

トラス鉄筋により補強された型枠鋼板付き合成床版の継ぎ手部疲労強度特性とずれ止め性能について

Fatigue strength behavior of joint for prefabricated composite-slab with steel form stiffened by bar-trusses and Characteristic on the shear strength

関口 修史*, 井澤 衛**, 阿部 幸夫***, 中川 敏之****, 松井 繁之*****

Shuji SEKIGUCHI, Mamoru IZAWA, Yukio ABE, Toshiyuki NAKAGAWA, Shigeyuki MATSUI

- * 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・橋梁技術部 (〒100-8113 東京都千代田区大手町 1-1-3)
- ***工修 住友金属建材（株） 道路土木製品技術部 (〒660-0891 兵庫県尼崎市扶桑町 1-21)
- **** 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 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

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 behavior of joint for this prefabricated composite-slab, the wheel trucking test using real-size model was carried out. And to investigate characteristic on the shear strength, the push-out test was carried out. As a result of these tests, the joint of composite slab was strong enough to bear the wheel load of the over designed-magnitude and the number of cycles 100×10^4 , and weld of bar-trusses was over 30 times as strong as that of stud. It was confirmed that the proposed composite-slab was applicable to practical use.

Key Words : composite-slab, bar-truss, wheel trucking test, push-out 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、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、さらに施工の合理化に寄与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合成床版（以下、TRC床版と呼ぶ）を提案し、すでに本床版に対して輪荷重走行実験等を行い、疲労耐久性の面で問題の無いことを確認している。^{1), 3), 5)}

本論文では、TRC床版のパネル間継手として引張りボルト接合を適用した場合の疲労耐久性を確認するための輪荷重走行実験、ならびに疲労耐久性評価の着目点であるトラス鉄筋と型枠鋼板との溶接部せん断強度特性を調査するために実施した押し抜きせん断実験について報告する。

2. TRC床版の概要

TRC床版は、図-1に示すように、機械製造されたトラス鉄筋を型枠鋼板の主鉄筋方向に工場溶接により取付け、現地敷設後に主鉄筋及び配力鉄筋を配筋し、コンクリートを打設するハーフプレファブ床版である。これにより現地での型枠支保工が不要となるため、現場作業の省力化が可能となる。また、トラス鉄筋はコンクリート打設時の型枠補強のほか、供用時の疲労耐久性の向上にも有効に寄与する。

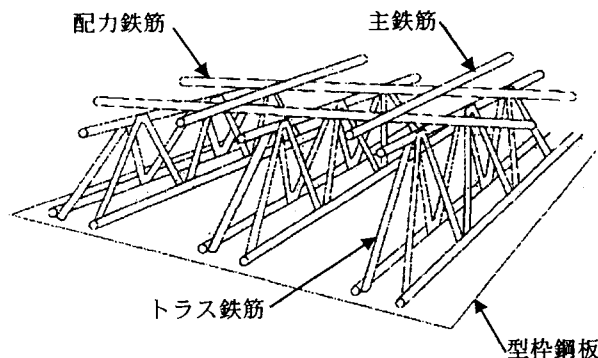


図-1 TRC床版

本床版の特徴は以下の通りである。

- ①. 型枠鋼板を主部材(引張り鉄筋)とする合成床版であり下側主・配力鉄筋を省略できる。

- ②. トラス鉄筋によるせん断補強効果により、飛躍的な疲労耐久性を実現(水張り状況下でRC床版の20倍以上)
- ③. トラス鉄筋によるせん断補強効果により、ひび割れを抑制するため防水層が不要となる。(凍結防止剤の散布がない地域)
- ④. 鋼製型枠パネル工法の為、施工時の安全を確保でき足場・支保工・型枠を省略可能。
- ⑤. 下側主・配力鉄筋を省略できるため、連続合成桁として使用する場合等においても、主桁スタッド本数が増えてもパネル架設等の施工を用意に行える

