

鋼・コンクリート合成床版（SCデッキ）の 中間支点部輪荷重走行試験

～首都高速大宮線見沼高架橋（仮称）～

Wheel Load Running Tests on Negative Moment Region of Continuous Composite Girder Bridge with Steel Plate-Concrete Composite Deck (SC-Deck)

柳澤 則文

Norifumi YANAGISAWA

川田工業(株)技術管理室課長

橋 吉宏

Yoshihiro TACHIBANA

川田工業(株)橋梁事業部技術部
東京技術部技術開発課課長

伊藤 博章

Hiroaki ITO

川田工業(株)橋梁事業部
技術統括部長

首都高速大宮線見沼高架橋（仮称）では、将来の拡幅への対応を考慮し、合成床版を有する鋼連続合成鈹桁橋が採用されることとなった。そこで、連続合成鈹の中間支点部を縮小模型化し、負曲げ領域下における合成床版の疲労耐久性を確認するため、輪荷重走行試験を実施した。なお、試験は、ロビンソン型タイプ（SCデッキ）を対象とした。ここでは、床版剛性と主桁剛性に着目した試験結果について報告する。また、合成床版上面に防水層を施した水張り走行試験の結果についても合わせて報告する。

キーワード：鋼・コンクリート合成床版、SCデッキ、連続合成鈹の負曲げ領域、輪荷重走行試験、疲労耐久性

1. まえがき

首都高速大宮線見沼高架橋（仮称）は、さいたま新都心の東側に位置する大規模緑地空間である見沼田圃を貫く全長1.6 kmの高架橋である。本高架橋では、現在のところ暫定2車線で整備が進められており、将来的には完成4車線へと拡幅される予定である。そこで、始終点部および芝川渡河部を除く、標準部の橋梁形式としては、橋軸直角方向にプレストレスを導入したPC床版と比べて、拡幅への対応が容易な合成床版を鋼連続合成鈹桁橋へ採用することが計画¹⁾され現在施工中である。このようなことから、負曲げ領域下における合成床版（SCデッキ）の疲労耐久性を確認するため、連続合成鈹の中間支点部（図1）を縮小模型化し、床版に発生する主桁作用による引張力と床版作用による曲げモーメントとの重ね合わせ応力状態を再現して、輪荷重走行試験を実施することとした。ただし、水の影響が懸念されることから、

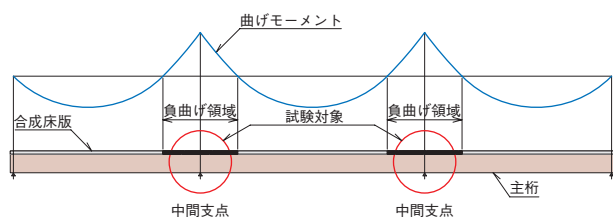


図1 試験対象

ウレタン系の高機能防水層を施した水張り走行試験も合わせて実施することとした。ここでは、その試験結果について報告するものである。

2. 試験体と載荷方法

(1) 試験体

表1 合成床版の試験体諸元

| | |
|-----------------|-------------------------------------|
| 底銅板厚 | 6 mm |
| 主鉄筋方向鋼材量(単位断面) | 主鉄筋：D19@150 (20.1 cm ²) |
| | 底銅板：1 000×6 (60.0 cm ²) |
| 配力鉄筋方向鋼材量(単位断面) | 配力筋：D19@125 (22.9 cm ²) |
| | 底銅板：1 000×6 (60.0 cm ²) |
| 鉄筋比 | 主鉄筋方向：1.3% |
| | 配力筋方向：1.5% |
| 純かぶり | 主鉄筋：30 mm |
| | 配力筋：49 mm |

試験体の基本寸法は、試験設備の制約から図2に示すように、幅：2.30 m、長さ：4.50 m（床版支間長2倍以上）、床版支間長：2.00 mとし、コンクリートの設計基準強度は、 $\sigma_{ck}=30$ N/mm²とした。また、床版厚については、中間支点部における実橋でのひび割れ性状を確認する目的から、床版厚：16.0 cm（実橋の2/3）とした。表1に試験体の諸元を示す。

(2) 載荷方法

載荷方法は、図2、3に示すように、負曲げ荷重Rを一定とし、輪荷重Wを階段状（10万往復ごとに137 kN、157 kN、177 kN）に変化させ、合成床版の耐荷性状を確

