

(15) トラス鉄筋により補強された型枠鋼板付き合成床版の疲労特性

Fatigue strength behaviour of prefabricated composite-slab with steel form plate stiffened by bar-trusses

阿部幸夫*, 井澤衛**, 中川敏之***

Yukio Abe, Mamoru Izawa, Toshiyuki Nakagawa

*工修 住友金属工業㈱ 建設技術部 (〒314-0255 茨城県鹿島郡波崎町砂山 16-1)

**工修 住友金属工業㈱ 土木・橋梁技術部 (〒100-8113 東京都千代田区大手町 1-1-3)

***住友金属工業㈱ 土木・橋梁技術部 (〒100-8113 東京都千代田区大手町 1-1-3)

Recently, some damages on reinforced concrete slabs in steel bridges have occurred due to increase of heavy traffic. So, the authors proposed a high durable composite-slab with steel form plate stiffened by bar-trusses. To investigate the fatigue strength behaviour of this composite-slab, two types of wheel trucking tests using real-size model were carried out. As the results of the tests, the composite-slab was strong enough to bear the wheel load of the magnitude 157kN to 392kN and the number of cycles 520×10^3 , and did not have remarkable deficiency under the moist environment. It was confirmed that the proposed composite-slab was applicable to practical use.

Key Words: composite-slab, bar-truss, wheel trucking test

1. はじめに

従来、鋼道路橋の床版には、経済性に優れ、比較的施工が容易である鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版と呼ぶ）が用いられてきた。

しかしながら、近年の重交通による疲労損傷により、打ち替えや補修工事が多く実施され、その際に生じる交通規制やメンテナンス費用の増大等が社会的に大きな損失をもたらしている。このため、疲労損傷が生じにくい床版の開発が求められている。

また、都市部の高架橋や跨線・跨道橋などでは、床版施工用の足場や型枠支保工を設置するスペースが確保できない場合が多く、これら施工上の課題を解決できる床版の開発も要求されている。

著者らは、これらの要求を満足する床版として、トラス鉄筋により補強された型枠鋼板付きの合成床版（以下、TRC床版と呼ぶ）を提案している¹⁾。本床版の特徴は以下の通りである。

- ① トラス鉄筋のせん断補強効果により、高い疲労耐久性が得られる。
- ② 床版厚を小さくすることができ、死荷重の低減が図れる。
- ③ 床版施工用の足場や型枠支保工が不要であり、工期の短縮および施工時の安全性に優れる。

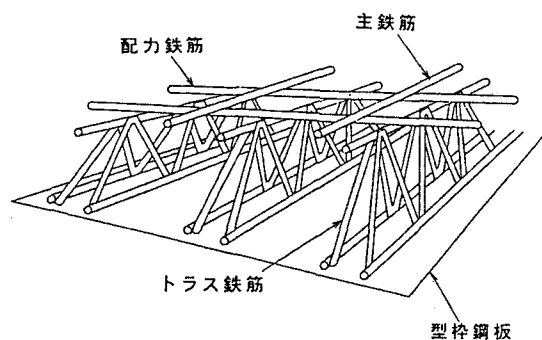
本論文では、第一の実験として、TRC床版とRC床版ならびにパーシャルプレストレスを導入したRC床版（以下、PRC床版と呼ぶ）に対し、同一条件で最大392kNに及ぶ階段状荷重漸増方式による輪荷重走行実験を行い、これらを比較することによりTRC床版の疲労耐久性を検証した。また、第二の実験として、湿潤状況下での疲労特性を調査する輪荷重走行実験を行い、TRC床版の供用時疲労耐久性を検証したので報告する。

なお、第一の実験は、建設省土木研究所、(財)土木研究センター、民間企業17社15グループによる「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」の一環として実施したものである。また、第二の実験¹⁾は大阪大学との共同研究により実施したものである。

2. TRC床版の概要

TRC床版の概念図を図-1に示す。本床版は、主鉄筋方向（橋軸直角方向）に配置するトラス鉄筋を工場溶接によって型枠鋼板に取付け、現地敷設後に主鉄筋および配力鉄筋をトラス鉄筋上に配置し、コンクリートを打設する半プレファブ型の合成床版である。

