

## (52) 合成床版を活用した鉄道下路トラスに関する実験的研究

後藤貴士<sup>1</sup>・吉田直人<sup>1</sup>・柳沼謙一<sup>2</sup>・工藤伸司<sup>3</sup>・谷口望<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 東日本旅客鉄道 東京工事事務所 工事管理室 (〒151-8512東京都渋谷区代々木2-2-6)  
E-mail: taka-goto@jreast.co.jp , naoto-yoshida@jreast.co.jp

<sup>2</sup>正会員 東日本旅客鉄道 JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所  
(〒331-8513埼玉県さいたま市北区日進町2-0)

<sup>3</sup>正会員 東日本旅客鉄道 建設工事事務部 構造技術センター (〒151-8578東京都渋谷区代々木2-2-2)

<sup>4</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (研究当時: 東日本旅客鉄道)  
(〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail: n-tani@rtri.or.jp

本論文では、都市内の厳しい条件における鉄道橋梁に適用が検討されている、合成床版下路トラス橋の実験的検討について示す。実験では、下弦材と合成床版および軌道構造を模擬した供試体を作成し、トラス構造により生じる軸引張および列車荷重に相当する鉛直荷重を同時に載荷する。載荷結果においては、鋼部材の応力・変位、コンクリートのひび割れ幅を計測し、載荷終了後は桁の内部のコンクリートの充填状況、損傷状態を確認する。また、載荷試験結果を受けて応力の分担効果や応力の集中度の考察行ない、今後の検討課題や設計時の留意点についても述べる。

**Key Words** : composite truss, composite slab, limitation of crack width

### 1. はじめに

近年、橋梁において鋼とコンクリートの複合構造が多く用いられるようになってきている。その中でも、底鋼板を用いた合成床版は、床版構造の薄型化が可能であり、また剛性が向上することで高耐久性となり、さらには、底鋼板をコンクリート打設型枠として用いることで経済性も向上するなど、非常に利点の多い構造形式であることが知られている<sup>1)</sup>。よって、道路橋床版では急速に普及しており、鉄道橋においても、九州新幹線の連続合成桁の床版で数橋使用された実績がある<sup>2)</sup>。

一方、鉄道橋では、桁下の空頭制限が厳しい場合等に、床版コンクリートを合成した下路トラス橋が用いられており、この形式の橋梁の事例としては、鴨川橋梁<sup>3)</sup>がある。鴨川橋梁では、トラスの下弦材に横桁をSRC形式とした床版を合成させ、レールレベルから桁下面までの厚さを低減できただけでなく、鋼橋の騒音低減を可能とした。本橋梁形式の開発に当たっては、下弦材とSRC床版を合成した模型供試体を作成し、下弦材より導入される軸力を模擬載荷し、ひび割れ制御手法やコンクリートの応力分担効果の確認を行っている<sup>4)</sup>。

現在、特に都市内の鉄道橋においては、更なる床版の薄型化が要求されており、鴨川橋梁の橋梁形式をさらに薄型化、合理化が必要となっている。そこで、著者らは、下路形式の橋梁に、底鋼板を用いた合成床版を用いることを考えた(図-1)。本構造の特徴としては、従来の床版の横桁を合成床版の底鋼板と接合させ、底鋼板のリブ、および、コンクリートとのずれ止めとしての効果を期待している。また、従来のSRC形式の床版や、合成床版

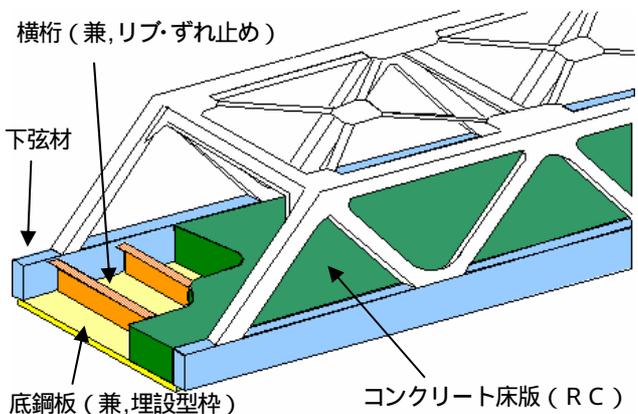
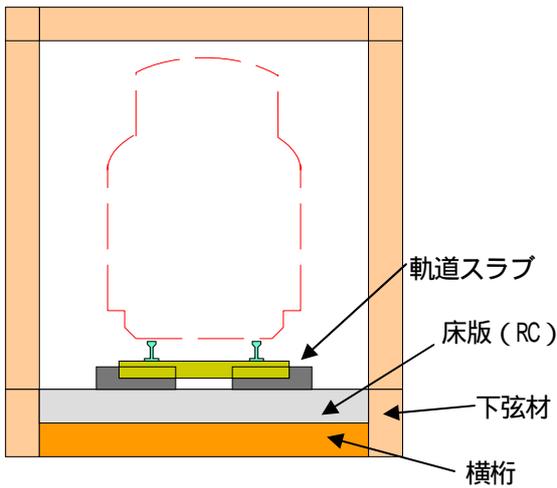
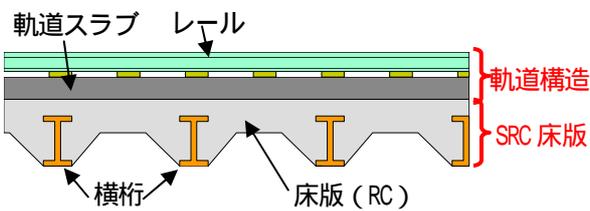


