

# SRC床版床組構造の鋼鉄道下路トラス橋の 設計手法に関する考察

矢島秀治<sup>1</sup>・内田裕市<sup>2</sup>・六郷恵哲<sup>3</sup>・北園茂喜<sup>4</sup>・市川篤司<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 ジェイアール西日本コンサルタンツ (株) (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-4-20)

E-mail:yajima@jrnc.co.jp

<sup>2</sup>正会員 岐阜大学工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail:uchida@cc.gifu-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー 岐阜大学工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

E-mail:rk@cc.gifu-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 西日本旅客鉄道(株) (〒530-8341 大阪市北区芝田二丁目4番24号)

E-mail:shigeki-kitazono@westjr.co.jp

<sup>5</sup>フェロー 財団法人 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:atsushi@rtri.or.jp

SRC床版を有する鋼鉄道下路トラス橋は、床組高さを低減できる等の長所がある。その一方で、主構による床版の拘束など、床版の力学挙動が必ずしも明確になっていない面がある。そのため、筆者らは大型模型供試体を用いた載荷実験および乾燥収縮実験を実施し、それらの知見に基づき、実際にSRC床版を有する3径間連続鋼下路トラス橋を建設した。

本研究は、上記トラス橋各部材の応力・ひずみ等を測定するとともに、床版のひび割れを考慮した解析により、下弦材、横桁、床版等の力学挙動を明らかにした。また、それらの結果をもとに、簡便かつ実務的な設計手法の提案を行った。

**Key Words :** *Steel-Reinforced-Concrete (SRC) slab, railway through-truss bridge, steel fiber reinforced concrete, composite truss bridge*

## 1. はじめに

鉄道橋では、レールレベル(R.L.)から桁最下端までの寸法が大きな制約を受けることが多く、従来から橋梁形式を下路形式とした上で、床高を更に低くする努力がなされてきた。床組構造には、開床式床組構造(以下、開床式)と閉床式床組構造(以下、閉床式)があるが、最近では騒音対策の面から閉床式としたものが多く、閉床式の中でも維持管理上有利なコンクリート床版構造が主流となっている。しかし、コンクリート床版構造とした場合には、縦桁および横桁の上フランジ上面にコンクリート床版が設置されるため、鋼床版床組構造に比べ床高が高くなるという欠点があった。

そこで、筆者らは、下路トラス橋の床組をSRC床版形式とする新しいタイプの床組形式を提案した<sup>1)</sup>。提案した床版形式は、床組の高さをできる限り低く抑えるために縦桁を省略し、左右下弦材間に横桁を2.5m~3.0m間隔で配置したSRC構造である。横桁間は橋梁支点付近の一部を除き、床版厚30cmである。下弦材と床版はスタッ

ドジベルを介して結合した。SRC床版形式とすることにより、主構の作用力が直接床版に伝わり(以下、主構作用)、床版コンクリートにひび割れが発生することが懸念された。このため、筆者らはSRC床版が橋軸方向に引張力を受けた場合のコンクリートのひび割れ挙動を把握するために、大型模型供試体を用いた載荷実験および乾燥収縮実験を行った<sup>2)</sup>。その結果、床版材料として膨張材を混入した鋼繊維補強コンクリート(以下、SFREC)を適用することにより、床版のひび割れは許容値以下に制御できることが明らかになった。そこで、これらの模型実験の結果を踏まえ、床組構造をSRC床版形式とする3径間連続複線下路トラス橋を建設した。しかしながら、本橋梁の設計では、SRC床版にひび割れが発生した場合の合成効果が必ずしも明確にならなかったことから、主構の設計において、床版との合成効果を考慮しておらず、橋梁の挙動を的確に反映したものになっていなかった。

このようなことから、本研究は、SRC床版を用いた鋼鉄道下路トラス橋を対象に、合成効果を考慮した設計手

法を確立することを目的にしている。その一環として、実橋でのたわみ、および部材のひずみを測定することにより、SRC床版および下弦材の力学挙動について検討した。また、SRC床版のひび割れを考慮した非線形FEM解析手法についても検討した。さらに、それらの検討結果をもとに、簡便かつ実務的な設計手法を提案した。

## 2. SRC床版形式のトラス橋の概要

### (1) 概要

本研究で対象とするSRC床版形式の下路トラス橋を写真-1および図-1に示す。本橋は河川改修に伴い、上路鉸桁から取替えられたもので、主構間隔8.7m、主構高8.0m、支間51+55+51m全長約160mの3径間連続複線下路トラス橋である<sup>3)</sup>。

SRC床版形式は、従来のコンクリート床版形式に比べ床高を約65cm低く抑えることができることに加え、橋梁全体の鋼重が従来のコンクリート床版形式に比べ約20%

低減できる<sup>2)</sup>。また、床組の鋼部材がコンクリートで覆われることから、大幅な騒音低減が可能である<sup>4)</sup>。列車速度120km/hにおける、橋桁からの水平距離0m、12.5mおよび25.0m地点の下路トラス橋の床組形式別騒音レベル比を図-2に示す<sup>5)</sup>。なお、騒音レベル比は、橋梁からの水平距離12.5mの場合のSRC床版構造の騒音レベル比を1.0としている。図からSRC床版形式は同鋼直結式およびマクラギ直結式の開床式床組構造に比べて、騒音を大幅に低減できることがわかる。この値は防音壁のない場合の測定結果であり、それでもレール面から高さ1.3mの防音壁を取付けたRCラーメン高架橋と同程度の値を示している。

その他にもSRC床版形式は、横桁がコンクリートで覆われているため、塗装の塗り替え等、床組のメンテナンスの軽減も期待できる。



写真-1 SRC床版形式の下路トラス橋

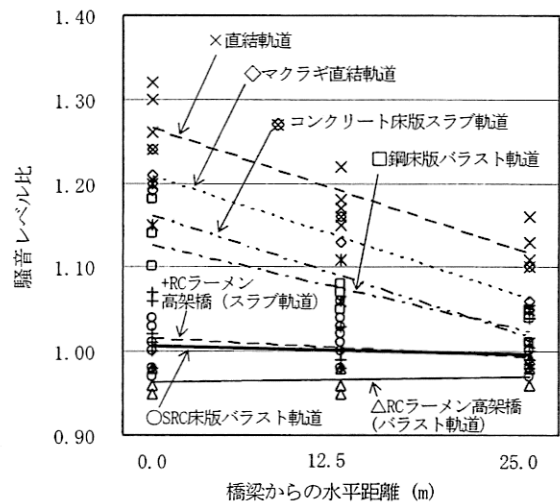
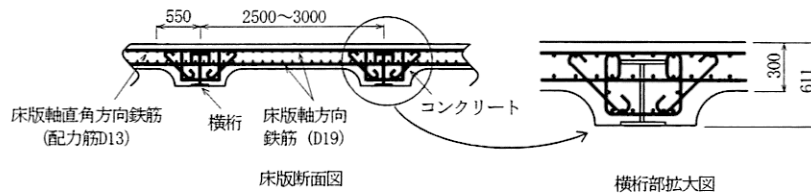
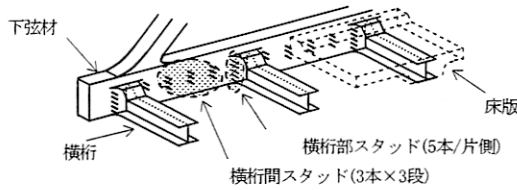


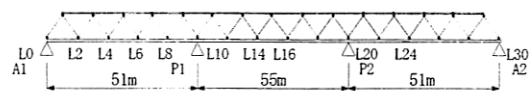
図-2 下路トラス橋の床組構造別騒音レベル



(a) 床版と横桁の構造



(b) 下弦材と床版のずれ止め配置



(c) 実橋側面図

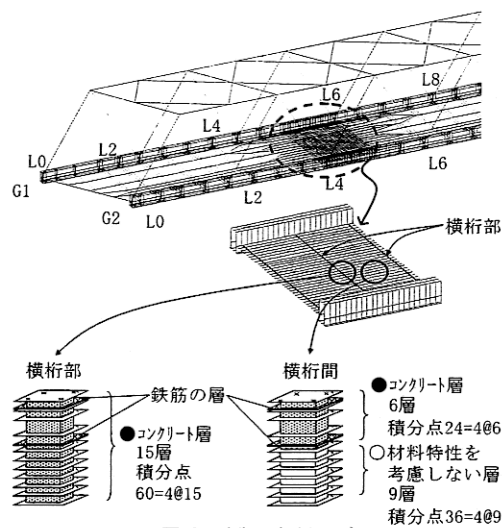
図-1 橋梁概要とSRC床版形式

## (2) 設計の考え方と問題点

従来のコンクリート床版形式の鋼鉄道下路トラス橋の設計では、床組と主構を別々に解析し、主構と床版の合成効果は考慮しない。これは、コンクリート床版に施工目地を配置していることから、主構と床版は非合成として考えているからである。一方、SRC床版形式は収縮目地が設けられないため、主構と床版とは合成されている。合成構造として設計するためには、コンクリートのひび割れを考慮する必要があるが、そのような設計手法はまだ確立されていない。そこで、(1)の実橋の設計では、これまでと同様、主構とSRC床版を非合成として設計したが、各部材が安全側になるように、以下のように設計した。