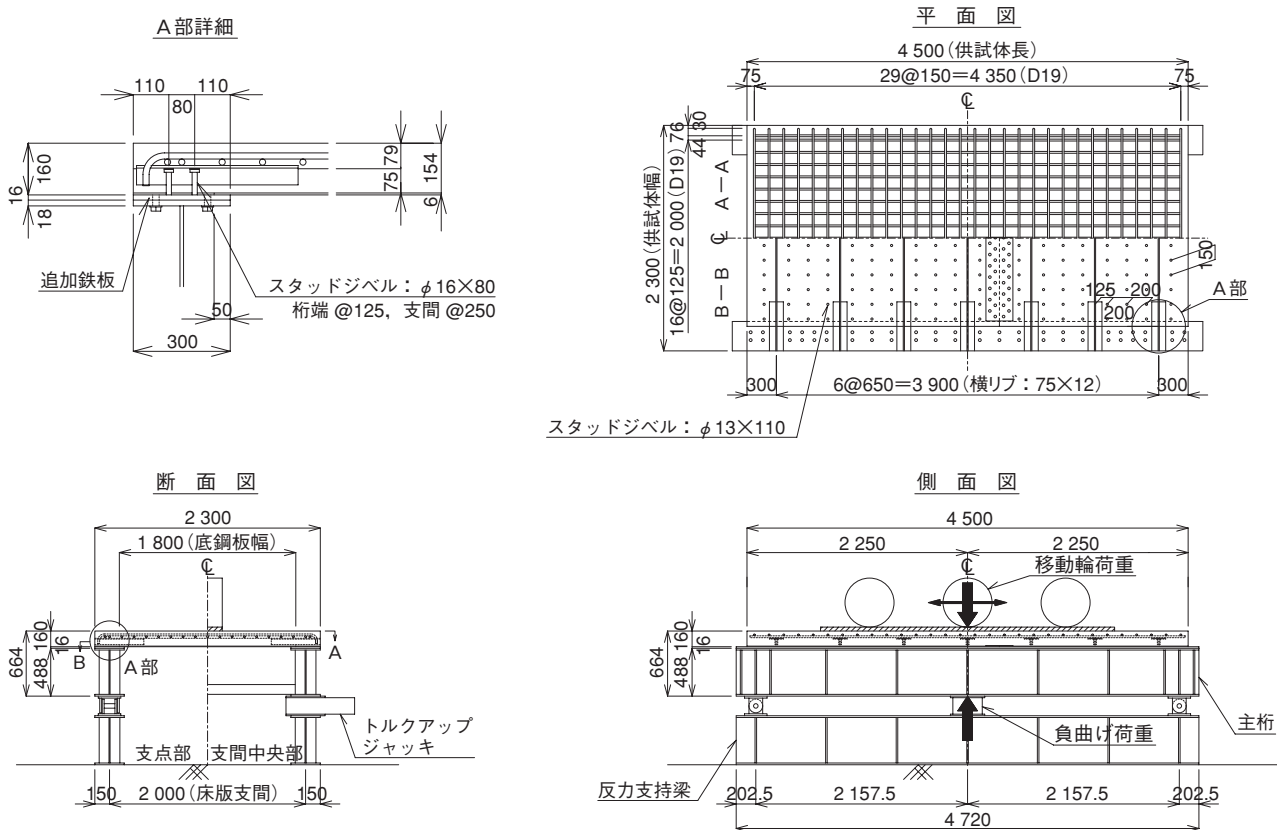


図2 対象とした試験体の基本寸法と載荷方法

認するものとした(次章で詳述)。なお、負曲げ荷重Rは、1主桁あたり256 kNとした(次章で詳述)。また、防水層を施工した水張り走行試験については、98 kNを載荷輪荷重とした。

3. 載荷荷重および走行回数の検討

(1) 負曲げ荷重Rの検討

負曲げ荷重Rは、対象橋梁の基本設計より上側配力鉄筋応力度に着目し、合成後死荷重(D₂)と合成後活荷重(L)の重ね合わせ応力度がD₂+0.6L相当²⁾となる荷重を載荷するものとした(表2参照)。なお、負曲げ荷重は、試験体における床版有効幅を2径間連続桁の中間支点上着目断面として計算し、主桁+コンクリートを無視した合成床版(底鋼板+配力鉄筋)による断面剛性から曲げモーメントを求め、単純ばりに作用する集中荷重として計算を行った。