図-1 合成床版を用いた下路トラス橋モデル概要

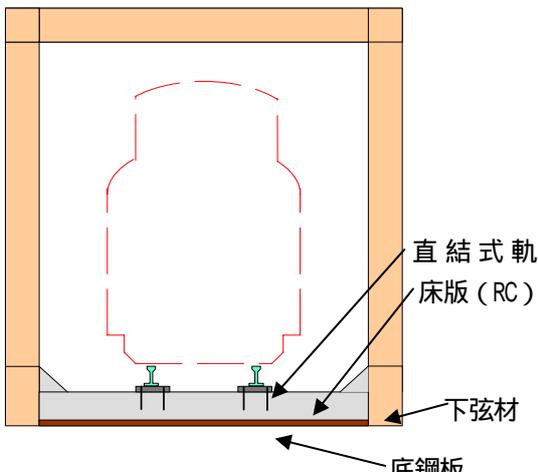


(a) 桁横断方向断面モデル図

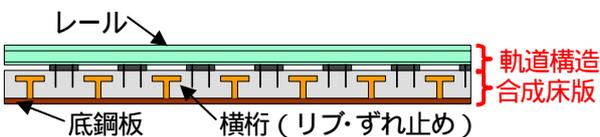


(b) 床版橋軸方向断面モデル図

図-2 SRC床版トラス（従来形式）概要



(a) 桁横断方向断面モデル図



(b) 床版橋軸方向断面モデル図

図-3 合成床版トラス（提案形式）概要

を用いた連続合成桁では、軌道構造（軌道スラブなど）は、非合成部材の別構造としていたが、更なる薄型化のために軌道構造を直に床版に接合させる直結式軌道としている（図-2、図-3）。床版の薄型化と直結式軌道

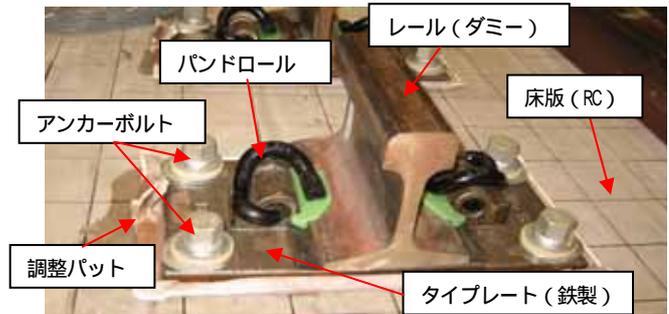


図-4 コンクリート直結式軌道の例（本検討供試体）

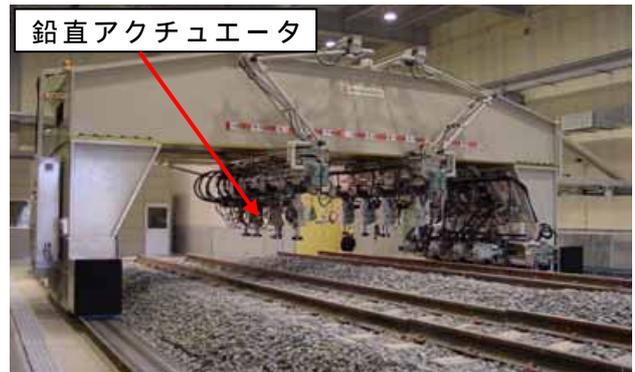


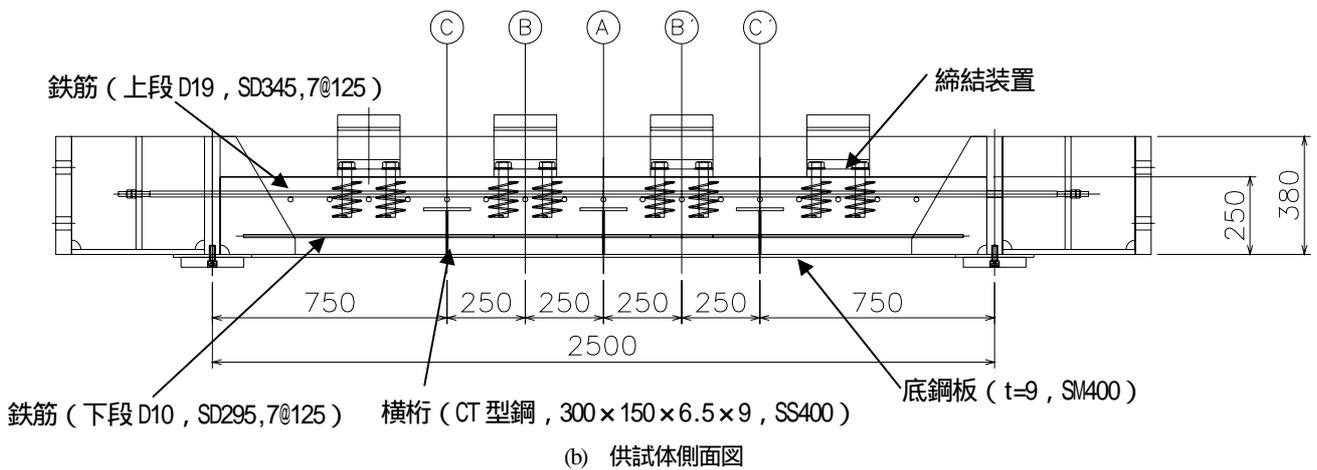
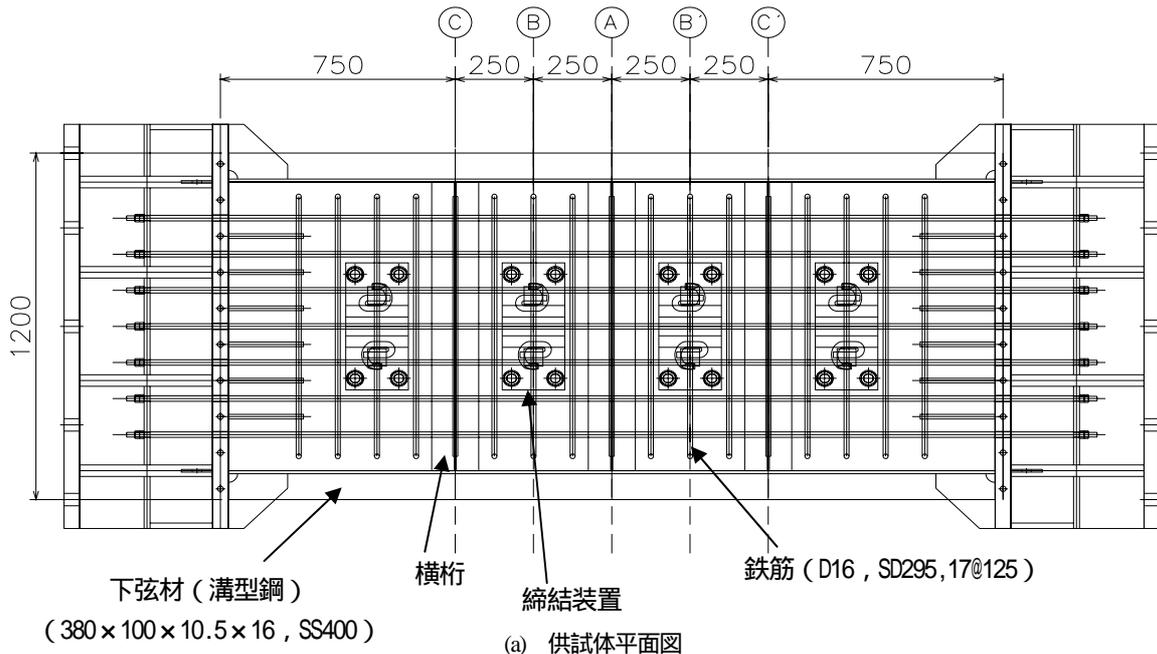
図-5 実物大軌道試験装置