- ① 主構は、床版および軌道荷重等を含めた死荷重が下弦材に直接載荷され、横桁を介して下弦材に設計活荷重(EA-17荷重)が載荷されるとし、上弦材、下弦材、斜材、および横桁を梁要素と考えて、各部材の断面を算定する。
- ② 横桁は、主構中心間を支間とするSRC構造の梁として設計する。
- ③ 主構作用に対する床版コンクリートのひび割れ幅は、床版と下弦材が全長にわたって結合され、軸方向に同じひび割れが生じるとして算定する。さらに、大型床版模型を用いた引張載荷実験の結果にもとづき、ひび割れ幅を制限値以内に納めるために、床版コンクリートを鋼繊維で補強する。

上記の設計は各部材の耐力に余裕をもたせた設計にはなっているが、床版コンクリートの挙動が反映されたものになっておらず、合理的な設計とは言えない。合理的な設計法にするためには、主構とSRC床版を合成して設計する必要があり、その場合、床版が主構作用による軸



力の一部を負担するが、床版にひび割れが発生すると、床版の軸方向の剛性が低下し、床版の負担が小さくなる点を考慮する必要がある<sup>2)</sup>。すなわち、設計ではこのような主構と床版の分担率の変化を考慮する必要がある。

## 3. 下弦材と床版を合成した解析方法

SRC床版形式のトラス橋は、2. (2)に述べたように、実際には下弦材と床版が合成されていると考えられる。このため、本研究ではSRC床版の合成効果を見込み、コンクリートのひび割れを考慮した非線形FE解析（以下、合成解析）を行った。

### (1) 解析方法の概要

#### a) 主構と床版のモデル化

本橋の解析モデルを図-3に示す。解析モデルは、上弦材、斜材、端柱、上横構および横桁を梁要素、下弦材および床版をシェル要素（以下、詳細床版シェルモデル）とした<sup>6)</sup>。

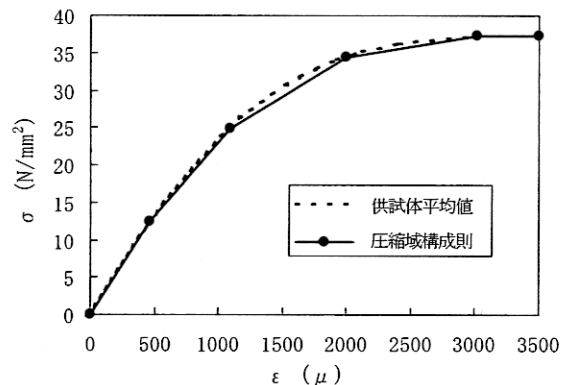
L4-L6間の床版のシェル要素サイズは、文献7)より算出した安定ひび割れ状態におけるひび割れ間隔に合わせて一辺約250mmの矩形モデルとした。なお、L4-L6間以外の横桁上の床版要素サイズは、橋軸方向を横桁幅の1/2 (275mm)、橋軸直角方向を床版幅の1/4 (2040mm)とした。また、横桁間については、橋軸方向を横桁間床版純支間(1560mm~2440mm)とし、橋軸方向を床版幅の1/4 (2040mm)の矩形要素モデルとした。

床版横桁間の各シェル要素は床版厚方向に15層に分割し、1層あたり積分点4個を与えた（図-3）。

また、下弦材と床版とは剛結されているとした。

#### b) 各部材の応力とひずみの関係

鉄筋、下弦材および横桁は弾性体 ( $E_s=2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ )とした。



床版コンクリートの圧縮域における応力-ひずみの関係は、円柱供試体の圧縮試験結果<sup>2)</sup>に基づく3供試体の平均値を多直線近似して使用した(図-4)。

また、コンクリートの引張域においては、コンクリート供試体の曲げ試験<sup>2)</sup>から求めた引張軟化曲線<sup>3)</sup>に、鉄筋の影響を考慮したテンションスティフニング曲線に基づく応力-ひずみ関係を構成則とする分散ひび割れモデルを採用した(図-5)。すなわち、①曲げ試験結果から求まる弾性域(コンクリートの引張強度( $f_t$ )以下)、②コンクリートのひずみ( $\epsilon_c$ )が $200\mu$ 以下の非線形領域、③ $\epsilon_c$ が $200\mu$ 以上の式(1)を適用する非線形領域、とする連続曲線を構成則として設定した<sup>9)</sup>。

$$\sigma = f_t (a / \epsilon)^b \quad (\epsilon > 0.0002) \quad (1)$$

ここに、 $f_t$  : コンクリートの一軸引張強度

$a, b$  : 鋼繊維混入率および鉄筋比から定まる定数( $a=0.00004, b=0.17$ )

## (2) 模型実験結果に基づく解析方法の検証

実橋の建設に先立ち実施した模型実験<sup>2)</sup>の供試体を(1)の方法によって解析した結果を、実験結果と比較することにより、解析方法の検証を行った。

### a) 実験概要

SRC床版床組構造供試体を用いた下弦材の引張荷重実験供試体および実験方法を図-6に示す<sup>2)</sup>。

供試体の寸法は実橋の1/4スケールとし、床版と下弦材の鋼材比および鉄筋比を、実橋に一致させた。また、床版コンクリートの鋼繊維混入率(体積比1.0%)も実橋に合わせた。

引張荷重実験は、供試体の一方の端を鋼製枠を介してPC鋼棒により反力壁に固定し、下弦材を模擬したH形鋼の他端をヒンジ支持し、ジャッキにより引張力を加えた。

模型供試体の最大引張荷重は、実橋において床版コンクリートが硬化した後の死荷重とEA-17荷重を複線荷重した場合の下弦材の設計引張力に相当する荷重(410kN)の約2倍とした。

