

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

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

中川敏之*、阿部幸夫**、井澤衛***、松井繁之****

Toshiyuki NAKAGAWA and Yukio ABE and Mamoru IZAWA and Shigeyuki MATUI

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

** 工修 住友金属工業（株）土木技術研究室（〒314-0255茨城県鹿島郡波崎町砂山16）

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

**** 工博 大阪大学工学部（〒565大阪府吹田市山田丘2-1）

Recently RC-Slab is damaged under heavy traffic loads and often repaired. So, it is necessary to develop high durability slab for fatigue loads. In this paper, it is proposed that composite slab with steel form plate stiffened by bar-truss which satisfy this need. This slab is confirmed to have high durability by dynamic wheel loading test, and in this paper it is reported about the result under wet situation by dynamic wheel loading test. Farther more, it is also reported about the result of fatigue durability test to composite-slab, which is more suitable for simple bridge with small number of main girder, which steel form plate is considered to be structural material.

Key Words: truss-bar, composite-slab, prefabricated-slab, steel form, dynamic-loading-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床版と略す）が用いられてきた。

しかしながら近年、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要求されている。

本研究ではこれら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合成床版（TRC床版）を提案する。本床版の主な特徴を以下に示す。

- ①トラス鉄筋のせん断補強効果により疲労耐久性が向上する。
- ②床版用の足場・型枠支保工が不要で工期の短縮が図れる。
- ③床版厚を小さくすることができ、死荷重の低減が図れる。

既に本床版については、型枠鋼板付きRC床版としての移動輪載荷実験¹⁾等を行い問題のないことを確認している。

本論文においては床版の疲労耐久性を評価するための一つの条件である湿潤状況下（水張り状況下）での供用時疲労耐久性の確認と、少数主桁橋への対応（長支間対応）およびコスト低減を目的として、下側主鉄筋および

下側配力鉄筋を削除し型枠鋼板を活荷重に対する設計部材とした合成断面の疲労耐久性を確認するために実施した移動輪繰り返し載荷実験の結果について報告する。

2. TRC床版の概要

TRC床版は、型枠鋼板に工場溶接によってトラス鉄筋を主鉄筋方向に取付け、現地架設後に主鉄筋及び配力鉄筋を配筋するプレハブ床版である。本床版の構成部材であるトラス鉄筋は、機械製造により製作されている点の特徴であり、従来の合成床版に用いられているトラス型ジベルに比べて材料及び製作性からコスト的に有利で

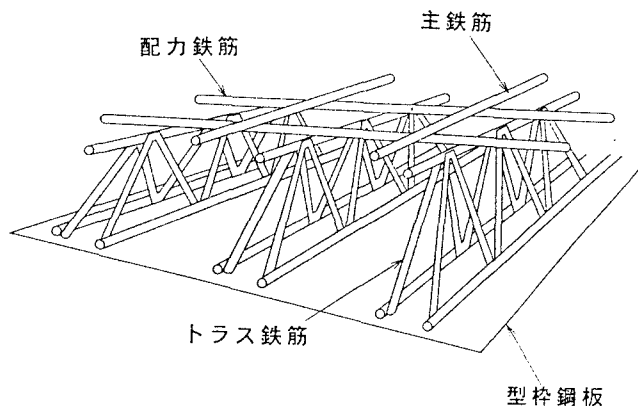


図1 TRC床版概念図

あると考えられる。また、主鉄筋と配力鉄筋は、現場で直線材のまま無加工で配筋され、さらにその際、トラス鉄筋をスペーサとして代用することにより作業の省力化が図れる。一方、型枠鋼板については、防錆処理に溶融亜鉛メッキを考慮しており、橋梁本体と同等以上の防食性を確保する。また型枠鋼板は主部材として設計するため標準板厚を $t = 6.0$ mm以上としている。床版1パネルの大きさは、輸送上の制約に配慮して幅 2.25 m × 橋梁総幅員を基本サイズとする。