の採用により、レールレベルから桁下面までの厚さは、従来の6割程度に低減させることが可能である。なお、軌道構造をコンクリート部材に直結させる構造としては、アンカーボルトにより直接接合させるコンクリート直結式構造（図-4）が軌道構造分野ですでに開発されているが、薄型の橋梁床版に与える影響については検討が行われていないのが現状である。

そこで、本検討では、合成床版と下弦材を模擬した供試体を作成し、下弦材より入る軸力に対する挙動を確認するために、軸力載荷試験を行った。また、従来の道路橋合成床版の研究では、移動輪荷重により曲げに加えてせん断やねじれが作用することで床版の損傷が生じることが知られている<sup>5)</sup>。本構造では従来に比べて軌道構造の薄型化により、床版の挙動に対する移動輪荷重の影響が増大し、道路橋と同様の損傷が懸念されることから、先の軸力載荷と同時に列車通過を想定した鉛直静的載荷も行った。その結果より、床版に生じる変位・ひずみの挙動を確認し、床版構造開発における基礎的な検討を行った。なお、鉛直載荷にあたっては、列車通過を再現するために、実物大軌道試験装置を用いることとした（図-5）。

## 2. 供試体概要

供試体の概要を図-6(a)～(d)に示す。供試体の設定にあたっては、締結装置4箇所分（500mmピッチ）を想定



計測位置	
a-1~a-3: 底鋼板	d-1, d-2: 下弦材ウェブ
b-1~b-5: 床版中鉄筋(上段)	e-1, e-2: 下弦材上面
c-1, c-2: 下弦材底面	