(2) 輪荷重Wの検討

2/3の縮小モデルに載荷する輪荷重Wについては、底鋼板の曲げ応力とコンクリートのせん断応力の相似性を考慮する必要がある。そこで前者に着目して試験的に載荷したところ、後者の影響が支配的となった。このようなことから、せん断応力の相似性に着目し、FEM解析を実施して載荷輪荷重を決定することとした。FEM解析は、コンクリートにソリッド要素、底鋼板にシェル要素を用い、支持条件を単純支持として行った。なお、解析

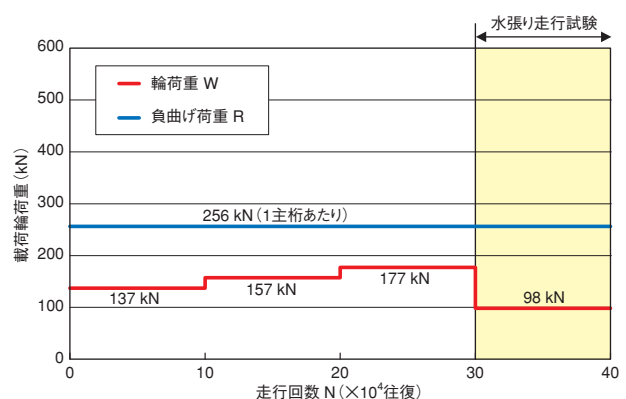


図3 載荷パターン

表2 対象橋梁の応力と負曲げ荷重

| 対象橋梁 | OE33工区上部工工事 | | |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------|
| | 実橋 | 輪荷重走行試験 | |
| | 上側配力鉄筋応力度 N/mm ² | 曲げモーメント kN·m | 負曲げ荷重R kN |
| ①合成前死荷重(D ₁) | — | — | — |
| ②合成後死荷重(D ₂) | 39.6 | -146.74 | 136 |
| ③活荷重(L) | 58.2 | — | — |
| ④クリープ | 3.0 | — | — |
| ⑤乾燥収縮 | 4.3 | — | — |
| ⑥温度差 | 31.0 | — | — |
| ⑦活荷重(0.6L相当) | 34.9 | -129.32 | 120 |
| ②+⑦ | 74.5 | -276.06 | 256 |

プログラムにはMSC-NASTRANを使用し、解析ケースは、図4~6に示す試験体モデル(設計輪荷重1輪)、実橋モデル(設計輪荷重)、実橋モデル(過積載相当)の3ケースとした。

*試験体モデル

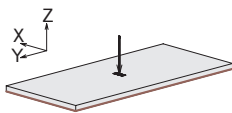


図4 CASE-1

*実橋モデル (設計輪荷重)

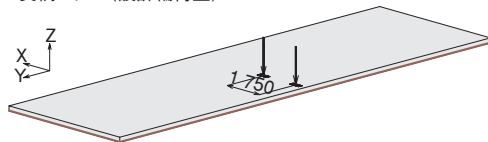


図5 CASE-2

*実橋モデル (過積載相当)

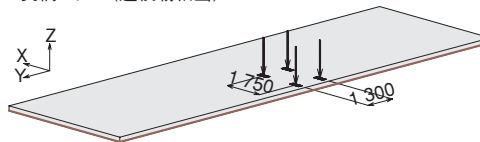


図6 CASE-3

表3 解析結果

| 解析条件 | 試験体モデル | | | 実橋モデル | |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | CASE-1 | CASE-2 | CASE-3 | CASE-2 | CASE-3 |
| | 98 kN* | 137 kN** | 177 kN | 98 kN* | 過積載相当*** |
| 解析モデル長 | 4.5 m | | | 20.0 m | 20.0 m |
| 床版支間長 | 2.0 m | | | 6.0 m | 6.0 m |
| 床版厚 | 16.0 cm | | | 26.0 cm | 26.0 cm |
| 底鋼板厚 | 6.0 mm | | | 9.0 mm | 9.0 mm |
| 載荷面の形状 | 300 mm×120 mm | | | 500 mm×200 mm | 500 mm×200 mm |
| 最大せん断応力: T_{zx} | -0.88 N/mm ² | -1.23 N/mm ² | -1.59 N/mm ² | -0.86 N/mm ² | -1.43 N/mm ² |

* 設計輪荷重 (1輪: 98 kN)