トラス鉄筋は、専用機械により製作されており、従来の合成床版に用いられている鋼板加工形式のトラス型ジ



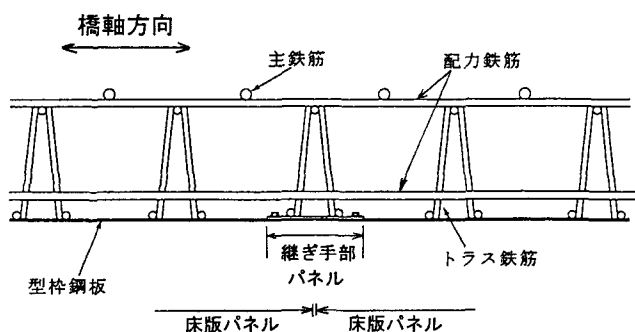
図－１ TRC床版概念図

ベルに比べて材料および製作性の面でコスト的に有利であると考えられる。また、トラス鉄筋は、主鉄筋と配力鉄筋を配置する際、スペーサとして代用できるので作業の省力化に有効である。

一方、型枠鋼板は、防錆処理として溶融亜鉛メッキを標準とし、橋梁本体と同等以上の防食性を確保している。また、型枠鋼板を設計上の強度部材とし、床版本体下側の主鉄筋および配力鉄筋を省略している。

床版パネルの基本サイズの幅は、輸送面から 2.25m とし、長さは橋梁総幅員である。現地でのパネル間の連結方法は、図－２に示す通り、トラス鉄筋を有する継ぎ手部パネルを床版のパネル間に設置し、そこに継ぎ手部配力鉄筋を上下に配置する形式を採用している。

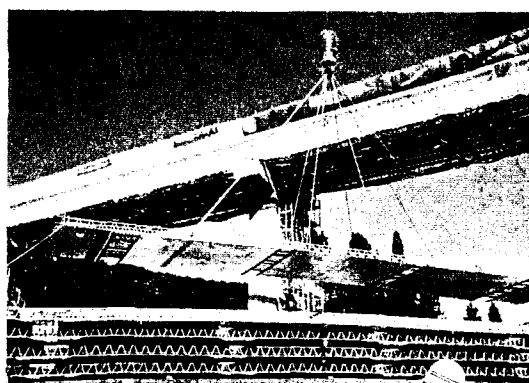
以上のことから、本床版は、配筋および型枠施工の省力化が可能であり、また、橋梁上部工本体が耐候性仕様もしくは工場全塗装の場合には、足場支保工の省略も可能となる。これより、橋梁上部工全体の工期短縮ならびにコスト削減に寄与できるものと考えられる。



図－２ パネル間継ぎ手構造

また、施工実績も数橋あり、その適用例として、日本道路公団山形自動車道岩根沢橋²⁾（橋長 201m × 全幅員 11.4m）での TRC 床版の架設状況を写真－１に示す。

本橋においては、パネル架設を 15 パネル／１日のペースで行い、全 89 パネルの架設を延べ 6 日間で行った。パネル架設から配筋、コンクリート打設までの現場工期は約 1 ヶ月であり、同規模を RC 床版で施工した場合に比べて 1/2 程度の工期で済むものと思われる。