### b) 解析モデル

床版のモデル化は、(1)の方法によった。また、床版橋軸方向要素サイズは、一般部150mm、横桁部75mm、ハ

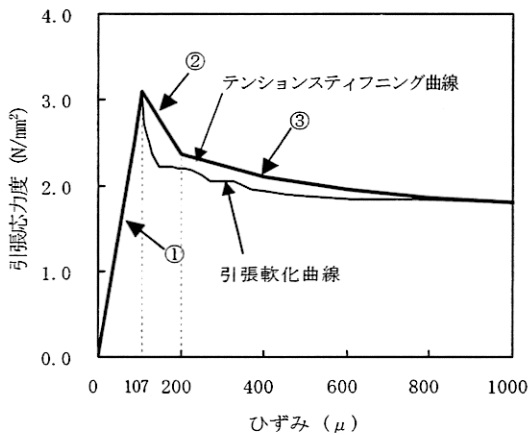


図-5 コンクリートの引張応力-ひずみ関係

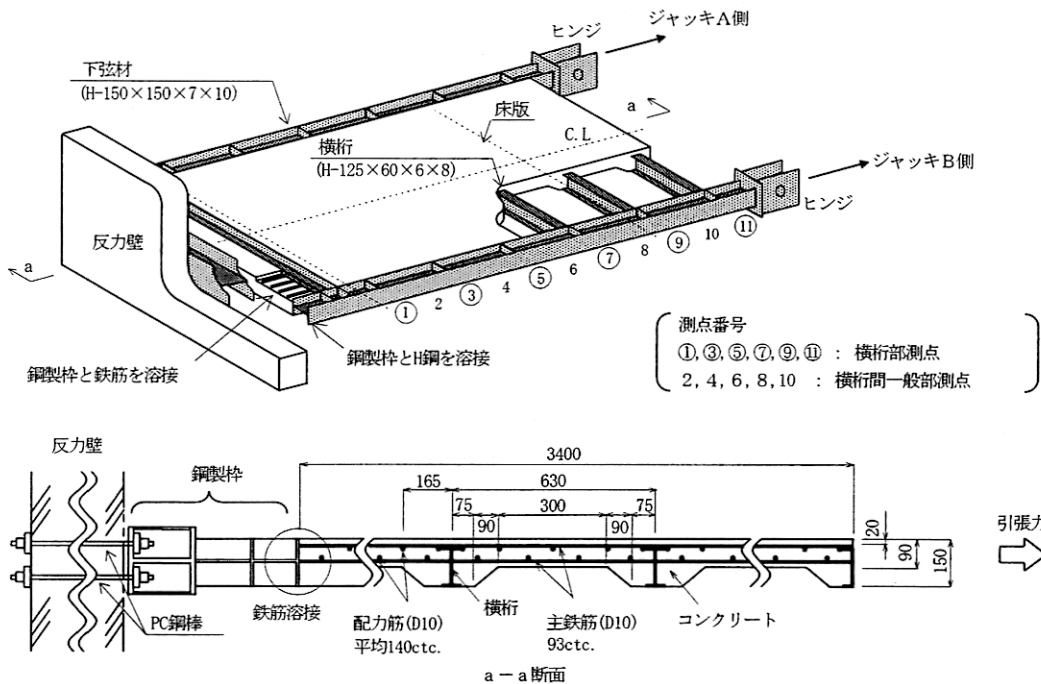


図-6 模型供試体の軸引張荷重実験

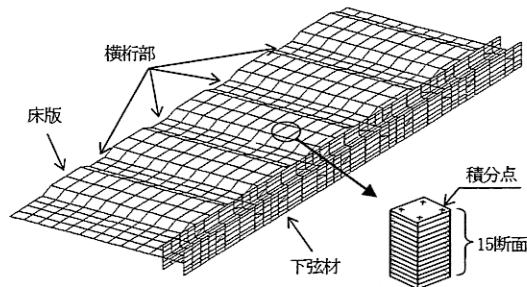


図-7 2次元シェルモデル (ハンチ部折板モデル)

ンチ部90mmとした。なお、橋軸直角方向の要素サイズは、供試体の幅等を考慮して何れの場合も92.7mmとした。解析モデルを図-7に示す。

床版のモデル化は、(1)の方法によった。また、床版橋軸方向要素サイズは、一般部150mm、横桁部75mm、ハンチ部90mmとした。なお、橋軸直角方向の要素サイズは、供試体の幅等を考慮して何れの場合も92.7mmとした。解析モデルを図-7に示す。

なお、供試体では床版と下弦材の接触面積が小さく、荷重の比較的初期に付着が切れる<sup>2)</sup>ことから、下弦材と床版とは、コンクリートの付着を無視して、ジベルのせん断バネにより結合されているものとした。

c) 各部材の構成則

鋼部材、床版コンクリートの圧縮域および引張域における応力-ひずみの関係は(1)b)に従うものとした。

d) 解析結果

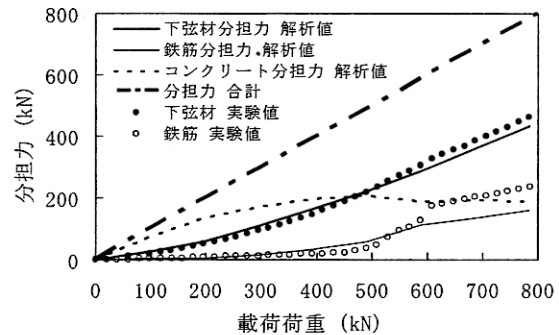
SRC床版の横桁間 (測点4, 測点6) における下弦材および鉄筋の分担力の実験値と解析値を図-8に示す。横軸に下弦材引張荷重を、縦軸に下弦材と鉄筋の分担力を示す。

ここに、鉄筋ひずみの実験値は局所的なひずみであるのに対して、解析値は鉄筋の平均ひずみを表しており、実験値と解析値を単純には比較できない。そこで、供試体の軸直角断面内 (測点4, 6) の半数の鉄筋ひずみを平均して鉄筋分担力の実験値とし、その値と解析値を比較した。

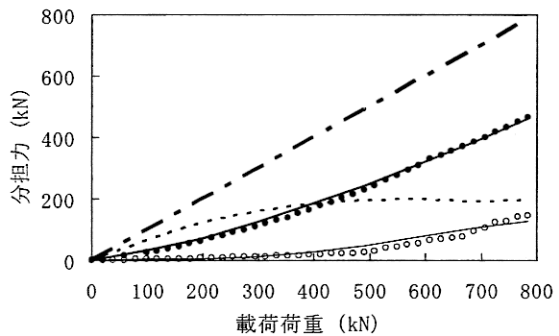
測定点4における引張荷重600kN以上の解析値と実験値の鉄筋分担力には乖離が見られるが、引張荷重600kN以下においては両者がよく一致している。また、下弦材については、高荷重域においても解析値と実測値がよく一致している。

測定点6においては、測定点4で見られた高荷重域での鉄筋の分担力の解析値と測定値の乖離もなく、よく一致している。

本実験では設計荷重に相当する載荷荷重が410kNであり、本解析モデルはSRC床版の挙動を、その1.5倍程度まで十分な精度で評価することが可能と考えられる。



(a) 測点4 (横桁間一般部)



(b) 測点6 (横桁間一般部)

図-8 供試体SFRECの荷重分担力

4. 実橋測定と解析結果

(1) 実橋測定概要

SRC床版および主構の力学特性を明らかにするために、実橋において列車通過時のトラス橋のたわみと各部材のひずみを測定した。測定部材は、床版鉄筋、下弦材、および横桁である。また、測定位置は側径間 (A1-P1間) の中央部 (L4-L6間) とした (図-3)

a) 測定方法

今回の実橋測定において対象とした部材および測定方法を以下に示す。

① 床版鉄筋

床版鉄筋のひずみ測定位置を図-9(a)に示す。ゲージ貼り付け位置は、横桁部と横桁間の上り線軌道直下 (C-C)、下弦材近傍 (D-D)、床版中央 (A-A)、下り線側の軌道直下 (a-a) の床版の橋軸方向の鉄筋 (以下、床版軸方向鉄筋)、および床版の橋軸直角方向の鉄筋 (以下、床版軸直角方向鉄筋) とした。

また、図-9(b)に示す横桁の橋軸直角方向の鉄筋 (以下、横桁主鉄筋) についても計測した。

② 横桁

横桁のひずみ測定位置を図-9(b)に示す。上下フランジの測定は、上下線軌道直下および横桁支間中央とし、フランジ両縁端から30mmの位置とした。

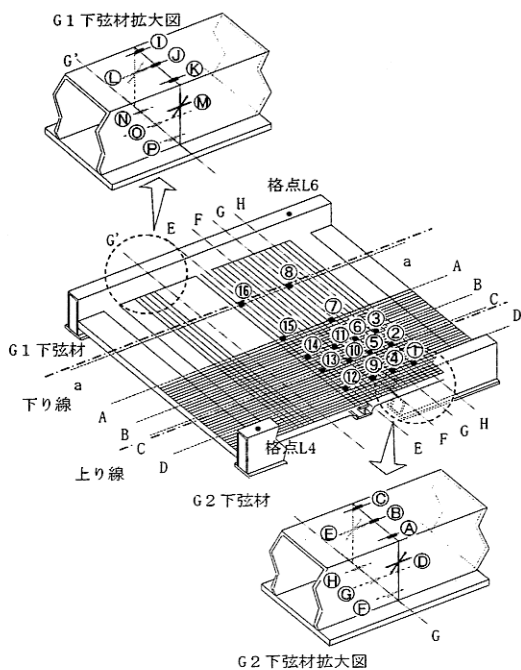


図-9(a) 下弦材および床版鉄筋のゲージ位置

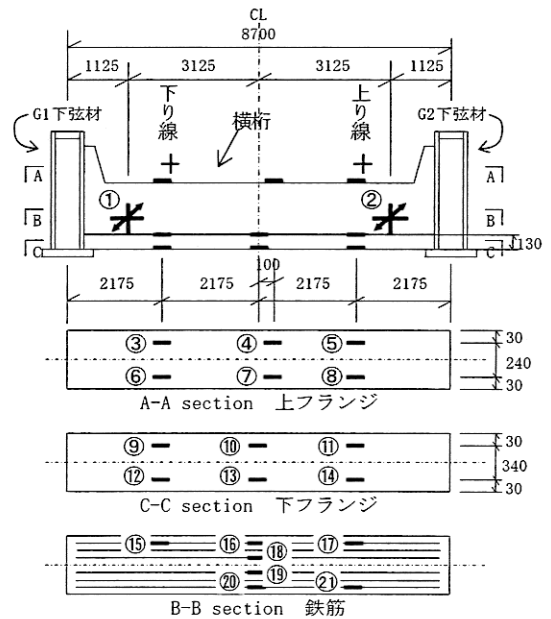


図-9(b) 横桁のゲージ貼付け位置

③ 下弦材

下弦材のひずみ測定位置を図-9(a)に示す。ゲージ貼り付け位置は、格点および横桁の影響が少ない横桁間とした。なお、下弦材中立軸近傍の腹板両面には3軸ひずみゲージを設置した。

