

鉄道下路桁用合成床版の開発に関する基礎実験

Basic study on the composite slab for railway through girder

谷口 望*, 吉田直人**, 後藤貴士**, 柳沼謙一**, 工藤伸司***

Nozomu Taniguchi, Naoto Yoshida, Takashi Goto, Kenichi Yaginuma, Shinji Kudo

*東日本旅客鉄道(株), 東京工事事務所 神奈川工事区 (〒221-0044 神奈川県横浜市神奈川区東神奈川1)

**東日本旅客鉄道(株), 東京工事事務所 工事管理室 鋼構造 G (〒151-8512 東京都渋谷区代々木 2-2-6)

***東日本旅客鉄道(株), 建設工事部 構造技術センター 鋼構造 G (〒151-8578 東京都渋谷区代々木 2-2-2)

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.

Key Words: railway bridge, composite slab, limitation of crack width

キーワード: 鉄道橋, 合成床版, ひび割れ制御

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, 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¹⁾。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²⁾。

一方, 鉄道橋では, 桁下の空間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³⁾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⁴⁾。

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

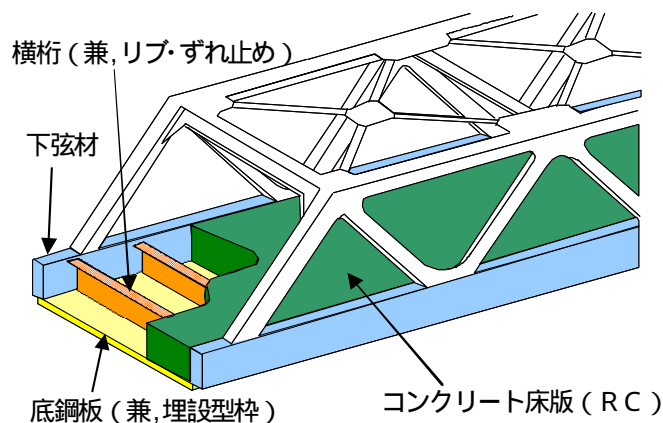
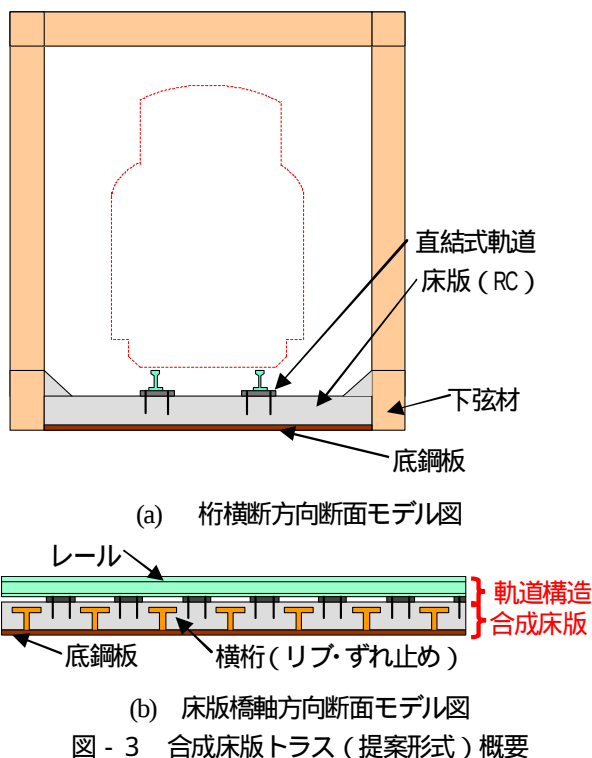
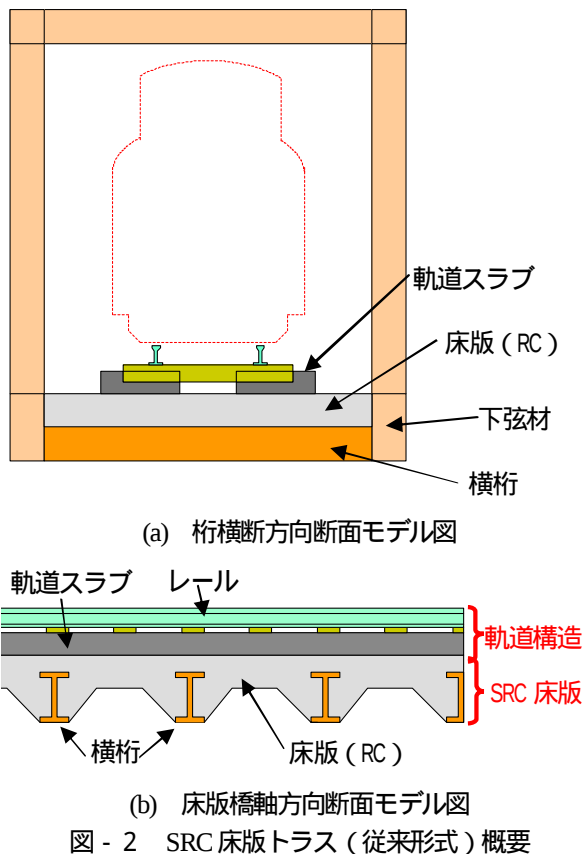


図-1 合成床版を用いた下路トラス橋モデル概要

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しての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