写真－１ 鋼製型枠パネルの架設状況

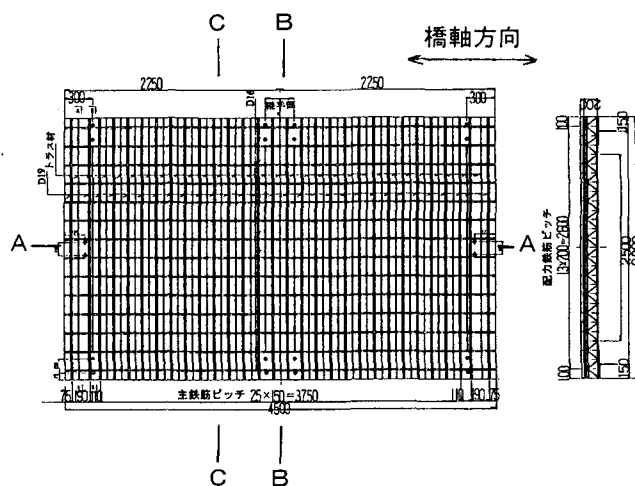
3. 実験内容

3.1 階段状漸増载荷による輪荷重走行実験

3.1.1 供試体

供試体は、実大スケールとし、荷重条件を B 活荷重³⁾とする床版支間 3.0m の連続版で設計した⁴⁾。供試体の形状寸法は、図－３に示すように、主鉄筋方向となる橋軸直角方向 2.8m、配力鉄筋方向となる橋軸方向 4.5m、コンクリート版厚 200mm、型枠鋼板厚 6mm である。鉄筋のピッチは、主鉄筋 D19 を 150mm、配力鉄筋 D16 を 200mm、トラス鉄筋を 150mm とし、主鉄筋および配力鉄筋とも床版の上側にのみ配筋した。また、供試体中央にはパネル間継ぎ手を設けた（継ぎ手部のみ配力鉄筋を上下配置）。

使用した鉄筋は SD295A 材、型枠鋼板は SS400 材である。また、コンクリートの設計基準強度を 30N/mm²とした。材料試験の結果、実験時のコンクリートの圧縮強度は 37N/mm²であった。



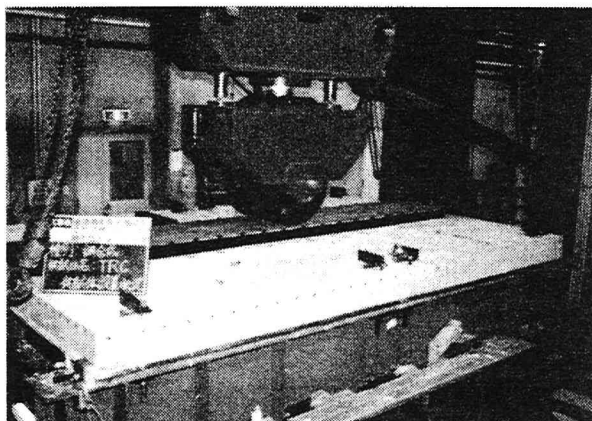
図－３ 供試体（階段状漸増载荷）

3.1.2 载荷方法

試験装置には、建設省土木研究所所有の輪荷重走行試験機⁴⁾を用いた。供試体の支持条件は、支間 2.5m の単純支持とした。これにより、供試体の設計条件である

床版支間 3.0m の連続版に生じる支間中央の曲げモーメントと等価な曲げ力を供試体に与えられる。また、供試体上面の支間中央部橋軸方向に 500 × 200mm の載荷ブロックを並べた。輪荷重は、このブロック上を幅 500mm の鉄輪が ± 1.5m の範囲で移動する方式で導入させた。載荷状況を写真－2 に示す。

載荷は、階段状荷重漸増方式とし、初期荷重 157kN から 4 万回走行毎に 20kN ずつ荷重を増加させ、供試体が破壊に至るまでもしくは載荷荷重が 392kN に達するまで実施した⁴⁾。



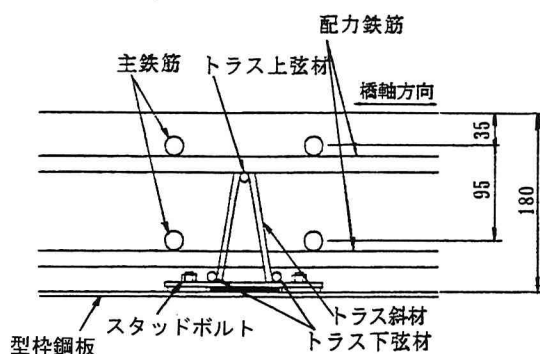
写真－2 移動輪荷重載荷状況（階段状漸増載荷）

3.2 水張り状況下での輪荷重走行実験

3.2.1 供試体

供試体は、実大スケールとし、荷重条件を B 活荷重³⁾とする床版支間 2.2m の連続版で設計した。なお、本実験は、湿潤状況下の影響を調査するため、同一試験機を用いた乾燥状況下の既往実験⁵⁾と同じ形状の供試体を採用した。既往実験では、型枠鋼板を強度部材とせず上下に主鉄筋および配力鉄筋を配置していたので、これに準じて、同様に上下に配筋することとした。