3. 輪荷重走行実験概要

3. 1 実験目的

連続合成桁に本床版を適用するにあたり、型枠鋼板を主桁断面に算入することができれば、桁を設計する際に有利になる。しかしこの設計法が成立するには型枠鋼板を橋軸方向に連続化する必要がある。そこで本論文では、型枠鋼板の連続化を図るため、引張りボルト接合の適用を考え、このときの疲労耐久性を確認するために、輪荷重走行実験を実施した。

3. 2 実験供試体

実験供試体の継手部形状を図-2に示す。供試体に用いた材料は、型枠鋼材(t4.5)がSS400材、主鉄筋(D19)、配力鉄筋(D16)およびトラス鉄筋上下弦材(D10)がSD295材とし、コンクリートの設計基準強度は 30N/mm^2 とした。また型枠鋼板を除く床版厚を180mmとし、鉄筋のピッチは、上側主鉄筋が150mm、上側配力鉄筋が200mm、トラス上弦材が150mm、同下弦材が75mmとし、床版断面の下側には主鉄筋および配力鉄筋を配置していない。引張りボルト継手は、F10T、M16のボルトを橋軸直角方向に200mmピッチで配置し、継手板の板厚は16mmとした。またボルトの初期導入締付け応力は、 675N/mm^2 とした。

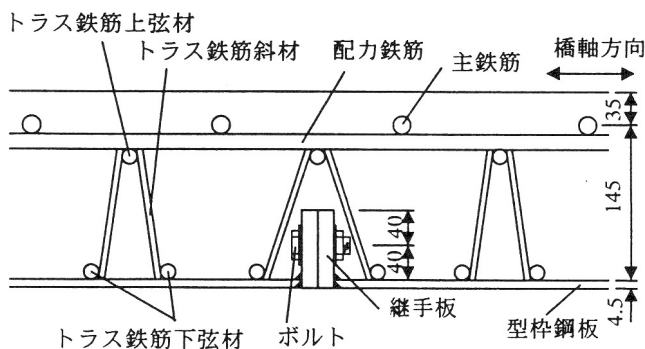


図-2 引張りボルト継手部

3. 3 載荷方法

実験装置には、大阪大学所有の輪荷重走行試験機を用

いた。供試体の支持条件は、橋軸方向の2辺を床版支間2.2mの主桁上で単純支持し、残る2辺を横桁により支持した。載荷位置は、供試体の橋軸直角方向中央ライン(載荷幅30cm)とした。また載荷荷重は、最初177kNで30万回載荷した後、206kNで30万回、さらに235kNで40万回の合計100万回を載荷した。なお、設計荷重は135kN(T荷重 後輪1輪衝撃込み)である。載荷状況を写真-1に示す。

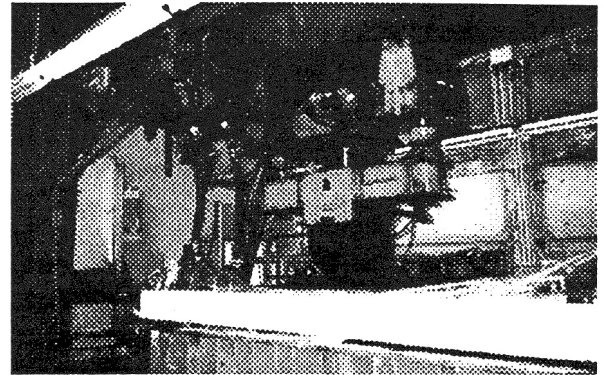


写真-1 移動輪荷重載荷状況

4. 輪荷重走行実験結果

4. 1 床版のたわみ

供試体中央の静的載荷時鉛直たわみと走行回数との関係を、図-3に示す。結果は、各載荷段階において、たわみは安定的に推移しており、疲労劣化による増加は見られない。なおこのたわみ値は、継手部に配力鉄筋重ね継手を採用した既往実験³⁾に比べて0.1mm程度増加していた。これは、今回採用した引張りボルト接合において、継手板に曲げ変形が発生し、鉄筋重ね継手より橋軸方向の曲げ剛性が低下していたことによる。しかしその値は、設計荷重を上回る載荷レベルにおいても、たわみの推奨値 $^2)L/2000$ (L:床版支間)を満足していた。

