

鋼・コンクリート合成床版 (QS Slab) の 中間支点上輪荷重走行試験

Wheel Load Running Tests Under Negative Moment Region of Continuous Composite Girder Bridge with Steel Concrete Composite Slab (QS Slab)

林 暢彦*¹ 内田 智文*¹ 佐藤 徹*² 能登 宥愿*³
Nobuhiko HAYASHI Tomofumi UCHIDA Toru SATOH Hiroyoshi NOTO

Summary

For applying a continuous composite girder bridge with steel concrete composite slab to an actual bridge of Metropolitan Expressway, wheel load running tests were carried out to confirm the fatigue durability of steel concrete composite slab under the negative moment region.

In this paper, the experimental results on flexural rigidity change of composite slab and girder, cracking of concrete and effect of a waterproofing are reported. Moreover FEM analyses are conducted to verify experimental results.

キーワード：連続合成桁、輪荷重走行試験、負曲げ領域、水の影響

1. はじめに

首都高速OE工区では、合成床版を有する鋼連続合成桁橋を一部採用することとなった¹⁾。合成床版の疲労耐久性は、輪荷重走行試験結果の相対評価²⁾による性能保証が行われ、連続合成桁の中間支点部の耐荷性状に関しては、負曲げ荷重静的載荷試験によるひび割れ特性の検討³⁾によって、要求性能を満足することが確認されている。しかし、首都高速道路の連続合成桁への適用に際しては実橋における主桁作用による引張力と床版作用による応力の重ね合わせ状態での耐久性を評価する必要があることから、負曲げ荷重作用下における輪荷重走行試験を行うこととした。本論文では中間支点部輪荷重走行試験結果から、連続桁中間支点部の負曲げモーメントの作

用(図-1)に対し、床版の剛性と合成桁としての主桁剛性に着目した試験結果について報告する。さらに、試験結果の検証を目的としたFEM解析、滞水状態の疲労耐久性を確認するために実施した水張り走行試験についても合わせて報告するものとする。

2. 試験概要

(1) 試験目的

本試験は以下に示す点に着目し、L荷重による主桁作用とT荷重による床版作用との重ね合わせ応力状態を縮小模型で再現した輪荷重走行試験を実施した。

- ・連続合成桁中間支点上における合成床版の耐久性
- ・床版の耐久性に及ぼす水の影響と防水層の効果
- ・載荷方法の違いが床版の耐荷性状と耐久性に及ぼす影響

(2) 試験方法

本試験では2体の供試体による載荷試験を実施した。その試験方法の概要を以下に示す。

① T荷重階段載荷試験

載荷方法は図-2に示すように、負曲げ荷重Rを一定とし、輪荷重Wを10万往復回ごとに137kN, 157kN, 177kNと階段状に変化させた。

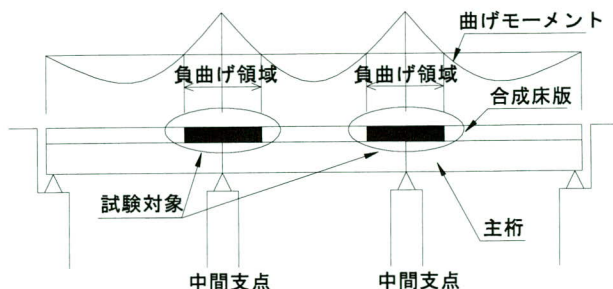


図-1 試験対象位置

*¹技術本部技術研究所技術開発課

*²技術本部技術研究所技術開発課課長

*³技術本部技術研究所所長

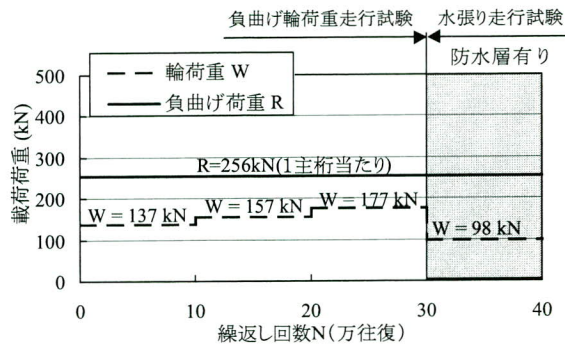


図-2 T荷重階段載荷試験

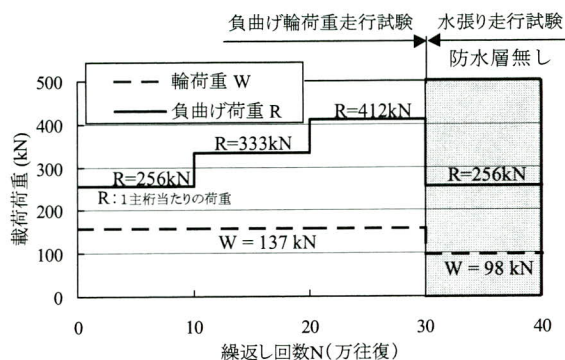


図-3 L荷重階段載荷試験

表-1 実橋の応力と負曲げ荷重

上側配力鉄筋	鉄筋応力度 (N/mm^2)	曲げモーメント ($kN \cdot m$)	負曲げ荷重 (kN)
合成後死荷重 (D2)	39.6	-146.74	136
活荷重 (0.6L相当)	34.9	-129.32	120
D2 + 0.6L	74.5	-276.06	256