供試体の形状寸法は、主鉄筋方向となる橋軸直角方向 2.5m、配力鉄筋方向となる橋軸方向 3.0m、コンクリート版厚 180mm、型枠鋼板厚 4.5mm である。鉄筋のピッチは、主鉄筋 D19 を上下とも 150mm、配力鉄筋 D16 を上 200mm、下 100mm、トラス鉄筋を 150mm とした。また、供試体中央にはパネル間継ぎ手を設けた。鉄筋の上下方向の配置位置および継ぎ手構造を図－4 に示す。



図－4 パネル間継ぎ手部詳細（水張り載荷）

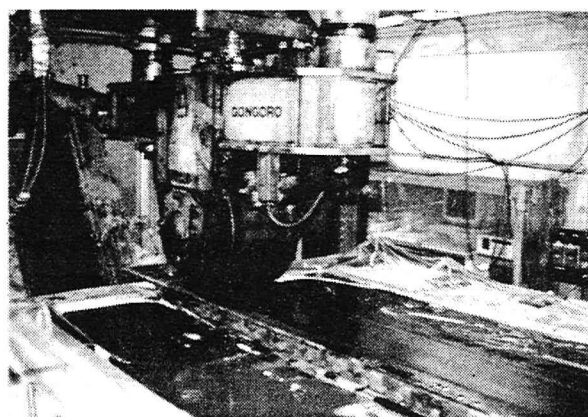
使用した鉄筋は SD295A 材、型枠鋼板は SS400 材である。また、コンクリートの設計基準強度を 30N/mm² とした。材料試験の結果、水張り実験時のコンクリートの圧縮強度は 37N/mm²、既往の乾燥状況下での実験時のコンクリートの圧縮強度は 33N/mm² であった。

3.2.2 載荷方法

試験装置には、大阪大学所有の輪荷重走行試験機⁶⁾を用いた。供試体は、床版支間 2.2m の主桁上にボルトで固定し、供試体上面の支間中央部橋軸方向に 300 × 120mm の載荷ブロックを設置した。輪荷重は、このブロック上を幅 300mm の鉄輪が ± 1.0m の範囲で移動する方法により導入させた。

載荷は、促進実験の観点により、T25 自動車荷重³⁾の衝撃込み後輪 1 輪荷重の 1.3 倍に相当する輪荷重 177kN で 60 万回載荷し、疲労損傷が生じない場合には、さらに輪荷重を 206kN に増加させて載荷を継続することとした。

水張りの方法は、移動輪荷重の載荷範囲を囲むように堰堤を作り、その中に深さ 10mm 程度の茶褐色の水を張り、床版にひび割れが生じた場合には水が常時浸透するよう適宜給水した。載荷状況を写真－3 に示す。



写真－3 移動輪荷重載荷状況（水張り載荷）

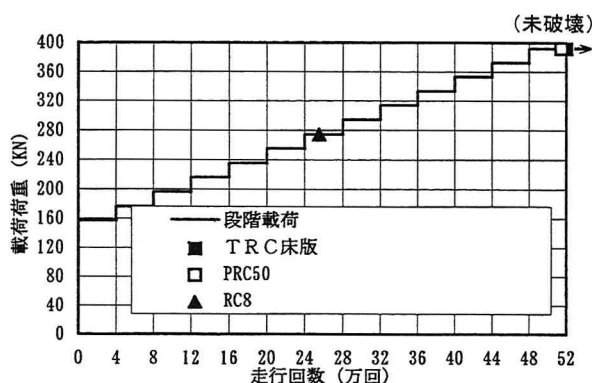
4. 実験結果

4.1 階段状漸増載荷による輪荷重走行実験

4.1.1 載荷荷重と走行回数との関係

階段状荷重漸増方式を適用した載荷荷重と走行回数との関係を図－5 に示す。なお、図中の RC8 供試体⁴⁾とは、平成 8 年の道路橋示方書³⁾に準じて製作された現行の R C 床版（床版厚 250mm、コンクリート強度 27N/mm²）であり、PRC50 供試体⁴⁾とは、同道示にてフルプレストレスで設計された PC 鋼材量に対し 50 % 減じた P R C 床版（床版厚 230mm、コンクリート強度 57N/mm²）である。

