

# トラス型ジベルを用いた長支間合成床版の実用化に関する実験的研究

## Experimental Study on Development of Long-span Composite Slabs with Truss-typed Shear Connectors

山本晃久\*, 橋本靖智\*\*, 鹿島孝之\*\*\*, 済藤英明\*\*\*\*, 水口和之\*\*\*\*\*, 鈴木規生\*\*\*\*\*, 堀川都志雄\*\*\*\*\*  
Akihisa YAMAMOTO, Yasusato HASHIMOTO, Takayuki KASHIMA, Hideaki SAITOU, Kazuyuki MIZUGUCHI,  
Norio SUZUKI and Toshio HORIKAWA

- \*工修 川崎重工業(株)鉄構・機器事業部橋梁・水門総括部 グループ長 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118)
- \*\*工修 川崎重工業(株)鉄構・機器事業部市場開発グループ 主事 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118)
- \*\*\*工修 川崎重工業(株)鉄構・機器事業部橋梁・水門総括部 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118)
- \*\*\*\* 川崎重工業(株)技術総括本部関東技術研究所構造システム研究部 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118)
- \*\*\*\*\* 日本道路公団名古屋建設局構造技術課 課長代理 (〒460-0008 名古屋市中区栄 4-1-1)
- \*\*\*\*\* 日本道路公団名古屋建設局構造技術課 (〒460-0008 名古屋市中区栄 4-1-1)
- \*\*\*\*\* 工博 大阪工業大学 工学部土木工学科 教授 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

In recent years, the development of bridge slabs with high strength and durability as well as low maintenance costs instead of the ordinary reinforced concrete slabs tends to be required strongly by several administrators. On the recent studies, the composite slabs tend to be attracted attention as the slabs that satisfy these requirements.

This paper reports a series of tests of the composite slab with Truss-typed Shear Connectors that intends to apply to the large span slabs of Toyota Junction Bridge. Principal results and conclusions are as follows,

- ①The composite slab with Truss-typed Shear Connectors has a high static bending strength for a simple supported span of 6m and a cantilever span of 2.5m.
- ②The stiffness and strength as formworks of the composite slab is enough high.
- ③This composite slab has high fatigue durability on the results of wheel trucking test.

**Key Words:** composite slab with Truss-typed Shear Connectors, large span slab, wheel trucking test

### 1. はじめに

近年、少主桁橋等の合理化・省力化橋梁の建設が進められており、この種の橋梁床版には耐久性のある長支間床版の適用が不可欠であり、PC床版が採用されるのが一般的であった。しかし、架設時の制約（工期短縮や軽量化など）によりPC床版の採用が難しい場合があり、PC床版に代わる耐久性のある床版形式が求められ、最近の研究<sup>1)~3)</sup>により合成床版がこれらの要求を満たす床版として注目されつつある。これらの合成床版の特長としては、以下に示すとおりである。

- ①コンクリート打設時の型枠および支保工が不要であり、現場作業の省力化や工期の短縮が可能である。
- ②RC床版や一方向PC床版に比べて床版厚を薄くすることができ、死荷重の軽減が可能である。
- ③底鋼板が強度部材として荷重に抵抗するため、鋼断面が大きく、高い耐荷力および耐久性を有する。

一方、著者らの一部は、平成2~6年にかけて多主桁橋床版を対象に、トラス型ジベルを用いた合成床版を開発・実用化するための一連の実験を実施し、トラス型ジベルのずれ止め特性や合成床版としての耐荷力および耐久性の検証を行った<sup>4), 5)</sup>。

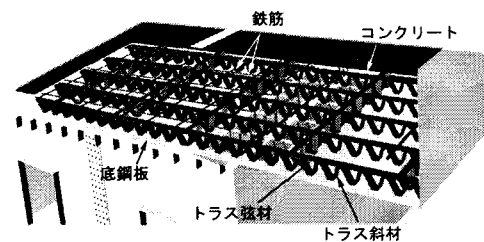


図-1 トラス型ジベル合成床版の概要

トラス型ジベル合成床版とは、図-1 に示すように、トラス斜材とトラス弦材とからなるトラス型ジベルを底鋼板に溶接し、ずれ止めとしたもので、底鋼板とコンクリートとを合成一体化した床版である。本合成床版は、前述のように、多主桁橋床版としての機能検証を完了し、実用化しているが、床版の適用支間の増大にともない、長支間床版としてトラス型ジベル合成床版を用いた場合の機能検証を行うことが急務となった。