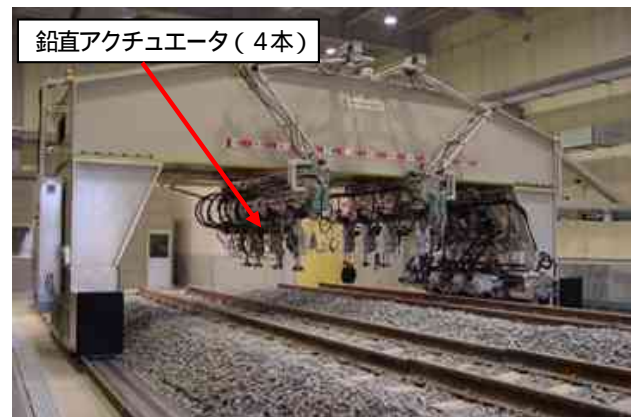
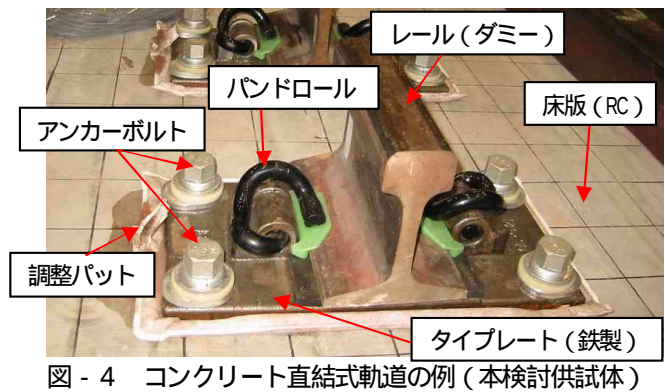
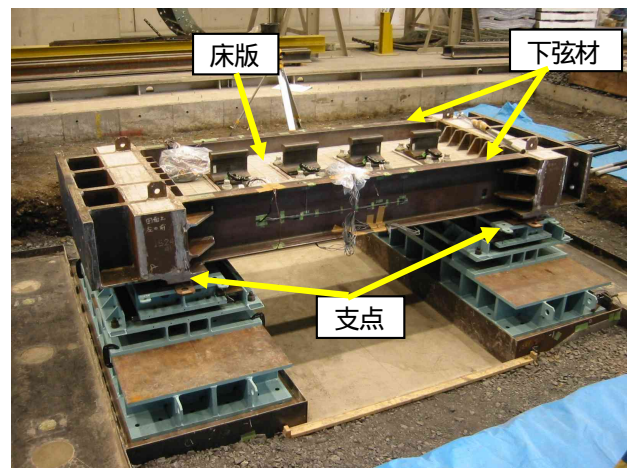
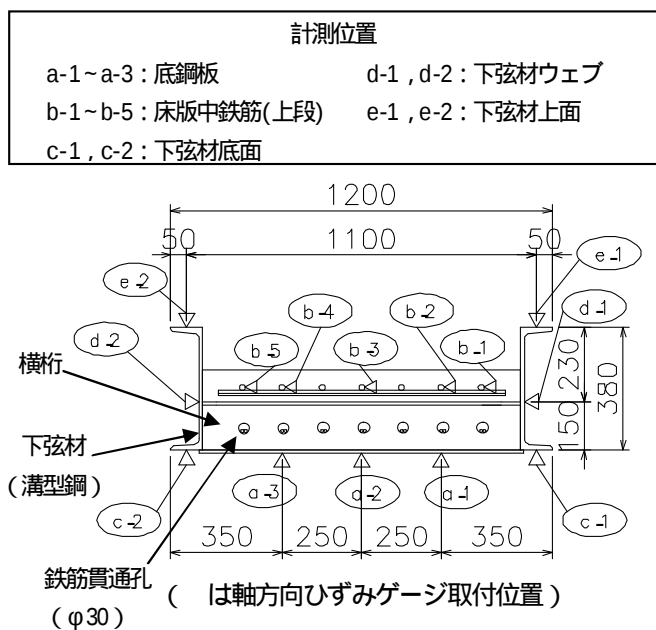
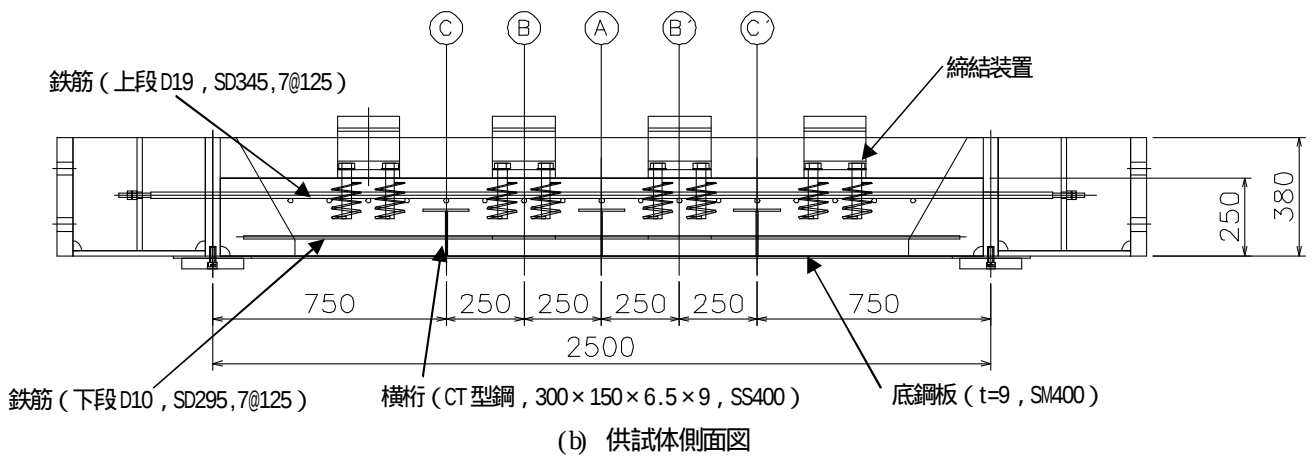
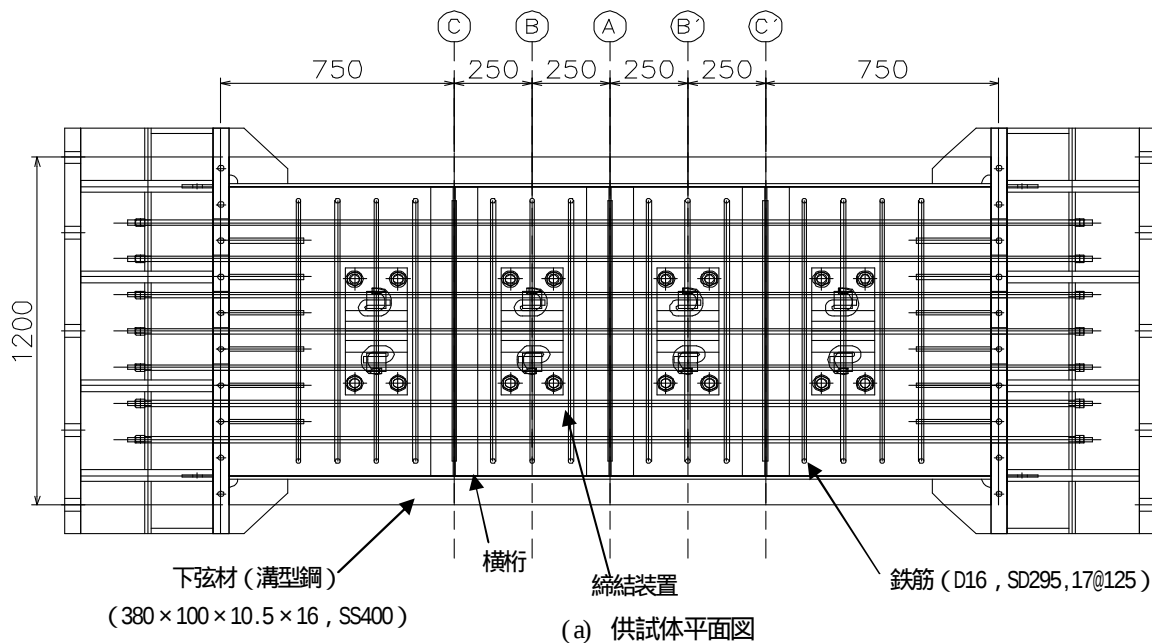