④ 主構たわみ

主構たわみは、A1-P1間中央部左右格点部(G1-L6, G2-L6)の下弦材下フランジに取り付けた変位計により測定した。

b) 測定列車

実橋測定に用いた測定列車を図-10に示す。本橋は、機関車けん引列車を想定したEA-17荷重(図-11)で設計されている。

c) 解析モデルへの列車荷重の載荷

解析モデルへの列車荷重の載荷は、軸重がマクラギ下面に一様に分布し、さらに道床の深さ方向に45°の角度で分散すると仮定し、橋軸方向約1.2m、橋軸直角方向約2.9mの部分分布荷重として床版中立面に作用させた<sup>10)</sup>(図-12)。

なお、対象部材毎に最大応力が発生する車両の軸配置は、実橋測定結果に基づき設定した。

(2) 測定結果と解析値の比較

今回測定した33列車の内、軸重の大きい1列車を抽出し、当該列車に対する主構たわみ、床版鉄筋、横桁および下弦材応力について、測定値と解析値を比較した。

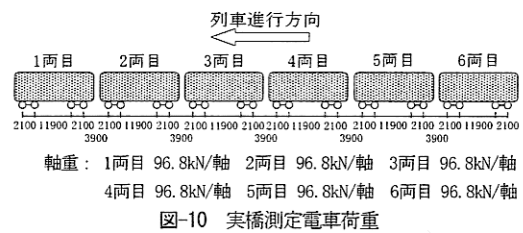


図-10 実橋測定電車荷重

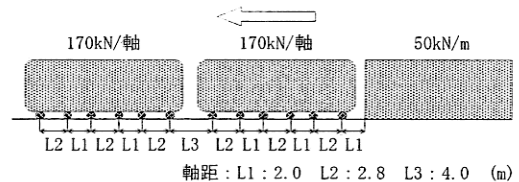


図-11 EA-17荷重の軸重・軸距

a) 着目部材に最大ひずみを生じさせる軸配置

各部材に最大ひずみを生じさせる車両軸配置は以下のケースを考えた。

- ① 床版軸方向鉄筋に対しては、横桁部軌道直下の上鉄筋ひずみ(図-9(a)ゲージNo. ⑬)および横桁間軌道直下の下鉄筋ひずみ(図-9(a)ゲージNo. ⑤)が最大となる2ケースとした(図-13(a), (b))。
- ② 横桁に対しては、軌道直下の横桁下フランジのひずみ(図-9(b)ゲージNo. ⑪と⑭の平均値)が最大となるケースとした(図-13(c))。
- ③ 下弦材に対しては、下弦材下フランジのひずみ(図-9(a)ゲージNo. ⑥, ⑧, ⑨の平均ひずみ)が最大になるケースとした(図-13(d))。

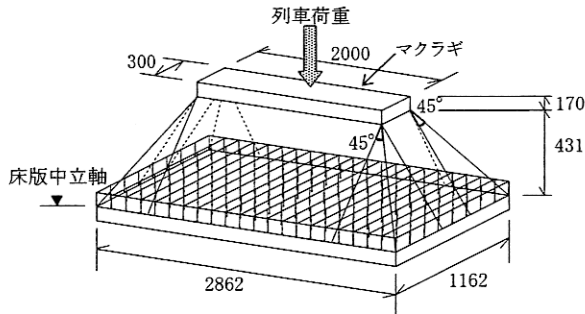


図-12 列車荷重の床版への載荷方法

④ 主構たわみについては、G2主構の格点L-6の鉛直変位量が最大となるケースとした(図-13(e))。

b) 床版軸方向鉄筋(主構作用)

横桁間中央の床版軸方向鉄筋の下筋のひずみが最大となる車両軸配置(図-13(b))における、軌道直下(C-C)および横桁間中央における橋軸直角断面(G-G)の床版軸方向鉄筋の下筋のひずみ計測値および解析値を図-14に示す。

横桁間の床版軸方向鉄筋には、軸方向引張力と横桁間を支間とする曲げが同時に作用しており、横桁間中央の下側鉄筋が最大となっている。

横桁部の床版軸方向上側鉄筋のひずみが最大になる場合(図-13(a))の床版軸方向鉄筋ひずみの計測値および解析値を図-15に示す。

横桁部の床版は横桁間を支間とする連続梁の挙動をしているものと推察される。横桁部の床版軸方向上側鉄筋と横桁間の床版軸方向下側鉄筋の引張ひずみを比較すれば、横桁間の方が大きい。

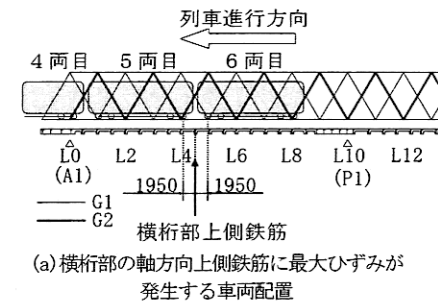
以上のことから、床版は主構作用による軸力と横桁間を支間とする曲げが作用していることが分かる。本ケースでは測定列車が設計荷重に比べて小さいことから、床版コンクリートが弾性限界内にあり、下弦材と床組は合成され、弾性挙動しているものと推察される。

また、図から、床版軸方向鉄筋の合成解析値は、測定値にほぼ一致することがわかる。

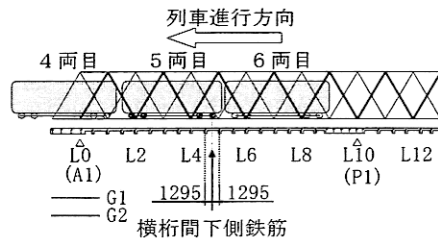
c) 横桁(床組作用)

図-13(c)に示す車両軸配置の横桁および横桁主鉄筋のひずみ測定値と解析値を図-16(a)に示す。横桁上下フランジ、床版軸直角方向鉄筋、および横桁主鉄筋のひずみは、列車が載荷された軌道直下が最大となっており、横桁は両下弦材を支間とする単純梁に近い挙動をしていることがわかる。

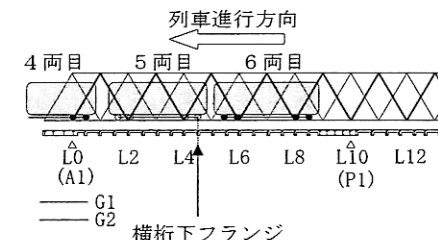
また、床版軸直角方向鉄筋、上フランジ、横桁主鉄筋、および下フランジのひずみは、平面保持されており、コンクリート、鉄筋および鉄骨は一体挙動しているものと考えられる(図-16(b))。