② L荷重階段載荷試験

載荷方法は図-3に示すように、輪荷重 W を一定とし、負曲げ荷重 R を10万往復ごとに1主桁当たり256kN, 333kN, 412kNと階段状に変化させた。

③ 水張り走行試験

30万回往復終了後、T荷重階段載荷試験の供試体は床版上面に防水層を施工して、L荷重階段載荷試験の供試体は防水層を施工せずに水張り走行試験を実施した。

(3) 試験荷重

1) 負曲げ荷重

T荷重階段載荷試験における負曲げ荷重 R はOE33工区の基本設計計算書から上側配力鉄筋応力度に着目し、合成後死荷重 (D_2) と合成後活荷重 (L) の重ね合わせ応力度が $D_2 + 0.6L$ 相当になる荷重を載荷するものとして⁴⁾、1主桁あたり $R = 256kN$ と決定した(表-1)。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

中間支点上として計算し、主桁+コンクリートを無視した合成床版による合成桁としての断面剛性の抵抗曲げモーメントを、単純ばりに作用する集中荷重を作用させ、等価な応力を発生させる荷重を求めた。合成床版の有効断面は、中間支点付近に設けた底鋼板のパネル接合部を高力ボルト摩擦接合としているため、底鋼板+配力鉄筋としている。

L荷重階段載荷試験における負曲げ荷重は、上記の活荷重応力度を0.6L相当から、1.0L相当及び1.4L相当までの3種類を考慮するものとし、以下に示す負曲げ荷重を決定した。

- ① $R = 256 kN$: $D_2 + 0.6L$
- ② $R = 333 kN$: $D_2 + 1.0L$
- ③ $R = 412 kN$: $D_2 + 1.4L$

