

## 孔あき T 型リブを用いた合成床版 “K-スラブ” の静的曲げ載荷試験

### Experimental Bending Tests on Composite Slab “K-SLAB” with Perfbond T-shaped Beams

川畑治\*<sup>1</sup>, 武山真樹\*<sup>2</sup>, 大垣賀津雄\*<sup>3</sup>, 松井繁之\*<sup>4</sup>

Osamu Kawabata, Masaki Takeyama, Kazuo Ohgaki, Shigeyuki Matsui

\*<sup>1</sup> 修士(工) 川崎重工業(株) 装置・土木機械本部 技術部 (〒675-0155, 兵庫県加古郡播磨町新島 8 番)

\*<sup>2</sup> 川崎重工業(株) 建設機械ビジネスセンター 資材部 (〒675-1113, 兵庫県加古郡稲美町 2680 番地)

\*<sup>3</sup> 博士(工) 川崎重工業(株) 営業推進本部 事業開発部 (〒105-6116, 東京都港区浜松町 2-4-1)

\*<sup>4</sup> フェロー 工博 大阪工業大学 (〒614-8289, 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4)

The composite slab with the truss type shear connectors has already developed for about ten years by authors. However, this type slab was high cost, and low competitive edge in market. Then, a new composite slab with perfbond T-shaped beams was designed. This new type composite slab was named "K-slab". And, it was experimented on bending moment. These kinds of the experiment were a sagging bending test of slab, a negative bending test of slab, and a negative bending test for composite girder with this slab. This paper shows that the newly developed "K-slab" possesses static load capacity enough.

**Key words:** Composite slab, Perfbond shear connectors, Static loading, Crack control, Bending test

#### 1. はじめに

少主桁橋等の合理化・省力化橋梁の建設が進められる中、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、これまでの研究<sup>1)~3)</sup>により合成床版がこれらの要求を満たす構造形式として定着してきている。

一方、筆者らの研究機関では平成 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試験を実施し、トラス型ジベルのずれ止め特性や合成床版としての耐力力および耐久性の検証を行った<sup>4), 5)</sup>。また、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なうことが急務となり、長支間化における問題点を整理し、耐力力および疲労耐久性の検討を行なうべく一連の試験を実施した<sup>6)~7)</sup>。

このような合成床版を開発した経緯はあるが、近年、更に公共事業コスト縮減の要請を受け、ずれ止めに孔あき T 型リブを用いた新タイプの合成床版 “K-スラブ” (図-1) を開発することとした。本形式の合成床版の耐力力等の検討を行なうべく、床版正曲げ試験、床版負曲げ試験、および合成桁としての負曲げ試験を実施した。ここでは、これらの結果について報告するものである。

#### 2. 実験概要

孔あき T 型リブを用いた合成床版に対する機能確認のための試験種類および供試体概要を表-1 に示す。

静的耐力試験に関しては、床版支間 6m、片持ち支間 2.4m の長支間床版における供用時の耐力力を検証するために、幅 1.2m の床版供試体を用いて静的載荷を行った。さらに、合成桁としての中間支点部床版の

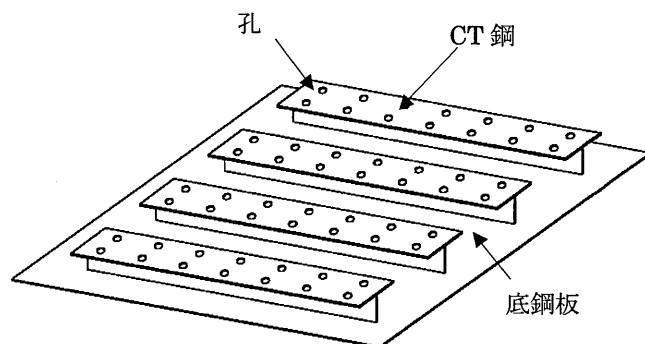


図-1 K-スラブ概要図

ひび割れ性状を確認するため、合成桁の負曲げ載荷試験を行なった。

合成床版に使用したコンクリートの設計基準強度は、 $30\text{N/mm}^2$ とした。示方配合を表-2、コンクリートの材料試験結果を表-3、鋼材材料試験結果を表-4 に示す。

