

Uリブ合成床版の疲労強度特性

Fatigue Strength Properties of U-RIB Composite Slab

滝口伸明*・猪村康弘**・川畑篤敬**・加納勇**

Nobuaki TAKIGUCHI、Yasuhiro IMURA、Atsunori KAWABATA、Isamu KANO

* NKK 基盤技術研究所 都市工学研究部 (〒210 神奈川県川崎市川崎区南渡田町 1-1)

**工修 NKK 橋梁建設部 開発技術室 (〒230 神奈川県横浜市鶴見区末広町 2-1)

It is necessary to develop high durability slab toward fatigue loads. In this paper, composite slab with steel form plate stiffened by U-rib is proposed. The composite slab is consists of concrete, upper reinforcement, and the steel-plate as a tension member which has a role of a form for concrete casting. The steel-plate is stiffened by U-rib in the transverse direction of the bridge. In order to verify fatigue durability, the wheel trucking tests were conducted using real-sized models (TYPE-1 and TYPE-2). In the wheel running test, TYPE-1 (50mm cover) has better fatigue durability than reinforced concrete slab. TYPE-2 (100mm cover) endured the fatigue loading without serious damages between 157kN and 392kN of the applied wheel loads under 520×10^3 cycles.

Key Words : composite-slab, wheel running test, fatigue durability

1. はじめに

従来用いられてきた鉄筋コンクリート床版 (以下、RC床版) の繰り返し荷重による疲労損傷、鋼橋の少数主桁化にともなう床版の長支間化、ライフサイクルコストを考慮した設計などにより、高耐久性床版の需要が高まり、鋼コンクリート合成床版の開発が各方面で行われている。本研究では、底鋼板とコンクリートを底鋼板に溶接したUリブを介して合成するオープンサンドイッチ型合成床版 (Uリブ合成床版) に関して実施した実験的研究を報告する。本床版の主な特徴を以下に示す。

- ① 床版用の足場・支保工が不要で工期の短縮が図れる。
- 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 底鋼板が構造部材として機能するため、耐荷力・耐久性が高い。

本論文では、本床版の疲労耐久性を確認するために実施した載荷荷重 157~392kN・走行回数 52 万回におよぶ輪荷重走行試験および床版各部位の基本特性を確認する梁モデル静的載荷試験の結果について報告する。

2. Uリブ合成床版の構造

Uリブ合成床版の概念図を図-1 に示す。本合成床版は、底鋼板にUリブを溶接したものを型枠とする。Uリブの腹板およ

び頂部にパンチ等による開孔を行い、Uリブ内部にコンクリートを充填させることにより、ずれ止め効果の向上と、配力筋方向の断面の連続化をはかっている。

パネル間の橋軸方向継手は溶接や高力ボルトによる添接は行わず、鉄筋重ね継手を採用しているため、パネル上面から施工が可能で、継手作業足場が不要である。

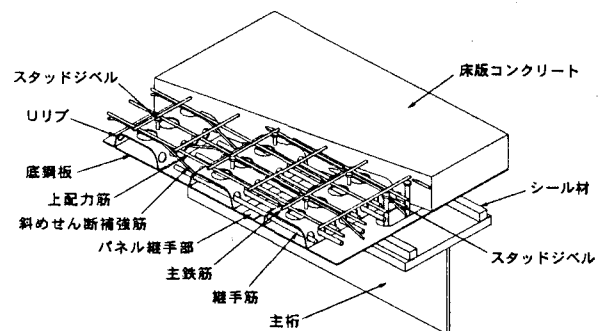


図-1 Uリブ合成床版概念図

3. 実験内容

(1) 輪荷重走行実験

a) 目的

床版の疲労損傷メカニズム解明と標準的なRC床版との比較による健全度評価を目的に実物大の供試体を用いた輪荷重走行実験を実施した。

b) 供試体

供試体は、床版支間 3m の連続版として B 活荷重、大型車日交通量 2000 台以上、床版のコンクリート部分の最小厚は、200mm または $(25L+100)\text{mm}$ (L:床版支間[m])のうちの大きい方とする条件で設計した。また、継手部の疲労耐久性を確認するために、載荷範囲に 1 箇所の継手を設けた。供試体の種類は、Uリブ高さや鋼板厚の異なる 2 種類とした。実験供試体の一般図を図-2~3 に、供試体の寸法、仕様を表-1 に示す。