T R C 床版供試体と PRC50 供試体の結果は、共に最終荷重値 392kN かつ最終走行回数 52 万回に至っても疲



図－５ 載荷荷重と走行回数との関係

劣破壊しなかった。これに対し RC8 供試体は、荷重値 274kN かつ走行回数 25.6 万回で押し抜きせん断破壊が生じた。この結果から、TRC床版は現行のRC床版に比べて高い疲労耐久性を有するといえる。

4. 1. 2 供試体中央たわみと走行回数との関係

供試体中央たわみと走行回数との関係を図－6に示す。なお、図中の載荷時のたわみとは所定回数での静的載荷による床版鉛直たわみであり、除荷時のそれとは静的載荷後の除荷状態での残留たわみである。

TRC床版供試体のたわみは、最終荷重値 392kN かつ最終走行回数 52 万回に至るまで急激な増加現象は見られず、最終たわみ値は載荷時で 2.5mm、除荷時で 0.5mm であった。この値は、PRC50 供試体の最終載荷時たわみ 6.2mm の約 40 %、最終除荷時たわみ 2.7mm の約 20 % と小さな値である。この結果から判断すると、TRC床版は、PRC床版に比べて同等以上の疲労耐久性を有するものと考えられる。

4. 1. 3 継ぎ手目開き量と走行回数との関係

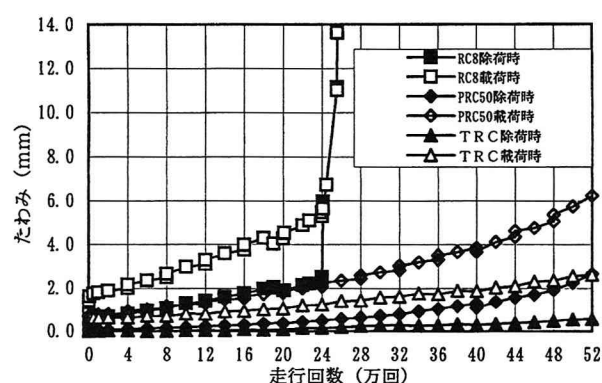
供試体中央の継ぎ手目開き量の静的測定結果と走行回数との関係を図－7に示す。

載荷時の継ぎ手目開き量は安定的に推移しており、最終荷重段階においても 0.3mm 程度の小さな値であった。また、除荷時の目開き量は載荷開始から終了までほとんど生じていない。この結果から、継ぎ手部が疲労耐久性上の弱点にならないことが明らかとなった。

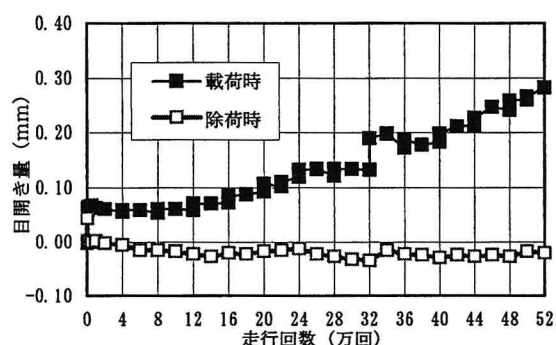
4. 1. 4 型枠鋼板ひずみと走行回数との関係

供試体中央の型枠鋼板下面の橋軸直角方向ひずみの静的測定結果と走行回数との関係を図－8に示す。

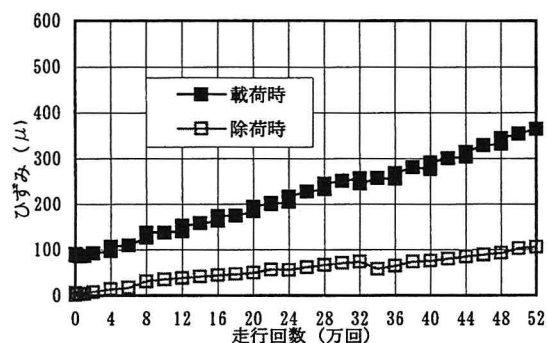
載荷時のひずみは、載荷開始から終了まで荷重の増加とともに階段状に増加しており、疲労損傷によるひずみの急増や乱れは認められない。また、最終荷重値 392kN かつ最終走行回数 52 万回時点での載荷時ひずみは 360 μ 程度であった。