** 設計輪荷重 (1輪: 98 kN) + 衝撃

*** 過積載相当輪荷重 (大型ダンブ (LD) 最大重量時) 後輪1軸目: 134 kN, 後輪2軸目: 135 kN

表4 両タイプの解析結果

| 解析条件 | 試験体モデル | |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 土研タイプ | OEタイプ |
| | 98 kN* | 98 kN* |
| 解析モデル長 | 4.5 m | |
| 床版支間長 | 2.5 m | 2.0 m |
| 床版厚 | 20.9 cm | 16.0 cm |
| 底鋼板厚 | 9.0 mm | 6.0 mm |
| 載荷面の形状 | 500 mm×200 mm | 300 mm×120 mm |
| 最大せん断応力: T_{zx} | -0.43 N/mm ² | -0.88 N/mm ² |

* 設計輪荷重 (1輪: 98 kN)

表5 土研タイプの等価繰返し回数

| 載荷輪荷重: W (kN) | 走行回数: ni (×10 ⁴ 回) | $T_{土研タイプ}$ (N/mm ²) | $T_{基準応力}$ (N/mm ²) | ni ($T_{土研タイプ}/T_{基準応力}$) ^m (回) | Σni ($T_{土研タイプ}/T_{基準応力}$) ^m (回) |
|---------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|---|
| 157 | 4 | -0.69 | -0.69 | 4.0E+04 | 4.0E+04 |
| 177 | 4 | -0.78 | -0.69 | 1.6E+05 | 2.0E+05 |
| 196 | 4 | -0.86 | -0.69 | 4.7E+05 | 6.7E+05 |
| 216 | 4 | -0.95 | -0.69 | 1.4E+06 | 2.1E+06 |
| 235 | 4 | -1.03 | -0.69 | 3.6E+06 | 5.7E+06 |
| 255 | 4 | -1.12 | -0.69 | 9.1E+06 | 1.5E+07 |
| 275 | 4 | -1.21 | -0.69 | 2.2E+07 | 3.7E+07 |
| 294 | 4 | -1.29 | -0.69 | 4.4E+07 | 8.1E+07 |
| 314 | 4 | -1.38 | -0.69 | 9.5E+07 | 1.8E+08 |
| 333 | 4 | -1.46 | -0.69 | 1.8E+08 | 3.5E+08 |
| 353 | 4 | -1.55 | -0.69 | 3.5E+08 | 7.0E+08 |
| 373 | 4 | -1.64 | -0.69 | 6.6E+08 | 1.4E+09 |
| 392 | 4 | -1.72 | -0.69 | 1.1E+09 | 2.5E+09 |

表6 OEタイプの等価繰返し回数

| 載荷輪荷重: W (kN) | 走行回数: ni (×10 ⁴ 回) | $T_{OEタイプ}$ (N/mm ²) | $T_{基準応力}$ (N/mm ²) | ni ($T_{OEタイプ}/T_{基準応力}$) ^m (回) | Σni ($T_{OEタイプ}/T_{基準応力}$) ^m (回) |
|---------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|---|
| 137 | 20 | -1.23 | -0.69 | 1.3E+08 | 1.3E+08 |
| 157 | 20 | -1.41 | -0.69 | 6.0E+08 | 7.3E+08 |
| 177 | 20 | -1.59 | -0.69 | 2.3E+09 | 3.1E+09 |
| 98 | 20 | -0.88 | -0.69 | 3.1E+06 | 3.1E+09 |

その結果、表3より実橋モデルでは、設計輪荷重で-0.86 N/mm²、過積載相当で-1.43 N/mm²、試験体モデルでは、設計輪荷重 (1輪) で-0.88 N/mm²と実橋での設計輪荷重載荷時とはほぼ同等の最大せん断応力となった。また、実橋での施工時期を考慮し、試験期間を短縮しなければならない制約から、基本載荷荷重を137 kN (98 kNに衝撃係数を考慮) とし、最大で177 kN (過積載相当の1割増) まで、3段階で荷重を増加させる促進試験とした。

(3) 走行回数の検討

走行回数については、過去に(独)土木研究所で実施した階段載荷による輪荷重走行試験 (正曲げ時) と同等以上となるよう、前節と同様せん断応力に着目し次のような手順で試算を行った。

- ① (独)土木研究所での試験体³⁾ (以下、土研タイプと記す) についても本試験と同様な解析モデルにより最大せん断応力を算出する (表4参照)。
- ② 土研タイプの解析結果より、土研タイプの初期載荷輪荷重 (157 kN) 時の最大せん断応力を基準応

