論文　ラチス鉄筋を用いた道路橋 RC 床版のせん断補強に関する実験

表　真也[*1]・岡田　慎哉[*2]・林川　俊郎[*3]・松井　繁之[*4]

要旨：本研究は，道路橋の RC 床版を対象としてその疲労耐久性を，床版厚を増すことなく向上させるために，波形に加工した鉄筋を既存の配筋に落とし込んでせん断耐力を向上させる方法を提案し，輪荷重走行試験により疲労耐久性の検討を行ったものである。その結果，提案のせん断耐力を向上させる方法は RC 床版のせん断ひび割れの開口を抑止し，せん断破壊に対する抵抗性を発現することを確認した。

キーワード：RC 床版，疲労耐久性，せん断補強，ラチス筋，輪荷重走行試験

1. はじめに

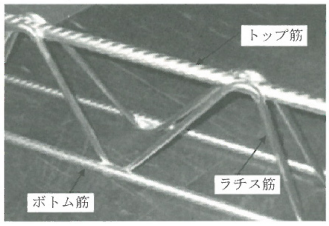
道路橋の RC 床版は，常に走行荷重に曝され，疲労等による損傷が著しい部材である。**写真－1** には床版コンクリートの層状剥離[1]と，床版が陥没部しアスファルトが損傷した状況を示す。一般的にこのような損傷が広範囲に至る場合には，床版の打ち替えが選択肢となる。しかしながら，旧基準で作られた床版は厚さが薄く，現行基準で照査すると厚さを増加しなければならない場合がほとんどである。厚さを増加する場合，上部工の死荷重が増加し，併せて，他の部位の補強を行うこととなり，結果，施工が大規模化しコストも増大する。このようなことから**写真－2** に示すように 1 本の上鉄筋（トップ）と 2 本の下鉄筋（ボトム）に波形をしたラチス筋が連続して溶接された構造のトラス鉄筋を PC 床版内に埋め込み，PC 版と場所打ちコンクリートとを力学的に合成させた PC 床版[2~3]や，トラス鉄筋により補強された合成床版[4~7]などが開発されている。PC 床版や合成床版は，鋼板などを先行して敷設するため床版施工用の足場や支保工が不要な場合は，施工の省力化から工期短縮に繋がりトータル的に場所打ち RC 床版よりもコストは有利になる場合がある。しかしながら，PC 床版や合成床版はその運搬や大型の揚重機の搬入が困難な場合があり，また，合成床版においては鋼板で床版下面が覆われているため床版の損傷状態が見えないなど課題がみられる。

このような背景から，経年劣化した既設床版の打ち替え等において，既設橋梁の床版厚を抑えつつ，施工性も考慮した工法により床版の疲労耐久性の改善を図ることを目的として，PC 床版や合成床版に用いられているトラス鉄筋のラチス筋に着目し RC 床版への適用を検討することにした。