c) 載荷方法

建設省土木研究所の輪荷重走行試験機を用いて試験を行った。荷重は、初期荷重 157kN より走行 4 万回毎に 19.6kN ずつ増加させる階段状荷重漸増載荷方法とし、供試体が破壊に至るまで、あるいは走行回数 52 万回、392kN まで載荷した。

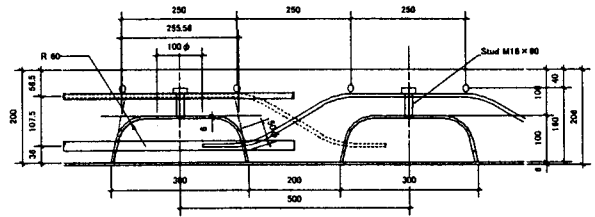


図-3 実験供試体 (TYPE-2)

表-1 供試体の寸法、仕様

項目	TYPE-1	TYPE-2
鋼板厚	4.5mm(SS400)	6mm(SS400)
コンクリート版厚	200mm	200mm
Uリブかぶり厚	50mm	100mm
Uリブ寸法	300 × 150 × 4.5mm	300 × 100 × 6.0mm
Uリブピッチ	650mm	500mm
Uリブ純間隔	350mm	200mm
Uリブ開口	上100Φ 横50Φ × 2段	上100Φ 横50Φ × 1段
Uリブ間配筋	なし	斜め補強鉄筋 D10
鉄筋材質	SD295	SD295
主鉄筋	D13@650	D13@250
配力鉄筋	D16@150	D13@150
コンクリート圧縮強度	30.3N/mm ²	40.6N/mm ²
膨張材	なし	35kg/m ³
継手形式	継手筋 D19	継手筋 D22
継手位置	中央	1mずらす
鋼板面処理	なし	砂接着
スタッド	なし	Uリブ上に配置 16Φ@300

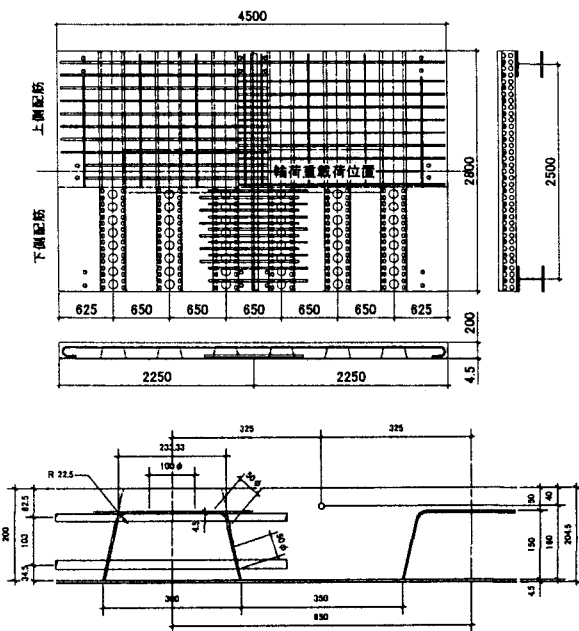
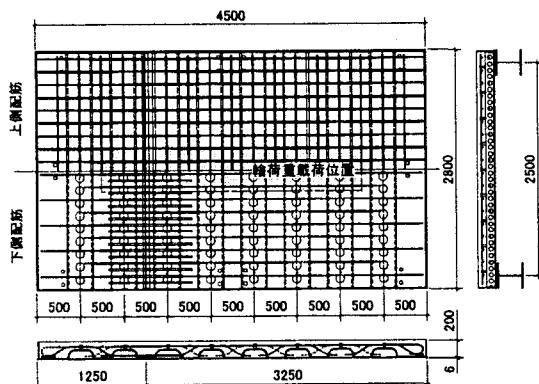