このような状況を受けて、本合成床版の長支間化における問題点を整理し、耐荷力および疲労耐久性の検討を行うべく一連の実験を実施した。これらの結果について報告するものである。

表-1 実験種類および供試体の概要

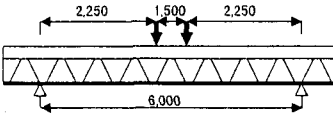
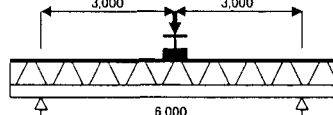
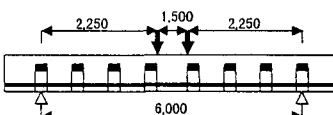
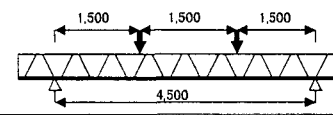
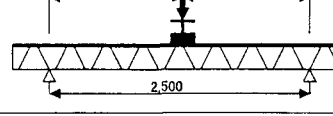
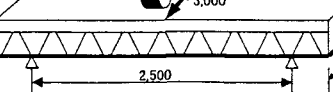
実験種類		実験項目	実験方法	供試体名称	供試体寸法
静的耐荷力実験(S)	主筋方向耐荷力試験(SL)	正曲げ実験		SL1	6500 × 270 × 1000
		負曲げ実験		SL2	6500 × 270 × 1000
	配力筋方向耐荷力試験(ST)	継ぎ手無し実験		ST1	6500 × 270 × 1500
		継ぎ手有り実験		ST2	6500 × 270 × 1500
型枠剛性実験	支間方向型枠剛性実験(SK)	正曲げ実験		SK1	5000 × 211 × 1000
		負曲げ実験		SK2	3000 × 211 × 1000
輪荷重走行実験(T)		輪荷重の繰り返し載荷に対する合成床版の疲労耐力およびひびわれ発生状況を調査し、疲労特性を把握する。		T1	4500 × 200 × 2800

表-2 使用したコンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kgf/m <sup>3</sup> )				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	10±2.5	48.0	4.0±1.5	46.2	161	336	839	982	0.89

※普通ポルトランドセメント使用

なお、本論文の内、疲労耐久性を確認するための輪荷重走行試験に関しては、建設省土木研究所、土木研究センターおよび民間 21 社が共同で行った、「道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価方法の開発に関する共同研究」の一部の成果に基づくものである。

## 2. 実験概要

トラス型ジベル合成床版の長支間化に対する機能確認のための実験種類および供試体概要を表-1に示す。

静的耐荷力実験および型枠剛性実験に関しては、床版支間 6m、片持ち支間 2.5m の長支間床版における供用時およびコンクリート打設時の耐荷力を検証するために、梁供試体を用いて静的載荷を行った。また、輪荷重走行実験に関しては、床版支間 3m の連続版として設計した版供試体を用いて輪荷重走行を行い、疲労耐久性を検証した。

表-3 コンクリートの材料試験結果

供試体	材齢28日		載荷実験時	
	圧縮強度	静弾性係数	圧縮強度	静弾性係数
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
SL1	31.7	3.15 × 10 <sup>4</sup>	36.6	—
SL2			31.7	3.15 × 10 <sup>4</sup>
ST1			32.9	2.99 × 10 <sup>4</sup>
ST2	—	—	35.5	—
T1	—	—	38.5	2.82 × 10 <sup>4</sup>