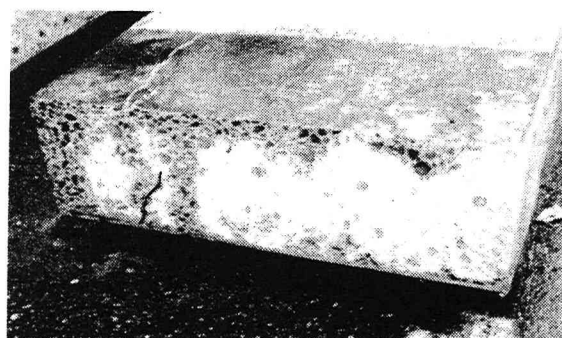
図－6 供試体中央たわみと走行回数との関係



図－7 継ぎ手目開き量と走行回数との関係



図－8 型枠鋼板ひずみと走行回数との関係



写真－4 切断面 A－A の状況

4. 1. 5 実験後供試体の損傷状況

実験終了後の供試体内部の状況を調査するために、図－3に示す切断線 A－A、B－B、C－Cに沿って供試体を切断した。このうち A－A 断面の供試体中央付近のひび割れ状況を写真－4に示す。なお、写真中のひび

割れには着色を施している。切断面を観察すると、ひび割れはほとんど発生しておらず、コンクリートが健全な状態であることが確認できる。また、切断した供試体に対し、パネル間継ぎ手部を含む範囲でコンクリートを除去した。その状況を写真－５に示す。トラス鉄筋と型枠鋼板との溶接部ならびにトラス鉄筋を構成する鉄筋同士の溶接部にも疲労損傷は認められなかった。

以上の結果から、TRC床版供試体は、今回の輪荷重走行実験において疲労損傷は認められず健全な状態を保持していた。なお、破壊形態については上述の理由により明らかにできなかった。

4.2 水張り状況下での輪荷重走行実験

4.2.1 供試体中央たわみと走行回数との関係

供試体中央の静的載荷時たわみと走行回数との関係を図－９に示す。177kNにて60万回載荷させたが疲労損傷がほとんど生じなかったため、その後206kNに荷重を増加させて載荷した。なお、図－９には同一形状供試体を用い乾燥状況下で177kNを100万回載荷させたが破壊しなかった既往実験結果⁵⁾も併記した。

結果は、206kNに荷重増加後、16万回繰返し時点で供試体中央付近の載荷軌道直下のかぶりコンクリートが橋軸直角方向300mm×橋軸方向150mmの範囲で上側主鉄筋位置の深さ30mmまで骨材化した。このため、試験機保護により実験を終了した。乾燥状況下の既往実験と比較すると、T25後輪荷重³⁾の1.3倍に相当する177kNの60万回の載荷において、両者に有意な差は生じておらず、この載荷程度では水による疲労劣化への影響は見られなかった。

4.2.2 供試体各部のひずみと走行回数との関係

供試体中央の載荷位置直下となる上下主鉄筋および型枠鋼板の静的載荷時ひずみと走行回数との関係を図－10に示す。図中において、破線で示した解析値は、床版本体の剛性を曲げ引張側のコンクリートも強度部材とする全断面有効モデルとし、主桁位置で固定支持したFEM解析により算出したものである。