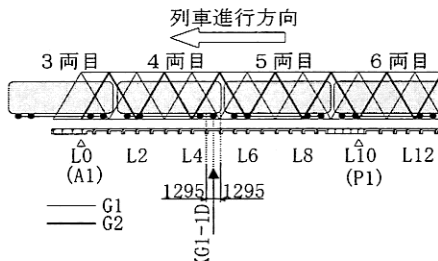
(a) 横桁部の軸方向上側鉄筋に最大ひずみが発生する車両配置



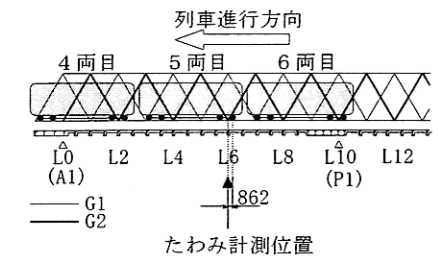
(b) 横桁間の軸方向下側鉄筋に最大ひずみが発生する車両軸配置



(c) 横桁下フランジに最大ひずみが発生する車両軸配置



(d) 下弦材下フランジに最大歪が発生する車両軸配置



(e) G2主構L6に最大たわみが発生する車両軸配置

図-13 測定列車が着目部材に最大ひずみを与える軸配置

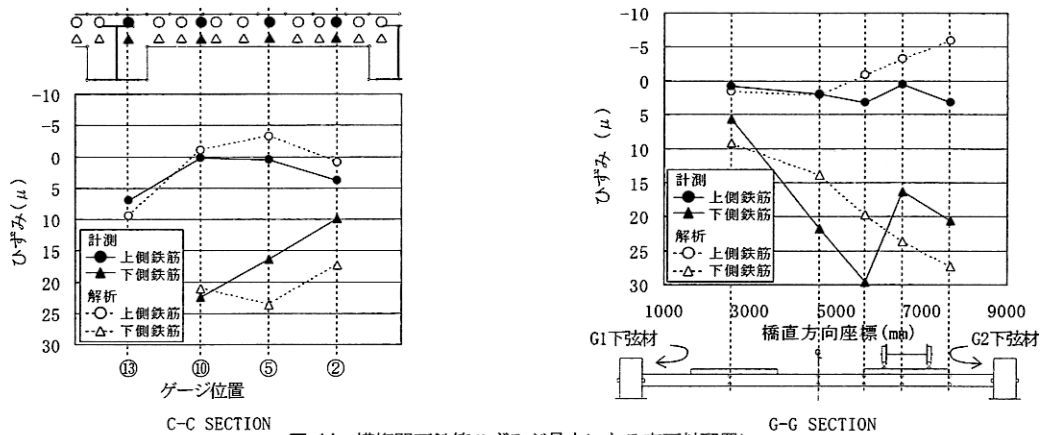


図-14 横桁間下鉄筋ひずみが最大になる車両軸配置における床版軸方向鉄筋のひずみ

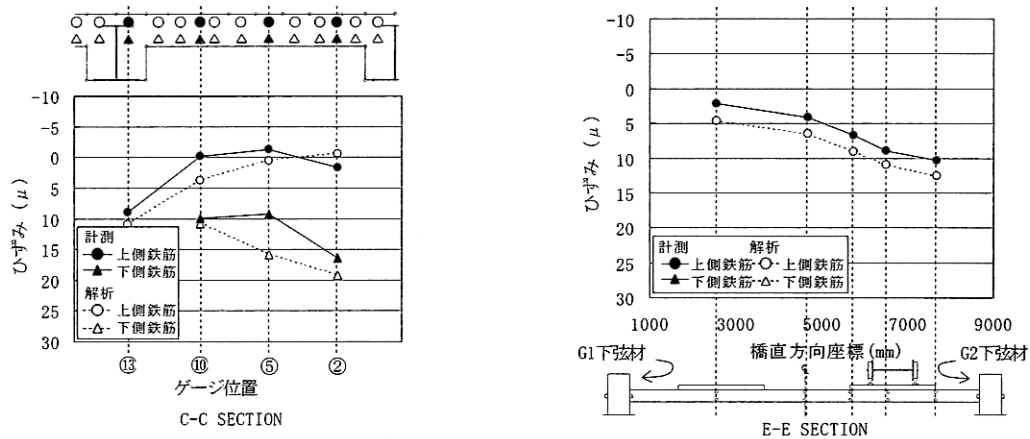


図-15 横桁部上側鉄筋ひずみが最大となる車両軸配置における床版軸方向鉄筋のひずみ

d) 下弦材

図-13(d)に示す車両軸配置のG2下弦材上下フランジとウェブのひずみ測定値と解析値を、下弦材中立軸の曲げひずみが0と仮定して図-17に示す。

本図より、下弦材には軸引張力と曲げが同時に作用していることがわかる。

また、下弦材は平面保持されており、曲げ作用による上下フランジのひずみと軸力によるひずみの割合は、概ね4:1であり、曲げが卓越している。また、測定値と解析値はよく合っている。

e) 主構のたわみ

図-13(e)に示す車両軸配置の両主構格点L-6のたわみを表-1に示す。なお、表には下弦材と床版を非合成とした解析値も示した。

格点L-6の実測たわみは、下弦材と床版が合成されているとして解析したたわみ値の80~85%、下弦材と床版を非合成として解析した場合のたわみ値の65%~70%で

表-1 主構たわみ解析結果 (測定電車)

	(a)G1主構	(b)G2主構	(b)/(a)
①測定値 (mm)	1.80	3.96	2.20
②合成解析値 (mm)	2.26	4.66	2.06
③非合成解析値 (mm)	2.50	6.22	2.49
解析値/計測値	①/②	0.80	0.85
	①/③	0.72	0.64

ある。本橋のようにコンクリート床版を有するトラス橋のたわみは、床版と下弦材が合成されているとして解析した結果に近い。なお、解析値に比べ実測値が小さくなっているが、これはレールおよび橋側歩道の剛性を解析モデルに考慮していないためと考えられ、桁の健全度調査等<sup>11)</sup>でのたわみ測定結果の傾向ともよく一致している。

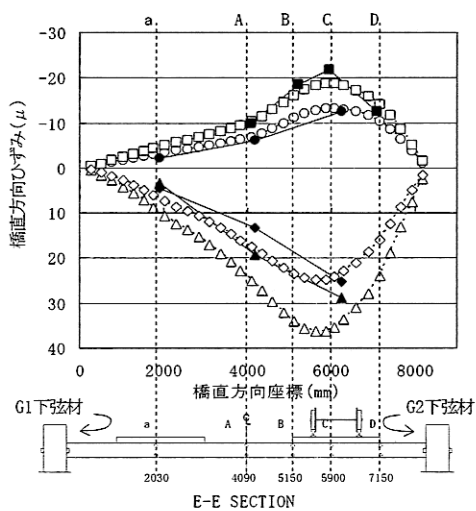
一方、列車載荷側主構(G2-L6)のたわみと列車非載荷側主構(G1-L6)のたわみの比は、2.2:1.0であった。合成解析による両主構のたわみ値の比が2.1:1.0、非合成とした場合の比が2.5:1.0であり、これらのことから



表-2 L4-L6間の分担力 (電車荷重)

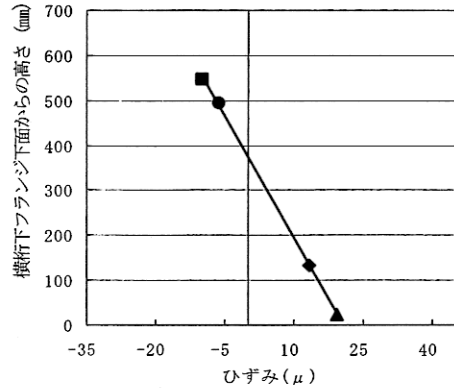
(単位:kN)

	G1				G2				G1+G2	
	下弦材	鉄筋	コンクリート	鋼材	下弦材	鉄筋	コンクリート	鋼材	鋼材	コンクリート
①測定値	47.3	7.0	-	54.3	116.7	22.7	-	139.4	193.7	-
②合成解析値	39.5	21.1	178.9	60.6	91.2	33.9	282.6	125.1	185.7	461.5
③非合成解析値	186.3	21.9	-	208.2	429.8	13.0	-	442.8	651.0	-
①/②	1.20	0.33	-	0.89	1.28	0.67	-	1.11	1.04	-
①/③	0.25	0.32	-	0.26	0.27	1.74	-	0.31	0.30	-



(a) 橋軸直角方向 (E-E)

マーカー	計測値	解析値
床版軸直角方向鉄筋	■	□
横桁上フランジ上面	●	○
横桁主鉄筋	◆	◇
横桁下フランジ上面	▲	△



(b) フランジおよび鉄筋のひずみ (A-A)

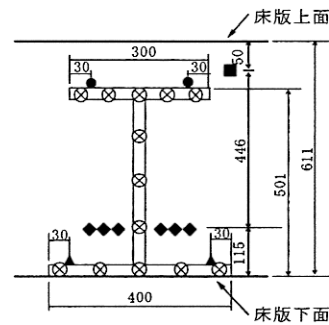


図-16 横桁フランジおよび鉄筋のひずみ

も、コンクリート床版を有するトラス橋は、床版と下弦材が合成された挙動を示すことがわかる。

f) 床版と下弦材の分担力

図-13(d)に示す車両軸配置における、下弦材および床版軸方向鉄筋の軸力成分のみに着目し、下弦材および床版軸方向鉄筋の軸力分担力を以下の方法により推定した。

- ① 横桁間床版軸方向鉄筋のひずみを曲げ成分と軸力成分に分解し、軸力成分に相当する鉄筋ひずみに鋼の弾性係数と鉄筋総断面積を乗じて鉄筋軸方向力を算出する。なお、ひずみゲージが貼り付けられていない鉄筋は、ひずみ測定鉄筋間を按分して鉄筋の軸方向力を推定した。
- ② 下弦材の軸方向応力は、上下フランジの応力を曲げ応力度と軸方向応力度に分解し、軸方向応力度