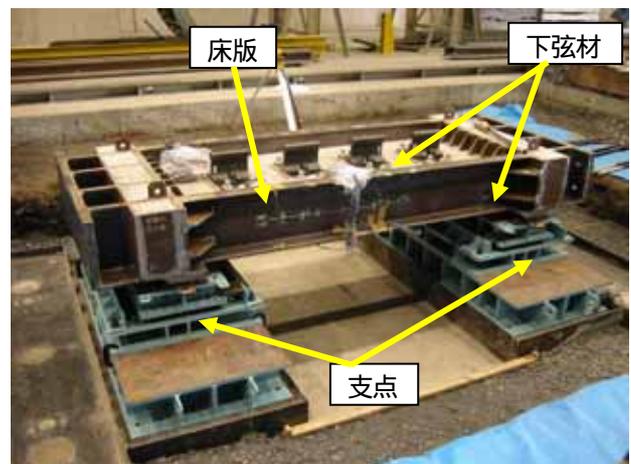
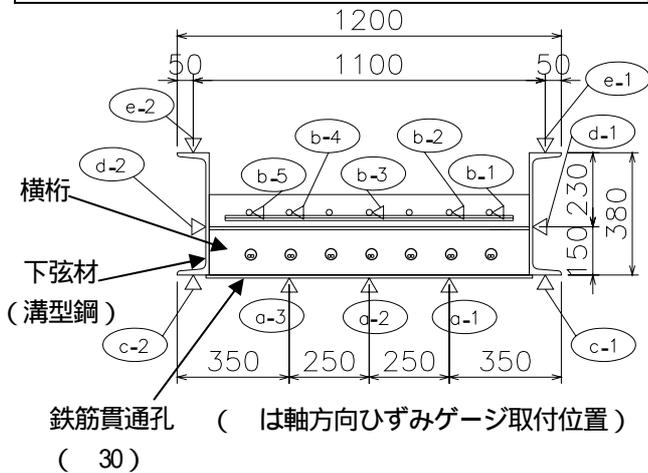
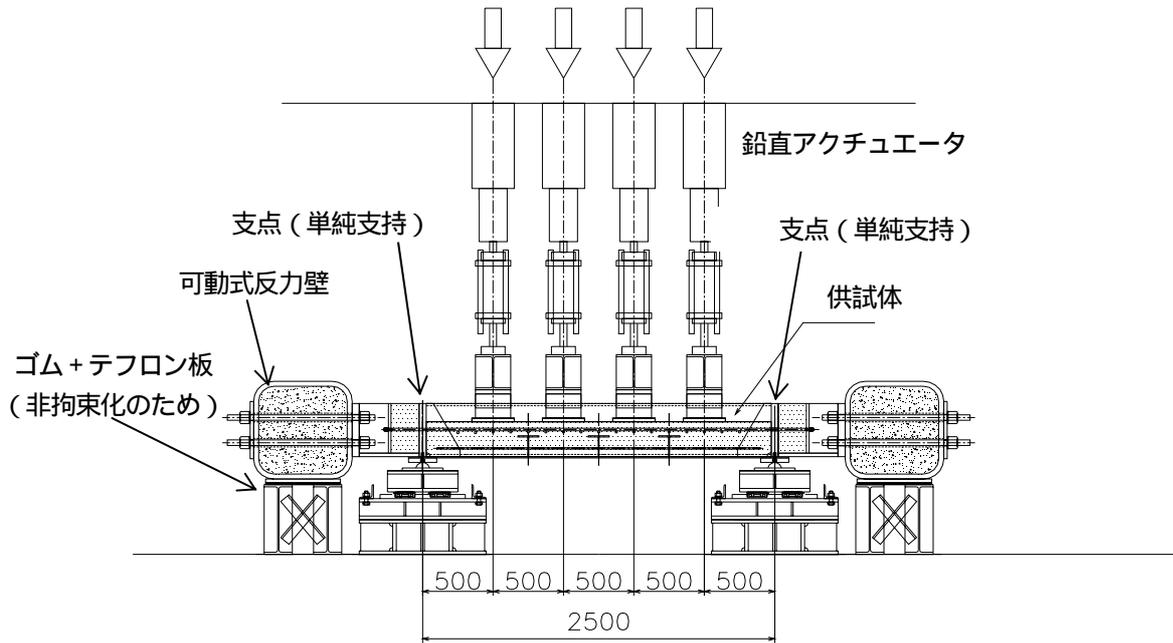
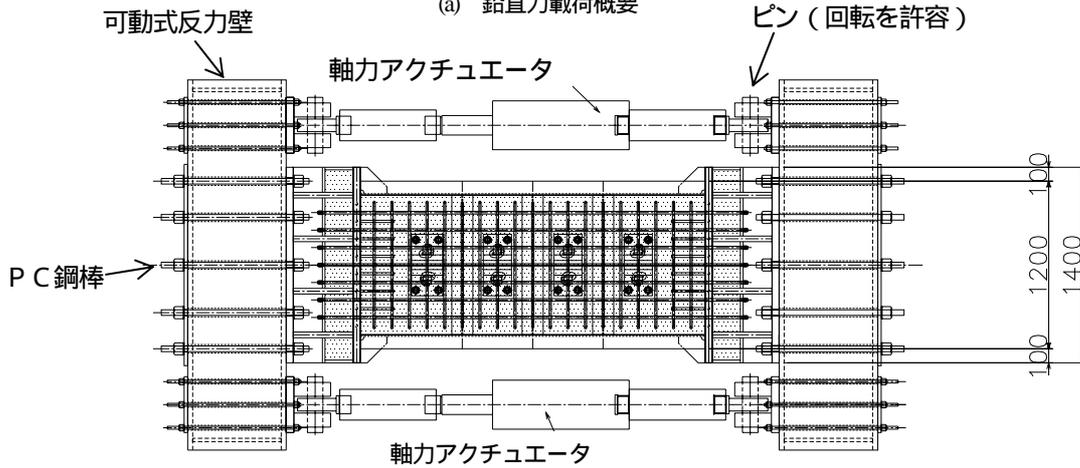


図6 供試体図・計測位置図 (単位: mm)

鉛直4 鉛直3 鉛直2 鉛直1



(a) 鉛直力载荷概要



(b) 軸力载荷概要

図-7 軸力载荷概要 (単位: mm)

表-1 打設コンクリートの配合・強度

配合名称	28=36-15-20
呼び強度	36 N/mm <sup>2</sup>
膨張材商品名	デンカCSA#20
膨張材配合量	20 kg/m <sup>3</sup>
スランプ(実測値)	12.5 mm
最大粗骨材寸法	20 mm
28日圧縮強度	48.1 N/mm <sup>2</sup>
28日割裂引張強度	3.18 N/mm <sup>2</sup>

表-2 供試体の断面定数

断面設定	断面積A	断面二次 モーメントI	偏心量e
	× 10 <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	× 10 <sup>6</sup> (mm <sup>4</sup> )	
合成断面	596	669	63.7
鋼+鉄筋断面	252	502	68.0
下弦材断面	139	286	0.0

偏心量は床版中立軸位置と溝型鋼中心位置のずれ量を示す。

するため橋軸方向のスパンを2500mmとし、床版厚については、ほぼ実物大の250mmとし、実物大の締結装置(コンクリート直結式)を設置できるようにした(図-4)。また供試体の幅については、締結装置の幅(440mm)からほぼ45度の角度で荷重の影響が広がることを考慮すると、底鋼板については約940mm程度の幅で荷重が分布することから、供試体床版の幅を1000mmとした。下弦材断面は、実物のトラス橋梁<sup>3)</sup>を参考に、床版断面積との比率より、溝型鋼(380×100×10.5×16)を2本配置した。横桁は、締結装置間に500mmピッチで設置することを想定し、実物の横桁支持式トラス橋の横桁の剛性と同程度で、かつ、