合成床版に使用したコンクリートの設計基準強度は、30N/mm<sup>2</sup>とした。示方配合を表-2に、コンクリートの材料試験結果を表-3に示す。

## 3. 静的耐荷力実験

### (1) 実験供試体および載荷方法

実験供試体は、床版支間 6m、片持ち支間 2.5m の床版

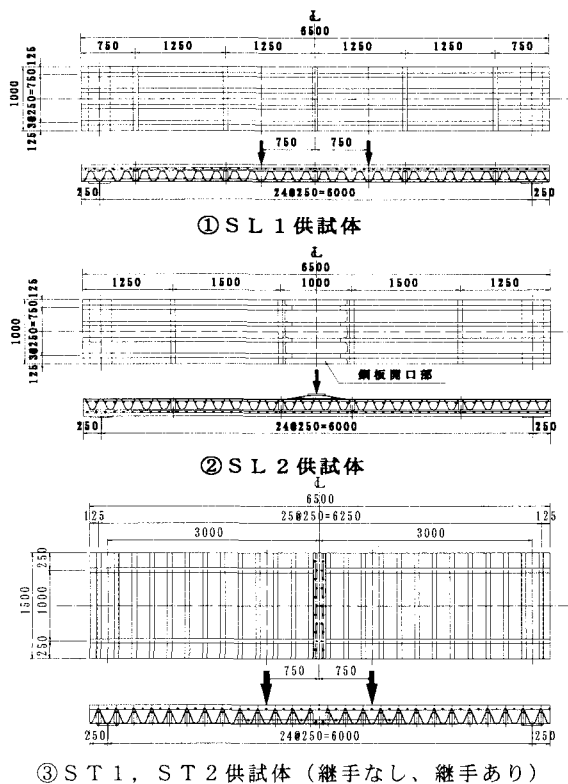


図-2 静的耐力実験の供試体形状および荷重方法

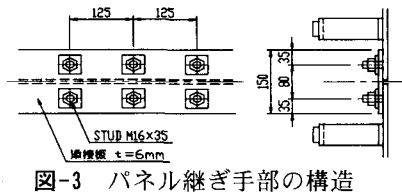


図-3 パネル継ぎ手部の構造

を想定して実物大のモデルを用いた。供試体形状および荷重方法を図-2に示す。また、供試体の鉄筋配置は、上段には主筋方向および配筋方向とも D19 (SD345) 125 ピッチで配置し、下段には合成床版パネル継ぎ手を想定して配筋方向のみ D22 (SD345) 125 ピッチで配置した。なお、パネル継ぎ手部の構造は、図-3 に示すように、底鋼板の上に M16 スタッドボルトを 125 ピッチで配置し、6mm の添接板で連結する構造であるが、普通ボルトでの添接となるため応力伝達部材としては考慮せず、鉄筋で抵抗する RC 断面とした。

荷重方法は、図-2 に示すように、2 点集中荷重または 1 点集中荷重にて荷重した。また、荷重は供試体の弾性域で 3~4 回の予備荷重を繰り返し、その後荷重荷重が上昇しなくなるまで、すなわち供試体が終局状態に至るまで荷重を漸増させた。

## (2) 実験結果

主筋方向正曲げ実験 (SL 1) および負曲げ実験 (SL 2) における荷重と支間中央変位の関係を図-4, 5 に示す。ここで、設計荷重とは合成後死荷重と B 活荷重に

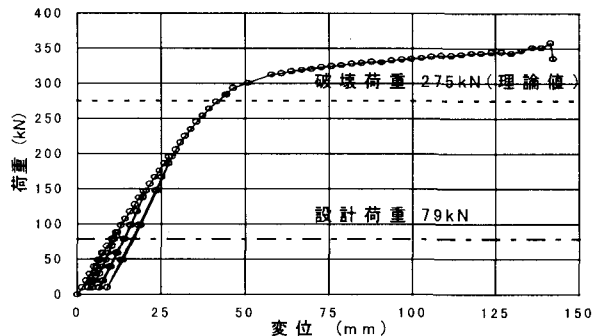


図-4 荷重-支間中央たわみ (SL 1)