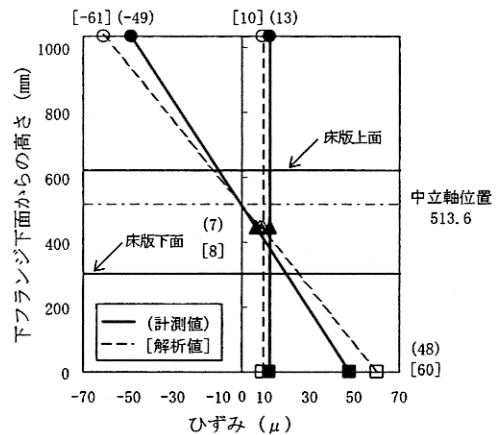


図-17 測定列車載荷時の下弦材ひずみ

に下弦材断面積を乗じて下弦材軸方向力とする。

測定結果から求めたG1およびG2のL4-L6間の軸力と解析により求めた軸力を表-2に示す。

G1, G2の鉄筋と下弦材の分担軸力を合算した軸方向力(以下、鋼材負担軸力)の測定値と合成解析値を比較すれば、両者には、G1, G2ともに約10%の差があるが、床版全幅の鉄筋と左右下弦材を合計した鋼材負担軸力は、測定値と合成解析値とで殆ど差がない。測定値の鋼材負担軸力(193.7kN)は、非合成解析値の鋼材負担軸力(651kN)の約30%となっている。この値はコンクリート床版の鋼換算断面積(3456cm<sup>2</sup>)、下弦材断面積(901cm<sup>2</sup>)および軸方向鉄筋断面積(371cm<sup>2</sup>)を合算した値(4728 cm<sup>2</sup>)に対する、下弦材と軸方向鉄筋の断面積(1272 cm<sup>2</sup>)の割合(27%)にほぼ等しい。

すなわち、列車荷重を載荷した場合の下弦材の挙動は、床版コンクリートの軸剛性を考慮した合成解析により想定できると考えられる。

## 5. 設計活荷重に対する解析

### (1) 設計活荷重作用時の床版と下弦材の挙動

実橋測定においては、下弦材とコンクリート床版は合成されており線形挙動していた。これは測定列車が設計列車荷重に比べて小さいためであると考えられる。

一方、設計活荷重であるEA-17荷重(図-11)を複線載荷した場合には、測定列車に比べて大きく、コンクリート床版のひび割れの発生を考慮した検討が必要になる。そこで、図-3に示した解析モデルを用い、非線形FE解析を行った。

部材に最大応力を与える軸配置は、図-13に示したように対象部材毎に異なる。このため、橋梁全長にEA-17

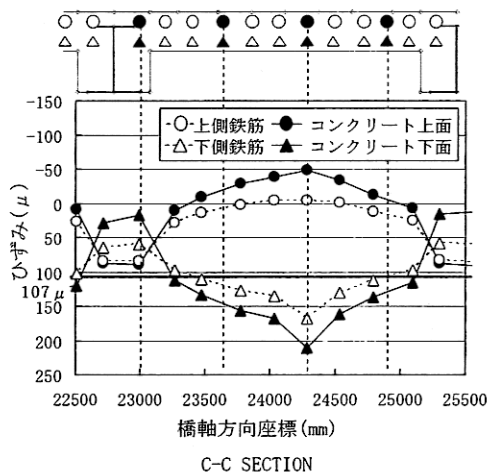


図-19 EA-17荷重載荷時の横桁間床版鉄筋ひずみ

荷重を影響線載荷し、G2-L6格点の鉛直変位が最大となる車両軸配置(図-18)を設定し、これらの軸配置を僅かに前後に移動し、対象部材に最大応力が発生する軸配置を設定した。

### (2) 解析結果

#### a) 床版コンクリートおよび床版軸方向鉄筋

横桁間の床版下鉄筋が最大ひずみを生じる車両軸配置の荷重と合成後死荷重を上記モデルに載荷して解析した結果、横桁間のコンクリート床版ひずみは、その大部分が図-5に示す引張弾性限界107μ以上であり、非線形領域にあることがわかる(図-19)。特に、車両軸直下の横桁間床版下面のひずみが急増している。これは、床版コンクリートにひび割れが発生し、これまでコンクリートが負担していた応力が床版軸方向鉄筋と下弦材に移行し、両者のひずみが急増したものと推察される。

なお、横桁上の床版上鉄筋が最大ひずみを生じる車両軸配置と合成後死荷重を同一モデルに載荷した結果、横桁上では床版軸方向鉄筋の上筋のひずみ(84μ)が、

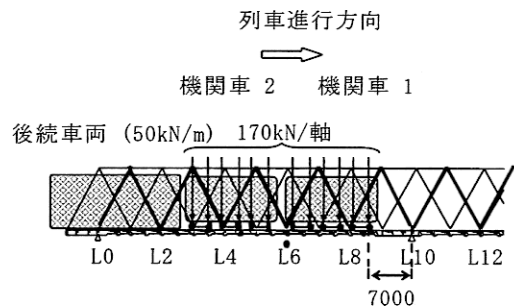
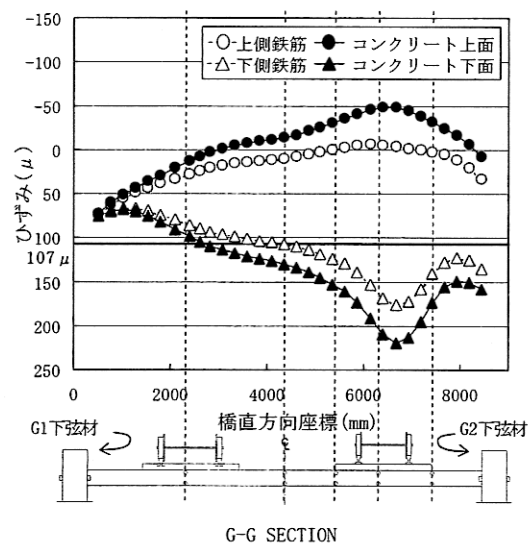


図-18 L6に最大たわみが生じる軸配置(EA-17)



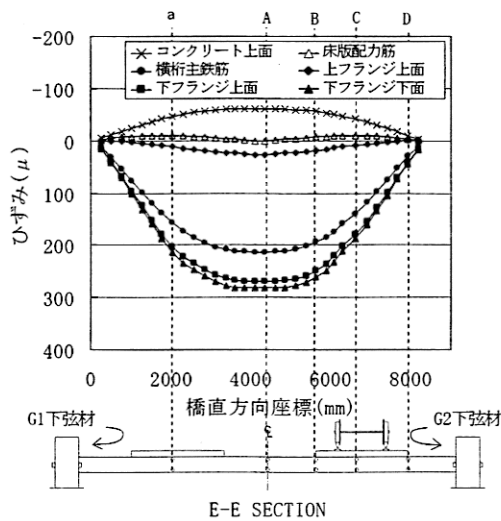


図-20 EA-17荷重載荷時の横桁のひずみ

表-3 主構たわみ解析結果(EA-17)

	(a)G1主構	(b)G2主構	(b)/(a)	
①非線形解析値 (mm)	20.11	19.93	0.99	
②線形解析値 (mm)	19.60	19.19	0.98	
非線形/線形	①/②	1.03	1.04	-

横桁間の床版軸方向下側鉄筋の最大ひずみ(169 $\mu$ )の約50%となり、横桁上の床版コンクリートは線形領域内にあることがわかった。したがって、SRC床版のコンクリートのひび割れ照査は、実務上、横桁間下面のみに着目すればよいと考えられる。

#### b) 横桁

横桁下フランジのひずみが最大になる車両軸配置の荷重を載荷した結果を図-20に示す。

横桁下フランジの最大ひずみは約280 $\mu$ である。一方、コンクリート表面の圧縮ひずみは約-60 $\mu$ 、横桁の上フランジのひずみは約25 $\mu$ である。横桁上フランジは若干の引張ひずみを受けているが、床版軸直角方向鉄筋より外方のコンクリートには圧縮ひずみが生じており、床組作用により床版に橋軸方向のひび割れが発生する可能性は少ないと考えられる。

#### c) 下弦材

下弦材下フランジのひずみが最大になる車両軸配置の荷重を載荷し、下弦材上下フランジのひずみを求めた。下弦材のひずみは平面保持の関係が成り立つとして、G2側の軸ひずみと曲げひずみに分けて図-21に示した。

下弦材のひずみは、軸方向ひずみが約70 $\mu$ 、曲げモーメントによる下フランジの引張ひずみが約210 $\mu$ である。曲げによる上下フランジのひずみと軸力によるひずみの比は、実橋計測の値が4:1であったものが3:1になっている。これは、床版にひび割れが発生して、下弦材の軸力分担率が大きくなったためと考えられる。

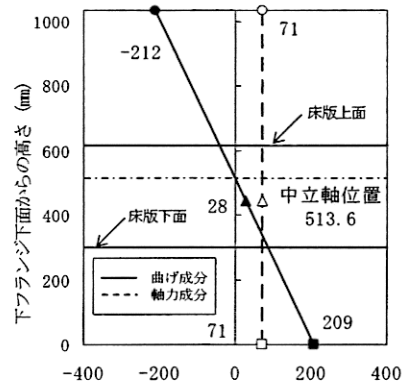


図-21 下弦材のひずみ (EA-17)