2) 輪荷重

輪荷重 W は、床版に発生する輪荷重によるせん断応力の相似性を考慮し、試験モデル、実橋モデルのFEM解析を実施して、次頁に示す載荷輪荷重を決定した⁵⁾。

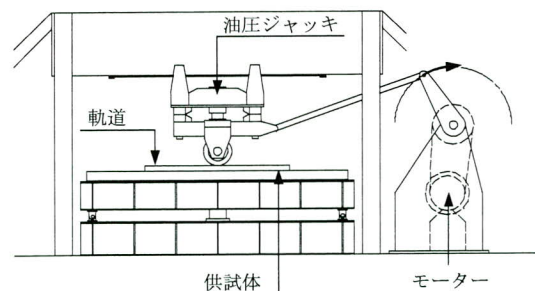


図-4 試験装置概要

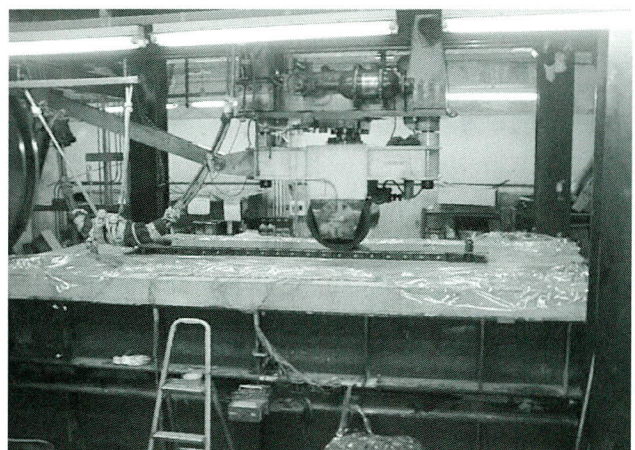


写真-1 試験状況

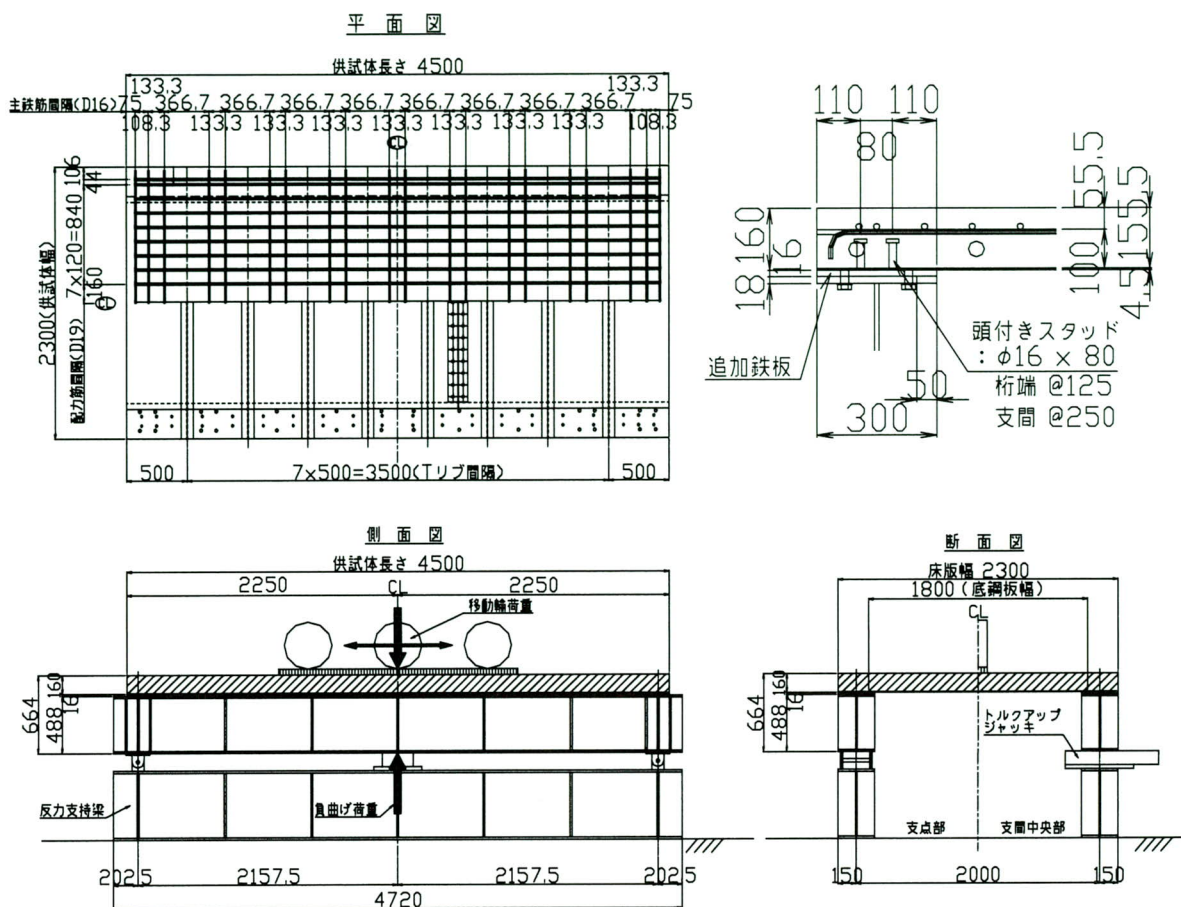


図-5 供試体概要

- ① $W = 137 \text{ kN}$: 設計輪荷重+衝撃
- ② $W = 157 \text{ kN}$: 過積載相当
- ③ $W = 177 \text{ kN}$: 過積載相当の1割増し

(4) 試験設備

試験は、大阪大学の所有する輪荷重走行試験機を使用して実施した。図-4に試験装置の概要図、写真-1に試験状況を示す。

(5) 供試体

合成床版の寸法は試験設備の制約から幅：2.3m、床版支間長：2.0m、長さ：4.5mとし、床版厚は、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、「合成床版 設計・施工マニュアル [(社)日本橋梁建設協会]」に準拠し、床版厚16cm (実橋の床版厚26cmの2/3)とした。供試体の詳細を図-5, 表-2に示す。

合成床版のコンクリート強度 ($\sigma_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$) は、試験開始後の実強度が設計基準強度程度となるよう配合し、膨張材の使用量は低添加型膨張材 20 kg/m^3 とした。

表-2 合成床版の供試体緒元

底鋼板板厚	4.5mm
主鉄筋方向鋼材量 (単位断面)	主鉄筋:4-D16(7.94cm ²)
	T形リブフランジ:2-100×10(20.0cm ²)
配力鉄筋方向鋼材量 (単位断面)	底鋼板:1000×4.5(45.0cm ²)
	配力鉄筋:D19@125(22.9cm ²)
鉄筋比	底鋼板:1000×4.5(45.0cm ²)
	主鉄筋方向:1.8%(T形リブを含む)
純かぶり	配力鉄筋方向:1.5%
	主鉄筋:55.5mm
	配力鉄筋:36.5mm

表-3 コンクリートの圧縮強度、静弾性係数

材齢(日)	圧縮強度(N/mm ²)	弾性係数(×10 ⁴ N/mm ²)
7	20.7	—
28	27.2	—
35	30.8	2.63

コンクリートの圧縮強度試験、静弾性係数試験の結果を表-3に示す。

3. 試験結果と解析結果

(1) T荷重階段載荷試験

1) 床版のたわみ

走行回数と換算活荷重たわみ関係を図-6に示す。ここで換算活荷重たわみとは、各荷重段階での輪荷重による床版たわみを98kNで換算したたわみである。たわみの増加量は0から1万往復回の間が大きく、1万往復回からT荷重階段試験終了の30万往復回までにおいては、たわみはあまり増加していない。