力とする。

- ③ 次に示す式により、土研タイプと本試験での試験体 (以下、OEタイプと記す) との等価繰返し回数 N_{ie} をRCのS-N曲線を用いて相対比較する (表5, 6参照)。

$$* \text{土研タイプ: } N_{ie(\text{土研タイプ})} = \phi ni \times \left[\frac{\sigma_{土研タイプ}}{\sigma_{基準応力}} \right]^m$$

$$* \text{OEタイプ: } N_{ie(\text{OEタイプ})} = \phi ni \times \left[\frac{\sigma_{OEタイプ}}{\sigma_{基準応力}} \right]^m$$

ni: 各載荷輪荷重ごとの走行回数

m: RCにおけるS-N曲線の傾き (m=11.21)⁴⁾

$\sigma_{土研タイプ}$: 各載荷輪荷重ごとの最大せん断応力

$\sigma_{OEタイプ}$: 各載荷輪荷重ごとの最大せん断応力

$\sigma_{基準応力}$: 土研タイプ初期載荷輪荷重 (157 kN) 時最大せん断応力

その結果、本試験での走行回数は、土木研究所で実施した輪荷重走行試験 (正曲げ時) の走行回数と、等価繰返し回数による相対比較をすると同等以上となることから、走行回数10万往復ごとに137 kN, 157 kN, 177 kNと輪荷重Wを階段状に変化させ、合計で30万往復走行させることとした。

4. 走行試験結果

(1) 床版剛性

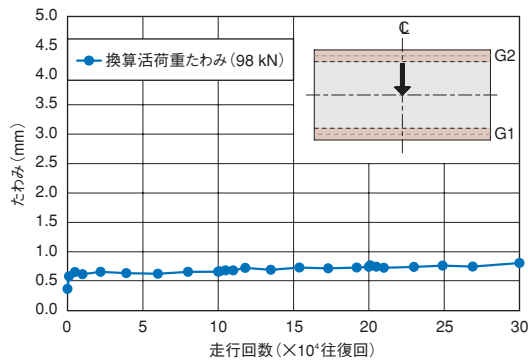


図7 床版中央部のたわみ

a) 床版たわみ 各走行回数ごとに実施した床版中央部での輪荷重静的載荷試験結果を図7に示す。たわみ量の増加は、走行回数0.1万往復時までで、その後はほとんど認められない。また、走行回数30万往復終了時においても剛性低下にともなう急激なたわみ量の変化は認められない。

b) 床版上面のひび割れ状況 負曲げ荷重の初期載荷時および輪荷重の走行終了時（走行回数30万往復）のひび割れ状況を図8に示す。発生したひび割れのほとんどは、負曲げ荷重の初期載荷時に発生しており、輪荷重の走行にともない進展はするものの、新たに発生するものはほとんど認められない。また、ひび割れ発生位置は、横リブ付近および横リブ間の主鉄筋付近に沿って発生し、Tリブ状となった主桁上の横リブ部分については、そのフランジ縁に沿って発生している。

(2) 主桁剛性

a) 主桁系断面の応力分布 輪荷重走行試験では、走行回数0, 0.1万, 10万, 20万, 30万往復時ごとに、輪荷重を除荷した状態で負曲げ荷重静的載荷試験を実施した。図9には各走行回数ごとに計測した主桁系断面の応力分布図を示す。応力分布は、初期載荷時および走行回数30万往復終了時においても大きな変化は認められず、主桁と合成床版は一体化して挙動している。

b) ひび割れ幅 各走行回数ごとに実施した負曲げ荷

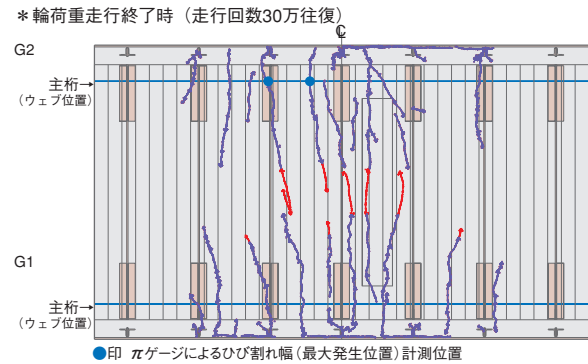
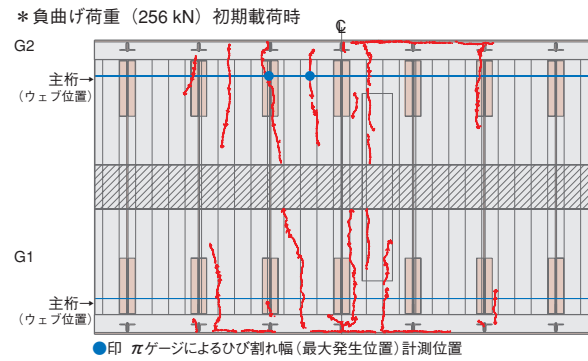
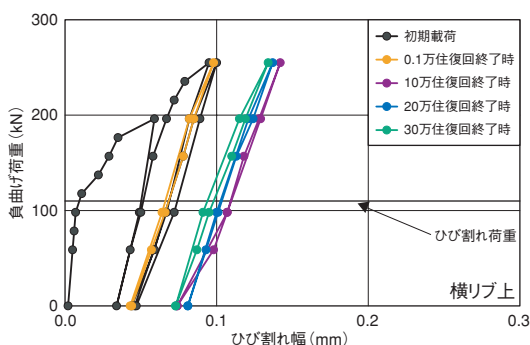