現地での作業は、工場にてトラス鉄筋を型枠鋼板に溶接したパネルを主桁上に敷設した後、このパネル間に継ぎ手部パネルを取り付け、そこに継ぎ手部下側配力鉄筋を配筋後、上側主鉄筋および上側配力鉄筋の配筋を行う。その後コンクリートを打設し完成する。

以上のことから、本床版は、配筋の省力化が可能であり、また施工時においても橋梁本体が耐候性裸仕様もしくは工場全塗装の場合は、足場支保工の省略が可能となることから、上部工全体工程の短縮およびコスト削減に寄与できる工法と考えられる。

数橋ではあるが、既に施工実績²⁾³⁾もありその代表的な適用例として、日本道路公団山形自動車道岩根沢橋での施工例³⁾を図2、図3に示す。

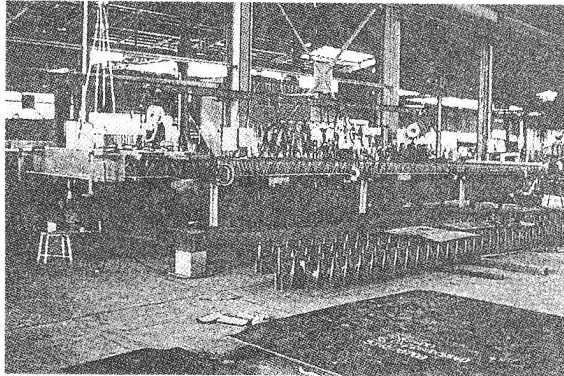


図2 鋼製型枠パネル製作状況

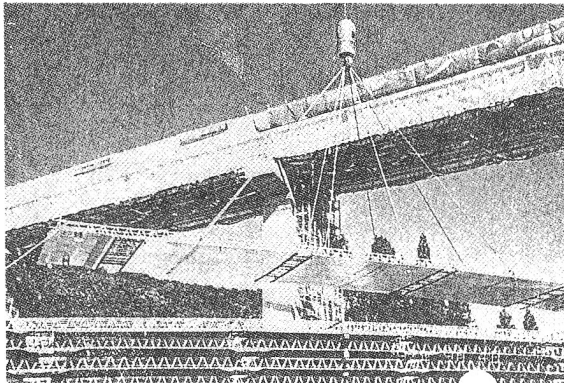


図3 鋼製型枠パネル架設状況

3. 実験内容

3.1 水張り輪荷重走行実験

3.1.1 目的

輪荷重走行試験機を用いた水張り実験により、トラス鉄筋により補強された型枠鋼板付きRC床版の湿潤状況での疲労耐久性を確認することを目的とする。

3.1.2 供試体

供試体は、床版支間 2.2 mの死・活荷重により生じる設計曲げモーメントに対して、型枠鋼板を無視し、主・配力鉄筋及びコンクリートのみで抵抗するとして上下に主・配力鉄筋を配置した。形状に関しては型枠鋼板が不連続となるパネル間継ぎ手部を供試体中央に設けた。供試体の断面図を図4に、供試体の継ぎ手部形状を図5示す。なお、本実験においては雨水が疲労耐久性に及ぼす影響を抽出する目的から、供試体形状は以前実施した乾燥状況下の実験供試体¹⁾と同一とした。