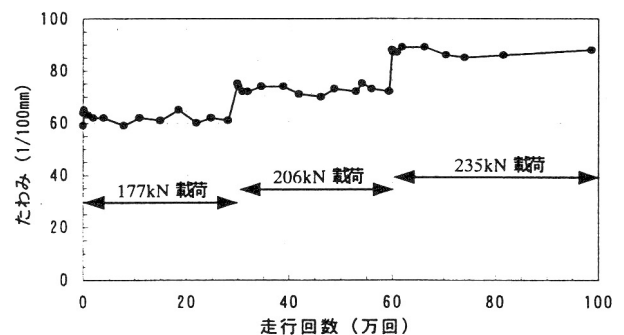


図-3 床版中央鉛直たわみの履歴

4. 2 型枠鋼板および主鉄筋のひずみ

供試体中央の載荷付近の型枠鋼板橋軸直角方向と上側主鉄筋の静的載荷時ひずみと走行回数との関係を図-4に示す。図中の破線は、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し、

主桁位置で単純支持した FEM 解析で算出したものである。

結果は、型枠鋼板の橋軸直角方向および主鉄筋とも発生ひずみに、輪荷重走行による劣化は見られない。また、図中の解析値に比べて実験値がわずかに大きい値を示した。これは、引張りボルト継手部の橋軸方向曲げ剛性が本体部より小さく、この異方性の影響により、ひずみ計測位置である継手部に生じる橋軸直角方向の曲げモーメントが継手の無い場合よりも若干大きくなることによる。

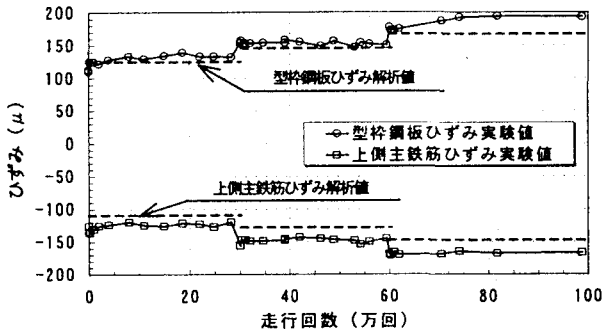


図-4 型枠鋼板および主鉄筋のひずみの履歴

4.3 継手の目開き量

供試体中央の荷重位置直下である継手部の静的荷重時目開き量と走行回数との関係を図-5に示す。結果は、設計荷重の1.7倍を超える235kN荷重時でも、0.6mm程度の目開き量であった。また、輪荷重走行に伴う継手部の劣化による目開き量の増加は認められない。