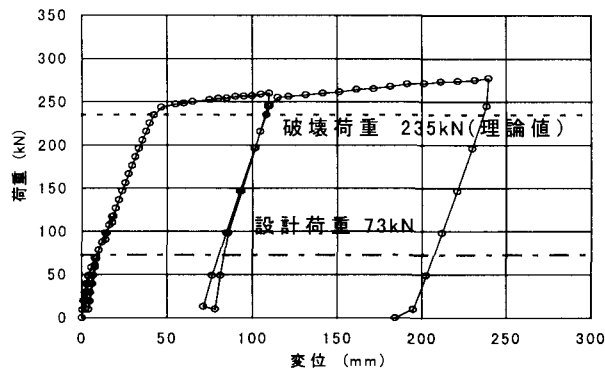


図-5 荷重-支間中央たわみ (SL 2)

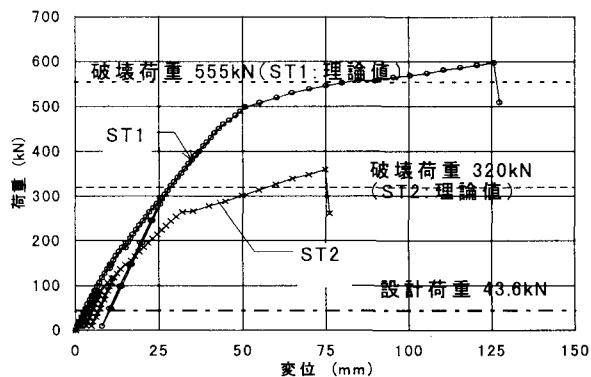
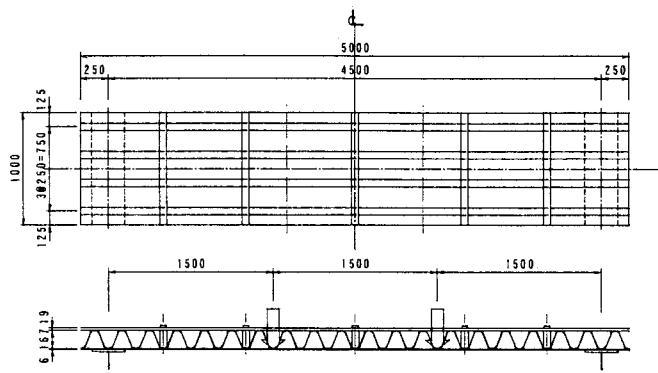


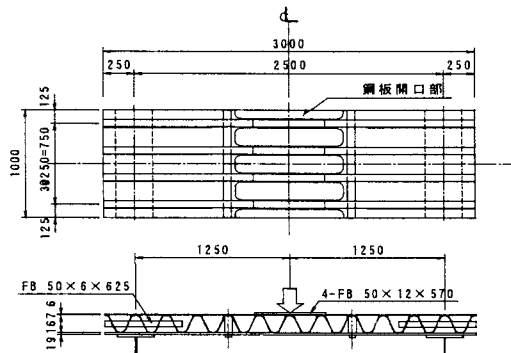
図-6 荷重-支間中央たわみ (ST 1, ST 2)

よって発生する曲げモーメントと等価になるような荷重である。破壊荷重は、正曲げで設計荷重の 4.5 倍にあたる 358kN、負曲げで設計荷重の 3.8 倍にあたる 277kN であり、十分な耐力があることが確認できた。また、本構造は底鋼板が降伏した後に、コンクリートが圧壊する破壊性状を示し、粘り強い変形能を示すことがわかった。

配筋方向の継ぎ手無し実験 (ST 1) および継ぎ手有り実験 (ST 2) における荷重-支間中央変位の関係を図-6 に示す。本図より、継ぎ手がない供試体の破壊荷重は、ほぼ理論値に近い結果であり、主筋方向に配置されたトラス型ジベルが底鋼板とコンクリートとの配筋方向の合成に寄与することがわかった。一方、継ぎ手がある供試体の破壊荷重は、設計荷重に対して 8.3 倍であり、十分な耐力があることが確認できた。また、その変形性状から、粘り強い変形能を示すことがわかった。