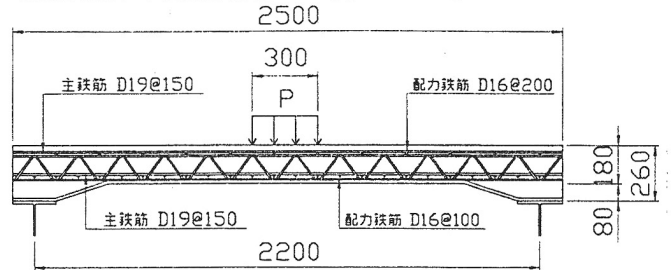


図4 供試体断面

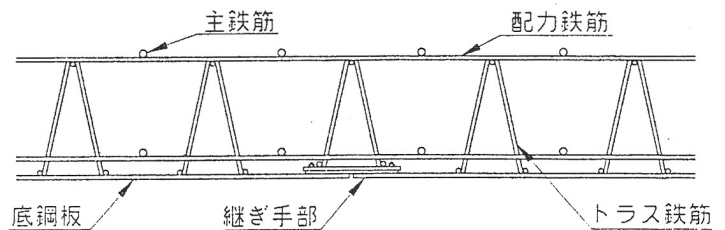


図5 継ぎ手部の形状

3.1.3 実験方法

供試体は橋軸方向の2辺を床版支間 2.2 mとした主桁上でボルトにより固定し、残る2辺を横桁により支持した。水張りの方法に関しては、輪荷重幅 0.3 m × 移動距離 2 mの載荷面積を囲むように堰堤を作り、その中に深さ 10 mm程度の薄い褐色の水を張った。載荷軌道は常時水に浸かり、床版にひび割れが生じた場合には、その下にも水が常時浸透するようにした。また、ハンチ位置の型枠鋼板には水抜き孔を設け、床版下面に浸透した水の有無を観察できるようにした。載荷荷重は、後輪一輪荷重である $P = 10$ t fに衝撃の影響を考慮した $P = 13.8$ t fで載荷する事が考えられるが、既往の乾

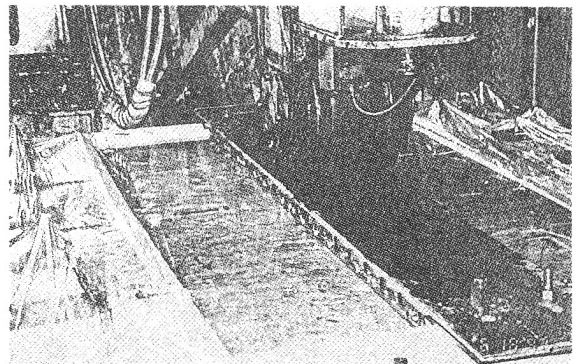


図6 水張り実験状況

表1 実験概要

供試体名	床版厚 (mm)	床版支間 (m)	橋軸方向 π 祓幅 (mm)	橋軸直角方向 π 祓幅 (mm)	載荷荷重と載荷回数	備考
水張り 供試体	180	2.2	1500×2	2500	18tf×60万回+ 21tf×16.2万回	供用時湿潤状況下の 疲労耐久性を把握
合成断面 供試体	180	2.2	1500×2	2500	18tf×100万回+ 21tf×60万回	合成床版としての 挙動を把握

乾燥状況下の実験結果¹⁾より、18tf×100万回載荷しても疲労損傷が全く見られず健全であったこと、また破壊形態を照査する目的から本実験においても $P=18tf$ にて載荷することとした。

3.2 合成断面載荷重走行実験

3.2.1 目的

トラス鉄筋により補強された型枠付きRC床版に関し、当初、トラス鉄筋と型枠鋼板との接合部が供用時の活荷重による繰り返し載荷により破断することが考えられたため、型枠鋼板を活荷重に対する強度部材とせず、あくまでも型枠材と見なしてきた。しかし実際には、既往の乾燥状況下の実験結果¹⁾および4.1に示す水張り実験結果よりトラス鉄筋と型枠鋼板との接合部に疲労亀裂が発生しておらず、型枠鋼板を強度部材とし、コンクリートと一体化した合成断面解析で実験結果を評価できることが判明した。そこで、型枠鋼板を強度部材とすることで下側主・配力鉄筋を省略する改良案を考えた。

本実験はその疲労耐久性を確認することを目的として実施したものである。

なお型枠鋼板が不連続となる部分に設置する継手パネルは、応力伝達を保障する構造となっていないため、橋軸方向配力鉄筋を下側に配筋する必要がある。

3.2.2 供試体

供試体は、床版支間2.2mの死・活荷重により生じる設計曲げモーメントに対して、型枠鋼板、上側主・配力鉄筋およびコンクリートで抵抗する合成断面として設計した。形状に関しては型枠鋼板が不連続となるパネル間継手部を供試体中央に設けた。実橋においては継手部のみを下側配力鉄筋が不可欠であるが、本実験ではより厳しい実験として実施する観点から、継手部も含めて下側には一切の主・配力鉄筋を配置しない供試体とした。供試体の断面図を図7に、供試体の継手部形状を図8示す。