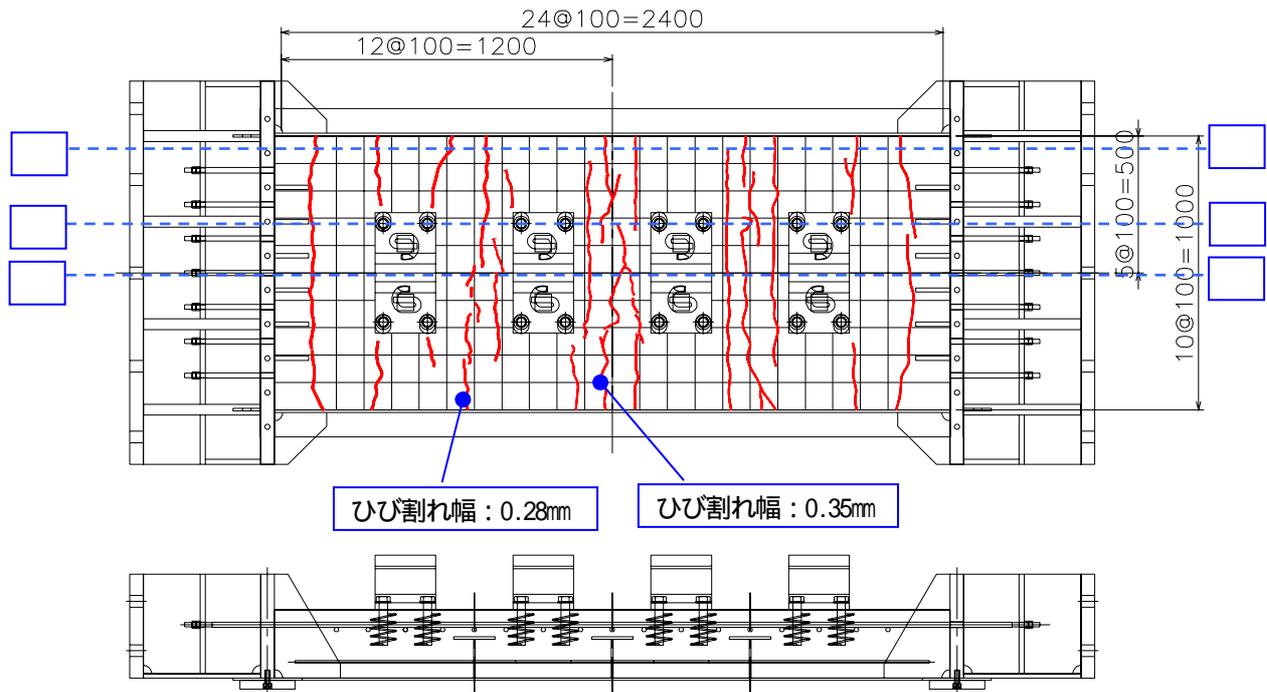


図-8 床版ひび割れ状況(3000kN 載荷時, 単位: mm)  
ひび割れ幅は3000kN 時のマイクロスコブ測定値

表-3 供試体の軸力載荷時のひび割れ発生荷重

軸力 (kN)	測定結果 (目視)	計算値	
		偏心なし	偏心考慮
700	700	1330	779

「偏心考慮」は、溝型鋼中心位置と合成床版中立軸位置のずれにより生じる曲げモーメントを考慮したことを示す。

表-4 軸力3000kN 載荷時のひび割れ幅

ひび割れ幅 (mm)	測定結果(平均値) (マイクロスコブ)	計算値	
		偏心なし	偏心考慮
0.32	0.32	0.20	0.28

「計算値」では、乾燥収縮  $150 \mu$ 、最大ひび割れ間隔  $500 \text{ mm}$  (横桁間隔) を用いて計算した。

横桁上フランジから床版上面までのかぶり高が約  $100 \text{ mm}$  を確保できるように、CT 型鋼 ( $300 \times 150 \times 6.5 \times 9$ ) を用いた。底鋼板は、CT 型鋼の溶接等に配慮して、板厚  $9 \text{ mm}$  を使用し、下弦材、横桁、底鋼板の各接触部は溶接により固定されている。床版内鉄筋については、コンクリートとの鉄筋比が  $1\%$  程度<sup>1)</sup> となるように、 $D19$  (上段)、 $D10$  (下段) を配置した。なお、 $D10$  鉄筋については、横桁ウェブに孔 ( $\phi 30$ ) を設けて横桁を貫通させる構造とし、各鉄筋と鋼部材とは溶接を行っていない。底鋼板や下弦材とコンクリートとの接触面については、摩擦力や横桁がずれ止めとしても機能することを期待して、横桁以外のずれ止めは設置していない。床版コンクリートの配合、28日強度については、表-1 に示す。なお、コンクリートにおいては、乾燥収縮防止

分の膨張材を混入している。

供試体の橋軸方向に関する断面定数を表-2 に示す。ここで、「合成断面」は溝型鋼、底鋼板、鉄筋、コンクリート ( $n = 7$ ) の剛性を考慮した場合、「鋼+鉄筋」は溝型鋼、底鋼板、鉄筋の剛性を考慮した場合、「下弦材」は溝型鋼のみの剛性とした場合を示している。

供試体のひずみ計測においては、図-6(a),(b)のように A ~ C, B', C' の各断面を設定し、底鋼板 (a-1 ~ a-3)、鉄筋 (b-1 ~ b-5)、下弦材 (c-1 ~ e-2) にひずみゲージを設置し、変位計については A, C, C' 断面に3箇所ずつ鉛直方向変位を測定するために設置した。載荷にあたっては、軸力載荷用には  $2000 \text{ kN}$  アクチュエータ2本を溝型鋼高さ方向の中心位置に設置し(図-7)、鉛直載荷用には  $125 \text{ kN}$  アクチュエータ4本を締結装置上のダミーレール上に設置している(図-7)。供試体の境界条件は、鉛直荷重に対して単純支持の桁になるように支点を配置し、軸力を伝える反力壁は床版の回転および伸びを拘束しないように、反力壁下部に硬質ゴム、テフロン板を敷いた。また軸力を載荷するアクチュエータについて床版の回転の影響を受けないように、それぞれ反力壁との間にピンを設置している。