本研究では，ラチス筋の有無や設置方向をパラメータとして試験体を製作し，補強効果を検証するため輪荷重走行試験を行ったのでその結果を報告する。

（1）床版の層状剥離　　（2）床版の陥没に伴うアスファルトの損傷状況

写真－1 床版の損傷状況



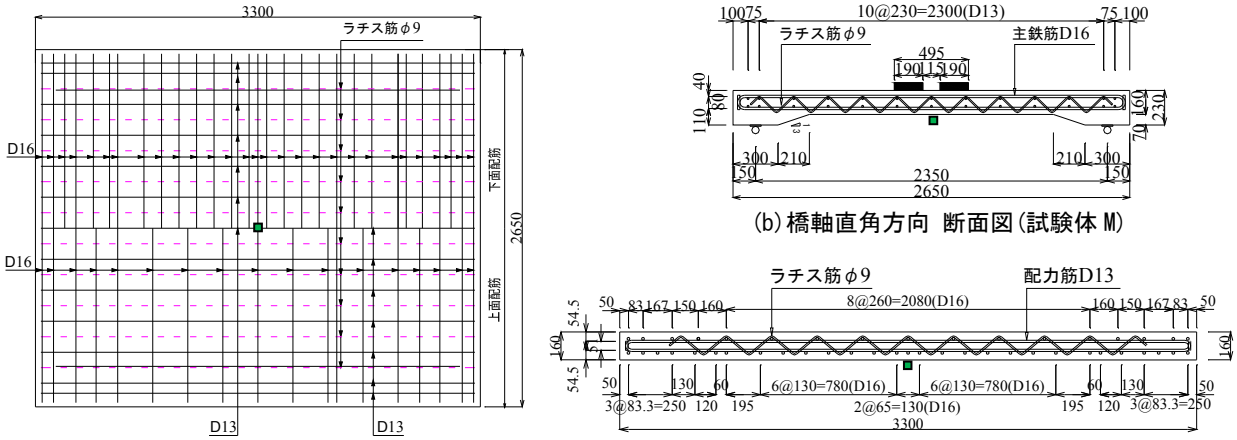
写真－2 トラス鉄筋の構造[3]

2. 試験体の輪荷重走行試験

2.1 試験体概要

図－1 には本試験で用いた試験体の配筋を，**表－1** には試験体に用いたコンクリートの配合を示す。試験体は昭和 31 年の鋼道路橋設計示方書に準拠して製作した。試験体寸法は長さ 3,300mm×幅 2,650mm，床版厚は 160mm とした。**表－2** には試験体の一覧を示す。ここで，ラチス筋を設置していない試験体を N，ラチス筋を主鉄筋方向に設置した試験体を M，配力鉄筋方向に設置した試験体を D としている。主鉄筋には鋼種 SD345 の D16 を使用し，上側 260mm，下側 130mm 間隔とした。配力鉄筋は D13 とし上下共に 130mm 間隔とした。ラチス筋は鋼種 SR235 の φ9 を使用し，折り曲げ位置では曲げ半径 R=15 mm 程度に加工している。ラチス筋は**図－1** の点線

*1 土木研究所寒地土木研究所　寒地基礎技術研究グループ　寒地構造チーム　研究員　(正会員)
*2 土木研究所寒地土木研究所　寒地基礎技術研究グループ　寒地構造チーム　主任研究員　博士（工学）(正会員)
*3 北海道大学大学院工学研究院　北方圏環境政策工学部門　教授　工博　(正会員)
*4 大阪工業大学　八幡工学実験場構造実験センター　客員教授　工博　(正会員)



(a) 平面図(試験体 D)

(b) 橋軸直角方向 断面図(試験体 M)

(c) 橋軸方向 断面図(試験体D)

■試験体中央 変位測定位置

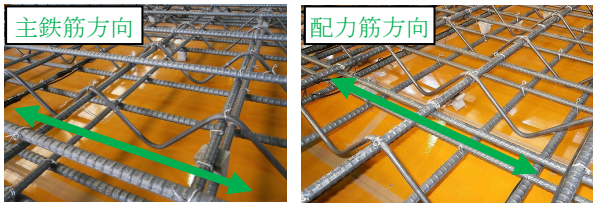
図－1 試験体配筋図(単位:mm)

表－1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg /m³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材 A
20	8	52.1	5	140	269	841	1082	2.69

表－2 試験体名および配筋

試験体名	主鉄筋		配力鉄筋		ラチス筋		
	呼び径	間隔(下側) (mm)	呼び径	間隔 (mm)	呼び径	主鉄筋方向 (10 本) (mm)	配力鉄筋方向 (10 本) (mm)
試験体 N	D16	260 (130)	D13	230	φ9	－	－
試験体 M						260	－
試験体 D						－	230



写真－3 ラチス筋設置状況

表－3 コンクリートの圧縮強度試験結果

試験体	圧縮強度 N/mm²	弾性係数 kN/mm²	ポアソン比
試験体 N	26.5	21.1	0.20
試験体 M	29.0	23.1	0.23
試験体 D	31.9	20.1	0.22

表－4 鉄筋の引張試験結果

種 別	鋼 種	呼名	降伏点	引張強さ	伸び
			N/mm²		%
鉄 筋	SD345	D16	392	563	22.0
		D13	393	545	24.0
ラチス筋	SR235	φ9	361	472	29.9