#### 3. 静的耐力試験

##### (1) 実験供試体および載荷方法

試験供試体は、床版支間 6m、片持ち支間 2.4m の床版を想定して実物大のモデルを用いた。供試体形状および載荷方法を図-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力筋方向とも D19(SD345)を 125mm ピッチで配置した。

載荷方法は、図-2 に示すように、正曲げ試験は 2 点集中載荷、負曲げ試験は 1 点集中載荷にて行なった。また、設計荷重で 2 回、設計荷重の 2 倍程度で 2 回、設計荷重の 4 倍程度で 1 回、載荷と徐荷の繰り返し後、供試体が終局状態に至るまで荷重を漸増させた。

表-1 試験概要

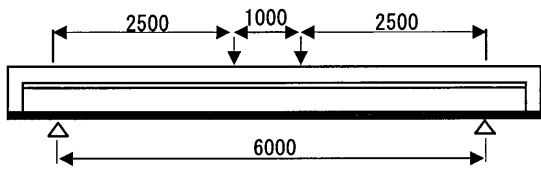
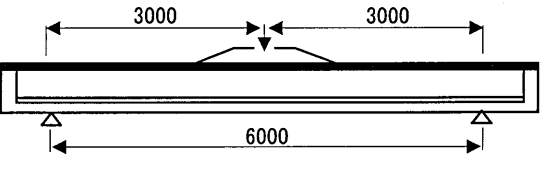
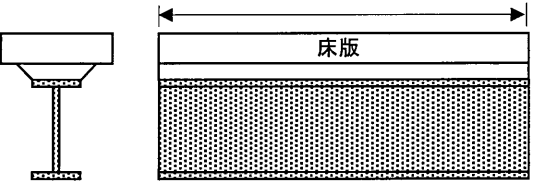
試験種類		試験項目	供試体
静的耐荷力確認	支間方向耐荷力	床版 正曲げ試験 支間 6m級の床版に対して支間部の正曲げモーメントに対する合成床版の静的曲げ耐荷力を調査する	 <p>想定破壊荷重：450kN（実降伏値より算出），最大変位：150mm</p>
	床版 負曲げ試験	片持ち支間 2.4m級の床版に対して片持ち部の負曲げモーメントに対する合成床版の静的曲げ耐荷力を調査する	 <p>想定破壊荷重：240kN（実降伏値より算出），最大変位：250mm</p>
ひび割れ分散確認	合成桁としての負曲げ試験	連続合成桁の中間支点負曲げ部に着目して、ひび割れ幅、ひび割れ間隔を調査し、ひび割れ分散効果を確認する。また、底鋼板剛性の影響度合いの確認も行なう	 <p>想定破壊荷重（上フランジ降伏）：2993kN（公称値より算出） 最大変位：31mm（鋼桁のみで抵抗すると考えた場合）</p>

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 (kg/m <sup>3</sup> )					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	混和材
20	8±2.5	50.0	4.5 ±1.5	46.4	167	335	810	948	0.888	20

表-3 コンクリートの材料試験結果

材齢	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
55日 (試験最終日)	41.2	2.8	28.4

表-4 鋼材の材料試験結果

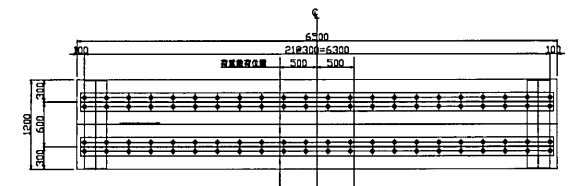
種類	板厚 (mm)	材質	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
底鋼板	6	SS400	308	436
CT型鋼	-	SS400	327	462
主鉄筋	D19	SD345	386	559
配力鉄筋	D22	SD345	377	557

(2) 床版正曲げ試験結果

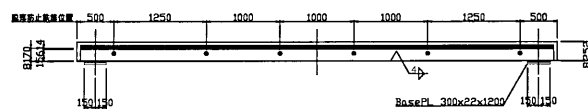
1) 鉛直変位

図-3に鉛直変位を示す。ここで、鉛直変位は支間中央の値である。計画通りの荷重ステップを行ったあと、圧縮側となる床版上面コンクリートが圧壊するまで荷重を行った。

底鋼板が降伏した 500kN 付近（設計荷重の約 5 倍）から非線形性を示し、その後、急激に耐荷力低下することなく鉛直変位が 100mm 程度発生（荷重 566kN）