### 3. 軸力載荷試験結果

軸力載荷にあたっては、床版コンクリートのひび割れ幅が、計算上  $0.2 \text{ mm}$  程度(偏心なし)になる軸力を

表-5 軸力・鉛直同時載荷と載荷ステップ

step	軸力荷重 (kN)	鉛直載荷荷重 (kN)				備考
		鉛直4	鉛直3	鉛直2	鉛直1	
1	2000	0.00	0.00	0.00	0.00	初期値
2	2000	0.00	0.00	0.23	56.35	鉛直1:60kN載荷
3	2000	0.00	0.00	60.46	1.69	鉛直2:60kN載荷
4	2000	0.00	60.50	3.75	0.00	鉛直3:60kN載荷
5	2000	55.56	0.97	4.30	0.00	鉛直4:60kN載荷
6	2000	1.30	1.46	0.23	81.45	鉛直1:85kN載荷
7	2000	2.89	0.00	83.81	5.38	鉛直2:85kN載荷
8	2000	6.90	88.38	10.16	12.70	鉛直3:85kN載荷
9	2000	82.74	0.00	6.21	7.76	鉛直4:85kN載荷
10	2000	11.77	6.76	8.09	4.78	除荷

想定して3000kN(2本合計値)まで引張載荷を行った。載荷の結果、床版上面にひび割れが生じたが、その状況を図-8に示す。図-8中のひび割れ幅は、3000kN載荷時における、マイクロスコープによる測定値である。また、ひび割れの発生荷重と計算結果の比較を表-3に、軸力3000kN時のひび割れ幅の比較を表-4に示す。図-8より、ひび割れは主に横桁フランジ上の橋軸直角方向鉄筋の位置に集中していることがわかる。軸力載荷においては、締結装置付近には、目立ったひび割れは生じなかった。表-3から、供試体のひび割れ発生は、荷重偏心による曲げを考慮しない「偏心なし」よりもかなり小さい軸力で生じている。また、「偏心考慮」の計算結果においても、約1割大きな軸力となっている。なお、実際のトラス橋において、この偏心を考慮したものは少ないが、これは従来の多くが非合成床版として設計されてきたためと考えられる。本橋梁のように床版を合成させ、弦材と床版が大きく偏心しているトラス橋においては、この偏心に配慮する必要があるといえる。また、表-4においても、測定結果のひび割れ幅は偏心を考慮した計算結果に近い結果となっている。しかし、計算結果では乾燥収縮(150 $\mu$ )を考慮しており、膨張材を使用した本供試体に対してはひび割れ幅を大きめに算定することや、最大ひび割れ間隔を横桁間隔(500mm)と長めに設定したことから考えると、測定結果のひび割れ幅は大きめに生じていることが分かる。これは、後述の結果でも述べるが、横桁直上の鉄筋にひずみが集中している影響により大きめに生じたと考えられる。

#### 4. 軸力・鉛直力同時載荷試験結果

鉛直力載荷にあたっては、軸力載荷荷重を一定に保ったままで行ったが、軸力荷重の大きさについては、軸力載荷実験の横桁部鉄筋のひずみが約800 $\mu$ 程度になる2000kNに設定した(表-5)。また、静的鉛直載荷は、鉛直アクチュエータを「鉛直1 鉛直2 鉛直3 鉛直4」の順で載荷し、列車の車輪が鉛直1から鉛直4に移動している様子を再現するようにした。載荷手順と

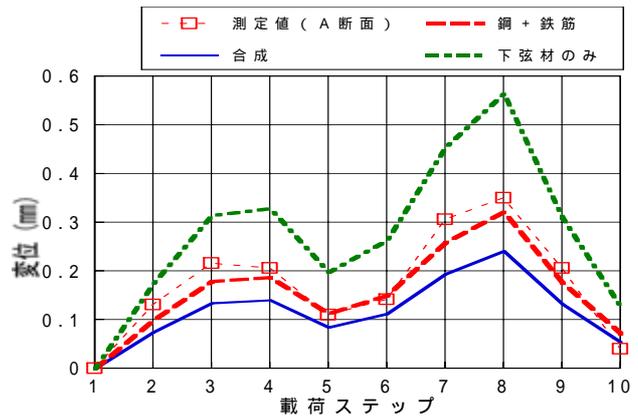
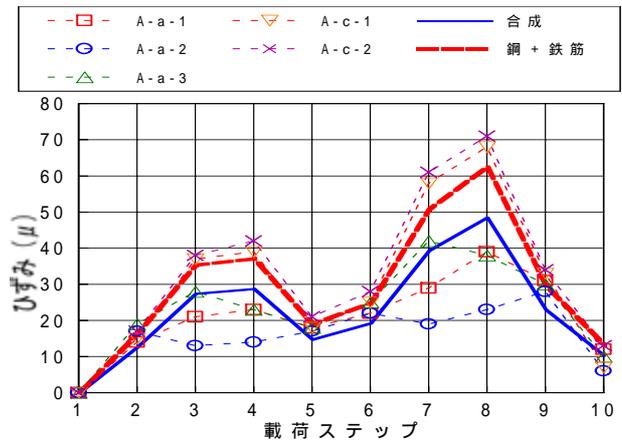
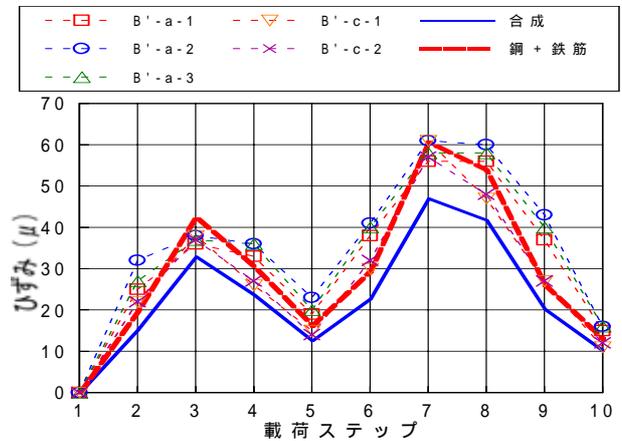