で示すように，主鉄筋と主鉄筋，配力鉄筋と配力鉄筋の各間隔の中央に設置し，主鉄筋方向へは 260mm 間隔で，配力方向へは 230mm 間隔で設置している。ラチス筋の設置は先に組み立てられた主鉄筋や配力鉄筋の上から落とし込むことから，鉄筋組立時の施工性に影響を与えずに，簡便に追加することが可能である。**写真－3** にはラチス筋の設置状況を示す。**表－3** にはコンクリートの圧縮強度試験結果を，**表－4** には鉄筋の引張試験結果を示す。

2.2 試験方法

写真－4 には，試験に使用する輪荷重走行試験機を示す。輪荷重走行試験は，試験体中央部に鋼製ブロックを敷設した載荷版上 2,000mm の範囲を，幅 500mm の鉄輪で荷重を繰り返し作用させ，試験体が終局するまで往復させる。載荷荷重は初期載荷を 120kN から開始し，その後は走行回数 10 万回毎に 130kN，150kN，170kN，200kN と載荷荷重を増加する漸増載荷プログラムとする。

試験体の支持条件は，走行方向の 2 辺（長辺）を単純支持，走行直角方向の 2 辺は実橋での床版の連続性を再現することを目的に弾性支持としている。

計測項目は試験体の鉛直変位および鉄筋ひずみとし，各荷重段階の走行回数 2 千回，5 千回，1 万回，2 万回，

5 万回，7 万回，10 万回時に輪荷重走行を停止し，静的載荷を実施して計測する。

2.3 輪荷重走行試験における等価走行回数

本実験では漸増荷重載荷としたことから一定荷重に換算した等価走行回数により疲労耐久性を評価する。このときの基準荷重 P はB活荷重 100kN に衝撃係数と安全率を考慮した 150kN とし，S－N 曲線の傾きの逆数 m には松井らが提案する 12.6（1/0.07835）[8] を適用する。

$$Neq = \sum \left(\frac{Pi}{P} \right)^m \cdot ni \qquad (1)$$

ここに，

Neq：等価走行回数（回）

Pi ：荷重（kN）

P ：基本荷重（kN）（ P ＝150 kN とする）

m ：S－N 曲線の傾きの逆数（m = 12.76）

ni ：荷重 Pi の走行回数（回）

3. 試験結果

3.1 等価走行回数と床版中央たわみの変化

表-5 に各試験体の走行回数および等価走行回数を示す。試験体 N，M の走行回数はほとんど変化が無く，また試験体 D の走行回数は試験体 N，D と比較して余り増加していないと見えるが，載荷荷重 200kN（40 万回）以降の走行回数を比較すると，試験体 N が 1,720 回，試験体 M は 1,672 回, 試験体 D は 24,412 回であることから，試験体 D の疲労耐久性は試験体 N, D と比較して 14～15 倍と大幅に向上している。なお，疲労耐久性とは**図－2** でみられる，試験開始から鉛直たわみが急増した時点までを示す。

図-2 には等価走行回数と試験体中央たわみの関係を示す。なお, 変位の計測位置は**図－1** に示す位置である。この図では試験体 D と試験体 N, M との等価走行回数を比較すると等価走行回数比で 2.3 倍に疲労耐久性が延びていることが明らかである。