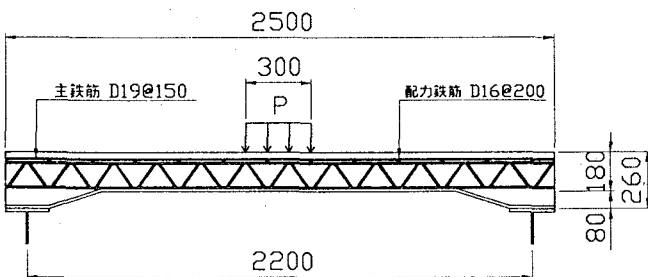


図7 供試体断面

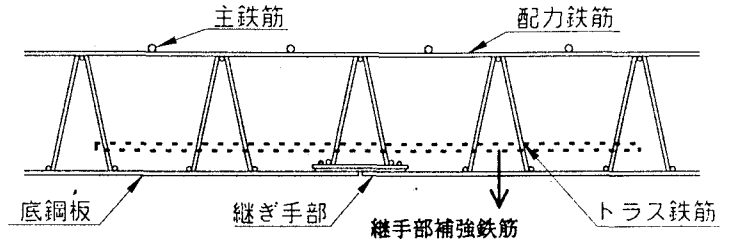


図8 供試体継手部形状

3.2.3 実験方法

供試体の支持方法および載荷荷重は、水張り輪荷重走行実験と同様とした。表1に水張りならびに合成断面載荷重走行実験概要を示す。

4. 実験結果

4.1 水張り輪荷重走行実験結果

18tf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21tfに荷重を増加させて載荷した。

その結果、21tf載荷の16.2万回繰り返し時点(総繰り返し数76.2万回)で供試体中央付近に30cm四方にわたり載荷軌道直下のコンクリートが上側主鉄筋位置まで骨材化した。なお、ここで試験機保護の観点から実験を終了した。

4.1.1 活荷重によるたわみ履歴およびたわみ分布

活荷重による供試体中央のたわみ履歴を図9に、橋軸方向のたわみ分布に関し、60万回載荷(18tf載荷)の場合を図10に、60万回載荷以降(21tf載荷)の場合を図11に示す。

なお図9のたわみ履歴には既往の乾燥状況下の実験結果¹⁾も併記した。また図10、図11の解析値は、床版本体の剛性を曲げ引張り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同断面を無視したRC断面モデルの2ケースについて、床版を主桁位置で固定支持した場合のそれぞれをFEM解析により算出したものである。

なお支持条件として固定支持と単純支持の2種の解析結果を載せたのは、実験において床版と桁とをボルト固定しているが、実際には完全に固定されておらず、固定支持と単純支持との中間的な挙動を示していたと考えられることによる。

図9のたわみ履歴の結果から、40万回載荷程度まで水張り供試体と乾燥状況下供試体とのたわみに有意な差はなく、水による疲労劣化から生じるたわみ増加は見ら

れなかった。その後50万回載荷付近から水張り試験体にたわみの増加傾向が見られたが、その増加量は0.1mm程度とわずかなものであった。

図10の18tf載荷でのたわみ分布は、実験時の床版と桁との支持条件が固定支持と単純支持との中間であると仮定すると、全断面有効とRC断面との解析値の範囲内を推移していたといえる。

図11の21tf載荷では、供試体中央載荷位置での上側かぶりコンクリートに疲労による劣化が生じたため、60万回載荷以降のたわみが増加し、載荷終了付近の72.2万回載荷時点で床版と桁との支持条件を単純支持とした引張り側コンクリート無視の解析値を上回っていた。