① SK 1 供試体



② SK 2 供試体

図-7 型枠剛性実験の供試体形状および荷重方法

#### 4. 型枠剛性実験

##### (1) 実験供試体および荷重方法

トラス型ジベル合成床版は、前死荷重に対してトラス形状の鋼型枠で抵抗する構造である。この場合、トラス格点の交点は溶接長を確保するために一致しておらず、疑似ラーメン構造となっている。したがって、この影響を把握するために、床版支間部および張出部に着目して、静的な型枠剛性試験を実施し、前死荷重状態での終局耐力および変形量を実験的に検証した。

供試体の形状寸法および荷重方法は、図-7 に示すとおりである。なお、荷重方法が2点集中荷重または1点集中荷重であるため、供試体は床版支間 6m、片持ち支間 2.5m の床版を想定して、着目点における前死荷重状態（等分布荷重）での曲げモーメントとせん断力が再現できるような形状寸法とした。

##### (2) 実験結果

型枠剛性に関する支間方向正曲げ実験（SK 1）の荷重-支間中央たわみの関係、および荷重-たわみ分布を図-8, 9 に示す。また、支間方向負曲げ実験（SK 2）の荷重-支間中央たわみの関係および荷重-たわみ分布を図-10, 11 に示す。ここで、解析値は、供試体の上弦材、斜材および底鋼板を梁要素としてモデル化した面内フレーム解析（線形）による値である。

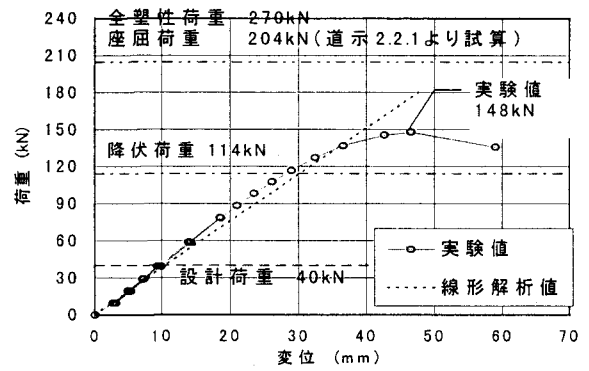


図-8 荷重-支間中央たわみ (SK 1)

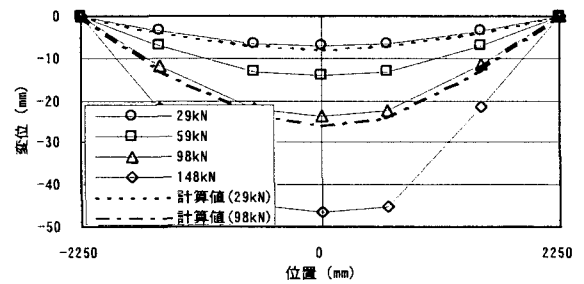


図-9 荷重-たわみ分布 (SK 1)

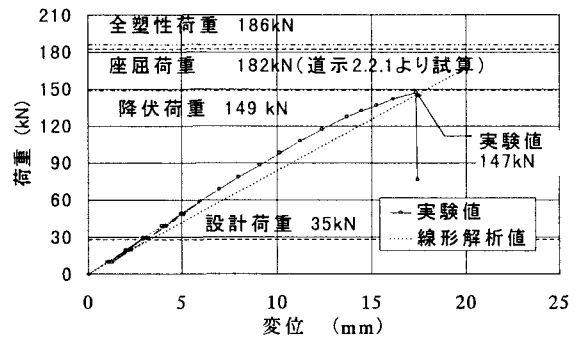


図-10 荷重-支間中央たわみ (SK 2)

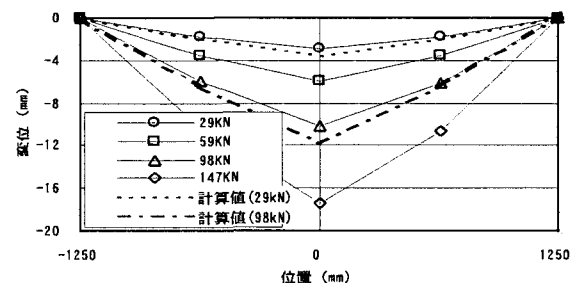


図-11 荷重-たわみ分布 (SK 2)