2) 主桁系の応力分布

各走行回数での負曲げ荷重静的載荷試験における、主桁系応力分布を図-7に示す。これより、主桁系応力分布は平面保持が成立しており、主桁と合成床版は一体化して挙動している様子が見受けられる。そして、初期載荷時から輪荷重走行終了時に至るまで、コンクリート全断面有効とする挙動に近く、所要の剛性を十分確保していることが確認できた。

3) ひび割れ発生状況

負曲げ荷重初期載荷時のひび割れ状況を図-8、30万往復回終了後のひび割れ状況を図-9に示す。図-8、図-9より、発生したほとんどのひび割れは負曲げ荷重の初期載荷時に発生しており、輪荷重の走行に伴い多少進展するものの、新たに発生するものはあまり見られない。そして、ひび割れの多くはT形リブフランジ端部から発生している傾向がある。

走行回数とひび割れ密度の関係を図-10に示す。図-10より、ひび割れの多くは0から10万往復回の間において、発生または進展したものであることがわかる。

(2) L荷重階段載荷試験

1) 床版のたわみ

走行回数と床版の換算活荷重たわみ関係を図-11に示す。たわみの増加量は、T荷重階段載荷試験と同様に0から1万往復回の間が大きく、1万往復回からL荷重階段試験終了の30万往復回までにおいては、たわみはあまり増加しなかった。

2) 主桁系の応力分布

各走行回数での負曲げ荷重静的載荷試験における、主桁系応力分布を図-12に示す。10万往復回までは、主

桁系応力分布はコンクリート全断面有効とする挙動を示すが、30万往復回終了時にはコンクリート断面無視の理論値に近づいている。

T荷重階段載荷試験結果と比べL荷重階段載荷試験では、コンクリートのひび割れ幅が大きくなって、剛性低下をもたらしていると考えられる。

3) ひび割れ発生状況

負曲げ荷重初期載荷時のひび割れ状況を図-13、30万往復回終了後のひび割れ状況を図-14に示す。負曲げ荷重初期載荷時と30万往復回終了時を比べると、図-14では多くの新しいひび割れが発生し、既存のひび割れも進展していることが分かる。これは負曲げ荷重の大きさや載荷方法がT荷重階段載荷試験と異なるためと考えられる。

また、ひび割れの多くはT形リブフランジ端部、T形リブ間隔の中間位置から発生している傾向がある。

走行回数とひび割れ密度の関係を図-13に示す。図-13より、そのほとんどのひび割れはT荷重階段載荷試験と同様に0から10万往復回で発生または進展したものであることがわかる。しかし、30万往復終了時のひび割れ密度においてはT荷重階段載荷試験結果に比べ0.6 m/m²程大きい、これは荷重ステップの第一段階で増加したもので第二段階以後の増加は少ない。

(3) 試験結果のまとめ

T荷重階段載荷試験とL荷重階段載荷試験の走行回数と床版の換算活荷重たわみ関係を図-16、累積換算回数 ΣN_{eq} と床版の換算活荷重たわみ関係を図-17に示す。ここで累積換算回数 ΣN_{eq} は、床版の疲労損傷にマイナー則が適用できることから文献6)を参考に下式により求まる N_{eq} の総和とする⁶⁾。

$$N_{eq} = \sum \left(\frac{P_i}{P_o} \right)^{11.21} \times n_i$$

そして、両試験結果から負曲げ荷重載荷時、各走行回数時におけるひび割れ密度の増加量を図-18に示す。

試験結果の比較から、得られた知見を以下に示す。

- ・ 図-16, 17より、床版の換算活荷重たわみは、T荷重階段載荷試験結果がL荷重階段載荷試験結果より若干大きい、大きな差は認められない。
- ・ 図-18より両試験のひび割れ密度は、負曲げ荷重初期載荷時から10万往復回の間大きく増加しており、