図-9 各載荷ステップにおけるA断面の変位



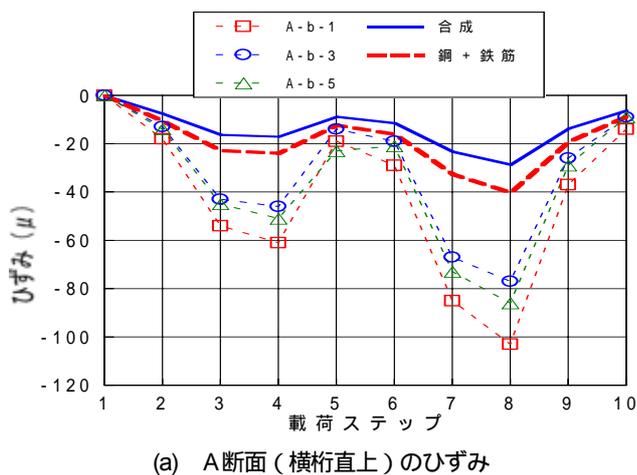
(a) A断面(横桁直下)のひずみ(底面)



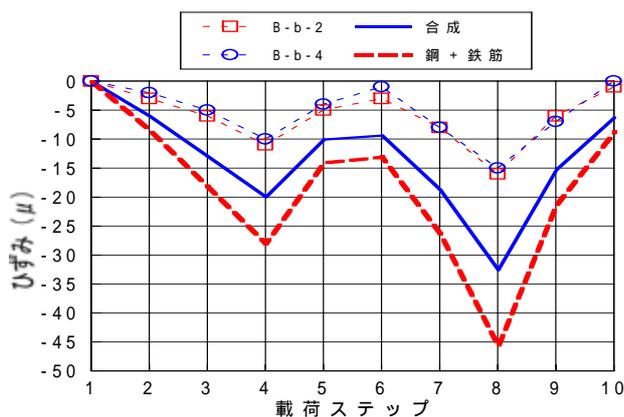
(b) B'断面(横桁間)のひずみ(底面)

図-10 載荷ステップと底鋼板・下弦材下面のひずみ

荷重の大きさを、表-5に示す。鉛直荷重の大きさにおいては、通常の在来線橋梁の設計荷重として多く用いられるEA-17<sup>6)</sup>(1車輪あたり85kN)を想定し、85kN程度になるように設定した。併せて、実際の列車荷重の最大値を想定する60kN程度においても載荷を行った。載荷の手順においては、表-5に示すように、初期値から序荷までを載荷ステップ1から10とした。なお、表-5のとおり、アクチュエータの挙動誤差によ



(a) A断面（横桁直上）のひずみ



(b) B断面（横桁間）のひずみ

図-11 各载荷ステップにおける鉄筋のひずみ

り除荷時にも多少の载荷荷重が残る場合もあり、これらについても比較計算では考慮するものとした。また、軸力・鉛直同時载荷においては、床版上面に新たなひび割れは生じなかった。

図-9は、各载荷ステップ時の床版の変位（下向きを正とする）を示している。床版の変位計測にあたっては、断面ごとに3箇所ずつ計測しているが、図では支点沈下補正とともに3点を平均化して示している。また、計算値については、表-2の各設定の剛性を用いて計算している。計算値は载荷ステップ1から10まで、測定結果の波形挙動をよく再現できている。変位の大きさについては、60 kN载荷時、85 kN载荷ともに、鋼+鉄筋剛性の計算値によく合う傾向となっている。

図-10は、底鋼板のひずみと、底鋼板とほぼ同じ高さの位置にある下弦材の下面のひずみを示している。下弦材下面のひずみについては、変位と同様に鋼+鉄筋剛性の計算値とほぼ一致している。しかし、底鋼板のひずみについては、横桁直下（A断面）では、最大値の生じる部分で下弦材のひずみとは異なり、ピーク部分が生じない傾向となっている。一方、横桁間（鉛直载荷点直下、B断面）では、底鋼板のひずみの最大値は、下弦材の

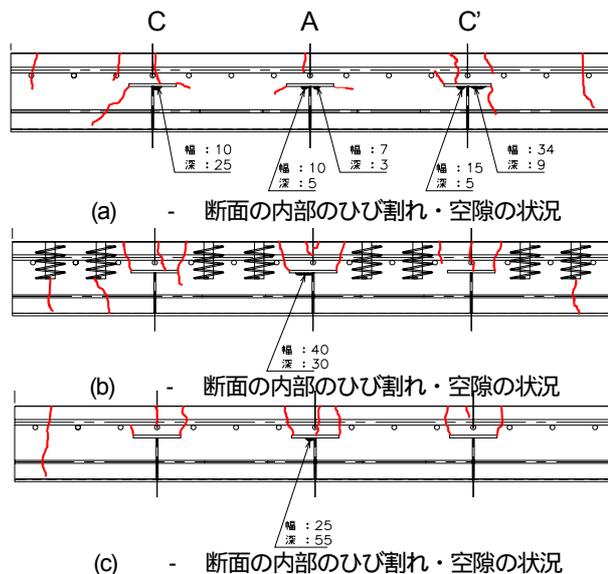


図-12 試験終了後のひび割れおよび床版内部の状況（単位：mm）  
「幅」と「深」は空隙の幅と深さを示す。

最大値とほぼ一致している。しかし、底鋼板のひずみは、そのピーク前後でも下弦材よりも大きなひずみを生じている（例えば、図-10(b)の载荷ステップ2、4など）。これらの挙動は、鉛直载荷点は横桁間であり、底鋼板に対しては鉛直力の影響が横桁間に比較的大きくなり、その反面横桁部については影響が小さくなっていると考えられる。しかし、下弦材については、鉛直载荷点と横桁部の差の影響は小さく、平均的に鉛直力の影響を受けていると考えられる。