図-2 実験供試体 (TYPE-1)



(2) 梁モデル静的載荷試験

a) 目的

床版を構成する各部位が疲労耐久性に与える影響の基礎データを得るため、梁モデルによる静的載荷試験を行った。

b) 供試体

表-2 に供試体の一覧を示す。供試体は、砂接着による鋼板表面処理、Uリブ高さ、スタッド、鋼板厚などをパラメーターとし、橋軸方向に着目した供試体 6 体、橋軸直角方向に着目した供試体 6 体とした。床版厚、Uリブ形状、鉄筋径は、輪荷重走行試験に用いた床版と同一とした。供試体の形状・寸法の例を図-4~5 に示す。コンクリートの圧縮強度は 45N/mm²であった。

c) 載荷方法

載荷方法は2点単純支持し、支間中央に1点載荷する方法とした。

表-2 供試体概要

NO.	着目断面	砂	スタッド	斜め筋	リブ高さ	鋼板厚
L-1	橋軸方向	○	○	○	100mm	6.0mm
L-2		×	○	○		
L-3		×	×	○		
L-4		×	○	×	150mm	
L-5		×	×	×		
L-6		×	×	×		
T-1	橋軸直角方向	○	○	○	100mm	6.0mm
T-2		○	×	○		
T-3		×	○	○		
T-4		×	×	○	150mm	
T-5		×	×	○		
T-6		×	×	○		
橋軸方向供試体		支間長 1000mm 幅 500mm コンクリート厚 200mm				
橋軸直角方向供試体		支間長 1900mm 幅 500mm コンクリート厚 200mm				

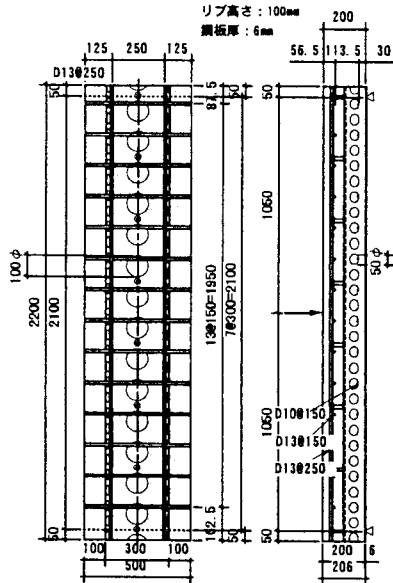


図-4 橋軸直角方向供試体 (T-1)

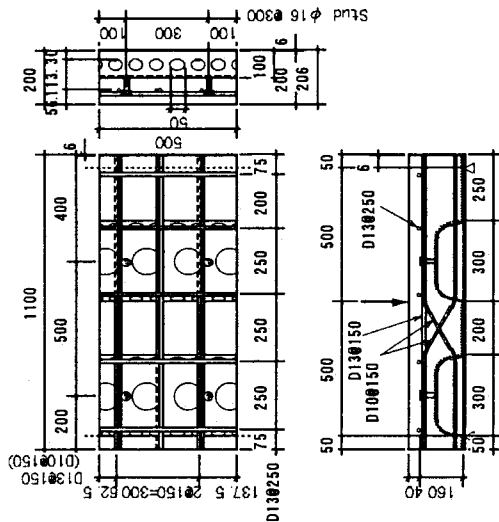


図-5 橋軸方向供試体 (L-1)

4. 実験結果

(1) 輪荷重走行試験

a) 載荷荷重-破壊回数の関係

走行回数と載荷荷重および破壊時荷重との関係を図-6 に示す。平成8年度道路橋示方書により設計されたRC床版 (以下、RC8) および、フルプレストレスの50%で設計したPC床版 (以下、PRC50)の試験結果も併記した。TYPE-1は、荷重値314kN・走行回数 35.6 万回で押し抜きせん断破壊した。TYPE-2 は PRC50 と同様に本試験での最終荷重値 392kN・走行回数 52 万回に至っても、破壊せずに終了した。TYPE-1、TYPE-2 ともに荷重値 275kN・走行回数 25.6 万回で破壊した RC8 と比べ、疲労耐久性が高いことが確認できた。