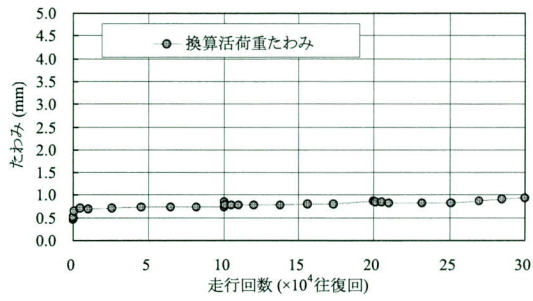


図-6 T荷重階段載荷試験の床版たわみ変化

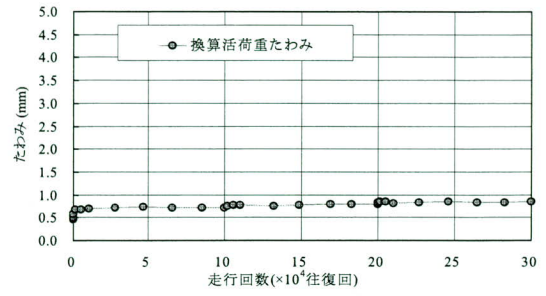


図-11 L荷重階段載荷試験の床版たわみ変化

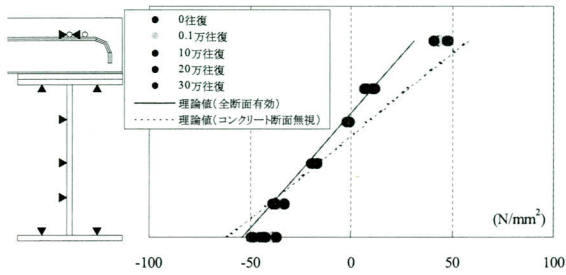


図-7 T荷重階段載荷試験の主桁系応力分布

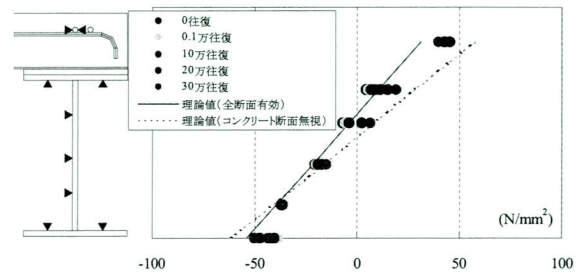


図-12 L荷重階段載荷試験の主桁系応力分布

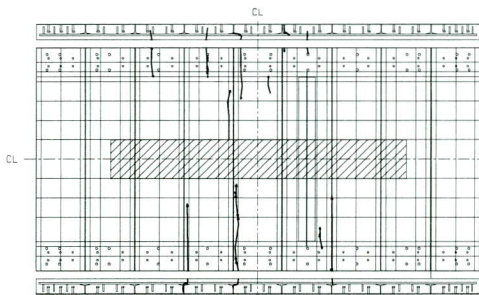


図-8 負曲げ荷重初期載荷 (T荷重階段載荷試験)

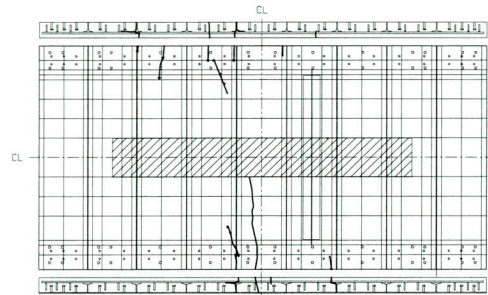


図-13 負曲げ荷重初期載荷 (L荷重階段載荷試験)

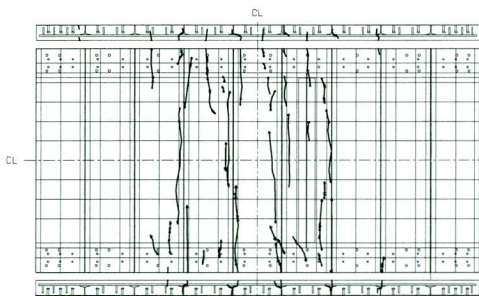


図-9 30万往復回終了 (T荷重階段載荷試験)

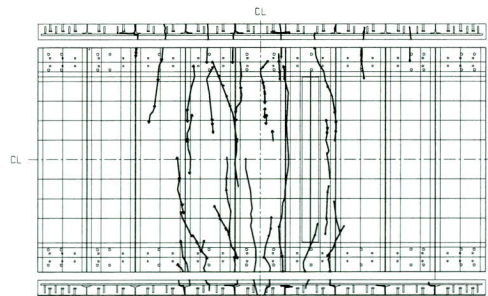


図-14 30万往復回終了 (L荷重階段載荷試験)