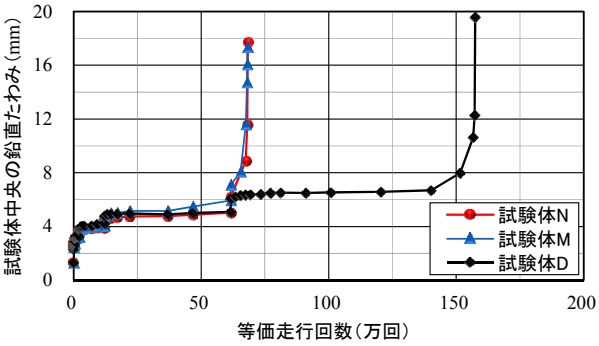
3.2 主鉄筋方向にラチス筋を入れた場合の効果

試験体 M より，ラチス筋を主筋方向へ設置した場合，ラチス筋による疲労耐久性の向上の効果を，今回の実験では明確に示せなかった。これは実験後に切断した断面でのひび割れ図から，次のように説明できる。**図－3** には試験終了後に試験体の中央を橋軸方向，橋軸直角方向に切断したひび割れ図と，ラチス筋位置に発生したひび割れを矢印で示す。試験体 M の橋軸・橋軸直角の断面図では矢印で示すように試験体下面とラチス筋の谷とのかぶり部においてひび割れが発生している。これはラチス筋が配力鉄筋より下側に位置しているため，ラチス筋設置方向（橋軸直角方向）において曲げひび割れが発生しやすくかつ，そのひび割れがラチス筋の面に沿う貫通ひび割れに進展したことが示唆される。これに伴い橋軸直角方向のひび割れ面の劣化が進み試験体の剛性が低下したことが考えられる。

写真－4 輪荷重走行試験機（クランク式）

表－5 試験体の等価走行回数

試験体名	走行回数	200kN 以降の走行回数比	等価走行回数（150kN）	等価走行回数比
試験体 N	401,720	1.0	683,335	1.0
試験体 M	401,672	1.0	681,449	1.0
試験体 D	424,412	14～15	1,574,773	2.3