(a) 正曲げ試験供試体



(b) 負曲げ試験供試体

図-2 静的耐荷力試験供試体

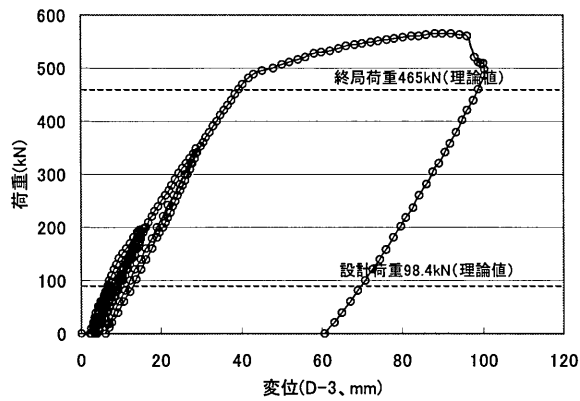


図-3 正曲げ試験鉛直変位

するまで変形しており、靱性に富んだ構造であるといえる。図中に示す設計荷重とは、支間 6m で合成後死荷重（舗装 75mm）と B 活荷重によって発生する曲げと等価になる荷重を示し、終局荷重とは、実材料強度を用いて、等価応力ブロック法により求めた終局荷重を示している。

最終的な鉛直変位が 140mm 程度生じたトラス型ジベル合成床版<sup>6)</sup>に比べると、多少靱性に劣ることとなるが、設計荷重の 5 倍以上の十分な耐荷性能を有しているものといえる。

## 2) 床版断面のひずみ

図-4 に床版支間中央断面のひずみを示す。同図(a)より、断面ひずみ分布が、終局段階の 566kN を除いてほぼ線形を示しており、本床版構造が完全合成に近いことがわかる。また、同図 (b) より、底鋼板およびコンクリートは約 500kN で降伏域に達し非線形性が顕著に現れていることがわかる。

## 3) ひび割れ状況

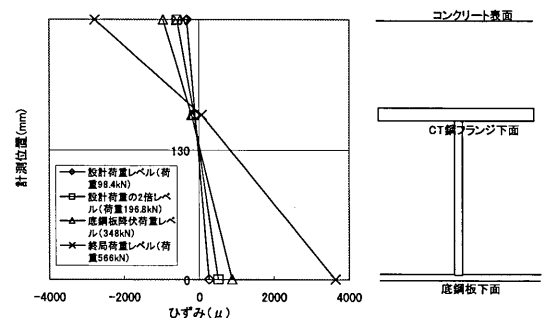
設計荷重の 2 倍レベルである 196.8kN 載荷時に供試体側面にほぼ等間隔でひび割れが発生したが、その後載荷荷重が増加してもひび割れ本数に目立った変化は見られず、ひび割れ幅の進展が見られるのみであった。終局荷重レベルの最終段階に等曲げ区間において、床版上面のコンクリートが圧壊した。

## (3) 床版負曲げ試験結果

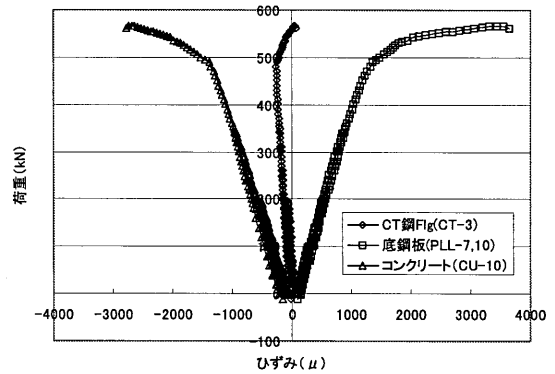
### 1) 鉛直変位

図-5 に鉛直変位を示す。ここで、鉛直変位は支間中央の値である。計画通りの載荷ステップを行ったあと、変位計の計測限界 180mm 手前まで載荷を行った。

図より、設計荷重の約 3.5 倍の 260kN 付近から非線形性が大きくなっていることがわかる。非線形性発現後、変位 75mm 付近で荷重が抜けたのは、ハンチ部に水平方向の貫通ひび割れが生じて、支間中央での剛性が「ハンチ厚+床版厚」から「ハンチ厚と床版厚の重ね梁」に変わったためと考えられる。その後、正曲げ