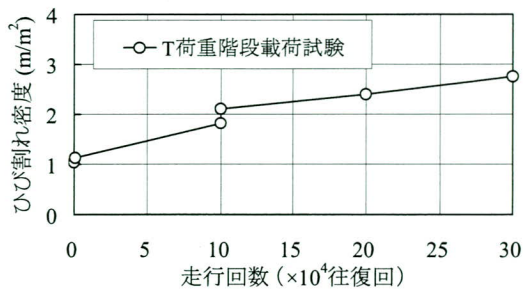


図-10 T荷重階段載荷試験のひび割れ密度の変化

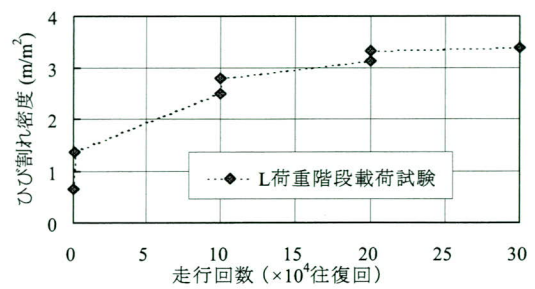
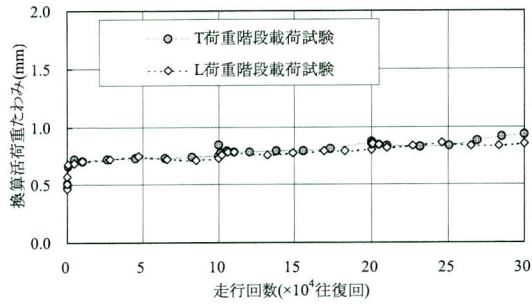
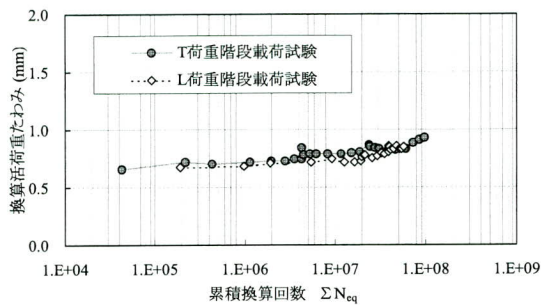


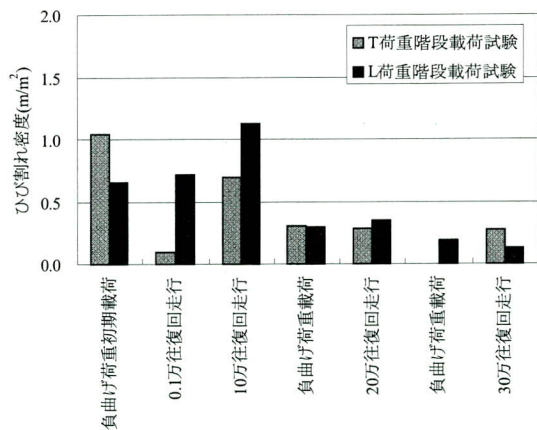
図-15 L荷重階段載荷試験のひび割れ密度の変化



図一 16 両試験の床版たわみの比較 (その1)



図一 17 両試験の床版たわみの比較 (その2)



図一 18 ひび割れ密度の変化

それ以降は、走行回数の増加、負曲げ荷重の増加の影響を受けることなく、増加量も小さい。

しかし両試験の主桁系応力分布において、L荷重階段載荷試験結果は、T荷重階段載荷試験結果に比べ鋼桁上フランジ、ウェブ上縁の応力にバラツキがわずかながら生じており、コンクリートが徐々に有効に働かなくなっている。

以上より、ひび割れ密度は負曲げ荷重初期載荷時と10万往復回までの輪荷重走行の間に増加している。

そして、床版のたわみもひび割れ密度と同様に、負曲げ荷重初期載荷、0から1万往復回の間増加し、それ以降あまり大きく変化しない。しかし、負曲げ荷重が大きくなると、合成桁の剛性は徐々に低下すると考察される。

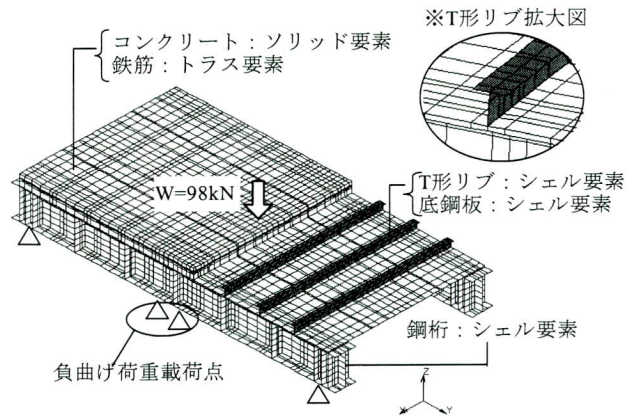
(4) FEM解析

1) 解析モデル

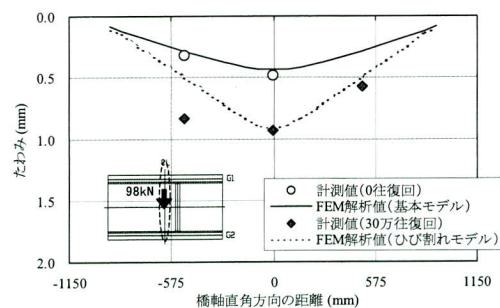
静的荷重載荷試験結果と比較することを目的とし、FEM解析を実施した⁷⁾。解析モデル、モデルを構成する要素、拘束条件を図一19に示す。解析モデルにおいては、T形リブの形状を表現するためにシェル要素を用いてモデル化した。

2) ひび割れのモデル化

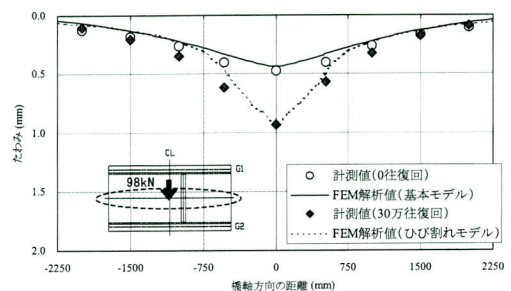
解析モデルはコンクリートを全断面有効とする「基本モデル」と「ひび割れモデル」の2種類を作成した。ひび割れモデルは次頁に示すひび割れを考慮した。