4.1.2 活荷重によるひずみ履歴

供試体中央の載荷位置直下となる上側主鉄筋、下側主鉄筋および型枠鋼板の活荷重ひずみ履歴を図12に示す。

また表2には18tf載荷時の各部に発生したひずみ値の範囲を示す。なお図12に示した解析値は曲げ引張り側のコンクリートも強度部材とする全断面有効モデルの床版を主桁位置で固定支持したFEM解析の結果である。また表2には、上記解析結果のほか、同じ固定支持条件において引張り側のコンクリートを無視したRC断面の解析値、および、床版を主桁位置で単純支持した全断面有効とRC断面についても記載した。

図12の実験結果から、各部の発生ひずみには輪荷重走行による増加傾向は見られず、疲労による劣化は認められなかった。

また図12、表2より実験結果がほぼ全断面有効の解析値と一致していることから、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明らかとなった。

なお、既往の研究⁷⁾によると、本実験と同一床版厚で同一試験装置を用いたRC床版が水張り状況下において17tf×15万回で押し抜きせん断破壊したとの報告がある。これに対してTRC床版は(18tf×60万回)+(21tf×16.2万回)を載荷させても一部のかぶりコンクリートの劣化に留まっており、供用時疲労耐久性が向上していた。また、供試体を切断して内部のコンクリートのひび割れ状況を目視観察した結果、貫通ひび割れは発生しておらず健全であった。

図13に実験終了後の供試体中央部(骨材化した箇所)の切断面を示す。

4.2 合成断面輪荷重走行実験結果

18tfにて100万回載荷した後、21tfに荷重を増加させて、さらに60万回載荷した。

4.2.1 活荷重によるたわみ履歴

活荷重による供試体中央のたわみ履歴を図14に示す。なお、図中には既往の乾燥状況下の実験結果⁴⁾も併記した。

図14より、15万回程度までは既往の乾燥状況下の

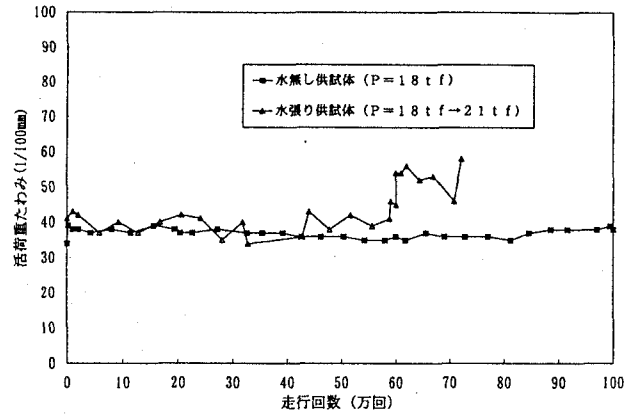


図9 活荷重によるたわみ履歴

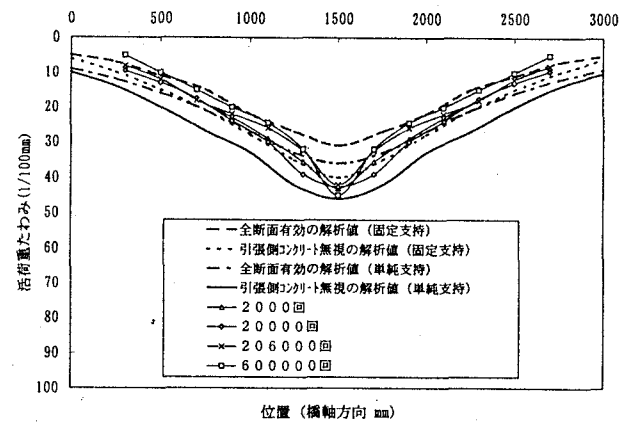


図10 活荷重によるたわみ分布(P=18tf)