(a) 断面内ひずみ分布



(b) T 型リブ、底鋼板およびコンクリートのひずみ

図-4 正曲げ試験ひずみ

試験体と同様、非線形性発現後も急激なたわみ増加は見られず、最終的に変位計の計測限界である 180mm まで変形したことから、靱性に富んだ構造であるといえる。終局段階でコンクリートのひび割れが底鋼板に達し、且つ底鋼板及び鉄筋が降伏した後は、CT 型鋼と底鋼板の鋼部材のみで断面力に抵抗していると考えられる。

## 2) 床版断面のひずみ

図-6 に床版支間中央断面の底鋼板、鉄筋および CT 型鋼フランジのひずみを示す。ここで、鉄筋においては両側面に貼り付けた 2 枚のゲージの平均値を、CT 型鋼フランジはフランジ表面に貼り付けたゲージの値を示している。

図より、鉄筋ひずみは設計荷重の約 4 倍の 300kN

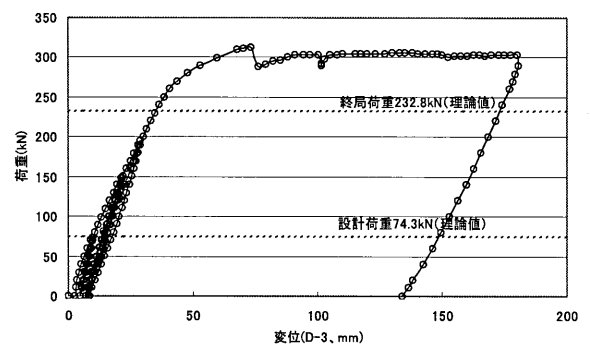


図-5 負曲げ試験鉛直変位

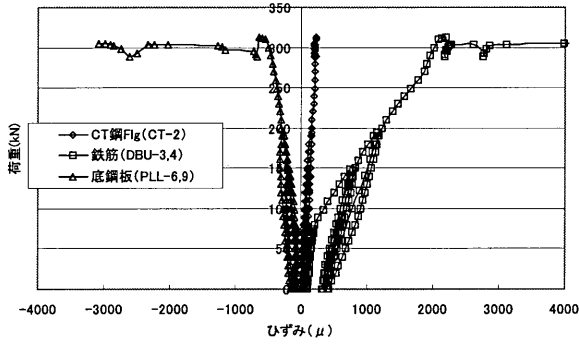


図-6 負曲げ試験ひずみ

付近で降伏ひずみに達し、非線形性が顕著に現れてくることがわかり、鉛直変位の非線形性発現が鉄筋の降伏と一致していることがわかる。

また、CT 鋼フランジのひずみは、終局状態まで線形を示している。これはコンクリートひび割れ後の引張力を主として鉄筋が負担するためと考えられる。

### 3) ひび割れ状況

設計荷重相当の 74.8kN 荷重時に既に多くのひび割れが発生した。また、断面変化位置となるハンチ付け根部からひび割れが発生した。最終的には、ほぼ配力鉄筋直上(配力鉄筋間隔 125mm)でひび割れが発生した。

## 4. 合成桁負曲げ載荷試験

### (1) 試験供試体および荷重方法

試験供試体は、中間支点部の実寸床版厚 260mm を有する幅 1200mm の合成床版と鋼桁を結合した合成

桁とした。供試体の基本寸法を図-7に示す。合成床版は、製作上の観点から継手を設けているが、試験結果の対象性からその影響はなかった。

図-7に示すように、鋼桁は I 断面の 1 本主桁に簡略化し、上側鉄筋が降伏するまで鋼桁が降伏や座屈に至らないように断面決定し補剛した。また、床版と鋼桁の結合部材については、頭付きスタッドとし、上側配力鉄筋の発生応力度が  $140\text{N/mm}^2$  となる荷重載荷時のせん断力にて、許容せん断力以下となるよう鋼桁上フランジ上に  $\phi 22 \times 150$  を橋軸直角方向 4 本、橋軸方向には約 200mm ピッチで配置した。

一方、合成床版は 8mm (SS400) の底鋼板に CT 型钢を溶接したものである。CT 型钢は橋軸直角方向に 600mm 間隔で配置し、主鉄筋 D19 は 150mm 間隔で配置している。配力鉄筋 D22 は、上段のみ橋軸方向に 125mm 間隔で配置し、下側は底鋼板を構造部材とみなして配置していない。