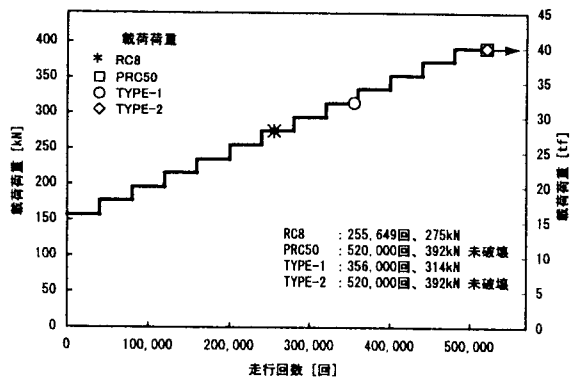


図-6 走行回数-載荷荷重関係

b) 鉛直たわみ-走行回数の関係

試験体中央部での静的鉛直たわみ-走行回数関係を図-7 に示す。TYPE-1 は荷重と走行回数の増加につれてたわみが漸増するが、荷重値 314kN 走行回数 32 万回付近でたわみが急増し、破壊に至った。TYPE-2 のたわみは、荷重値 392kN・走行回数 52 万回に至るまで急激な増加現象は認められず、最終たわみは 392kN 静的載荷時で 2.7mm、除荷時で 0.9mm であった。RC8 と各供試体との載荷時たわみの比率は TYPE-1 が約 60%、TYPE-2 は約 25%であり、TYPE-1、TYPE-2 ともに RC8 に比べて、高い剛性を保持していた。破壊した RC8 および TYPE-1 はたわみが 5mm を超えると急激にたわみが増加し、破壊に至っている。

c) ひずみ分布

TYPE-1、TYPE-2 の橋軸直角方向断面のひずみ分布を図-8~9 に示す。図中には、設計値 (コンクリート引張側無視、鋼とコンクリートとのヤング係数比 n=15) を併記した。ひずみは、上側主鉄筋と底鋼板下面の計測値を示す。TYPE-1、TYPE-2 ともに中立軸位置は設計値近傍を推移しており、大きな構造系の変化が生じていないことを示している。ただし、TYPE-1 はこれ以降ひび割れ発生が多く、データが得られていない。

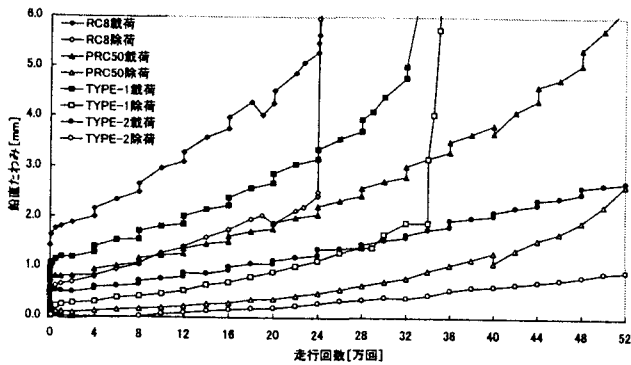


図-7 試験体中央位置たわみと走行回数との関係

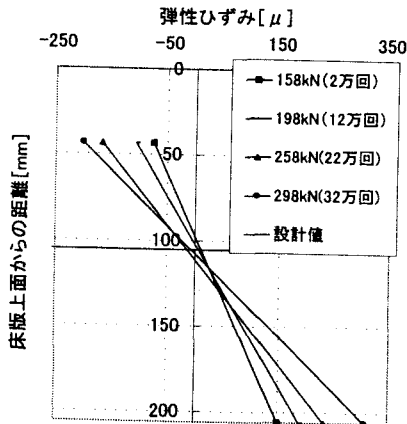


図-8 ひずみ分布 (TYPE-1 供試体)