図 - 5 実物大軌道試験装置

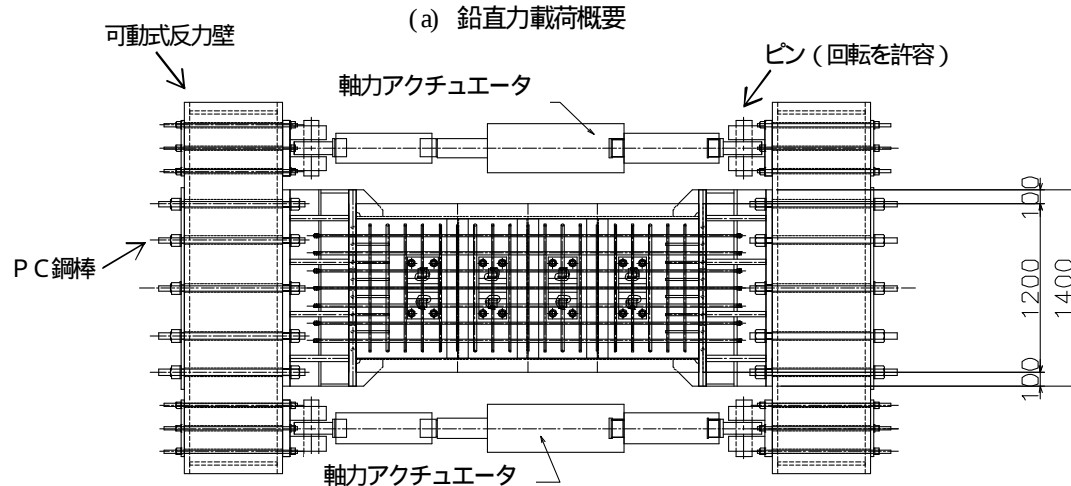
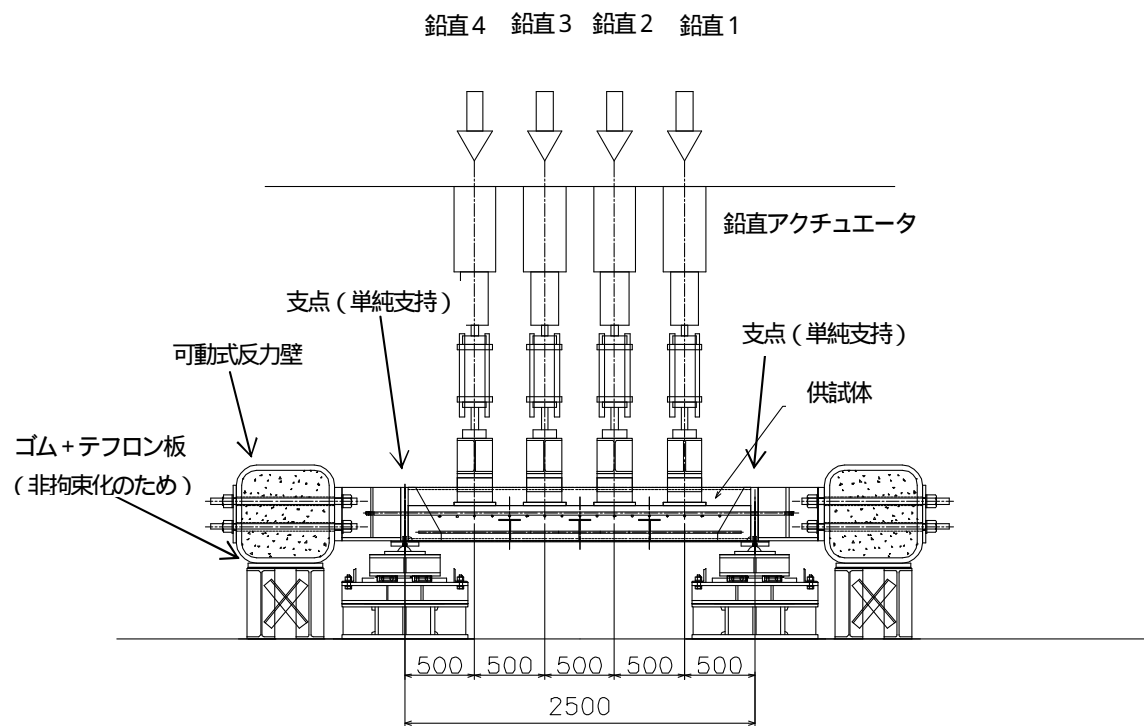
路橋合成床版の研究では、移動輪荷重により曲げに加えてせん断やねじれが作用することで床版の損傷が生じることが知られている⁵⁾。本構造では従来に比べて軌道構造の薄型化により、床版の挙動に対する移動輪荷重の影響が増大し、道路橋と同様の損傷が懸念されることから、先の軸力載荷と同時に列車通過を想定した鉛直静的載荷も行った。その結果より、床版に生じる変位・ひずみの挙動を確認し、床版構造開発における基礎的な検討を行った。なお、鉛直載荷にあたっては、列車通過を再現するために、実物大軌道試験装置を用いることとした（図—5）。

2. 供試体概要

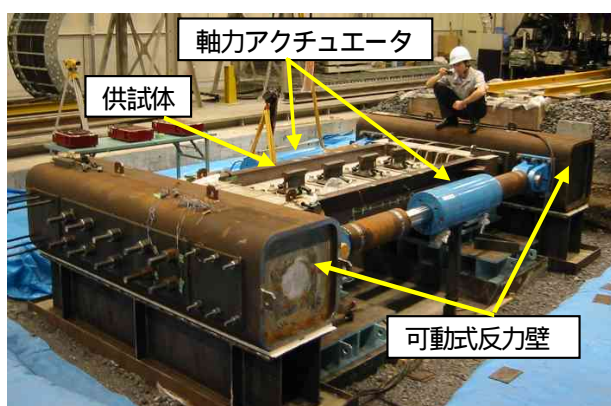
供試体の概要を図—6(a)～(d)に示す。供試体の設定にあたっては、締結装置4箇所分（500mmピッチ）を想定するため橋軸方向のスパンを2500mmとし、床版厚については、ほぼ実物大の250mmとし、実物大の締結装置（コンクリート直結式）を設置できるようにした（図—4）。また供試体の幅については、締結装置の幅（440mm）からほぼ45度の角度で荷重の影響が広がることを考慮すると、底鋼板については約940mm程度の幅で荷重が分布することから、供試体床版の幅を1000mmとした。下弦材断面は、実物のトラス橋梁³⁾を参考に、床版断面積との比率より、溝型鋼



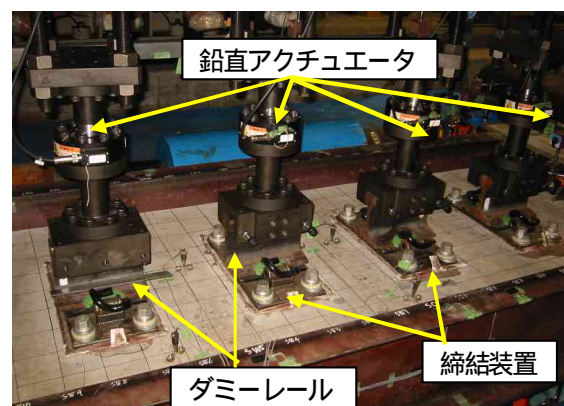
図—6 供試体図・計測位置図 (単位: mm)