実橋相当の負曲げモーメントを再現するため、供試体を上下反転した後、支間 10m となるように設置された支承上に供試体を載せ、支間中央部に 1 点荷重を行った。

荷重ステップは、図-8に示すように、まず、床版のひび割れ発生荷重レベル (1/2 設計応力度レベル: 鉄筋応力度  $50\text{N/mm}^2$ )、上側鉄筋応力度が  $100\text{N/mm}^2$  (設計応力度レベル) になる荷重レベル、および上側鉄筋応力度が許容応力度  $140\text{N/mm}^2$  になる荷重レベルまでそれぞれ 3 回づつ荷重除荷を行い、次に鉄筋応力度が降伏応力度  $345\text{N/mm}^2$  になる荷重レベルまでの荷重除荷を 1 回繰り返す、その後、鋼桁上フランジが降伏するまで荷重を漸増させた。

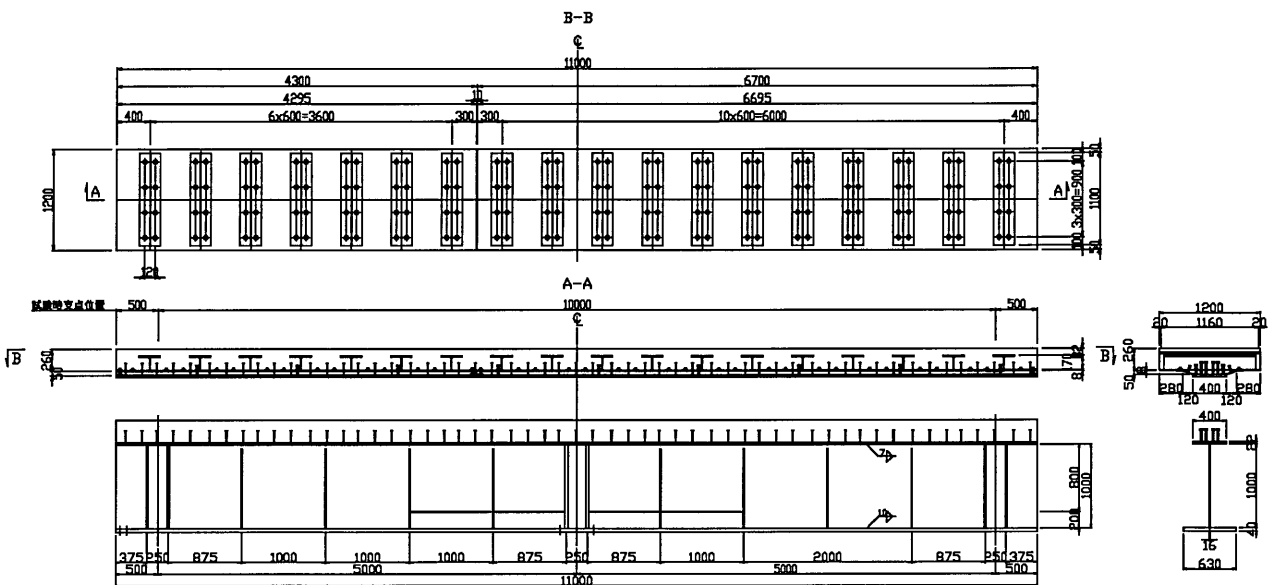


図-7 合成桁負曲げ試験供試体

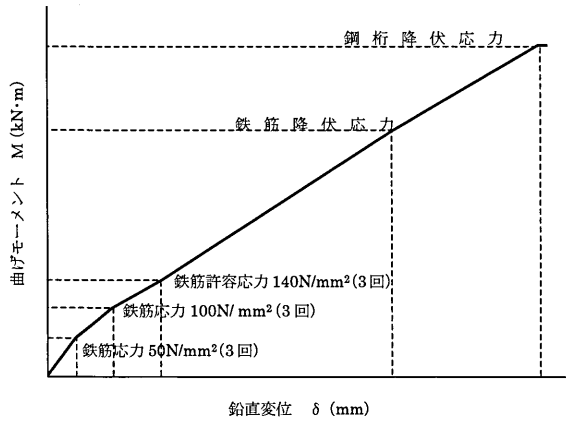


図-8 荷重増分ステップ

試験における主な計測項目を次に示す。データは荷重1ステップごとに採取するものとした。また、ひび割れ幅については、 $\pi$ ゲージで計測すると同時に図-8の点線で示した荷重レベルにおいて、目視によりひび割れ発生位置およびひび割れ幅を計測した。