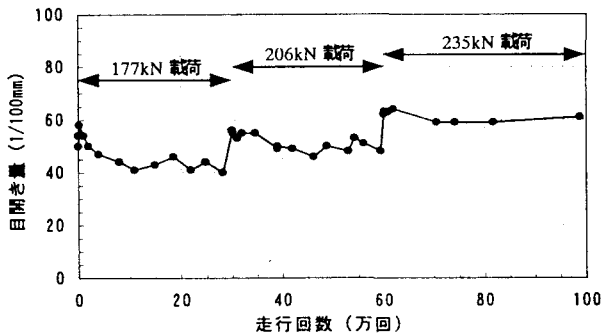


図-5 継手目開き量の履歴

4.4 継手ボルトのひずみ

供試体中央の荷重位置直下である継手ボルトの静的荷重時ひずみと走行回数との関係を図-6に示す。

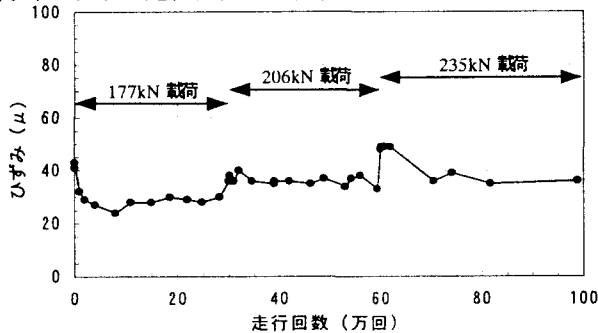


図-6 継手ボルトひずみの履歴

結果は、40μ程度の小さな値を安定的に推移しており、ボルトに生じた引張力は初期導入プレストレス力以下であったことが判る。

5. 押し抜きせん断実験概要

5.1 実験目的

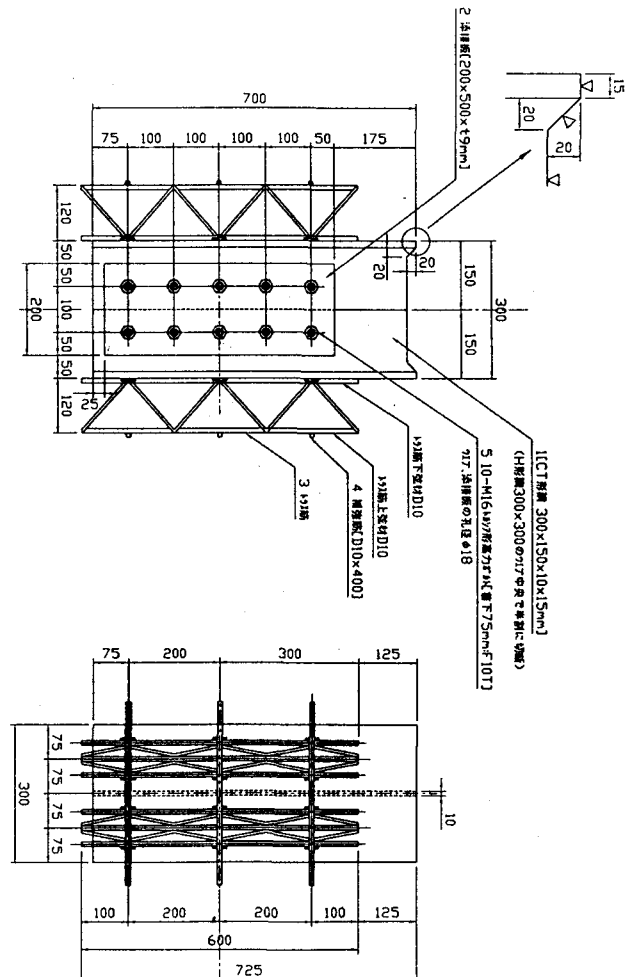
本床版の疲労耐久性を評価する着目点として、トラス鉄筋と型枠鋼板との溶接部が考えられる。これまでに実施してきた輪荷重走行実験結果³⁾からは、当該部に疲労亀裂は認められないが、溶接部のずれせん断特性ならびにずれ性状を調査するのを目的に押し抜きせん断実験を実施した。

5.2 実験供試体

実験は表-1に示す3ケースについておこなった。トラス鉄筋全3列を全て溶接したCASE.3の供試体形状を図-7に示す。型枠鋼板を除く床版厚はいずれの供試体も180mmとした。