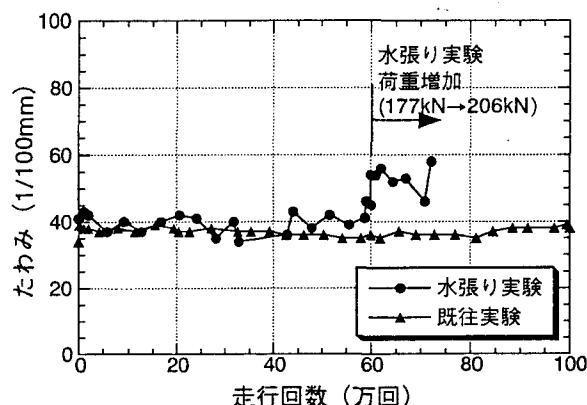
結果は、各部の発生ひずみに輪荷重走行による増加傾向は見られず、その値も全断面有効とする解析値と一致していた。これより、各部のひずみには平面保持の仮定が成立しており、型枠鋼板も一体となって合成挙動を示していることが判る。また、この状態は載荷終了時まで保持されており、今回の水張り条件での移動輪載荷実験において、一部骨材化した部分があるものの、疲労破壊の兆候は認められない。

4.2.3 実験後供試体の損傷状況

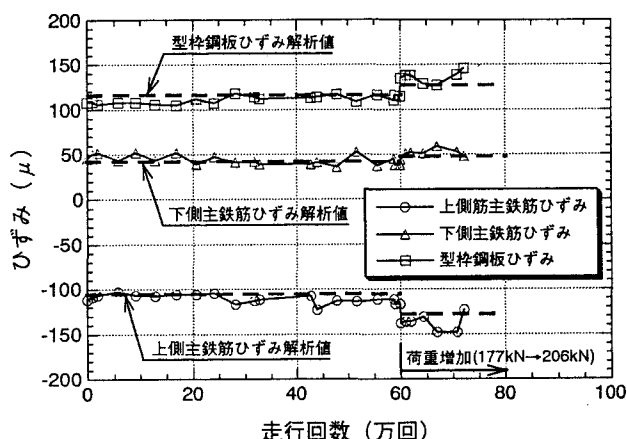
実験終了後、供試体中央部の骨材化した部分を切断した状況を写真－６に示す。なお、写真中のひび割れには着色を施している。骨材化した部分の下のコンクリー



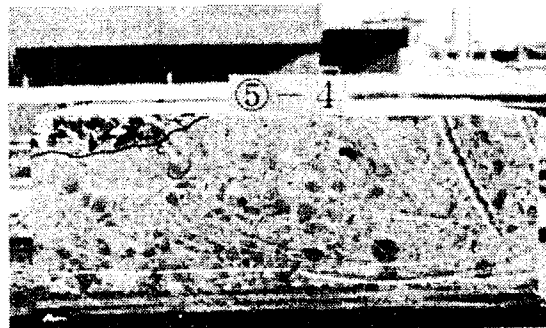
写真－５ 切断後のコンクリート除去状況



図－９ 供試体中央たわみと走行回数との関係



図－10 供試体各部のひずみと走行回数との関係



写真－６ 骨材化した部分の切断面の状況

トにはひび割れが生じておらず健全であった。これより、局部的に骨材化した部分があるものの、それ以外の部分に疲労損傷は生じていないことが判った。

4.2.4 疲労耐久性に関する考察

供用時を想定した今回の水張り実験の結果から、床版上面のコンクリートが骨材化するまでの載荷過程が明らかになった。この骨材化は舗装面にくぼみを形成させる可能性があるため、この時点を最初の補修時期と考え、実橋に適用した際の補修を必要としない寿命を評価できればよいと考えられる。しかし、今回実施した1体のデータから推定するのは無理であり、また、実橋ではランダムな輪荷重がランダムな位置を走行する場合の確率密度が対象橋梁により異なるため、一般的な寿命を予測することは困難である。

そこで、本実験に用いた大阪大学所有の輪荷重走行試験機において、過去に昭和48年の道路橋示方書⁷⁾で設計されたRC床版の乾燥状態と湿潤状態（水張り）の実験も行われていることから、この既往実験結果⁸⁾と今回のTRC床版の実験結果とを比較して疲労耐久性の考察を試みた。比較するに当たり各実験での載荷荷重が異なるため、床版疲労に関してマイナーの線形被害則が成立すると仮定し(1)式により補正⁹⁾を行った。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m \cdot n_i \quad \cdots (1)$$