図-11は、床版上段鉄筋のひずみを示している。ここで、ひずみは引張を正としており、図では载荷によって圧縮ひずみが生じていることを示している。この図においては、底鋼板のひずみ挙動とは大きく異なり、横桁部（図-11(a)）ではひずみが計算値よりもかなり大きくなっている。このひずみの集中は、軸力载荷時の挙動と同様であり、軸力载荷時にひずみが集中化した結果、鉛直载荷でも変形が集中したといえる。一方で、横桁間（図-11(b)、鉛直载荷点直下）でも、軸力载荷時の挙動と同様に、小さいひずみとなっている。よって、床版鉄筋のひずみ挙動は、軸力载荷時と同様に横桁部に集中する結果となっており、横桁部でひずみのピークが生じない底鋼板のひずみ挙動とは異なる傾向となっている。

## 5. 床版内部の状況（切断試験結果）

図-12(a)~(c)は、実験終了後に、床版内部の損傷状態を調査する目的で、床版をワイヤーソーで切断した結果である。切断面は、図-8に示した□、□、□である。ひび割れは、床版上面と同様に横桁上部に集中している様子が分かる。また、横桁上においても上フランジ端部から床版上面に伸びるひび割れと横桁上フランジ上の鉄

表6 実験結果から算定した応力集中係数

	横桁部	横桁間 (締結装置部)
下弦材	1.0	1.0
底鋼板	(0.7)	1.0
軸方向鉄筋	2.5	(0.3)
ひび割れ幅	1.2	ほぼ生じない

鋼+鉄筋断面計算値との比による値

筋を貫通するひび割れが多く見られ、横桁フランジ端部とこのフランジ上の鉄筋がひび割れを誘発していることが推測される。なお、横桁上フランジと締結装置アンカーについては、両者の距離が短く、干渉によりひび割れが生じると考えられていたが、この部分を結ぶひび割れは生じていなかった。

図-12(a)~(c)には、横桁上フランジ下面に生じた隙間の状況も示している。この隙間は、床版コンクリートを打設した際に、空気が混入し、結果として未充填部となったものである。この未充填部は、構造上の弱点となることが予想されるが、ひび割れの発生状況には影響を与えていない結果となっている。

## 6. 設計にあたっての留意点

本構造においては、たわみ、および下弦材のひずみについては、鋼+鉄筋断面の剛性を用いて算出することが分かった。しかし、床版内の橋軸方向鉄筋や底鋼板については、横桁部と横桁間（締結装置部）でひずみ挙動が異なっている。そこで、鋼+鉄筋断面の剛性より算出した計算値と実験より得られた値の比をとり、応力集中係数を算出し、表-6にまとめた。表-6では、1.0は計算と実験結果がほぼ同じ、1.0よりも大きいものは、応力集中により実験結果が計算値よりも大きくなることを示している。本表を見ると、横桁部の鉄筋においては2.5倍ものひずみが生じ、逆に横桁間の鉄筋や横桁部底鋼板においては、1.0よりも小さくなっている。つまり、設計にあたっては、終局限界や疲労限界においては、この応力集中を考慮すべきであり、特に1.0よりも大きくなる横桁部鉄筋については応答値の倍以上の値を設計に用いることになる。

## 7. まとめ

本検討で得られた結論を以下に示す。

- (1) 載荷実験の結果、合成床版の横桁部と横桁間とは、応力集中の影響で、ひび割れや鉄筋のひずみの挙動が異なる。ただし、下弦材のひずみについては、横桁部と横桁間の差は小さい。
- (2) 軸力・鉛直同時載荷実験では、合成床版の曲げ挙動については、コンクリートの剛性を無視した鋼+鉄筋断面の剛性で、おおむね評価できることがわかった。しかし先に述べた理由で、鉄筋については応力集中の影響を考慮する必要があると考えられる。
- (3) 応力集中は、横桁上フランジ部のかぶり厚が薄いことにより生じていると考えられ、構造上の弱点となることが予想され、ディテールの改良の余地がある。

## 参考文献

- 1) 八部順一：我国における合成床版の開発・適用状況について、第4回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集、土木学会鋼構造委員会、pp.35-44、2001。
- 2) 谷口望、相原修司、池田学、八巻康博、藤原良憲、鈴木喜弥、木下哲龍：連続合成桁における中間支点部の活荷重応答に関する実橋測定、構造工学論文集 Vol.51A、土木学会、pp.1449-1457、2005。
- 3) 西村康之、下野一行、紀伊昌幸、矢島秀治：奈良線鴨川橋梁の設計と施工—SRC床版の採用により低い床高と鋼重の低減を可能にした鉄道鋼トラス橋—、橋梁と基礎、2000-11、pp.9-18、2000。
- 4) 谷口望、西田寿生、村田清満、矢島秀治、依田照彦：鋼繊維補強合成床版の軸引張挙動に関する簡易解析、コンクリート工学論文集、第13巻第3号、2002。
- 5) 複合構造物の性能照査指針（案）、土木学会、構造工学シリーズ11、pp.99-130、2002。
- 6) 運輸省（監修）、（財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼合成構造物、丸善、2000。

## Experimental study on the composite slab for railway through truss

Takashi GOTO, Naoto YOSHIDA, Kenichi YAGINUMA,  
Shinji KUDO and Nozomu TANIGUCHI

The composite slab girders are mainly used for bridges, in which cracking of concrete slab plays an important role. In this study, we developed the slab for through girders that there was in slab more thinly. In development, a loading examination was performed, and it was measured crack of the slab concrete and stress of the steel members. Experiment results are compared with simple calculation results, and basically behavior was confirmed.