表-1 実験供試体の種類

CASE	トラス鉄筋-型枠鋼板溶接位置	荷重方法
1	中央1列 (8箇所)	単調増加
2	中央1列 (8箇所)	漸増繰返し



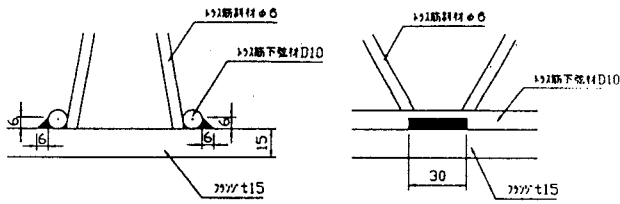


図-7 実験供試体形状

5.3 載荷方法と計測位置

単調増加載荷法は、溶接部が全て破断するまで静的に一方方向に静的載荷した。一方、漸増載荷法は以下の要領で載荷した。

- ・荷重制御とし、荷重増分は単調増加載荷の最大荷重 650kN の約 1/20 となる 30kN とする。
- ・計測は 5.0kN ピッチで実施する。
- ・荷重が 600kN を超えた時点で変位制御に変更し、増分 0.2mm ピッチで繰り返す。

また計測位置は、トラス鉄筋中央の溶接部の水平面内とし、H形鋼左右ブロックの両側面の4箇所で鋼フランジとコンクリートブロックとの間に生じる相対ずれを計測した。

5.4 材料試験結果

実験供試体に用いた鋼材の機械的性質を表-2に、コンクリートの性質を表-3に示す。また、溶接に用いた溶着金属の機械的性質を表-4に示す。

表-2 鋼材の機械的性質 (n=3)

分類		材質	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
トラス鉄筋	斜材	φ6	561	599	10.8
	上下弦材	D10	365	527	30.1
補強筋		D10 SD295	355	496	29.3

表-3 コンクリートの性質 (n=3)

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比 (ν)
15日	30	2.7	2.45×10 ⁴	0.178

表-4 溶着金属の機械的性質

シールドガス	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	吸収エネルギー (J)
CO ₂	450	550	29	120

6. 押し抜きせん断実験結果

荷重と相対ずれとの関係を図-8に示す。

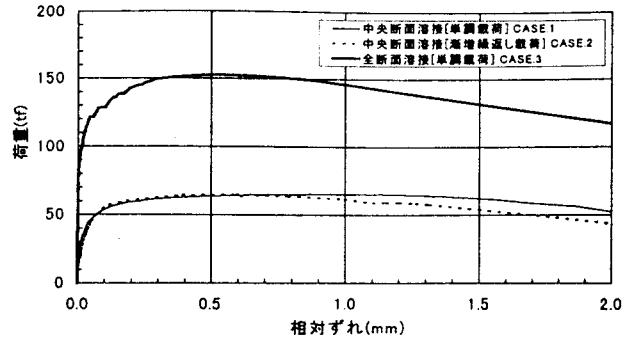


図-8 荷重と相対ずれの関係

また、各ケースの結果を表-5にまとめた。表中の各値の説明を以下に示す。なお、Q_y 算定時の状況を図-9 (CASE.1), 図-10 (CASE.2) に示す。

Q_{max} : 最大せん断耐荷力

Q_y : 降伏せん断耐荷力であり、Q_{max}/3 荷重点の割線によるオフセット法により求めた値 (オフセット量は 0.04mm とした)

δ_{max} : Q_{max} のときのずれ量

K_{st}⁰ : ずれ剛性であり、作用せん断力と相対ずれ関係における Q_{max}/3 荷重点の初期割線剛性

表-5 実験結果

CASE	Q _{max} (kN)	Q _y (kN)	δ _{max} (mm)	K _{st} ⁰ (kN/mm)
1	651	471	1.04	36170
2	646	514	0.60	13140

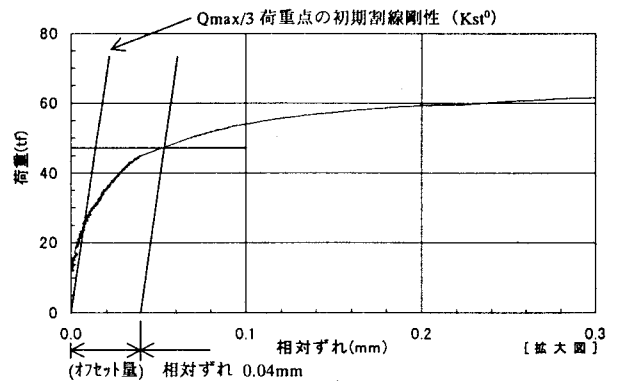


図-10 荷重と相対ずれ関係 (中央断面溶接: CASE.1)