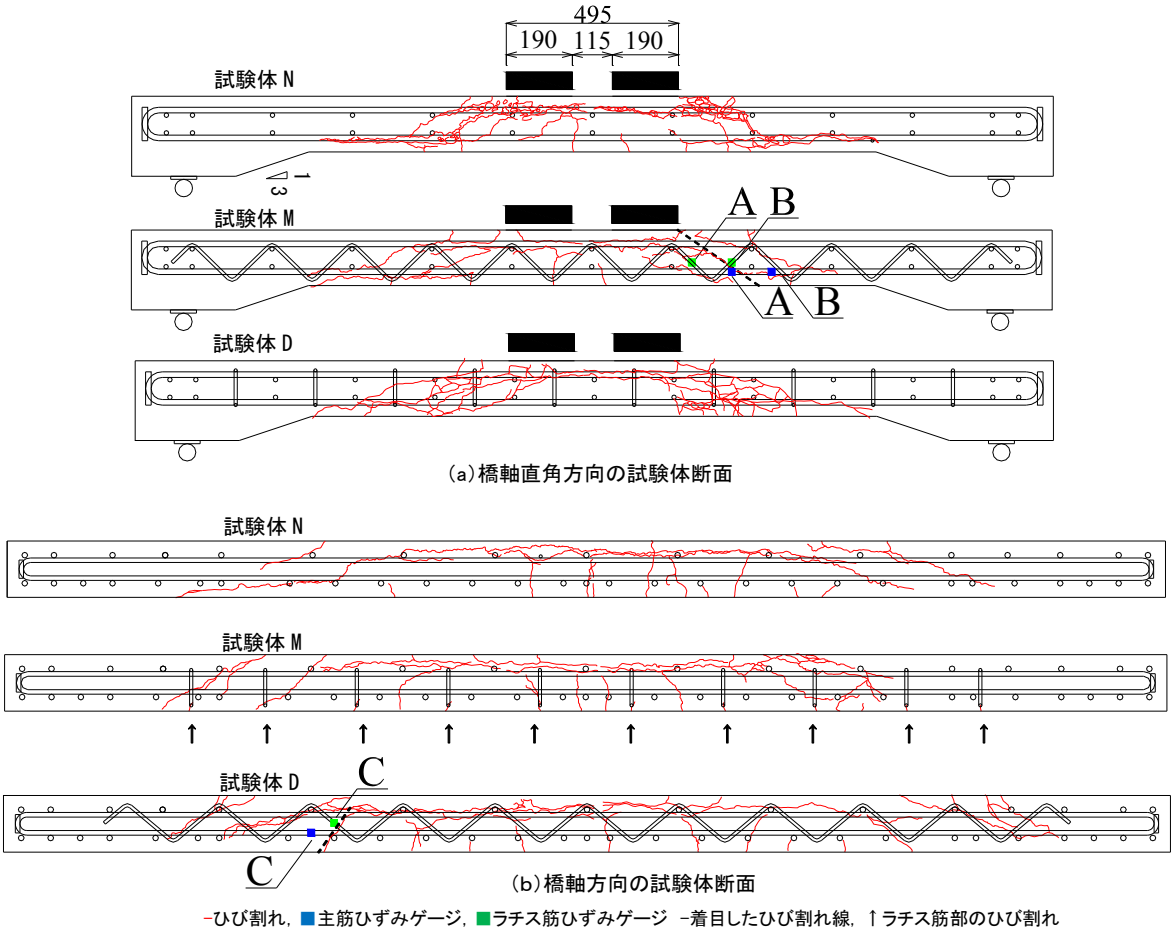


図－2 等価走行回数と床版中央たわみ

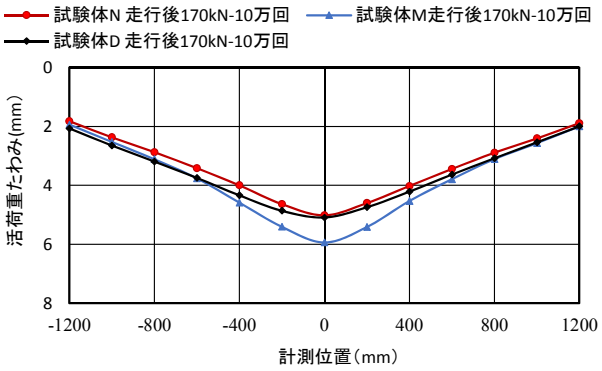
図－4 には橋軸方向，**図－5** には橋軸直角方向の試験体の 170kN 載荷時（走行回数 40 万回後）の活荷重たわみ分布を示す。**図**より，試験体 M のたわみは試験体 N, D と比較して増加していることから，試験体にひび割れが進展し劣化していることを示している。これは先で述べた試験体断面図とラチス筋の谷部のひび割れの発生の関係の推察結果と符号している。以上から，ラチス筋に沿う貫通ひび割れを抑制するためラチス筋を少し上方に設置する必要があることを確認した。

図－6 には試験体中央部の下側主鉄筋ひずみと走行回数との関係を示す。図より試験体 M の下側主鉄筋のひずみは走行開始から試験体 N，D よりも小さく推移している。これはラチス筋が若干効いているためと考えられる。

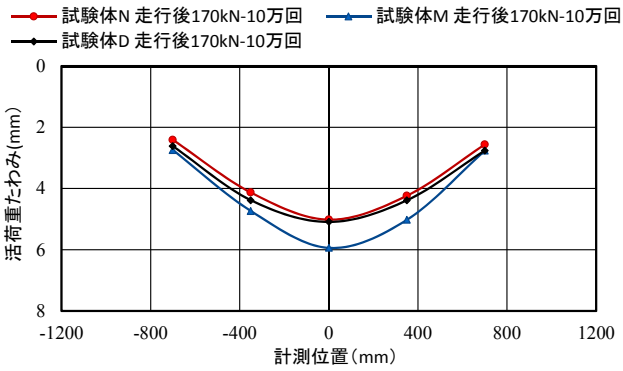
図－7 には試験体 M におけるラチス筋および主鉄筋のひずみの走行回数との関係を示す。走行回数 30 万回以降