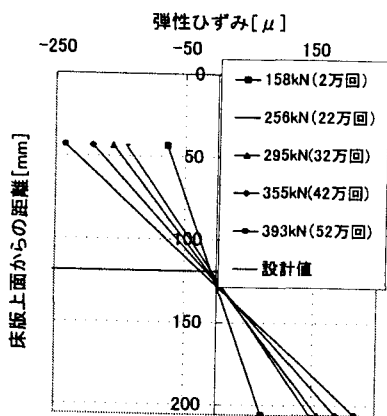


図-9 ひずみ分布 (TYPE-2 供試体)

d) 継手

TYPE-1 継手鉄筋の破壊直前におけるひずみは 200μ と小さかった。また、ひび割れは継手のある中央位置ではなくその両隣のUリブ位置で発生していた。これは継手位置に継手鉄筋が密に配置されているためと考えられ、継手部が弱点となることはなかった。

TYPE-2 継手鉄筋の最終荷重におけるひずみは 140μ と小さかった。供試体の継手位置およびその対称位置となる一般部位位置のたわみを比較したが、ほぼ同じ性状であり、継手部が弱点となることはなかった。

e) 供試体の疲労損傷状況

コンクリート上面のひび割れ進展状況を図-10 に示す。TYPE-1 は以下に示すようなメカニズムにより破壊した。

- ① Uリブ直上で発生したひび割れが支点部から支間中央へ向かって進展
- ② ひび割れが中央部へ達し、Uリブとコンクリートのはく離が発生
- ③ 版から梁状へと構造系が変化したことにより、Uリブ間コンクリートが押し抜きせん断破壊する。

梁状化の早期発現が、TYPE-1 の耐久性低下の原因であった。試験終了後、TYPE-1 の損傷部のコンクリートを撤去して鋼部材およびすみ肉溶接部を確認したが、損傷は見られず、コンクリート部の疲労損傷による破壊であることが判明した。

TYPE-2 は、試験終了後に床版を切断して内部調査を行ったが、ひび割れの発生はごくわずかでありほぼ健全なままであった。

f) たわみ分布における解析値と計測値との比較

TYPE-1、TYPE-2 の橋軸方向、橋軸直角方向の鉛直たわみ分布を図-11~14 に示す。図中の解析値は、引張側コンクリート無視、等方性版、 $n=15$ (TYPE-1)、 $n=10$ (TYPE-2) としたシェル要素モデルによる FEM 解析により算出した。TYPE-1 については、計測値と解析値が荷重値 177kN ・走行回数 4 万回でほぼ一致した。荷重回数が増えるにつれて計測値が解析値よりも大きくなり、破壊時には約 3 倍となった。これは、荷重回数、荷重の増加につれて、ひび割れの進展、底鋼板とコンクリートのはく離が進み剛性が低下したためと考えられる。