図一 19 解析モデルの概要



図一 20 橋軸直角方向床版たわみ分布



図一 21 橋軸方向床版たわみ分布

- ・負曲げ荷重により発生するT形リブフランジ端部から床版上面への橋軸直角方向ひび割れ (図-8, 図-13)
 - ・輪荷重走行により発生する床版下面から中立軸へのひび割れ (輪荷重による引張領域のひび割れ)
- 以上のひび割れを、隣接するソリッド要素に二重節点を作成するモデルで構成し、その二重節点間に節点力を伝達しないモデルとした⁸⁾。

3) 解析結果と計測結果の比較

T荷重階段載荷試験のたわみ分布を図-20, 21に示し、同時に基本モデル、ひび割れモデルの解析結果も示す。荷重走行前の0往復回の計測結果は、コンクリートを全断面有効とする基本モデルの解析結果と一致しており、30万往復回の計測結果は多少バラツキを示しているが、ひび割れモデル解析結果とほぼ等しい。

以上より、輪荷重走行後の計測結果は、負曲げ荷重によるT形リブ位置でのひび割れや輪荷重走行による引張領域でのひび割れをモデル化することで再現することができると考えられる。

(5) 水張り走行試験

1) 水張り走行試験概要

各試験の30万往復走行後に、床版上面に水を張り滞水状態で輪荷重を走行させる水張り走行試験を実施した。

T荷重階段載荷試験に使用した供試体は床版上面のブラストの後、防水層 (ウレタン系速硬化型床版防水システム) を施工した状態で、L荷重階段載荷試験供試体は防水層を施工しない状態で試験を実施した。この試験の目的は、床版の耐久性に及ぼす水の影響⁹⁾と防水層の効果を確認するものである。

2) 防水層を施工した供試体の試験結果

走行回数と床版たわみ関係を図-22に示す。防水層を施工した供試体は40万往復回 (水張り走行10万往復

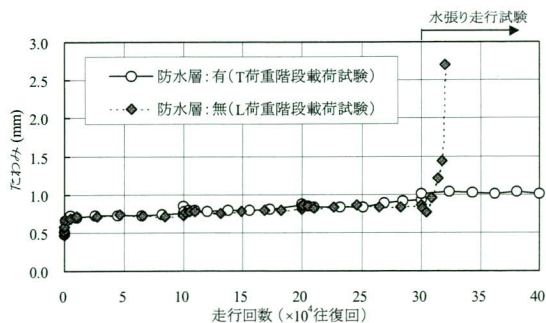


図-22 試験結果 (床版たわみ)

回)に至るまでたわみは増加せず、たわみ分布、ひずみにおいても変化は確認できなかった。これより、床版の剛性は低下することはなかったと判断できる。そして、床版下面、側面からの漏水も認められなかったことから、防水層を施工することにより床版への水の浸入を防ぐことができたと言える。(写真-2)

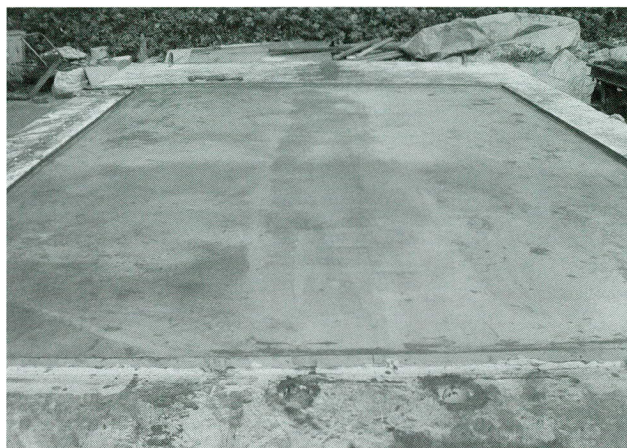


写真-2 水張り走行試験終了時の状況 (防水層有り)

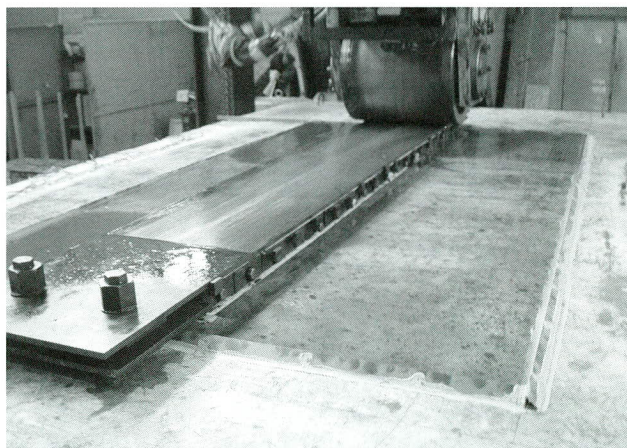


写真-3 水張り走行試験 (防水層無し)