N_{eq} : 等価載荷回数

P_i : 載荷輪荷重

P_0 : 基本輪荷重 (177kN とした)

m : 両対数表示の S-N 曲線の傾きの絶対値

n_i : 載荷輪荷重の繰返し回数

ここで、(1)式の m の値に関しては、RC床版の押抜きせん断破壊の場合、11～13との研究結果⁹⁾があり、今回のRC床版については $m=12$ で補正した。また、TRC床版の場合には移動輪による破壊形態が明らかにされていないため、 m の値を鋼部材の破壊により終局となる $m=3$ ⁹⁾と、RC床版と同様にコンクリートの押抜きせん断破壊により終局となる $m=12$ の2ケースを仮定して補正した。各実験の等価載荷回数を表-1にまとめる。

この結果から、供用時を想定した湿潤状態でのRC床版は、基本輪荷重177kNの等価載荷回数1～7万回載荷で押抜きせん断破壊したのに対して、TRC床版は同基本輪荷重の等価載荷回数85万回($m=3$)～159万回($m=12$)載荷でも床版の一部表面骨材化に留まっていた。

表-1 各実験での等価載荷回数と供試体最終状況

実 験 内 容	床 版 厚	支 間	載 荷 回 数	177kN等価 載荷回数	最 終 状 況	
乾 燥	RC	180mm	1.8m	177kN × 86 万回	86 万回	破壊
	TRC	180mm	2.2m	177kN × 100 万回	100 万回	損傷無し
湿 潤	RC	180mm	1.8m	137kN × 21 万回	1 万回	破壊
	RC	180mm	1.8m	167kN × 15 万回	7 万回	破壊
	TRC	180mm	2.2m	177kN × 60 万回 +206kN × 16 万回	m3 : 85 万回 m12:159 万回	一部表面 骨材化

5. おわりに

トラス鉄筋により補強された型枠鋼板付き合成床版（TRC床版）は、階段状荷重漸増方式を用いた輪荷重走行実験において、載荷荷重392kNかつ走行回数52万回に至るまで、床版のたわみや各部のひずみに疲労損傷につながる増加現象は認められず安定的に推移していた。また、本床版は、同様の載荷を行った現行のRC床版と比べて高い疲労耐久性を示し、PRC床版と比べても同等以上の疲労耐久性を示した。

また、湿潤状況下の輪荷重走行実験において、載荷軌道直下に一部骨材化現象が生じたが、これに至るまでの寿命はRC床版が押抜きせん断破壊する寿命に比べて極めて長いことが推定された。

以上の結果、RC床版およびPRC床版とTRC床版の輪荷重走行実験から、TRC床版が供用時において十分な疲労耐久性を有することが明らかとなった。

謝辞：本研究において、階段状漸増載荷による輪荷重走行実験に関しご指導を賜りました建設省土木研究所、(財)土木研究センターおよび「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」に携わる関係者の皆様、ならびに、水張り状況下での輪荷重走行実験に関しご指導を賜りました大阪大学大学院 松井繁之教授、実験にご協力いただきました同大学院 池田良介氏（現、日本構造橋梁研究所）に感謝致します。

参考文献

- 1) 中川、阿部、井澤、松井：トラス鉄筋により補強された型枠鋼板付き合成床版の疲労強度特性、第一回鋼橋床版シボジウム講演論文集、pp.219-224, 1998.
- 2) 鈴木、八重樫、中川、井澤、阿部：トラス鉄筋に補強された型枠付きRC床版（TRC床版）岩根沢橋における施工報告、土木学会第53回年次学術講演会、CS-45, pp.88-89, 1998
- 3) 道路橋示方書・同解説、日本道路協会、1996
- 4) 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）、建設省土木研究所、共同研究報告書 第221号、1999
- 5) 松井ほか：トラス鉄筋により補強された型枠付きRC床版の移動輪荷重に対する疲労強度特性、土木学会第52回年次学術講演会、I-A173, pp.344-345, 1997
- 6) 松井：合成桁橋の復権と合成構造の開発と研究、鋼構造論文集、第1巻第2号、pp.1-9, 1994
- 7) 道路橋示方書・同解説、日本道路協会、1973
- 8) 道路橋RC床版のひび割れ損傷と耐久性、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報告書、1991
- 9) 鋼構造物の疲労設計指針・同解説、日本鋼構造協会、1993