#### d) 主構たわみ

G2主構格点L6のたわみが最大になるEA-17荷重の車両軸配置を複線載荷した場合の両主構のL6格点のたわみを表-3に示す。本表の①は図-5に示すテンションステイニング曲線に基づく応力ひずみ関係を構成則とする非線形解析結果を、②はひび割れを無視した線形解析結果を示す。①は②に比べて若干大きくなっているものの、その差は僅かであり、設計活荷重載荷時の主構のたわみは線形解析値を用いても実務上問題ないものと考えられる。

### 6. 簡便な設計手法の検討

実橋の応力測定および解析結果から、SRC床版形式の下路トラス橋の床版と下弦材は合成されて一体挙動していることがわかった。ただし、設計活荷重載荷状態での引張領域のコンクリート床版は一部が非線形領域にある。このような橋梁を設計する方法としては、前述した詳細床版シェルモデルを用いた非線形解析を行うことが考えられる。しかし、この方法は、部材毎に荷重ケースを設定し、詳細なシェルモデルにより解析する必要があり煩雑で実務的でない。そこで、線形骨組解析を繰り返すことで床版と主構との合成効果と非線形性を考慮した、簡便で実務的な設計手法について検討した。すなわち、図-3に示した詳細床版シェルモデルと簡易解析法による解析結果を比較し、簡易解析法の実務設計への適用性を検証した。

なお、本検討では実務設計時の荷重を想定して、5.において検討した荷重に加えて、衝撃荷重(衝撃係数0.323)、ロングレール縦荷重(1軌道当たり10kN/mとし、桁の全長を乗じた荷重)等についても考慮した<sup>12)</sup>。

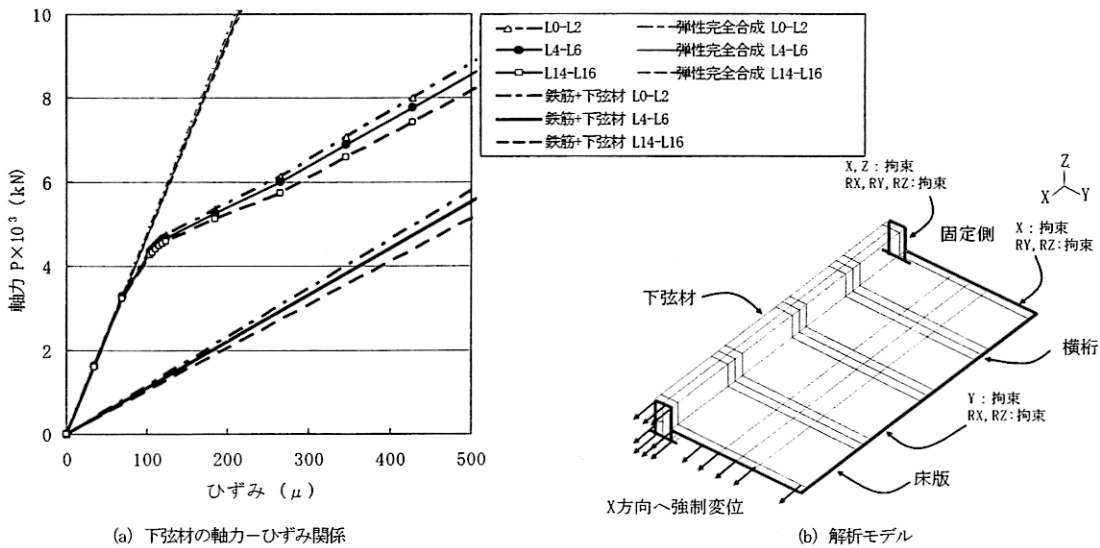


図-22 床版の非線形性を考慮した下弦材の軸力-ひずみ関係

表-4 床版の合成効果を考慮した床版シェルモデルと簡易解析法によるひずみ

単位:ひずみ (μ)

解析法	床版シェルモデル							簡易法	比較			
	下弦材 + 床版	下弦材 G1・G2 平均	床 版				⑧		②/⑧	③/⑧		
			全体	鉄筋							コンクリート	
				平均	上下面 平均	上面					下面	
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	②/⑧	③/⑧			
L0-L2	66	53	67	67	67	41	94	68	0.79	0.99		
L2-L4	139	137	139	131	140	86	195	161	0.85	0.86		
L4-L6	212	197	213	213	213	43	383	201	0.98	1.06		
L6-L8	88	119	85	85	85	37	134	93	1.27	0.92		

(1) 簡易解析法

模型実験および実橋測定結果から、床版と下弦材が一体となって挙動していることに加え、図-17に示したように、床版は下弦材中立軸近傍にあるため、床版が下弦材の曲げ剛性に与える影響は小さい。したがって、下弦材の曲げ剛性に与える床版の影響を無視し、下弦材への床版の影響は軸力のみに影響すると考えた。

簡易解析法は、図-22に示す床版の効果を下弦材断面に見込んだ軸力-ひずみ関係を用いて、床版を鋼断面に換算して下弦材断面に加算することにより、2次元線形骨組ビーム要素モデル（以下、2次元骨組モデル）、または3次元線形骨組ビーム要素モデル（以下、3次元骨組モデル）により、主構断面を算定する方法である。

簡易解析法による下弦材断面の設定は以下による（図-23）。

Step1: 非合成解析により下弦材断面を仮定する。

Step2: シェル要素でモデル化した下弦材と床版からなる1パネルについて非線形解析により、下弦材の軸

力-ひずみ関係を算定する（図-22）。

Step3: Step1で算定した下弦材軸力およびStep2で設定で設定した軸力-ひずみ関係を用いて、線形骨組解析を繰り返すことで、床版と下弦材を合成した場合の下弦材に加算すべき床版の鋼換算断面積を算定する。

Step4: 下弦材の設計軸力は、Step3-④で求めた平均ひずみを用いて算出される下弦材の合成後分担軸力と合成前荷重による軸力を足し合わせて設計軸力とし、これにStep1で求められる曲げモーメントおよびせん断力を加えて設計断面力として、下弦材の終局限界状態の検討を行う<sup>10)</sup>。また、床版コンクリートのひび割れ幅については、Step3-④の主構作用によるひび割れ幅と、下弦材および床版の曲げ作用による横桁上または横桁間のひび割れ幅を加算して、床版の使用限界状態の検討を行う<sup>10)</sup>。

Step5: Step4で設定された下弦材断面を用いて、Step2

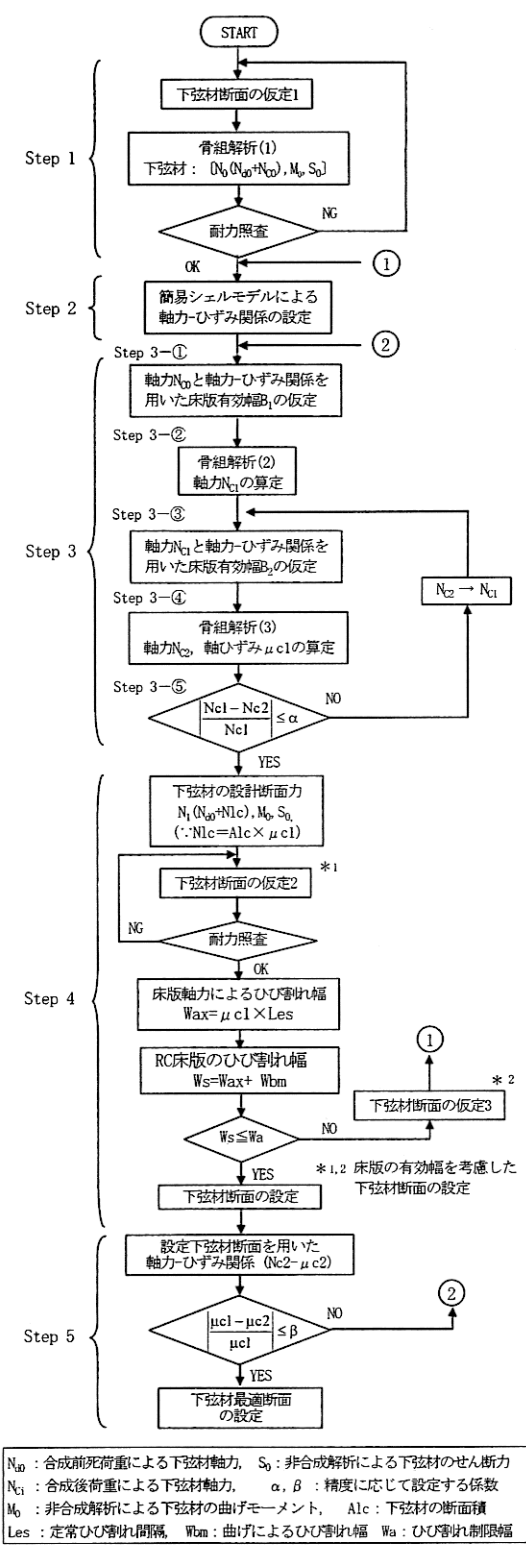


図-23 簡易解析法を用いた下弦材断面の設定

の方法により軸力-ひずみ関係を設定する。本関係を用いて、着目する格点間に最大軸力が作用した場合の軸方向ひずみを算定し、これを Step3-⑤の軸方向ひずみと比較し、その差が所要の精度以内にあることを検証する。