図—7 軸力载荷概要 (単位 : mm)



図—8 軸力アクチュエータ設置状況



図—9 鉛直アクチュエータ設置状況

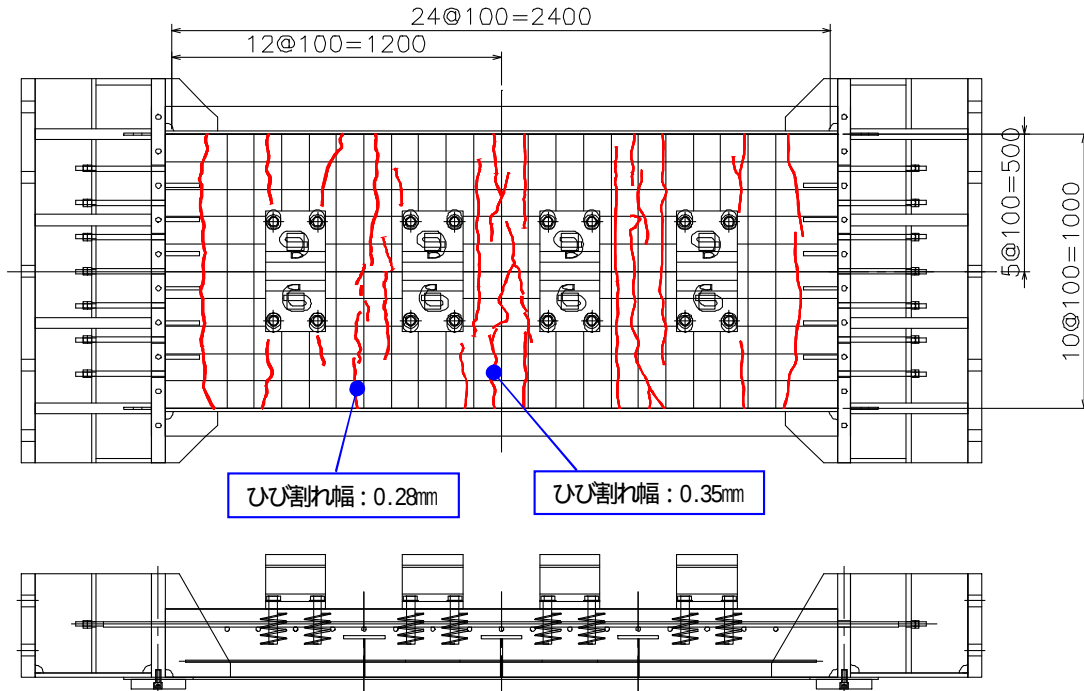
表—1 打設コンクリートの配合・強度

配合名称	$\sigma 28=36-15-20$
呼び強度	36 N/mm ²
膨張材商品名	デンカCSA#20
膨張材配合量	20 kg/m ³
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 ²
28日割裂引張強度	3.18 N/mm ²

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
	$\times 10^2(\text{mm}^2)$	$\times 10^6(\text{mm}^4)$	
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

偏心量は合成床版中立軸位置と溝型鋼中心位置のずれ量を示す。



図—10 床版ひび割れ状況(3000 kN載荷時, 単位: mm)

ひび割れ幅は3000 kN時のマイクロスコブ測定値

(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、横桁上フランジから床版上面までのかぶり高が約100mmを確保できるように、CT型鋼(300×150×6.5×9)を用いた。底鋼板は、CT型鋼の溶接等に配慮して、板厚9mm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¹⁾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(φ30)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、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。

表-3 供試体の軸力載荷時のひび割れ発生荷重

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

「偏心考慮」は、載荷点中心(溝型鋼中心)位置と合成床版の中立軸位置のずれにより生じる曲げモーメントによる効果を考慮したことを示す。

表—4 軸力3000kN載荷時のひび割れ幅

	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
ひび割れ幅(mm)	0.32	0.20	0.28

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

ここで、「合成断面」は薄型鋼、底鋼板、鉄筋、コンクリート（ヤング係数比 $n = 7$ ）の剛性をすべて考慮した場合、「鋼+鉄筋」は薄型鋼、底鋼板、鉄筋の剛性を考慮した場合、「下弦材」は薄型鋼のみの剛性で床版部を非合成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2000kNアクチュエータ2本を薄型鋼高さ方向の中心位置に設置し（図—7, 図—8）、鉛直載荷用には125kN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, 図—9）。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. 軸力載荷実験結果

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0.2mm程度（偏心なし）になる軸力を想定して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—10に示す。図—10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—10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 μ ）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

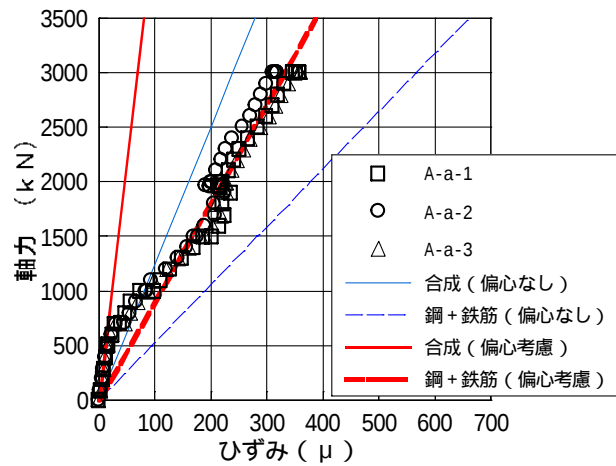
れ幅を大きめに算定することや、最大ひび割れ間隔を横桁間隔（500mm）と長めに設定したことから考えると、測定結果のひび割れ幅は大きめに生じていることが分かる。これは、後述の鉄筋の結果でも述べるが、横桁直上の鉄筋にひずみが集中している影響により大きめに生じたと考えられる。

軸力載荷実験結果のうち、各断面の底鋼板の荷重—ひずみ関係を図—11に示す。ここで、凡例の「A-a-1」は、図—6に示すA断面のa-1の計測点を示しており、ひずみは引張を正としている。また、直線は、表—2の剛性を用いて算出した理論剛性線であり、表—3と同様に偏心考慮の有無で2通りを示している。各断面ともにひび割れの生じない初期剛性については、偏心を考慮した合成断面の理論線と一致している。横桁直上でひび割れが生じたと考えられる700kN以上になると、横桁直下のA, C, C'断面（図—11(a),(c),(e)）では、偏心を考慮した鋼+鉄筋断面に漸近している。一方、横桁間のB, B'断面（図—11(b),(d)）では、横桁部とは挙動が異なり、700～1800kNでは、合成（偏心なし）の理論線に一致し、1800kN以上になると大きなひずみのジャンプを生じて鋼+鉄筋（偏心なし）に移行している。したがって、この結果から、横桁部（A, C, C'）ではひび割れ後も偏心による影響を受けているが、横桁間（B, B'）では横桁部のひび割れ後は、偏心の影響が小さくなっていると考えられる。