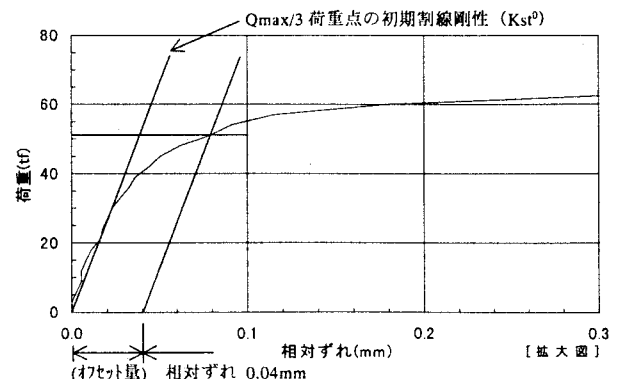


図-11 荷重と相対ずれ関係 (中央断面溶接: CASE.2)

実験結果から、CASE.1、CASE.2とも最大せん断耐荷力は65tf程度、降伏せん断耐荷力は500kN程度であった。また、今回の溶接仕様は、サイズ6mm、溶接長30mmであり、これより溶接部の降伏せん断強度を計算で求めると、

$$0.6\text{cm} \times 0.707 \times 3\text{cm} \times (240\text{N/mm}^2 / \sqrt{3}) \times 8 \text{箇所} = 140\text{kN}$$

以上より、実験時の降伏せん断耐荷力500kNと上記の降伏せん断強度計算値140kNは大きく異なっている。この原因を明かにするため、実験後の溶接破断面を調査した。

まず溶接破断面の面積を、CASE.1、CASE.2のB断面について計測した。計測箇所を図-12 (CASE.1)、図-13 (CASE.2)に、計測結果を表-6に示す。

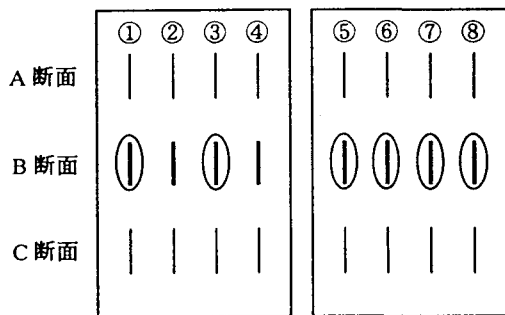


図-12 測定箇所 (CASE.1)

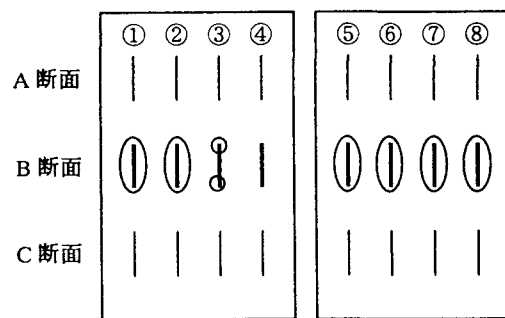


図-13 測定箇所 (CASE.2)

図-12、13において、測定ポイントの丸囲みは、型枠鋼板に溶接が残っているものである。また、計測は以下の要領により行った。

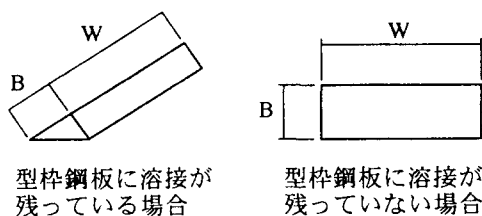


表-6 溶接破断面面積測定結果

測定位置	CASE.1 B断面		CASE.2 B断面	
	B (mm)	W (mm)	B (mm)	W (mm)
①	7	32	8	33
②	10	37	8	30
③	9	37	8	33
④	10	32	10	32
⑤	9	39	11	35
⑥	9	33	10	37
⑦	9	32	10	33
⑧	9	36	8	35