TYPE-2 については、計測値と解析値が荷重値 392kN ・走行回数 52 万回でほぼ一致した。

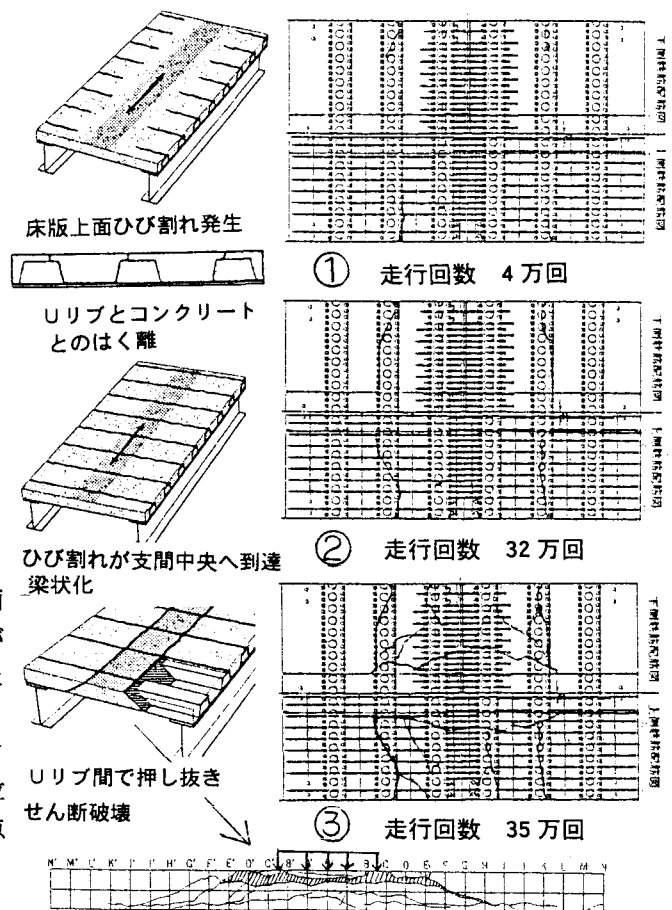


図-10 ひび割れ進展状況と疲労損傷メカニズム (TYPE-1)

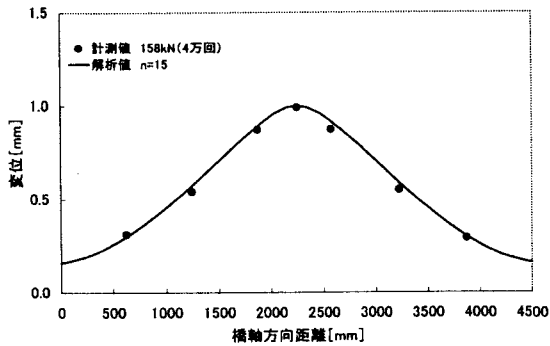


図-1 1 橋軸方向たわみ分布 (TYPE-1)

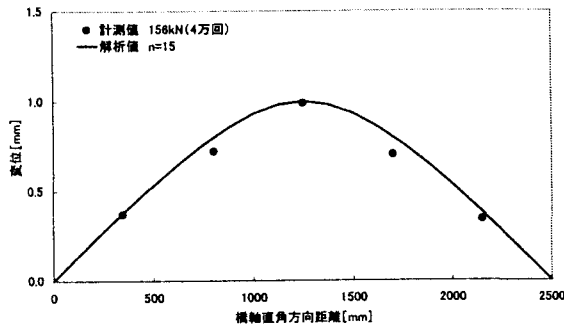


図-1 2 橋軸直角方向たわみ分布 (TYPE-1)

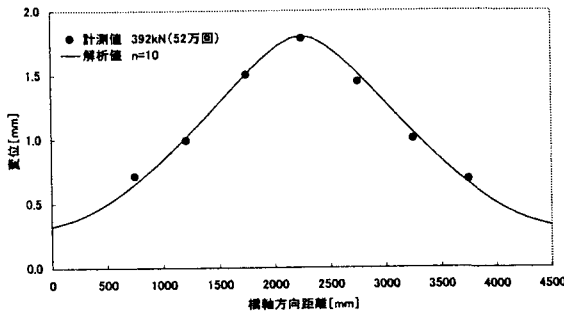


図-1 3 橋軸方向たわみ分布 (TYPE-2)

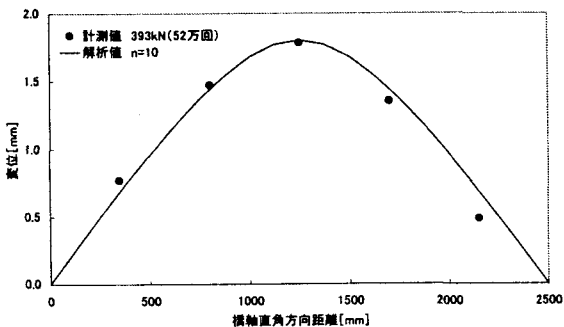


図-1 4 橋軸直角方向たわみ分布 (TYPE-2)

(2) 梁モデル静的載荷試験

a) 橋軸方向供試体

橋軸方向供試体の荷重と鉛直たわみの関係を図-15~16 に示す。コンクリート引張側無視 $n=7$ での梁理論による解析値を併記した。計測値は解析値よりも大きくなった。以下に特徴を示す。