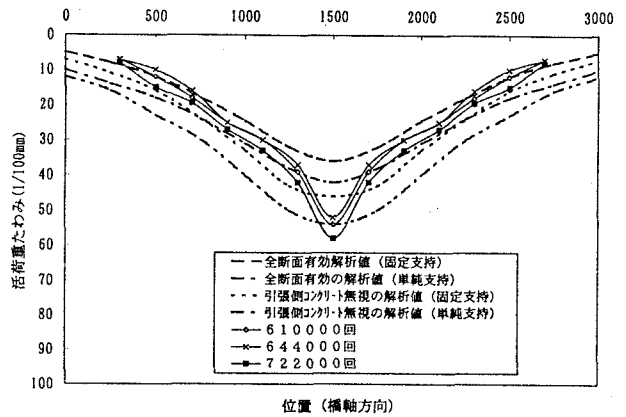


図11 活荷重によるたわみ分布(P=21tf)

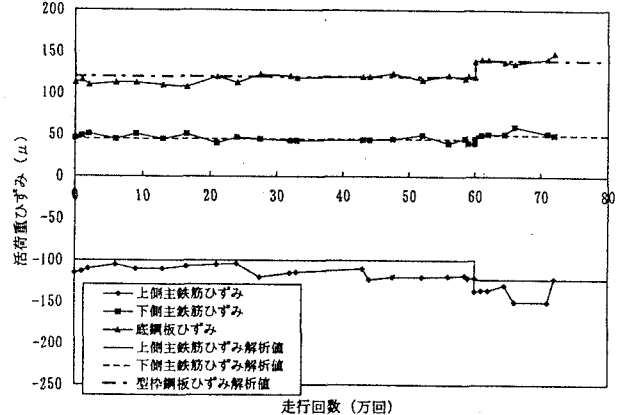


図12 活荷重によるひずみ履歴

表2 床版載荷点直下の活荷重ひずみ (P=18tf)

		上側主鉄筋ひずみ (μ)	下側主鉄筋ひずみ (μ)	型枠鋼板ひずみ (μ)
水張り供試体実験値		-103~-123	36~53	105~118
固定支持	全断面有効解析値	-106	40	125
	RC断面解析値	-103	86	195
単純支持	全断面有効解析値	-113	43	126
	RC断面解析値	-111	93	200

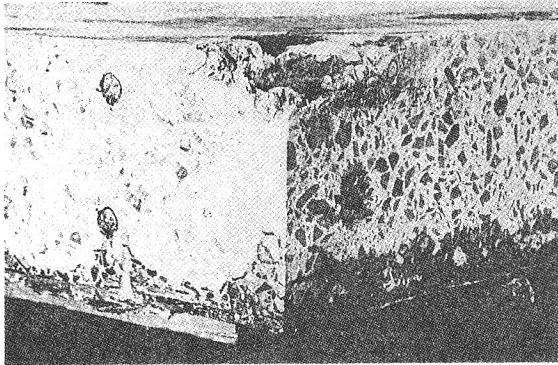


図13 供試体切断面

実験¹⁾と同程度のたわみを示していたが、19万回付近でたわみがわずかに0.1mm弱増加した。これは、型枠鋼板が不連続となる継ぎ手部に橋軸方向下側配力鉄筋を配置していないことから、橋軸方向の曲げモーメントによって継ぎ手位置の曲げ引張り側コンクリートにわずかなクラックが発生したものと考えられる。しかし、継ぎ手部以外の本体は健全な状態にあると思われ、100万回までの18tf繰り返し載荷に対してのたわみの増加はほとんど生じていなかった。また100万回以降の21tf×60万回載荷では、荷重が厳しいため、わずかにたわみの増加傾向が認められる。しかし、この荷重レベルでも、継ぎ手部劣化による曲げ破壊や床版の押し抜きせん断破壊は生じなかった。

以上の結果から、すべての下側主・配力鉄筋を削除したにも関わらず、T25後輪荷重を越える(18tf×100万回)+(21tf×60万回)の移動輪繰り返し載荷に対しても、本体には大きな損傷がなく健全であった。