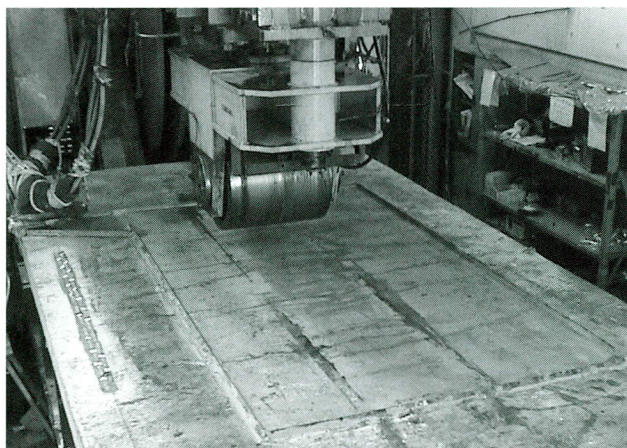


写真-4 水張り走行試験 (防水層無し) のひび割れ

3) 防水層を施工しない供試体の試験結果

防水層を施工しなかった供試体においては32万往復回(水張り走行回数2万往復回)で急激にたわみが増加し、破壊に至った。これは、水の影響によりコンクリートの砂利化が進み、床版剛性が急激に低下した結果と考えられる。破壊に至る経過、状況を以下に著述する。

- ① 30.1万往復回：ひび割れからの気泡の発生(写真-3)
- ② 30.5万往復回：床版側面からの漏水開始、ひび割れからのセメント成分の遊離
- ③ 31万往復回：ひび割れ近傍にセメント成分の堆積、継手部からの漏水
- ④ 31.8万往復回：ひび割れ幅の増大、砂利化の進行
- ⑤ 32万往復回：ひび割れ幅の更なる増大(写真-4)、漏水量の増加、目視によるたわみの増大

防水層を施工しなかった供試体はL荷重階段載荷試験のひび割れの存在している状態から試験を開始しているので、試験開始直後にひび割れから水の浸入があったと考えられる。そして、その後漏水の確認とともにたわみ量が増加したことから、急激な床版剛性の低下は水の影響によるものと判断できる。

4. おわりに

本論文では、T形リブを用いた鋼・コンクリート合成床版の中間支点部に対する輪荷重走行試験について報告した。ここでの試験結果より、得られた知見を以下に整理する。

- ・ T荷重階段載荷試験、L荷重階段載荷試験を実施したことにより負曲げ領域下での合成床版の耐久性が確認できた。
- ・ 合成床版の耐久性に及ぼす水の影響が大きいことを確認した。
- ・ 防水層を施工したことにより、床版の耐久性を飛躍的に増大させることができる。
- ・ 両試験結果より、負曲げ荷重の増加に伴うコンクリートのひび割れの発生によって合成桁としての剛性は若干低下するものの、床版としての機能に対しては大きな影響はなかった。

以上の内容より、本合成床版は要求する性能を十分に満足し、高い耐久性を有していることがわかり、連続合

成桁の中間支点上への適用において全く問題ないことを確認できた。

最後に本試験を行うにあたり大阪大学の松井繁之教授、大学院生の福井正章氏、川田工業(株)の橋吉宏氏、柳澤則文氏、首都高速道路公団には多大なご指導、貴重なご意見を賜りました。ここに記して深謝致します

<参考文献>

- 1) 大久保, 山本, 岩城, 北川, 渡辺: 合成床版を有する鋼連続合成少数桁橋の設計, 鋼構造年次論文報告集, 第10巻 pp.149-156, 2002年11月.
- 2) 土木研究所: 道路橋床版の輪荷重走行試験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5), 平成13年3月.
- 3) 村山, 吉崎, 西川, 矢部, 橋, 大垣, 済藤: 合成床版を有する合成桁の中間支点部負曲げ実験, 土木学会第56回年次学術講演会, CS7-043 pp.466-467, 平成13年3月.
- 4) 中菌, 安川, 稲葉, 橋, 秋山, 佐々木: 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, Vol.36 No.2 pp.27-35, 2002年2月.
- 5) 柳澤, 橋, 内田, 佐藤, 松井, 久保田: 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1: 床版剛性に着目した試験結果), 土木学会第59回年次学術講演会概要集, 2004年9月.
- 6) 庄中, 大西, 横山, 関口, 堀川: 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, pp.17-24, 平成15年6月.
- 7) 日本エムエスシー(株), MSC.Marc 2001 日本語オンラインマニュアル
- 8) 街道, 渡辺, 橋, 松井, 堀川: 鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験および3次元有限要素解析における疲労耐久性評価, 構造工学論文集, pp.1119-1130, 2004年3月.
- 9) 松井: 移動輪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9-2, pp.627-632, 1987.

2004.10.12 受付