図－3 試験体断面のひび割れ図

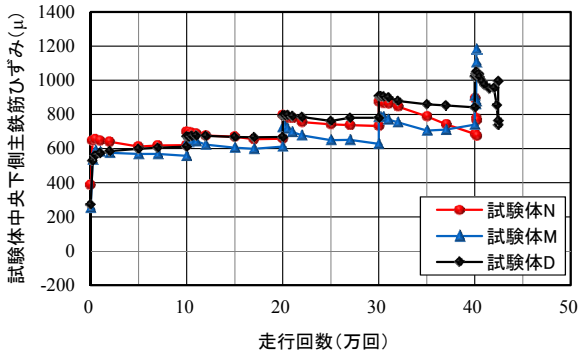


図－4 橋軸方向の変位分布

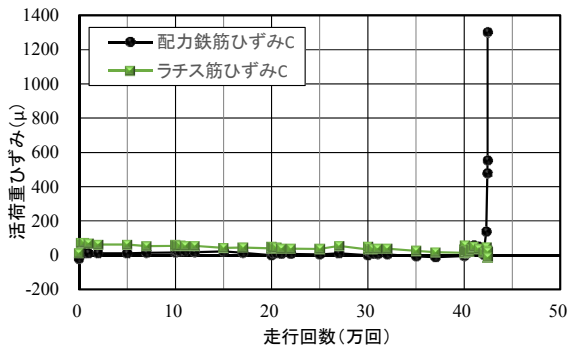


図－5 橋軸直角方向の変位分布

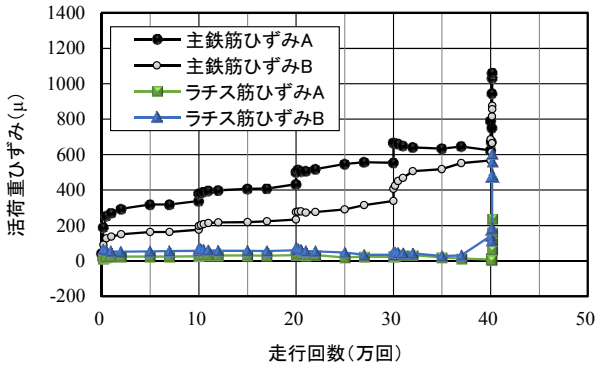
において，主鉄筋ひずみ A は，それまで増加傾向だったひずみが減少傾向に転じ，主鉄筋ひずみ B のひずみは増加割合が大きくなっていることが分かる。また，ラチス筋ひずみ A はそれまで安定した値であったものが低下する傾向を示し，逆にラチス筋ひずみ B は 37 万回以降，急激な増加傾向が見られる。この傾向の要因を以下に推察する。**図－3**(a)には試験体 M のひずみ計測位置と着目したせん断ひび割れを点線で示す。走行回数 30 万回以降主鉄筋ひずみの AB 間を横断する位置にせん断ひび割れが試験体下面から生じ，このひび割れの進展に伴い試験体中央部の近傍に生じていた曲げ変形が解放され，主筋ひずみ A のひずみが減少傾向を示したことが推察される。一方，37 万回以降には，そのひび割れがラチス筋 AB 間を横断するように入り，ラチス筋がスターラップ効果を発現したため，ラチス筋のひずみ B が急激に増加したものと考えられる。このようにラチス筋を横断するような斜めひび割れが発生するとラチス筋は効果を発揮することを確認した。以上のことからラチス筋がせん断補強効果を発現することを確認したが，ラチス筋量が少なく効果が目立たなかったと言える。



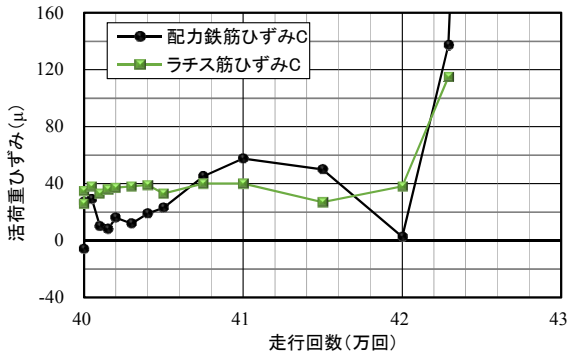
図－6 試験体中央部下側の主鉄筋ひずみと走行回数



(a) 鉄筋ひずみと走行回数



図－7 鉄筋ひずみと走行回数(試験体 M)



(b) 鉄筋ひずみと走行回数の拡大図

図－8 鉄筋ひずみと走行回数(試験体 D)