図8 床版上面のひび割れ状況

重静的載荷試験で得られたπゲージによるひび割れ幅（最大発生位置）の計測結果を図10に示す。ひび割れ幅は、初期載荷時で最大約0.1 mm程度であり、走行回数30万往復終了時には、最大約0.15 mm程度のひび割れが認められる。また、残留ひび割れは、輪荷重の走行にともない徐々に増加するが、走行回数10万往復を超えるとその増加はほぼ落ち着き最大で約0.08 mmである。しかしながら、主桁剛性の変化に大きな影響は認められない。

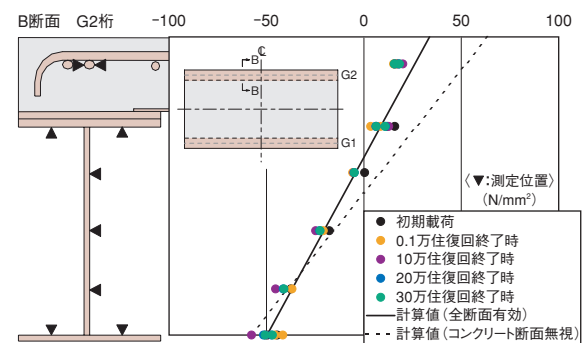


図9 主桁系断面の応力分布 (B断面)