- ① 供試体鉛直方向変位
- ② 底鋼板のひずみ
- ③ 主桁上フランジ，下フランジおよび腹板のひずみ
- ④ 床版ひび割れ幅
- ⑤ 合成床版内の配力鉄筋，CT型鋼のひずみ

## (2) 試験結果

### 1) 鉛直変位

載荷荷重と鉛直変位の関係を図-9に示す。同図中、縦軸は載荷荷重，横軸は載荷点直下の鉛直変位の計測値を示す。同図中には、ひび割れ発生までの全断面有効「鋼桁+コンクリート」としたときの計算値，ひび割れ発生後の「鋼桁+鉄筋+底鋼板」断面，さらに鋼桁断面のみの弾性線形計算値を示している。

結果、ひび割れが発生荷重レベル（載荷荷重235kN程度）までは「全断面有効」と「鋼桁+鉄筋+底鋼板」の中間の計算値に近い傾きを示しているが、ひび割れ

の増加とともに変化も増加し、徐々に「鋼桁+鉄筋+底鋼板」断面に漸近していくことがわかる。その後、載荷荷重1500kN程度で（鋼桁+鉄筋+底鋼板）断面ラインを下回ることから、底鋼板が抵抗断面として有効でなくなったと考えられる。

### 2) 中立軸位置の変化

荷重増分段階における鋼桁および底鋼板ひずみ分布変化を図-10(a)に示す。ひずみは、腹板を対して対称に貼付けたひずみゲージの平均値としている。計測点を供試体中央部から300mmにしたのは、供試体中央に荷重集中点の補強があるためである。同図より、鉄筋許容応力度140N/mm<sup>2</sup>レベルまでは、底鋼板を含むひずみ分布がほぼ線形を示しており、底鋼板が有効に作用していることがわかる。しかし、鉄筋降伏応力度レベルになると、底鋼板のひずみは線形を示さなくなり、ずれ止め位置でずれ変形が生じたものと思われ、抵抗断面として有効でなくなったことがわかる。

図-10(b)には中立軸位置の変化を示している。

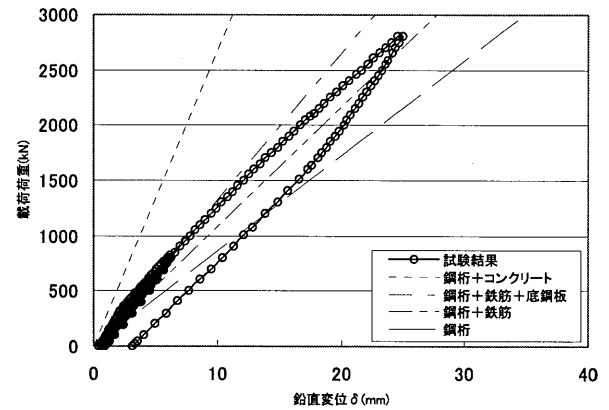
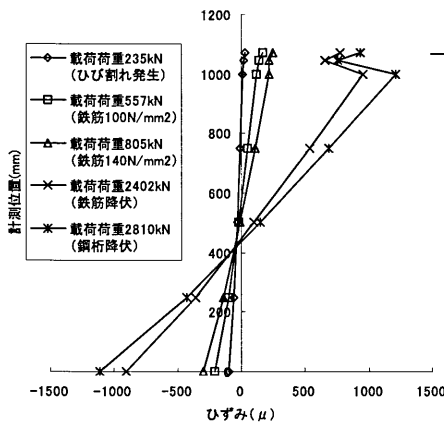
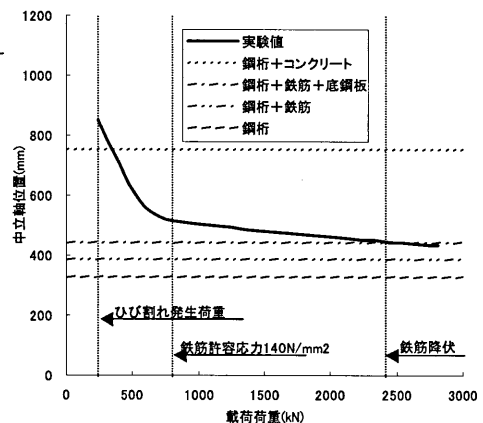