##### a) 支間方向正曲げ実験

図-8 より、破壊荷重は、設計荷重（前死荷重）40kN に対して 3.7 の 148kN であり、十分な耐力があることが確認できた。また、破壊モードは支間中央の上弦材降伏後の座屈破壊であり、道路橋示方書の基準耐力曲線<sup>6)</sup>を用いて、上弦材の座屈モードから上弦材格間長/2 を固定間距離とした(式1)で表されることがわかった。

$$\sigma_{cr} = \alpha \cdot \sigma \cdot \sigma_y \quad \text{--- (式1)}$$

ここで、 $\alpha$  : 二次曲げの影響による低減係数

$$\begin{aligned} \overline{\sigma} &= 1.0 & (\overline{\lambda} \leq 0.2) \\ \overline{\sigma} &= 1.109 - 0.545\lambda & (0.2 < \overline{\lambda} \leq 1.0) \\ \overline{\sigma} &= 1.0 / (0.773 + \lambda^2) & (1.0 < \overline{\lambda}) \end{aligned}$$

ここに、 $\overline{\lambda} = (1/\pi) \sqrt{(\sigma_y/E) \cdot l/r}$

l : 上弦材格間長 / 2

図-9 より、荷重漸増時のたわみ分布を示すが、設計荷重相当の載荷荷重 40kN 時の最大たわみは、床版支間の 1/500 以下である約 9mm 程度であり、型枠剛性として問題ないことがわかった。また、線形解析値との比較においても良い一致を示している。

#### b) 支間方向負曲げ実験

図-10 より、破壊荷重は、設計荷重（前死荷重）35kN に対して 4.2 倍の 147kN であり、十分な耐荷力があることが確認できた。また、破壊モードはハンチ開口端部の未補強区間の座屈破壊であり、正曲げ供試体と同様に道路橋示方書の基準耐荷力曲線を用いて耐荷力を推定できることがわかった。

図-11 より、荷重漸増時のたわみ分布を示すが、設計荷重相当の載荷荷重 35kN 時の最大たわみは約 4mm 程度であり、型枠剛性として問題ないことがわかった。また、線形解析値と良く一致している。

## 5. 輪荷重走行実験

### (1) 実験供試体および載荷方法

供試体の形状寸法を図-12 に示す。本試験における供試体は、荷重条件をB活荷重および1方向当たりの大型車の計画交通量 2,000 台/日以上とする床版支間 3.0m の連続版として設計し、床版厚は本床版の最小床版厚である 20cm とした。また、中央から橋軸方向に 625mm 離れた位置に底鋼板のパネル継手部を設け、継手部が疲労耐久性上問題にならないかどうかを確認した。供試体は設計における床版支間 3.0m と、試験時における支間中央部での曲げモーメントが等しくなるように、支間 2.5m で単純支持した。

輪荷重は、床版供試体の支間中央部に 20×50cm の載荷ブロックを並べ、橋軸方向に中央部から±1.5m の範囲で移動輪荷重を載荷させた。載荷荷重は図-13 の走行回数と載荷荷重の関係図<sup>7)</sup>に示すように、157kN(16tf) から 4 万回載荷毎に 19.6kN(2tf) ずつ増加させ 392kN(40tf) 合計 52 万回まで実施した。

### (2) 実験結果

図-13 に示すように、平成 8 年の道路橋示方書に基づき設計した RC 床版の供試体（以下 RC8 と示す）は荷重値 274kN(28tf)、走行回数 25.6 万回で押し抜きせん断破壊<sup>8)</sup>に至ったが、本試験の結果、トラス型ジベル合成床版は本試験の最終段階である載荷荷重の 392kN(40tf) でも破壊には至っておらず、急激なたわみ量や変形量の増大も認められなかった。