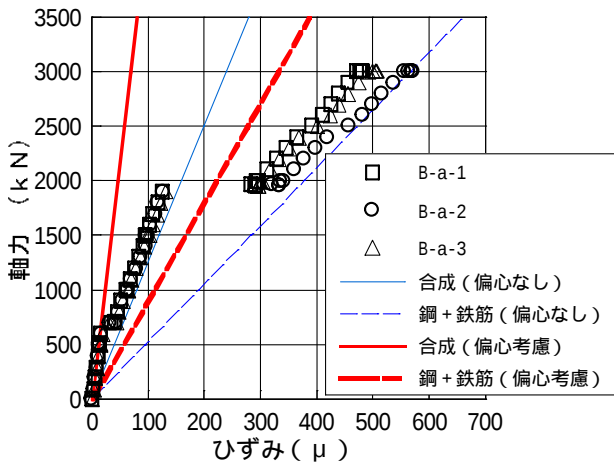
図—12は、床版中の上段鉄筋のひずみ値である。この結果も、図—11と同様に初期剛性は合成（偏心考慮）に一致している。しかし、A, C断面（図—12(a),(c)）では、横桁部のひび割れが生じた700kN以上になると各理論剛性よりもかなり大きなひずみが生じている。これは、ひび割れ部付近におけるテンションスティフニング効果および、ひび割れ部とその周辺での剛性急変に起因する応力集中が生じたため、鋼桁+鉄筋の剛性よりも大きなひずみとなったと考えられる⁴⁾。ただし、値としては大きくなっているが、剛性勾配については、鋼+鉄筋（偏心考慮）とほぼ等しくなっている。一方、横桁間のB断面（図—12(b)）では、700～2000kNでは合成（偏心なし）に一致し、2000kN以上でも計算値と比較して大きなひずみは生じていない。

図—13は、下弦材のひずみ値を示している。底鋼板（図—11）、鉄筋（図—12）の結果では、700kN以上になると横桁部と横桁間で挙動に大きな差が生じたが、下弦材については各断面ともにほぼ同様な挙動になっており、偏心を考慮した理論剛性と一致している。

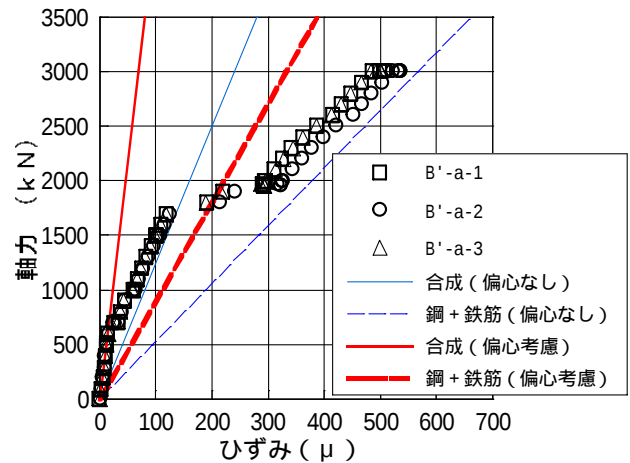
以上軸力載荷実験の結果より、ひび割れ発生後は、横桁部と横桁間で挙動が大きく異なることがわかる。横桁部においては、偏心の影響を受けひび割れ発生を生じやすく、また、床版上縁の鉄筋にかなりひずみが集中する。一方、横桁間においては、ひび割れ発生後、偏心の影響



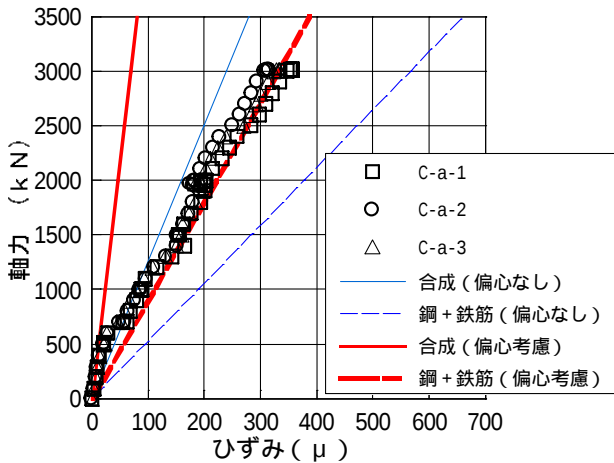
(a) A断面 (横桁直下) の底鋼板のひずみ



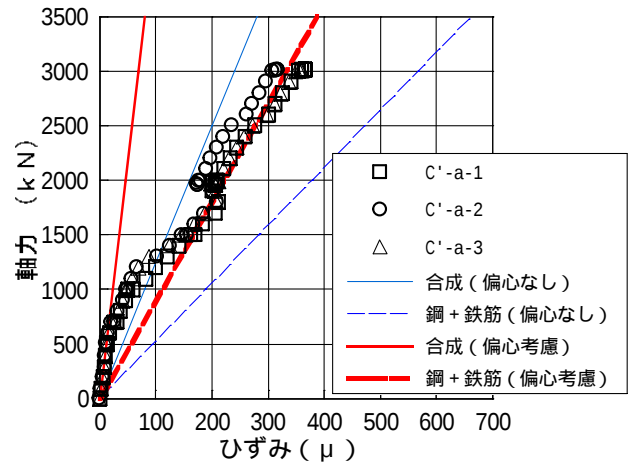
(b) B断面 (横桁間) の底鋼板のひずみ



(d) B'断面 (横桁間) の底鋼板のひずみ



(c) C断面 (横桁直下) の底鋼板のひずみ



(e) C'断面 (横桁直下) の底鋼板のひずみ

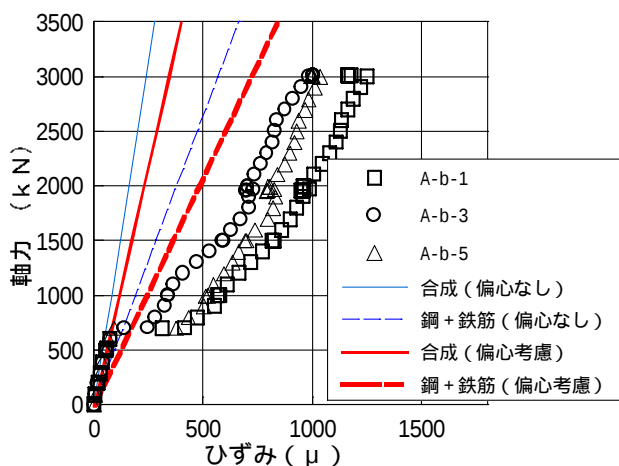
図—11 底鋼板の軸力—ひずみ関係図

が小さくなり、床版上縁の鉄筋のひずみも大きくなり、したがって、この横桁部と横桁間の差は、横桁や締結装置の有無により生じていると考えられ、偏心による曲げは横桁部に集中する傾向となり、特に床版上縁の鉄筋部に集中しやすい傾向があるといえる。しかし、下弦材の挙動に着目すると、床版部とは異なり、横桁部と横桁間での差はほとんどない。よって、床版部は横桁部と横桁間の剛性の差の影響があるものの、下弦材ではその