①砂接着

砂接着を施した供試体は剛性の変化が緩やかであり、他の供試体と比較して曲げひび割れの発生荷重が約 55%、最大耐力が

約 25%高い効果が得られた。

②スタッド

スタッドを溶植した供試体は、スタッドの無い供試体と比較して約 15%の最大耐力の増加が見られた。

③Uリブ高さ

Uリブ高さ 100mm の供試体は 150mm の供試体と比較して、最大耐力が約 30%増加し、高いじん性を備えている。

b) 橋軸直角方向供試体

橋軸直角方向供試体の荷重と鉛直たわみの関係を図-17~18 に示す。コンクリート引張側無視 $n=7$ での梁理論による解析値を併記した。曲げひび割れ発生までは、計測値と解析値は良く一致した。以下に特徴を示す。

①砂接着

砂接着を施した供試体は剛性の変化が緩やかであり、他の供試体と比較して曲げひび割れの発生荷重が約 1.5~2.3 倍高い効果が得られた。

②スタッド

スタッドを溶植した供試体は、スタッドの無い供試体と比較して約 10%の最大耐力の増加が見られた。

③Uリブ高さ

Uリブ高さ 100mm の供試体は 150mm の供試体と比較して、曲げひび割れの発生荷重が約 25%、最大耐力が約 15%低下した。

④鋼板厚

鋼板厚さ 6.0mm の供試体は 4.5mm の供試体と比較して、曲げひび割れの発生荷重が約 25%増加し、最大耐力が約 15%高い効果が得られた。

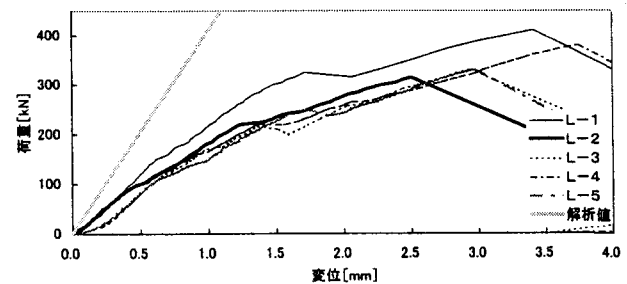


図-1 5 荷重-たわみ曲線 (橋軸方向供試体 砂・スタッド着目)

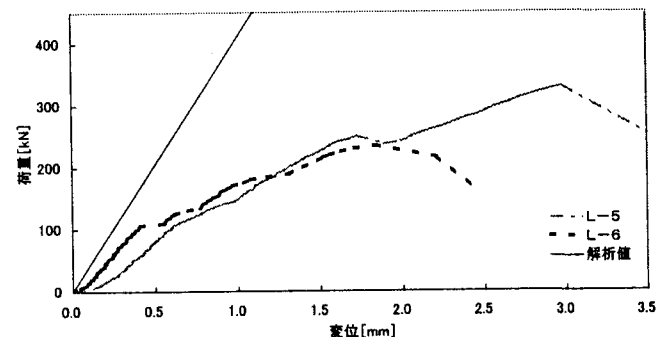


図-1 6 荷重-たわみ曲線 (橋軸方向供試体 Uリブ高さ着目)