3.3 配力鉄筋方向にラチス筋を入れた場合の効果

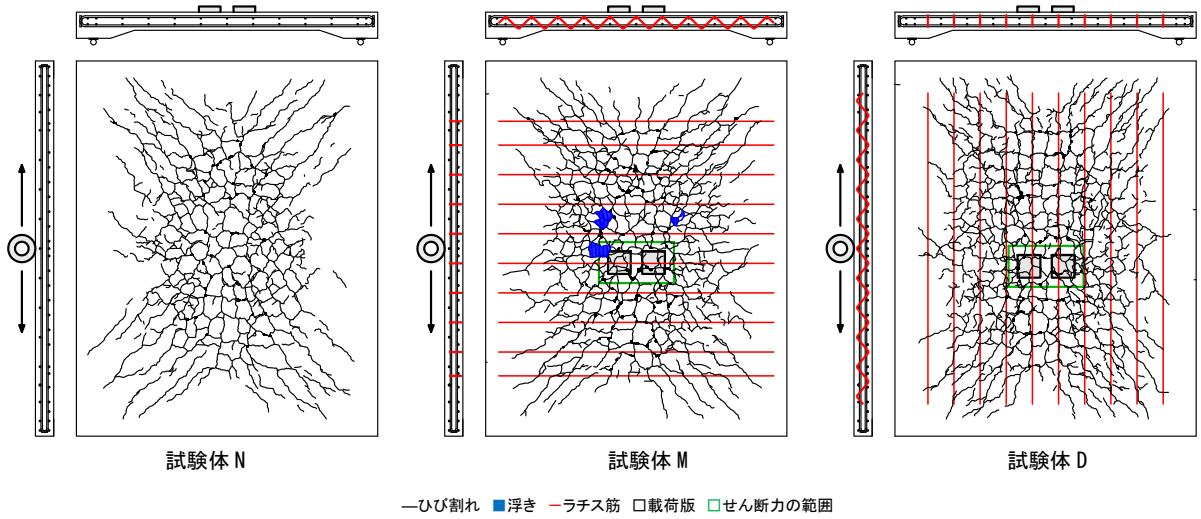
3.1 で述べたように試験体 D からラチス筋を配力筋方向に設置した場合は試験体の疲労耐久性が増加しラチス筋の効果が非常に有効であることが判った。**図－8** には試験体Dにおける鉄筋ひずみと走行回数との関係を示す。なお，走行回数 40 万回以後の挙動に着目するため，**図－8(b)**に 40 万回以降の抜粋を示す。なお，**図－3(b)**にはそのひずみ計測位置と着目したひび割れを点線で示す。

図－8 (a)より，それぞれのひずみは走行回数が 40 万回までは一定の傾向を示し，安定した挙動を示している。しかしながら走行回数が 40 万回以降，その傾向に変化が見られる。配力筋ひずみ C は 40 万回到達後ひずみが減少し，その後は 41 万回まで増加に転じ，41 万回以降は減少している。ラチス筋ひずみ C においては配力筋ひずみ C で見られた 40 万回到達後のひずみの低減はみられず一定の傾向を示し，41.5 万回以降は増加傾向に転じているのが分かる。この増加は試験体下面から発生した曲げひび割れがラチス筋を横断するように直上し，これらのひび割れのせん断挙動に対してラチス筋がスターラップ効果を発揮しているためである。ただし，今回の実験では動的にひずみ計測をしていなかったので明示できないが，**図－8(b)**に示した配力鉄筋とラチス筋のひずみの変化から，ラチス筋はせん断力に対して働いていることが伺える。42 万回以降においてひずみが急増しているのは試験体が最終状態に入ったため，このゲージ部のひび割れが試験体を貫通し，せん断変形が大きくなったと理解できる。

以上のことから配力鉄筋方向においても，鉛直方向のひび割れの発生に伴い配力鉄筋とラチス筋がせん断力を分担した。このような現象がひずみゲージを張っていない部分でも発生し，試験体 D の疲労耐久性が伸びたと考えられる。