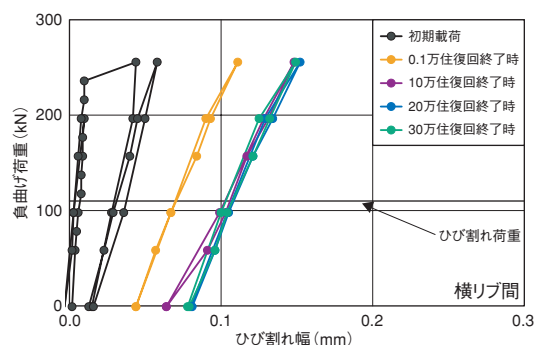


図10 ひび割れ幅

注) 計測位置 図8参照

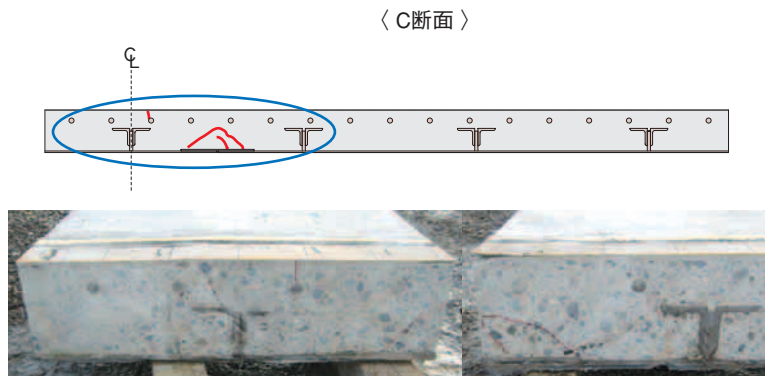
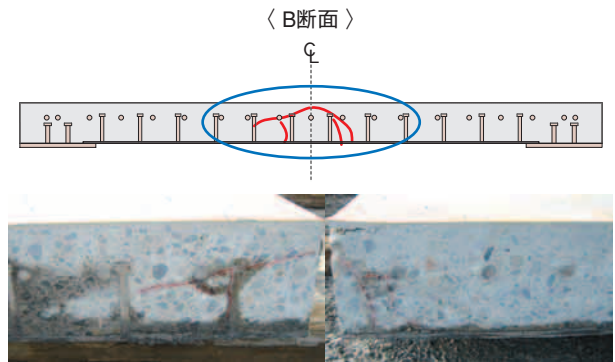
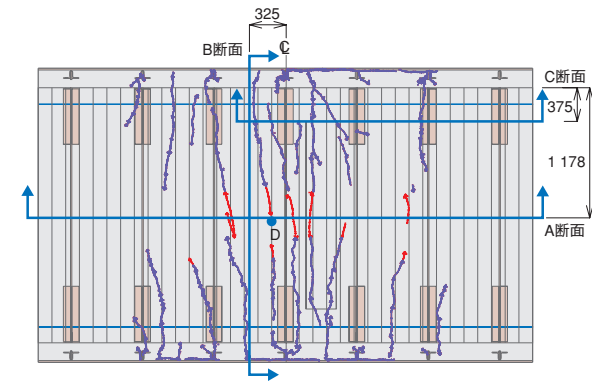
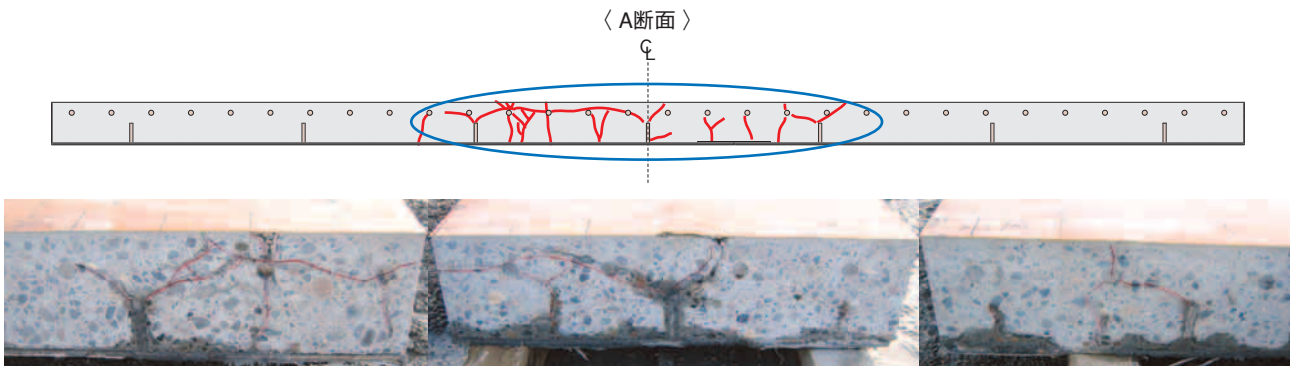


写真1 切断状況

注) ひび割れ図は、切断面の両面を観察し記載

(3) 切断面のひび割れ状況

試験体内部のひび割れ状況を調べるため、水張り走行試験終了後に試験体を写真1のように切断した。

- a) A断面（橋軸方向床版中央部） 横リブの頂部から斜めにひび割れが発生し、上主鉄筋に沿って水平に伸び、一部は床版上面にも伸びている。また、横リブ間のひび割れは、底鋼板から主鉄筋方向へ鉛直に伸びている。
- b) B断面（橋軸直角方向床版中央部） 軌道直下で曲げひび割れが発生し、スタッドの頂部をアーチ状に結ぶ水平ひび割れとなっている。
- c) C断面（橋軸方向主桁近傍床版中央部） 負曲げ荷重静的載荷試験で発生した床版上面のひび割れは、切断時の荷重除荷の影響により、目視では確認できなかった。
- d) D（中央付近のスタッド） 曲がりなどの変形や溶接近傍での損傷といった異常は特に認められない。

上側鉄筋層の水平ひび割れの発生を使用限界状態のひとつと考えると、以上の結果から本供試体の試験終了時

においては、ほぼ使用限界状態に到達していると判断できる。

5. 水張り走行試験結果

30万往復走行後、床版上面にウレタン系の高機能防水層を施工し、水を張った状態で輪荷重98 kNを10万往復走行させる水張り走行試験（写真2参照）を行った。



写真2 輪荷重走行試験状況（水張り走行試験状況）

走行回数約2万往復ごとに実施した床版中央部での輪荷重静的載荷試験結果を図11に示す。なお、本試験では防水層を施した試験のみのため、図11には成型型鋼タイプの結果（防水層：有、無の2ケース⁵⁾も合わせて示し比較することにする。成型型鋼タイプの結果と同様、床版のたわみ量等の増加はほとんど見られず、剛性低下にともなう急激なたわみ量の変化も認められない。また、床版上面の防水層については、試験終了後も健全なままである。しかしながら、防水層を施さない成型型鋼タイプについては、既往の水張り走行試験（防水層：無⁶⁾と同様、約2万往復回程度で急激なたわみ量の変化を示しており、本合成床版も同様な性状を示すと推察される。また、応力分布については、走行回数30万往復終了時と同様大きな変化は認められず、主桁と合成床版は一体化して挙動している。