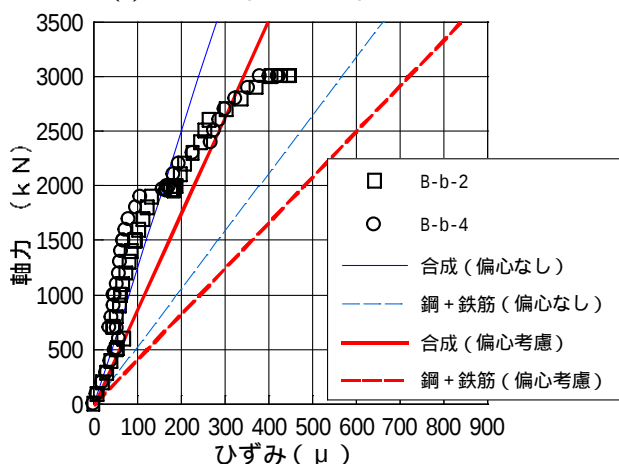
差の影響が小さくなっていると考えられる。

4. 軸力・鉛直力同時載荷実験

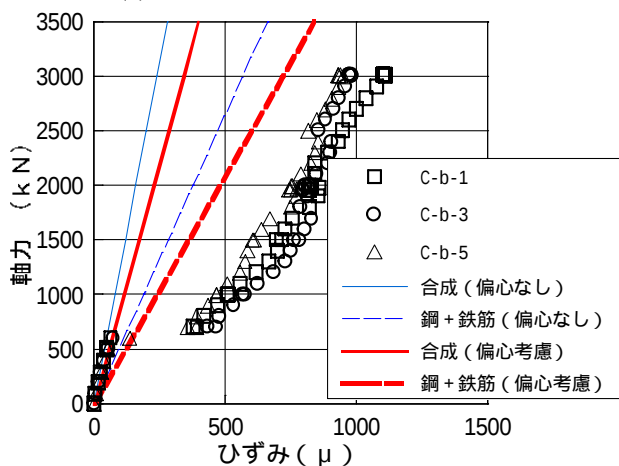
鉛直力載荷にあたっては、軸力載荷荷重を一定に保ったままで行ったが、軸力荷重の大きさについては、軸力載荷実験の横桁部鉄筋のひずみが約800μ程度になる2000kNに設定した(表—5)。また、静的鉛直



(a) A断面 (横桁直上) の鉄筋ひずみ

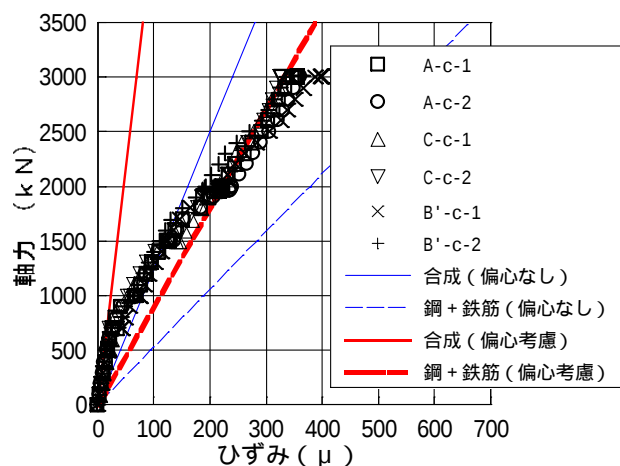


(b) B断面 (横桁間) の鉄筋ひずみ

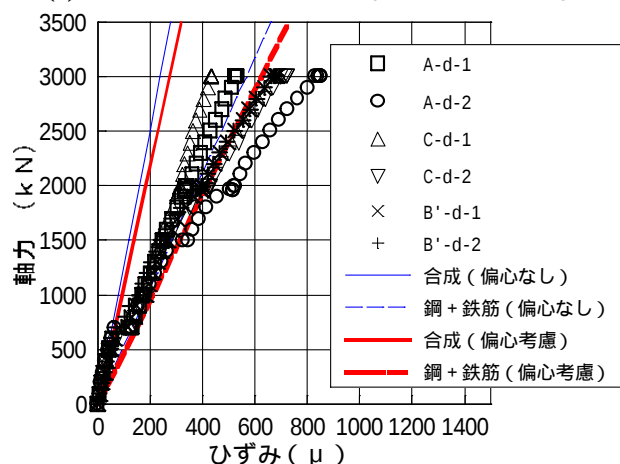


(c) C断面 (横桁直上) の鉄筋ひずみ

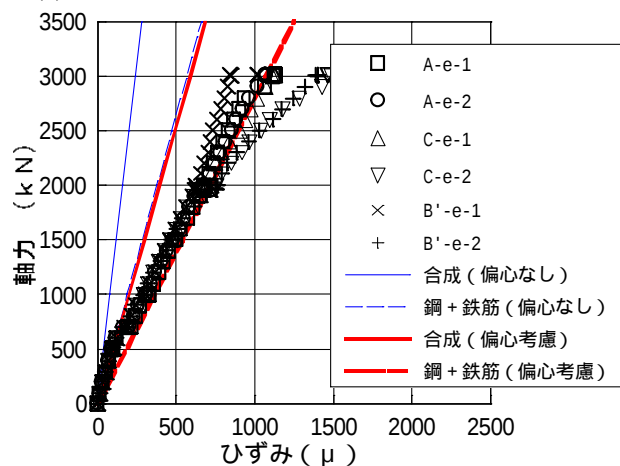
図—1 2 床版鉄筋の軸力—ひずみ関係図



(a) 下弦材下面の鉄筋ひずみ (A, C, B' 断面)



(b) 下弦材ウェブの鉄筋ひずみ (A, C, B' 断面)



(c) 下弦材上面の鉄筋ひずみ (A, C, B' 断面)

図—1 3 下弦材の軸力—ひずみ関係図

荷荷は、鉛直アクチュエータを「鉛直1→鉛直2→鉛直3→鉛直4」の順で荷荷し、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。荷荷手順と荷荷の大きさを、表—5に示す。鉛直荷荷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-17⁶(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。荷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荷荷ステップ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り除荷時にも多少の荷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・鉛直同時荷荷においては、床版上面に新たなひび割れは生じなかった。