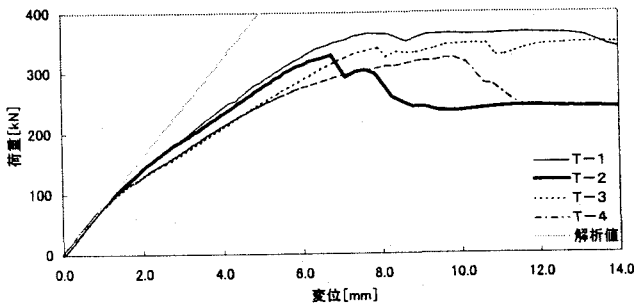


図-17 荷重-たわみ曲線（橋軸直角方向供試体 砂・スタッド着目）

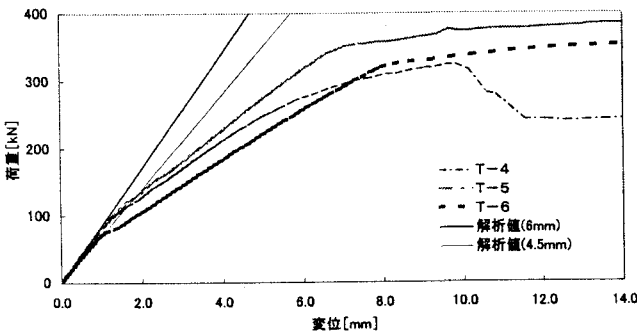


図-18 荷重-たわみ曲線（橋軸直角方向供試体 Uリブ高さ・鋼板厚着目）

5. 疲労耐久性に影響を与える因子

(1) コンクリート

a) 押し抜きせん断耐力

RC床版は梁状化した床版の押し抜きせん断耐力による評価式により疲労耐久性を評価した研究が知られている。¹⁾

TYPE-1 供試体の破壊状況はRC床版の破壊と同様に押し抜きせん断破壊であること、Uリブ上コンクリートかぶり厚およびコンクリート強度が押し抜きせん断強度に大きく影響を与えることから、コンクリートのせん断破壊角度を 45° 、Uリブ位置ではUリブ上のコンクリートのみ有効として押し抜きせん断耐力を計算した。TYPE-1 の押し抜きせん断耐力に対して、Uリブ上のかぶりコンクリート厚を 100mm としたものは 1.6 倍、さらに、コンクリート強度を TYPE-2 のコンクリート強度と同じにしたものは 1.8 倍であった。コンクリートかぶり厚とコンクリート強度が大きいことが TYPE-1 に比べて、TYPE-2 の疲労耐久性を著しく大きくしたと考えられる。

b) 膨張材

TYPE-2 供試体には試験終了後もほとんどひび割れが生じていなかった。膨張材はひび割れ抑制に有効であったと考えられる。

c) 鋼とコンクリートとの付着

TYPE-2 では、鋼板とコンクリートとの一体化を損なわないようにする目的で、鋼板とコンクリートとの接触面に砂を接着させている。梁モデル静的載荷試験結果より、鋼板に砂を接着

させると、鋼板とコンクリートとの界面に働く水平せん断力に接着された砂が抵抗するため、底鋼板とコンクリートとのずれが小さくなり、剛性が大きくなる。したがって、疲労耐久性を向上させる要因と考えられる。

(2) 鋼部材

梁モデル静的載荷試験結果より、鋼板厚を 4.5mm から 6.0mm に増厚すると剛性の向上が認められた。また、中立軸を押し下げることによりせん断抵抗面積が増加するため押し抜きせん断耐力も増加する。よって、板厚増は床版の疲労耐久性を向上させる要因となる。

梁モデル静的載荷試験結果より、Uリブ高さが 150mm のものは、橋軸直角方向の剛性および耐力は向上するが、橋軸方向の耐力およびじん性が大幅に低下し、橋軸直角方向のひび割れ発生および梁状化の発現を早めたことが判明した。このため、床版としての疲労耐久性が低下したものと考えられる。

6. まとめ

本研究により得られた本床版の特性をまとめると以下のとおりである。

- ①TYPE-1、TYPE-2 ともにRC床版と同等以上の高い疲労耐久性を有している。
- ②TYPE-1、TYPE-2 ともに継手部が弱点となることはなかった。
- ③TYPE-1 の疲労損傷メカニズムは、Uリブ位置での橋軸直角方向ひび割れの進展により、版から梁状に構造が変化したことによりコンクリートが押し抜きせん断破壊するというものであった。
- ④TYPE-2 の疲労耐久性はTYPE-1 と比較して著しく向上した。Uリブ上コンクリートかぶり厚の増加によりせん断耐力を向上し、梁状化の発現を遅らせたことにより、床版としての耐久性が向上したものである。また、鋼板への砂接着、膨張材の使用などについても有効性が認められた。

輪荷重走行試験は、建設省土木研究所、(財)土木研究センター、民間企業 19 社 17 グループによる「道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：道路橋RC床版のひび割れ損傷と耐久性，1991.12
- 2) 建設省土木研究所：道路橋床版の輪荷重走行試験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2），共同研究報告書第233号，1999.10