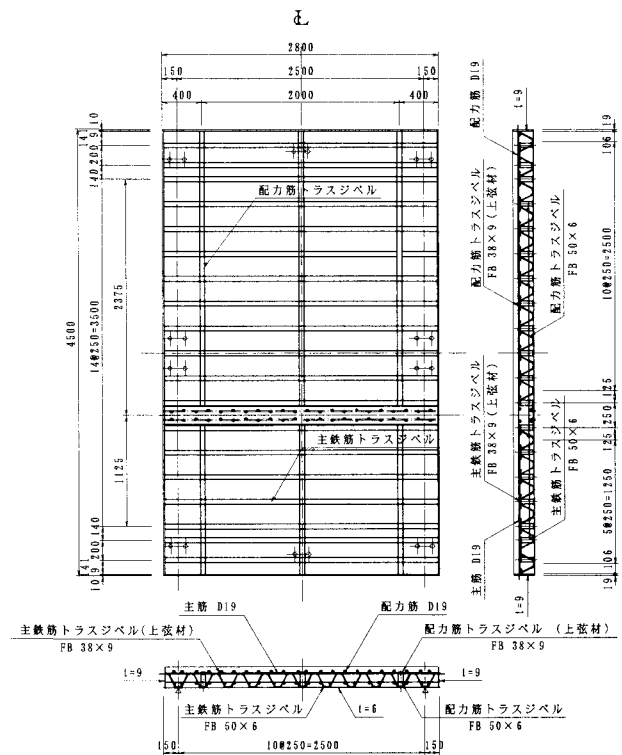


図-12 輪荷重走行実験供試体（T1）の形状寸法

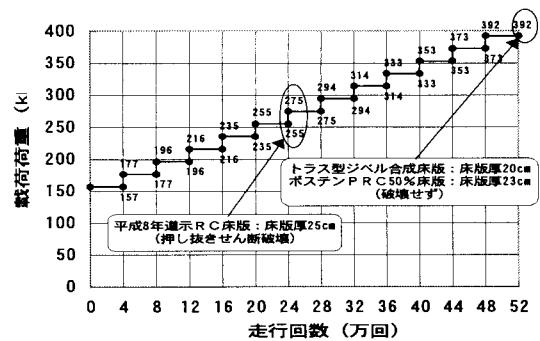


図-13 走行回数－載荷荷重の関係

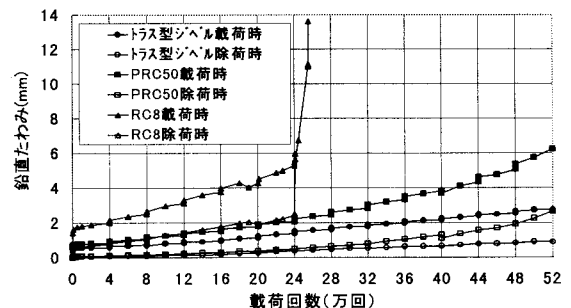


図-14 走行回数－床版中央たわみの関係

図-14 に走行回数と床版中央の静的載荷時のたわみの関係を示す。トラス型ジベル合成床版の最終載荷段階となる 392kN(40tf)・走行回数 52 万回時点のたわみ量が 2.7mm、除荷時のたわみ量が 0.9mm であり、ポステン

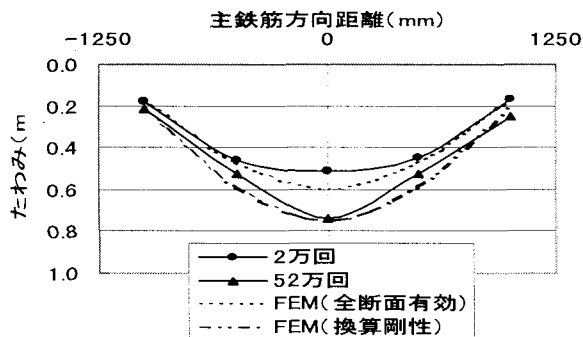


図-15 主筋方向のたわみ分布

PRC床版（以下 PRC50 と示す）と比較すると、載荷時のたわみ量が約 40%，除荷時のたわみ量が約 30%に留まっている。また、継手部の目開き量についても、載荷荷重 392kN(40tf)・走行回数 52 万回時点で 0.3mm 程度で、除荷時についてもほとんど増加はなかった。

