kNで実施した場合に母床版の載荷時中央変位が8mmになるものと考えられる。

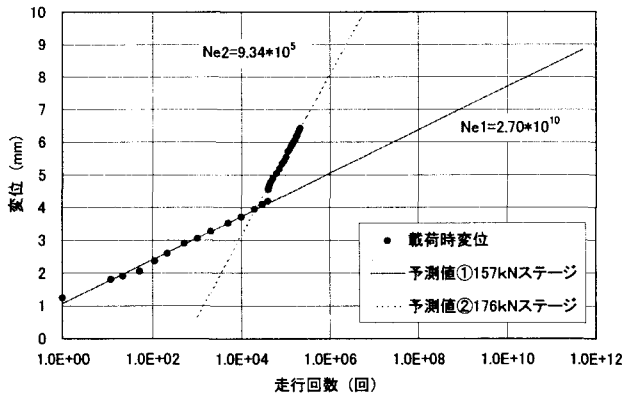


図-10 初期損傷時の変位-走行回数 (対数予測)

次に、39年道示に準拠して製作された床版は一般的には10万回程度以内の走行で破壊することが知られていることから<sup>3)</sup>、5万回で載荷時変位が8mm程度のレベルになるものとして載荷重Xを(2)式で予測した。

$$943,000 = (X/176)^{12.763} \times (50,000) \quad \dots\dots (2)$$

載荷重Xは222kN程度であり、39年道示に準拠して製作された一般的な床版の耐荷力が157kN程度であるのに対して、本実験に用いた母床版の耐荷力は65kN程度高かったものと推察される。

既往の研究成果と本実験の結果を図-11に取りまとめた。図中、S39は昭和39年、H8は平成8年の道示に準拠して製作した床版の実験結果である<sup>3)</sup>。また、二方向シート補強(1)、(2)とあるのは、(1)が本実験結果をそのまま示したものの、(2)が上述したように母床版の耐荷力が高いことを考慮して再評価した結果である。なお、再評価はS39の結果を文献<sup>3)</sup>のままとし、本実験結果を65kN程度引き下げて行った。

本検討結果から、二方向シートで下面を補強した39年道示床版は、母床版の耐荷力が高いことを評価しても平成8年道示床版に近い疲労耐久性を有するものと位置付けられる。

#### 4.まとめ

施工性に優れ、コスト縮減に資する新しい床版下面補強工法として、87タイプ二方向ケブラー繊維シートを事前含浸法によって2層接着する方法を提案し、輪荷重走行試験によって疲労耐久性を検討した。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると以下の通りである。

(1)損傷度Ⅱのレベルに達したのは157kN載荷(走行回数4万回)後、載荷重176kNの走行を17万回実施した後であった。

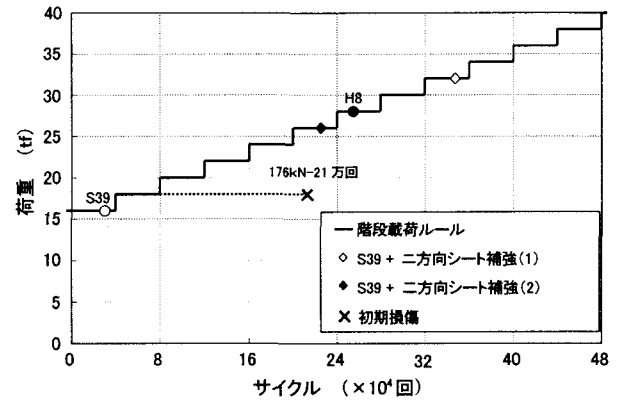


図-11 実験結果の位置付け

(2)二方向シート補強後の床版中央活荷重変位は、載荷重が低い場合は、32万回走行時までほぼ一定であった。一方、載荷重を314kNに増加させたことによる活荷重変位の増大は極めて顕著であり、走行回数よりも載荷重の大きさの影響が支配的であった。

(3)鉄筋および二方向シートの橋軸直角方向のひずみは橋軸方向よりも大きく、曲げ設計で予想される応力分担機構とは異なることが明らかとなった。同時に、押し抜きせん断で破壊したことから、せん断型設計法の適用を考慮する必要があるものと考えられた。

(4)目視によってシート剥離が確認されたのは終局近傍であり、断面内ひずみ分布は終局までほぼ線形関係を保持していたことから、二方向シートと既設床版の一体性は良好であるものと判断される。

(5)本実験に用いた母床版の耐荷力が既往の実験におけるものよりも高いことを考慮して再評価した結果、二方向シートで補強した39年道示床版の疲労耐久性は平成8年道示床版には若干劣るものの、それに近いレベルであることが明らかとなった。

本研究は二方向シート工法研究会の共同研究として実施したものです。ご支援を頂いた東レ・デュポン(株)および(株)ポーの皆様に感謝致します。また、研究を行うにあたり第一技研コンサルタント(株)の皆様に適切なご助言とご指導を頂きました。紙面をお借りして厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1)土木研究所資料、橋梁点検要領(案)、建設省土木研究所、昭和63年4月
- 2)道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性、阪神高速道路公団、平成3年12月
- 3)内田賢一、西川和廣：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討、土木学会第53回年次学術講演会、平成10年10月