ここで、Step2の下弦材の軸力-ひずみ関係を設定するための解析モデルは、一つのトラスパネルについて設定し、他のパネルについてもこれを用いることとした。これは、引張力が作用する下弦材の内、L0-L2,L4-L6,L14-L16(図-1(c))の各パネル(約10m)について軸力-ひずみ関係(図-22)を求めたところ、下弦材の引張軸力が約4500kN以上においては、下弦材と床版の軸剛性が非線形領域にあるものの、この領域においても格点間毎の下弦材鋼断面積の差が軸剛性に与える影響は僅かであったためである。なお、床版厚は橋梁全長にわたって一定として、横桁間床版厚の300mmとした。

本解析では、Step4に示すように下弦材と床版の平均ひずみを用いた主構作用にパネル間の曲げ作用を加算して、下弦材の耐力照査を行っている。これは大型模型実験の結果<sup>2)</sup>から得られた知見によっている。すなわち、床版材料を鋼繊維補強コンクリートにすることにより、下弦材および床版の分担軸力は、床版に局部的なひび割れが発生したとしても、下弦材と床版の平均ひずみを用いて算定できることが明らかとなった<sup>2)</sup>。したがって、下弦材の設計は、下弦材の分担軸力を用いて耐力照査(終局限界状態の検討)を行えば、「下弦材+軸方向鉄筋」のみの非合成断面による応力度照査を行う必要はないものと考えられる。また、床版の設計においては、主構作用と下弦材の曲げ作用に加え、横桁間隔を支間とする曲げ作用によるひび割れ幅の照査を行っている。

(2) 詳細床版シェルモデルと簡易解析法による解析結果の比較

格点L6の鉛直たわみが最大となるように活荷重(EA-17)を固定載荷し(図-18)、詳細床版シェルモデルと簡易解析結果(Step4)の結果を比較した。床版コンクリートが引張領域にあるL0-L8間の各部材の軸ひずみを表-4に示す。

詳細床版シェルモデルの解析結果によれば、下弦材と床版の平均ひずみ①、左右下弦材ひずみ②、床版全体ひずみ③、鉄筋ひずみ④、およびコンクリートの上下面の平均ひずみ⑤は、よく一致している。なお、L0-L2およびL6-L8の下弦材の平均ひずみに20~30%の差がある。これは、本検討モデルが斜角桁(右斜角60度)であるため、径間端部にこのような差が生じたものと推察される。

簡易解析手法と詳細床版シェルモデルによるL2-L4およびL4-L6の下弦材の軸方向ひずみを比較すれば、簡易解析法による下弦材ひずみ⑧と詳細床版シェルモデル解

析結果②はよく一致している。また、床版の全体ひずみ③もほぼ一致している。

これらのことから、簡易解析法を用いて線形骨組解析を数回繰り返すことにより、実務上問題のない精度で下弦材断面が設定できるものと考えられる。

一方、簡易解析法によって、床版の軸ひずみは算定できるが、曲げの影響は把握できない。すなわち、L4-L6の床版コンクリート下面のひずみ⑦(約380 $\mu$ )は、床版の曲げ作用により、床版と下弦材を合成した軸方向ひずみ①(約210 $\mu$ )に比べ、約170 $\mu$ 大きくなっている。したがって、Step4の床版の使用限界状態の照査においては、床版の軸方向ひずみと曲げひずみによるひび割れを加算する必要がある(図-23)。

## 7. まとめ

### (1) 実橋測定と合成解析

実橋に営業用電車を載荷し、各部材のひずみを計測するとともに、非線形FE解析を実施し、計測値と解析値を比較した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 横桁部の床版上面の軸方向引張ひずみは、横桁間の床版下面の引張ひずみに比べ小さい。
- ② 横桁は両下弦材を支間とする単純梁に近い挙動をしている。また、床版配力筋、上フランジ、横桁下鉄筋、および下フランジのひずみは、平面保持されており、コンクリート、鉄筋および鉄骨は一体挙動している。
- ③ 下弦材には軸引張力と曲げが同時に作用しており、曲げが卓越している。
- ④ 床版軸方向鉄筋、横桁、下弦材、および主構たわみの計測結果と非線形FE解析結果はほぼ一致する。
- ⑤ コンクリート床版を有するトラス橋の床版と下弦材の軸力分担率およびたわみは、床版と下弦材が合成されているとして解析した結果にほぼ一致する。

### (2) 設計活荷重に対する解析

実橋モデルに合成後死荷重とEA-17荷重を載荷して解析した結果、以下のことがわかった。

- ① 横桁間の軸方向下鉄筋のひずみは、コンクリートのひび割れが発生する領域にある。一方、横桁上の軸方向上鉄筋のひずみはコンクリートのひび割れがまだ発生しない領域にある。したがって、SRC床版の床版コンクリートのひび割れ照査は、横桁間下面のみに着目すればよい。
- ② 横桁上の床版コンクリートには橋軸直角方向に圧縮ひずみが生じており、床組作用により床版に橋軸方向のひび割れが発生する可能性は少ない。

- ③ 床版と下弦材の合成を考慮した線形解析と非線形解析による主構たわみに差は殆どない。

### (3) 簡便な設計手法の検討

3径間連続トラス橋を対象として簡易解析法を提案した。詳細床版シェルモデルと簡易解析法による解析結果はよく一致しており、簡易解析法により実務上問題のない精度で下弦材断面が設定できることを示した。

## 参考文献

- 1) 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, 橋梁と基礎, Vol. 34, No. 11, pp. 9-18, 2000. 11
- 2) 矢島秀治, 市川篤司, 村田清満, 北園茂喜: SRC床版床組構造の鋼鉄道下路トラス橋への適用に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 731/I-63, pp. 283-298, 2003. 4
- 3) 矢島秀治: JR奈良線鴨川橋梁-SRC床版を適用した鋼鉄道下路トラス橋-, JSSC, No. 45, pp. 9-11, 2002. 7
- 4) 谷口紀久, 羽根良雄, 菅原則之: 鋼橋の騒音防止, 日本国有鉄道 構造物設計事務所・監修 構造物設計資料, No. 38, pp. 24-27, 1974. 6
- 5) 坂東孝美, 矢島秀治, 紀伊昌幸: 鋼鉄道橋の騒音と騒音低減のための床組構造について, 第59回土木学会年次学術講演会, I-035, 2004. 9
- 6) 西田寿生, 谷口望, 江口聡, 矢島秀治, 村田清満: 鋼繊維補強SRC床版のひび割れ挙動に関する解析的検討, 鉄道総研報告, pp. 13-18, 2003. 3
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善, pp. 387-398, 1999. 10
- 8) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 国枝稔, 内田裕市, 六郷恵哲: 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状, 土木学会論文集, 第532号, pp. 119-129, 1996. 2
- 9) Uchida, Y. and Ozawa, M.: Tension stiffening effect in RC beams with steel fiber, Seminar on post-peak behavior of RC structures subjected to seismic loads, JCI, Vol. 2, pp. 181-193, 1999.
- 10) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 丸善, pp. 167-168, 1999. 10
- 11) (財) 鉄道総合技術研究所: 建造物保守管理の標準(案)同解説 鋼構造物, pp. 206-219, 1987.
- 12) 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, pp. 21-62, pp. 99-109, 2000. 7

(2005. 1. 27受付)

STUDY ON DESIGN METHOD OF RAILWAY THROUGH-TRUSS BRIDGE  
WITH SRC FLOOR SYSTEM

Shuji YAJIMA, Yuichi UCHIDA, Keitetsu ROKUGO,  
Shigeki KITAZONO and Atushi ICHIKAWA

A steel railway through-truss bridge with SRC slab has advantages on the reduction of the slab height and so on. The fact that the main trusses restrict the SRC slab makes difficult to verify the behaviors of the slab. The authors conduct pull-load and dry-shrinkage experiments by using model slabs and apply these results to the designs of three-span continuous steel through-truss bridges.

In this study, the authors demonstrate the behaviors of the lower chord members, cross girders, slabs and so on by measuring stress and strain of each member of these truss-bridges and analyzing them by considering the cracks of the SRC slabs. Based upon these results, the authors also propose simple and practical design methods of the SRC slabs.