6. まとめ

今回、負曲げ領域下における合成床版（SCデッキ）の疲労耐久性を確認するため、輪荷重走行試験を実施した。以下に得られた結果を要約することとする。

(1) 床版剛性

- a) 床版たわみ 試験終了時まで、剛性低下にともなう急激なたわみ量の変化は認められない。したがって、床版の剛性は十分確保されているものと推察される。
- b) 床版上面のひび割れ状況 床版上面に発生したひび割れは、横リブ等の位置から発生する構造的な要因が支配的であり、ほとんどが負曲げ荷重の初期載荷時に発生している。したがって、輪荷重の走行による影響は少ないものと推察される。

(2) 主桁剛性

- a) 主桁系断面の応力分布 初期載荷時および走行試験終了時ともに応力分布には大きな変化は認められず、所要の剛性を十分確保しているものと思われる。
- b) ひび割れ幅 ひび割れの多くは、初期載荷時に発生し、その大部分は0.05 mm以下の微細なものである。また、残留ひび割れは、輪荷重の走行にともない徐々に増加（走行回数10万往復終了時まで）するが、最大で0.08 mmであり、主桁剛性の変化に大きな影響は認められない。

(3) 切断面のひび割れ状況

荷重除荷の影響により、床版上面に発生したひび割れが床版内へ貫通しているかどうか目視では確認できなかった。しかしながら、微細なものは存在するものと推察される。また、試験体中央付近のひび割れは、既往の輪荷重走行試験（正曲げ時）結果³⁾と非常に近いひび割れ性状を示していることから、輪荷重の影響が支配的であると思われる。

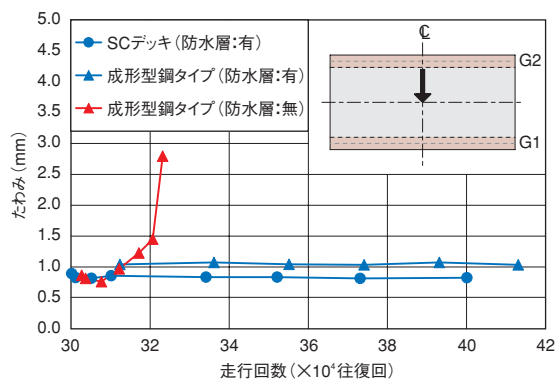


図11 床版中央部のたわみ（98 kN換算⁵⁾）

(4) 水張り走行試験

防水層は走行回数10万往復終了時においても健全なままであり、剛性低下にともなうような急激なたわみ量の変化も認められない。しかしながら、防水層を施さない成型型鋼タイプでは、既往の水張り走行試験⁶⁾と同様、約2万往復回程度で急激なたわみ量の変化を示しており、本合成床版も同様な性状を示すと推察される。このようなことから、合成床版においても耐久性確保という観点からは、防水層の適用は重要なことと考えられる。また、走行回数10万往復終了時においても応力分布には大きな変化は認められず、所要の剛性を十分確保しているものと思われる。

以上から、本合成床版（SCデッキ）は、連続合成桁の中間支点部（負曲げ領域下）へ適用しても十分な耐久性を有するものと考えられる。

最後に本研究は、首都高速道路公団、大阪大学、川田工業(株)、(株)宮地鐵工所の4者により実施したことをここに付記する。

参考文献

- 1) 大久保他：合成床版を有する鋼連続合成少数鋼桁橋の設計，鋼構造年次論文報告集第10巻，日本鋼構造協会，pp.149-156，2002.11.
- 2) 中園他：PC床版を有する鋼連続合成2主桁橋の設計法（上），橋梁と基礎，建設図書，pp.27-35，2002.2.
- 3) 街道他：鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験，土木学会第54回年次学術講演会概要集，1999.9.
- 4) 庄中他：道路橋RC床版の疲労耐久性を評価するための試験方法について，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，土木学会，pp.17-24，2003.6.
- 5) 福井他：鋼・コンクリート合成床版の中間支点部輪荷重走行試験（その3），土木学会第59回年次学術講演会概要集，2004.9.
- 6) 松井：移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，コンクリート工学会，pp.627-632，1987.