図-9 鉛直変位



(a) 鋼桁ひずみ分布の変化



(b) 中立軸位置の変化

図-10 中立軸位置の変化

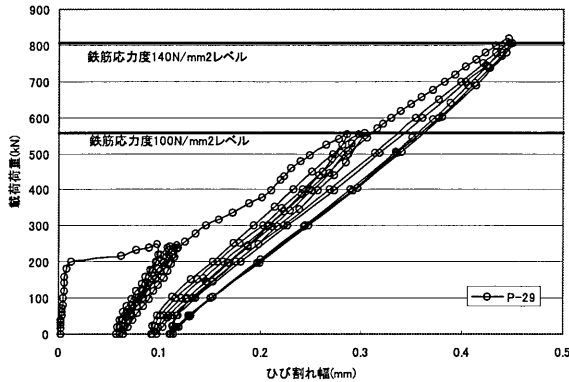


図-11 ひび割れ幅（ $\pi$ ゲージ結果）

ここで、中立軸位置の変化には、鋼桁の高さ方向のひずみ分布から、圧縮から引張へ変化している2点の計測値から算出したものである。同図より、ひび割れ発生荷重（載荷荷重 235kN）を過ぎたあたりから、鋼桁+コンクリートの全断面有効の計算値を下回り、床版の剛性低下とともに徐々に「鋼桁+鉄筋+底鋼板」の断面計算値に近づいていき、鉄筋降伏（載荷荷重 2408kN）あたりでその値を下回っていることがわかる。以上より、鉄筋許容応力度レベルの約 2.5 倍程度の荷重まで底鋼板が有効に作用していることがわかる。図-9 に示した鉛直変位の結果と異なるものの、安全側に評価しても鉄筋許容応力度レベルまでは、底鋼板が十分有効に作用しているといえる。鉛直変位の結果と異なる原因としては、底鋼板と鉄筋がひび割れ後も重ね梁として抵抗しており、それらの影響を含んだ中立軸位置が算出されたためである。

### 3) ひび割れ幅

ひび割れ幅は、標点距離 100mm の  $\pi$ ゲージにより計測した。 $\pi$ ゲージは、供試体中央から片側 50cm の範囲に 5 個、逆側 2m の範囲に 20 個の合計 25 個を取り付け、その 2.5m の範囲内に発生したひび割れを全て採取できるようにした。

供試体中央付近においては、図-11 に示すとおり、 $\pi$ ゲージの計測結果では、鉄筋応力度 100N/mm<sup>2</sup>レベル（載荷荷重 557kN）から、ひび割れ幅が 0.3mm を上回り、鉄筋許容応力度 140N/mm<sup>2</sup>レベル（載荷荷重 805kN）では 0.45mm 程度の結果であった。しかし、クラックスケールを用いた計測によるひび割れ幅は、0.2mm 以下であった。これは、 $\pi$ ゲージの計測結果には、鉄筋とコンクリートの付着によるひび割れていないコンクリートの伸びも含まれているためであると考えられる。

## 6. まとめ

本文では、孔あき T 型リブを用いた合成床版“K-スラブ”の耐荷力機能を確認するための実物大静的耐荷力試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試験より、床版支間 6m および張出し支間 2.4m クラスに対して正曲げ、負曲げ共に十分な曲げ耐荷力がある。
- ②合成桁負曲げ試験より、鉄筋が降伏するまでは底鋼板が抵抗断面に有効である。また、ひび割れ幅については、クラックスケールによる計測 0.2mm 程度であり、有害なひび割れが発生しておらず、ひび割れ分散性が確認できた。

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おり、形鋼を用いた加工度の低いコストパフォーマンスに優れた長支間合成床版であるといえる。

### 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, 1999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, 1999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)山本晃久, 橋本靖智, 済藤英明, 水口和之, 鈴木規生, 堀川都志雄: 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, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.325~330, 2003年6月
- 7)鹿島孝之, 山本晃久, 落合盛人, 武山真樹, 堀川都志雄: トラス型ジベル合成床版の版としての定点疲労実験, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.345-346, 2005.9