表-6より、溶接破断面の面積 $B \times W$ の総計を求めると以下の値となる。

$$\text{CASE.1 供試体} : 25.1\text{cm}^2$$

$$\text{CASE.2 供試体} : 24.5\text{cm}^2$$

この値は、計算値の際に用いたのど厚面積

$$0.6 \times 0.707 \times 3 \times 8 \text{箇所} = 10.2\text{cm}^2$$

の約2.5倍であった。

溶接破断面のせん断面積を前記より 25cm^2 とし、溶接部の降伏強度に、表-4に示す溶着金属の降伏点 460N/mm^2 を用いると、降伏せん断強度は次のようになる。

$$25\text{cm}^2 \times (460\text{N/mm}^2 / \sqrt{3}) \times 8 \text{箇所} = 530\text{kN}$$

上記の計算値は、ほぼ実験時の降伏せん断耐荷力500kNと一致する。

以上の結果より、今回の実験では溶接部の破断面積として、「溶接サイズ $\times 0.707$ 」より与えられるのど厚を用いて設計した場合、かなり安全側であることが判った。また、溶着金属の降伏点の影響を受けていることも判った。

また、ずれ剛性 K_{st}^0 については、 $\phi 19$ のスタッドジベルを4本用いた場合、 $150 \sim 200\text{kN/mm}^4$ である。これに対して、今回のトラス鉄筋溶接部(8箇所)の K_{st}^0 は、漸増繰り返し载荷時でも約 13000kN/mm であった。このずれ剛性を溶接4箇所として換算し、スタッドジベルと比較すると、今回の実験ではトラス鉄筋溶接部はスタッドジベル溶接部の30倍以上のずれ剛性を有していた。

7. おわりに

本論文では、TRC床版の継手部疲労強度特性ならびに、トラス鉄筋と型枠鋼板とのずれ止め性能を調査するために、輪荷重走行実験および、押し抜きせん断実験を実施した。まず輪荷重走行実験結果より、設計荷重を越える移動輪荷重を100万回载荷しても、疲労劣化は見られず、型枠鋼板の橋軸方向への連続化が、引張りボルト

接合を用いることにより十分可能であることを確認した。また、押し抜きせん断実験結果から、溶接部の破断面積として、「溶接サイズ×0.707」より与えられるのど厚を用いて設計を行った場合は、かなり安全側での設計が行われ、また溶着金属の降伏点の影響も受けていることが判った。また、ずれ剛性については、本来φ19mmのスタッドジベルを4本用いた場合のずれ剛性が150～200kN/mmであるのに対して、今回のトラス鉄筋溶接部（8箇所）のずれ剛性は、漸増繰り返し載荷時でも13000kN/mmであり、スタッドジベル溶接部の30倍以上であることが判った。ずれ剛性が大きくなると、溶接部に作用するせん断力が増加する傾向にあるが、TRC床版の場合は前述より当該部の溶接破断面積が設計で仮定している値よりも大きいため、十分実用に供しうる疲労強度を有していると考えられる。以上の結果から、TRC床版が供用時において十分な疲労耐久性を有していることが明らかとなった。

謝辞：本研究においてご指導を賜りました大阪大学大学院松井繁之教授および関係者の皆様に感謝致します。

参考文献

- 1)中川, 阿部, 井澤: トラス鉄筋により補強された型枠付き合成版の疲労強度特性, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, pp.219-224, 1998.
- 2)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1996.
- 3)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.
- 4)頭付きスタッドの押し抜きせん断試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状: 日本鋼構造協会, p.67, 1996.
- 5)松井, 池田, 阿部: 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, 第52回年次学術講演会講演概要集,