図—1 4は、各荷荷ステップ時の床版の変位(下向き

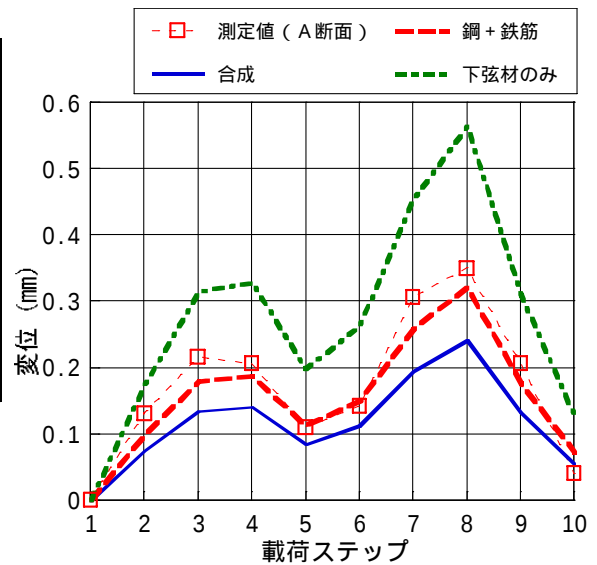
表—5 軸力・鉛直同時載荷と載荷ステップ

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

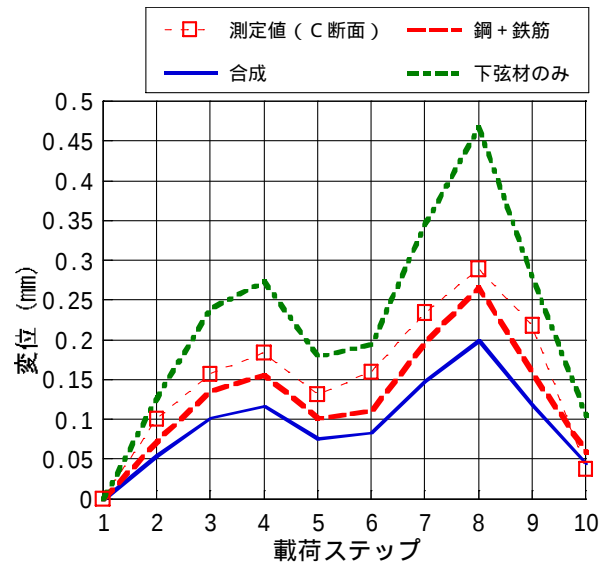
を正とする)を示している。床版の変位計測にあたっては、A、C、C'の断面ごとに3箇所ずつ計測しているが、図では支点沈下補正とともに3点を平均化して示している。また、計算値については、表—2の各設定の剛性を用いて計算している。計算値は各断面ともに、載荷ステップ1から10まで、測定結果の波形挙動をよく再現できている。変位の大きさについては、60kN載荷時、85kN載荷ともに、鋼+鉄筋剛性の計算値によく合う傾向となっている。

図—15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、C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(鉛直載荷点直下、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—15(c)の載荷ステップ2、4など)。これらの挙動は、鉛直載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、鉛直載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。

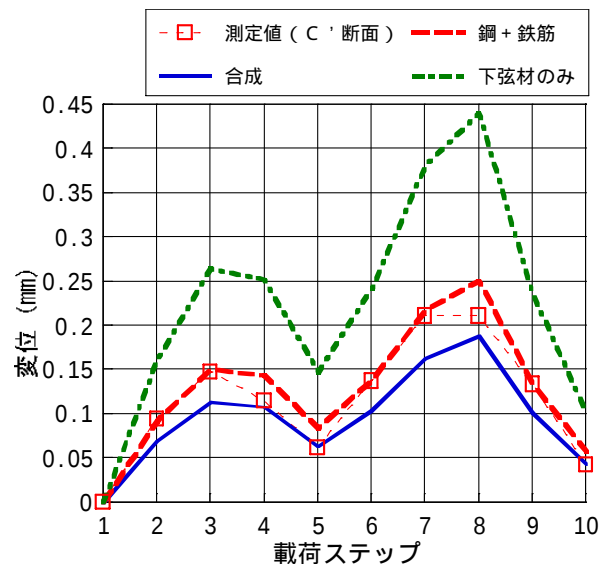
図—16は、床版上段鉄筋のひずみを示している。ここで、ひずみは引張を正としており、図では載荷によって圧縮ひずみが生じていることを示している。この図においては、底鋼板のひずみ挙動とは大きく異なり、横桁部(図—16(a),(c))ではひずみが計算値よりもかなり大きくなっている。このひずみの集中は、軸力載荷時の挙動と同様であり、軸力載荷時にひずみが集中化した結果、鉛直載荷でも変形が集中したといえる。一方で、横桁間(図—16(b),鉛直載荷点直下)でも、軸力載荷時の挙動と同様に、小さいひずみとなっている。よって、床版鉄筋のひずみ挙動は、軸力載荷時と同様に横桁部に集中



(a) A断面の変位(平均値)

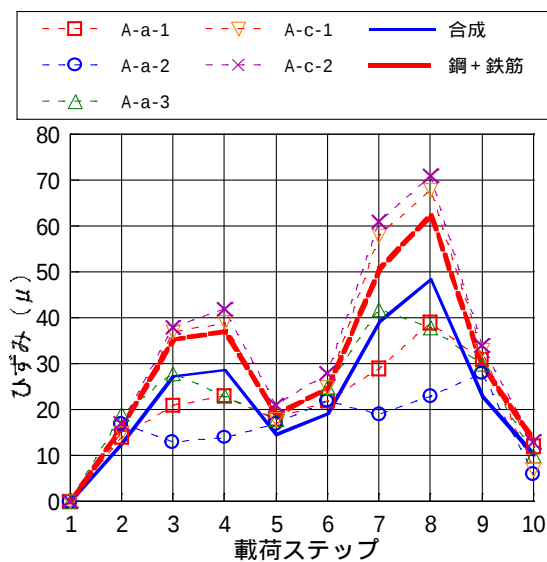


(b) C断面の変位(平均値)

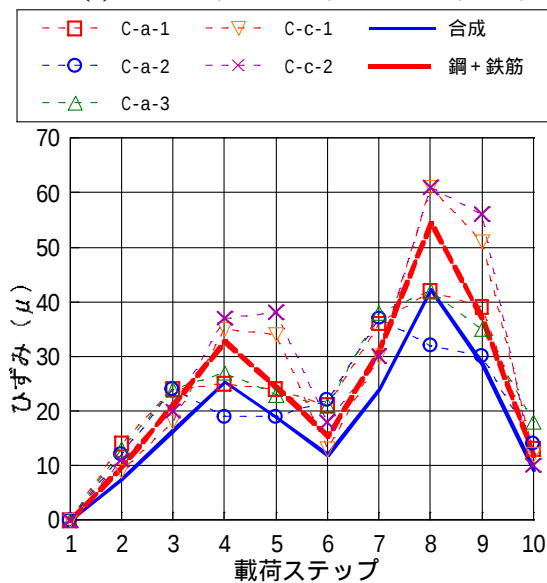


(c) C'断面の変位(平均値)