4.2.2 活荷重によるたわみ履歴

供試体中央の載荷位置直下となる上側主鉄筋および型枠鋼板の活荷重ひずみ履歴を図15および表3に示す。

なお、図15に示した解析値は、床版本体の剛性を曲げ引張り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同強度を無視したRC断面モデルの2ケースについて、床版を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。また、表3に示した解析値は、上記解析値のほか、支持条件として単純支持の解析結果も併記した。これは、実験において床版と桁とをボルト固定しているが、実際には完全に固定されておらず、固定支持と単純支持との中間的な挙動を示していたと考えられることによる。

図15により、18tf×100万回載荷においては、

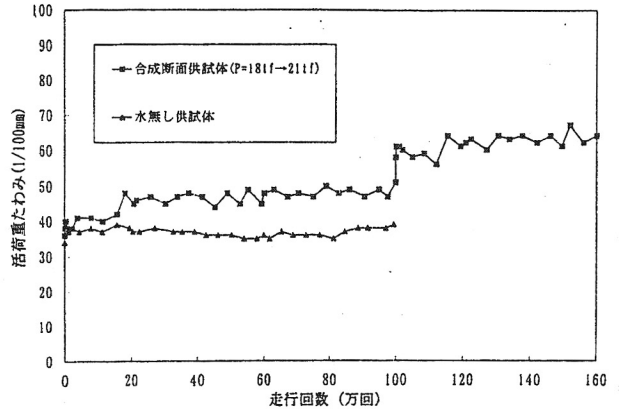


図14 活荷重によるたわみ履歴

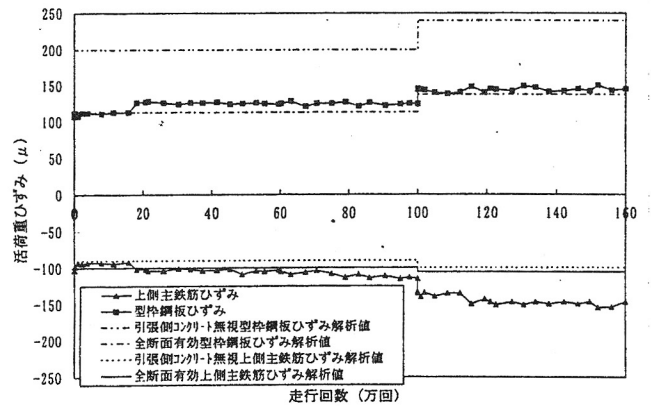


図15 活荷重によるひずみ履歴

上側主鉄筋および型枠鋼板とも、図14のたわみ履歴と同様に19万回載荷付近で10 μ 程度のわずかなひずみ増加が見られたが、ほぼ全断面有効とする解析結果と一致していた。その後の21tf×60万回載荷では、荷重レベルが厳しいため、継ぎ手部の劣化により上側主鉄筋のひずみが床版を主桁位置で固定支持とする解析値に対して50 μ 程度上回っていた。しかし、この荷重レベルでも床版が破壊するようなひずみの増加現象は見られなかった。なお、継ぎ手部の上下に橋軸方向配力鉄筋を配置することによって、継ぎ手部の劣化が生じないため、実験結果が全断面有効の解析値で表現できるものと考え、合成断面設計が可能であることが実証された。

5. 疲労耐久性に関する考察

今回の実験結果よりTRC床版の実橋供用時における疲労寿命が評価できればよいが、今回実施した数少ないデータから推定するのは無理があり、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ため、対象橋梁により、実状が異なるためここでは実施しないことと

表3 床版載荷点直下の活荷重ひずみ

		上側主鉄筋ひずみ (μ)		型枠鋼板ひずみ (μ)	
		18 t f	21 t f	18 t f	21 t f
合成断面試体実験値		-92~-115	-133~-155	107~128	138~150
固定支持	全断面有効解析値	-93	-109	113	132
	R C断面解析値	-89	-103	205	239
単純支持	全断面有効解析値	-110	-128	125	146
	R C断面解析値	-110	-129	210	245