3.4 ラチス筋の設置方向の違いによる耐久性の向上の差異

3.1～3 で述べたように試験体 M と試験体 D でラチス筋の効果に差がみられた。この差を明確にするため**図－9** の試験体下面ひび割れ図に，ラチス筋位置と輪荷重のせん断力の作用状況を示す。せん断力の作用範囲は実床版において，押し抜いた破壊性状がみられることから，載荷版端部から試験体下面へ 45 度に作用すると仮定して，せん断力が試験体の厚さの半分に到達した場合の範囲を示す。試験体 M の場合，ある点での輪荷重直下のせん断力の影響範囲にはラチス筋が 1 本しか配置されていないが，試験体 D の場合は少なくとも 2 本以上，4 本程度が作用する形でラチス筋が設置されているため，橋軸方向に作用する輪荷重のせん断力による試験体の曲げ変形をラチス筋 4 本で分担するため，試験体下面の橋軸直角方向に発生する曲げひび割れや，ひび割れの開口を抑



図－9 試験体下面ひび割れ図(170kN_7 万回)

制したことが示唆される。試験体 M の場合，橋軸方向の曲げ変形に抵抗するラチス筋は無く，また橋軸直角方向に作用する輪荷重のせん断力をラチス筋 1 本で分担しているためラチス筋が少なく効果がみられなかったと推察される。

4. まとめ

本検討では床版試験体に波形に加工したラチス筋を用いて，RC 床版のせん断耐力を向上させる方法を提案し，輪荷重走行試験機を行った。その結果，以下の知見が得られた。

(1) ラチス筋のひずみ状況の変化からラチス筋を橋軸方向，または橋軸直角方向に設置した場合，斜めひび割れの発生後に効果を発揮する。しかし，今回の試験体 M では，試験体 D と比較してせん断力の作用範囲にラチス筋の本数が少なかったため効果が少なかったことが推察される。また，ラチス筋の谷の位置が下側配力筋よりも下側に設置したため，ラチス筋に沿って曲げひび割れが入りやすく曲げ剛性の低下をもたらした。

(2) 橋軸方向にラチス筋を設置すると，橋軸直角方向のひび割れの開口を拘束することによって，疲労耐久性を向上させる効果が有ること確認できた。また，200kN の載荷段階で走行回数を比較すると試験体 N の 14 倍以上の疲労耐久性を確認した。

(3) 今回の実験からラチス筋を配置する場合，橋軸方向に設置する方が，効果が大きいことを確認できた。

今後は，ラチス筋の鉄筋量や配置方法などの方法を変化させ，かつ実験途中の計測を動的に行って効果の評価を明確にしたい。

謝辞

本研究は寒地土木研究所と日本カイザー，災害科学研究所と共同で実施したものであり，関係各位に多大なるご協力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。

参考文献

1) 澤松俊寿，岡田慎哉，山崎達也：一般国道 275 号志寸川橋の床板陥没について，第 56 回北海道開発技術研究発表会，2012

2) 松井繁之，川本安彦，梨和甫：トラス鉄筋によりせん断補強した RC 床版の疲労耐久性，土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集，pp.682-683，1994

3) 建設省土木研究所：道路橋床版の輪荷重走行試験に関する研究共同研究報告書(その 2)，pp.198-218，1999

4) 浜田純夫，兼行啓治，半田剛也，米田俊一：トラス型ジベル付合成床版の耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.2，pp.59-64，1990

5) 阿部幸夫，井澤衛，中川敏之：トラス鉄筋により補強された型枠鋼板付合成床版の疲労特性，第 4 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，1999

6) 河西龍彦，村田茂，中島義信，竹田憲史：トラス鉄筋付 PCF 版合成床版（ハーフプレハブ合成床版）の開発，土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集，pp.564-565，2000

7) 伊藤康幸，池田博之，筒井孝幸，肥沼年光，堀川都志雄，松井繁之：ハーフプレキャスト合成床版の設計・施工，橋梁と基礎，vol38，pp21-27，建設図書，2004

8) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版株式会社，2007