図-15 に走行回数 2 万回と 52 万回時点における主筋方向（橋軸直角方向）の 157kN(16t)換算弾性たわみ分布性状を示す。図中の FEM 解析は、合成床版を等方性のシェル要素でモデル化し、床版中央部に輪荷重（16t）を載荷した場合の計算結果である。ヤング係数比を  $n=10^9$  として、コンクリート部分を全断面有効にした場合と、引張側を無視した場合（換算剛性）についてそれぞれ算出した値を使用した。この結果から床版剛性は走行回数 2 万回、52 万回の時点でそれぞれ全断面有効とした場合の剛性の 116%，81%と推定される。

さらに、主筋方向で推定した剛性を用いた FEM 解析値と実験値の配力筋方向（橋軸方向）のたわみ分布性状とを、図-16 に比較した。走行回数 2 万回、52 万回どちらの時点も解析値と実験値がほぼ一致しており、等方性版と考えると問題のないことが確認できる。

## 6. まとめ

本文では、トラス型ジベル合成床版の長支間化機能を確認するための実物大静的耐荷力実験、型枠剛性実験および輪荷重走行実験の結果を報告した。

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

- ①支間方向の静的耐荷力は、床版支間 6m および張出し支間 2.5m クラスに対して十分な曲げ耐荷力がある。
- ②配力筋方向の静的耐荷力は、継ぎ手でも設計荷重の 8 倍以上あり、十分な耐荷力がある。また、継ぎ手部の設計は RC 断面として設計してよい。
- ③型枠としての終局耐荷力は、床版支間 6m および張出し支間 2.5m クラスに対して前死荷重の 4 倍程度あり、十分な耐荷力がある。また、耐荷力は道路橋示方書の基準耐荷力曲線を用いて推定できる。
- ④型枠としての剛性は、前死荷重時 4~9mm 程度の変位量であり、十分な型枠剛性がある。

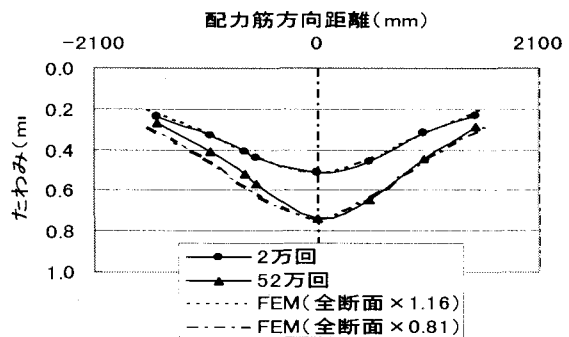


図-16 配力筋方向のたわみ分布

- ⑤トラス型ジベル合成床版は、H8RC床版、ポステンPRC床版と比べて、相対的に優れた疲労耐久性がある。
- ⑥主筋・配力筋方向のたわみ分布性状を FEM 解析結果と比較することにより、52 万回の繰り返し載荷を受けても等方性版として挙動していることを確認した。

上記の結果より、本合成床版は長支間床版としての基本機能は満足していると考えられる。今後は、連続合成桁への適用など、主桁作用を受け持つ場合の中間支点上における負曲げ域でのひびわれ制御や桁との連結構造の検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1)阿部幸夫，久保圭吾，高木優任，武内隆文：各種合成床版の構造と適用例，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp23~30，1998年11月
- 2)土木研究所，他：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），第221号，平成11年3月
- 3)土木研究所，他：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2），第233号，平成11年10月
- 4)中井博，松本雅治，中村求，山本晃久，真田健司：トラス型ジベルを用いた合成床版の耐荷力と疲労強度に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.37A，pp1357~1365，1991年3月
- 5)中井博，堀川都志雄，堀松正芳，真田健司：トラス型ジベルを用いた合成床版の設計・製作・施工について，土木学会論文集 No.486/VI-22，pp65~74，1994年3月
- 6)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，pp121~124，平成8年12月
- 7)内田賢一，西川和廣：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討，土木学会第53回年次学術講演会，CS-13，1998.10
- 8)西川和廣，内田賢一：既設床版の疲労耐久性に関する実験的検討，第22回日本道路会議論文集，pp836~837，1997.12
- 9)土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物 平成9年版