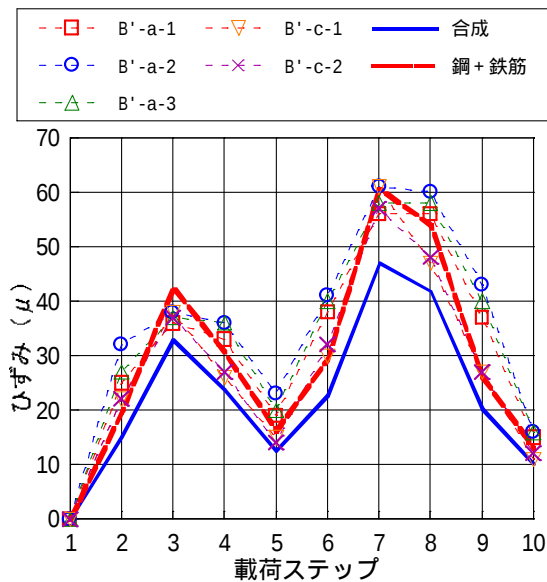
図—14 各載荷ステップにおける各断面の変位



(a) A断面 (横桁直下) のひずみ (底面)

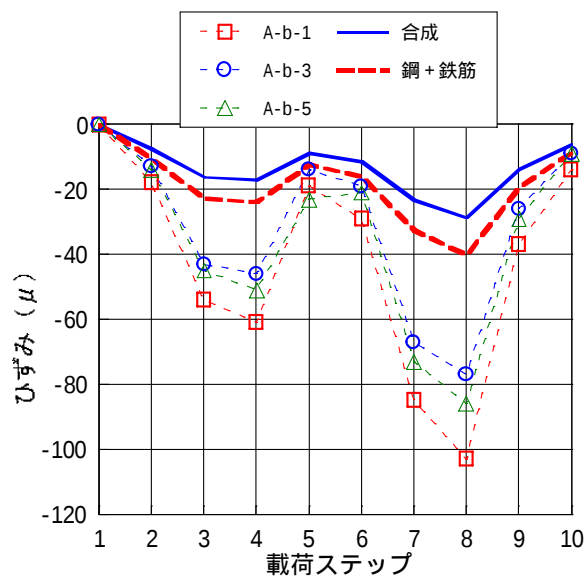


(b) C断面 (横桁直下) のひずみ (底面)

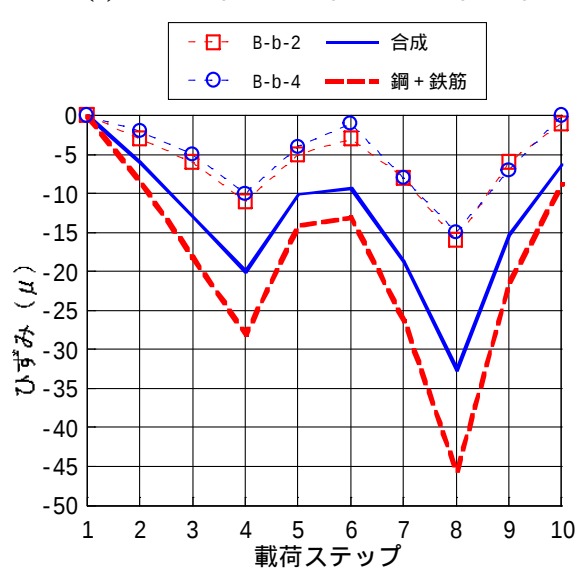


(c) B'断面 (横桁間) のひずみ (底面)

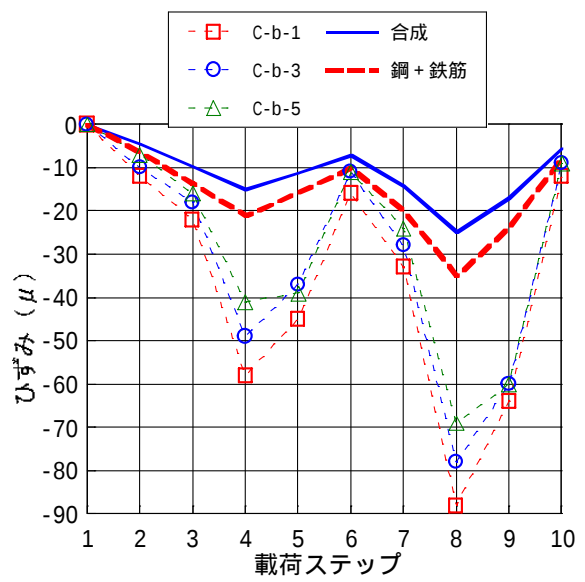
図—15 载荷ステップと底鋼板・下弦材下面のひずみ



(a) A断面 (横桁直上) のひずみ (鉄筋)



(b) B断面 (横桁間) のひずみ (鉄筋)



(c) C断面 (横桁直上) のひずみ (鉄筋)

図—16 各载荷ステップにおける鉄筋のひずみ

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. まとめ

本検討では、鉄道用下路桁に合成床版を用いた場合を想定し、合成床版と下弦材を合成し、軌道構造も含めた供試体を作成し、軸力荷重および鉛直荷重を静的に載荷することで合成床版に生じる変位、ひずみを測定し、基礎的な検討を行った。得られた結論を以下に示す。

- (1) 軸力載荷実験の結果、合成床版の横桁部と横桁間では、ひび割れ後の挙動が異なる。横桁部は中立軸のずれによる偏心の影響を受けるが、横桁間には偏心の影響が小さい。ただし、下弦材については、横桁部と横桁間の差は小さい。
- (2) 床版の軸引張により生じるひび割れは、横桁部の橋軸直角方向鉄筋上に集中する傾向が見られ、横桁間にはひび割れはほとんど生じなかった。また、この横桁部に生じたひび割れの幅は、ひび割れ制御設計で用いる計算手法により算出したひび割れ幅よりも、やや大きめとなった。
- (3) 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。
- (4) 軸力載荷実験、および、軸力・鉛直同時載荷実験において、横桁上の鉄筋にひずみが集中する傾向が見られ、ひび割れ幅の増大や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。

本検討では、合成床版の基礎的なデータを得ることを目的としたため疲労試験は行っていないが、道路橋で報告されている移動輪荷重による損傷についての検討には、疲労試験を行う必要があり、今後の検討課題である。さらに、本形式の構造は、コンクリート断面に対する鋼断面の比率が大きいいため、温度変化等によるひび割れも懸念されるため、この点についても検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたっては、新日本製鐵(株)木下雅敬氏、および、環境エンジニアリング(株)の各担当の方々に多大なご協力を得ました。記して謝意を表します。

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—S R C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。

(2006年9月11日受付)