する。そこで、同じ輪荷重走行試験機を用いた同厚のR C床版の既往の実験結果（乾燥状態及び湿潤状態）^{4) 7)}と今回のT R C床版の実験結果を比較してR C床版に対してT R C床版がどの程度の疲労強度を有するかを参考までに調査した。本考察を実施するにあたり既往の実験結果^{4) 7)}と本実験結果と載荷荷重が異なるため、床版の疲労に関してもマイナーの線形被害則が成立⁵⁾すると仮定し(1)式により補正を行った。なおコンクリートの各種疲労試験結果⁶⁾から得られているmは1.1~1.3程度との記載があり、参考文献5)の疲労寿命の評価において用いたm値を求めるとm=11.91となる。

ここでT R C床版の移動輪による破壊形態がまだ明らかにされていないため、R C床版での押抜きせん断破壊のm値(11.91)が適用できるとはいえないが、他に評価する手法がないためこの値を用いた。なお鋼材部分の破壊により終局となる場合は、適用するm値はもっと小さくなるものと考えられ、その時の比較対象は破壊形態の異なるR C床版を用いるのは適切ではない。この辺りの合成床版の疲労強度の評価手法は今後の議論の対象といえる。

(1)式により各実験の異なる載荷輪荷重×繰返し回数を、基本荷重(18 t f)×載荷回数として表現した。

$$N_{eq} = \sum (S_i / S_0)^m \cdot n_i \dots \dots \dots (1)$$

- N_{eq} : 等価繰返し回数
- S_i : 作用応力
- n_i : 作用応力による繰返し回数
- S₀ : 基本応力 (P=18 t fとした)
- m : 両対数表示のS-N曲線の傾きの絶対値

各実験の等価繰返し回数まとめると表4となる。

表4

実験内容		走行回数	最終状況
乾燥状態	R C	86万回	破壊
	T R C	476万回	損傷無し
湿潤状態	R C	1~8万回	破壊
	T R C	160万回	一部表面骨材化

以上の考察から湿潤状態におけるT R C床版はR C床版の少なくとも20倍以上(160^{万回}/8^{万回}=20倍)の疲労寿命を有するものと考えられる。

6. まとめ

本実験結果及び考察より、T R C床版は実用上十分な

疲労耐久性を有することが実証された。少数主桁橋においては、現状P C床版が主流であるが、それと同程度の疲労耐久性を本床版は有していると考えられ、それを検証するための段階載荷実験も実施済みである。これについては別途報告したい。

また連続合成桁への適用性に関しても、

- ①下側鉄筋を省略しているため主桁スタッド本数が増えても施工が容易。
- ②主桁作用による軸圧縮力に対して、型枠鋼板にはトラス鉄筋が密に配置されているため局部座屈が防止され、有効断面として考慮できる。
- ③主桁作用による引張り力に対しては、型枠鋼板を有効断面として考慮できる。

以上より、施工性及び主構作用に対する基本的な問題はクリアできている考えられる。

今後は、上記連続合成桁への適用に際し、中間支点上負曲げ区間における型枠鋼板の連結方法等具体的な構造検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 松井, 池田, 阿部, 中川: トラス鉄筋により補強された型枠付きR C床版の疲労強度特性, 土木学会第52回年次学術講演会 1998-10。
- 2) 別所, 松崎, 若林, : トラス鉄筋により補強された型枠鋼付きR C床版の設計・施工報告, (社)日本道路協会日本道路会議論文集, 1997。
- 3) 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R C床版(T R C床版)岩根沢橋における施工報告, 土木学会第52回年次学術講演会1998-10。
- 4) 松井, 辻, 文, : トラス型せん断補強筋を用いたR C床版の耐久性に関する研究, 土木学会第50回年次学術講演会, 1995-9。
- 5) 松井ほか: 重交通路線におけるR C床版損傷に対する疲労寿命評価と耐久性向上の一考察, 橋梁と基礎, 1992-6。
- 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, 1994-6。
- 7) 道路橋R C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, 1991-12。