

# 鋼・コンクリート合成床版（QS Slab） の開発研究（その1）

## Development of a Steel / Concrete Composite Slab (QS Slab) : (Part 1)

佐藤 徹\*<sup>1</sup> 能登 宥 愿\*<sup>2</sup> 太田 貞 次\*<sup>3</sup>  
Toru SATO Hiroyoshi NOTO Teiji OTA

### Summary

Steel/Concrete composite slabs are being developed to satisfy the needs for reducing slab costs, simplifying the work of constructing slabs, and improving their structural performance.

Research aimed at the development of QS Slab is under way to meet the above purposes. Furthermore, a travel wheel-loading test was carried out to determine the durability of QS Slab. This paper outlines the test results and reports that the test shows that the QS Slab has excellent durability.

キーワード：合成床版，輪荷重走行実験，疲労耐久性

### 1. はじめに

橋梁の床版は、車両の大型化および増加に伴う過酷な使用条件で供用されており、鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版）の損傷発生問題が指摘されてきた。また近年、コスト縮減要求に応えるための橋梁構造および施工の合理化が進められ、主桁本数を減らした少数主桁の鉸桁形式、箱桁の上フランジ構造を大幅に簡素化した開断面箱桁形式<sup>1)</sup>などが施工されるようになった。その結果、床版は床版支間の長支間化へ対応する必要が生じ、さらに高い耐荷力・耐久性が要求されるようになってきている。このようにコスト縮減、施工の合理化、床版支間の長支間化および高耐久性などを満足する新形式床版として鋼・コンクリート合成床版が注目され、開発が進められている。

合成床版は一般的に、以下のような特長を有している。

- ①鋼とコンクリートとの合成作用により、RC床版と比較して剛性が高く、耐荷力を減ずることなく床版厚を薄くできる。
- ②同様に、耐久性が向上する。
- ③底鋼板は軽量のプレファブ部材で、コンクリート打設時の型枠として十分な剛性を有する。
- ④架設が容易で、足場を削減できる。
- ⑤コンクリート打設時の型枠・支保工が不要で、現場作業の省力化および工期短縮が図れる。

当社が開発研究を進めている“QS Slab（図-1）”は、他の合成床版と同様の特長に加え、主鉄筋方向にT形断面の形鋼をリブとして配置することにより、床版の張出し長が長い場合など、床版上面側に大きな引張応力が作用することへの対応も考慮している。また、合成床版は鋼部材とコンクリートとのずれ止めが重要であり、他の合成床版にはスタッドなどのずれ止めが設けられている。QS Slabは、主鉄筋方向にはコンクリート内に埋め込んだ形鋼リブに設ける孔によって一体化し、配力筋方向にはこのリブを適当な間隔で配置することでジベル効果が発揮されると考えている。さらに、コンクリートの浮き上がりによる底鋼板との付着劣化は、形鋼リブの拘束および鉄筋の付着によって押さえると考えて、底鋼板にはスタッドを設けないものとしている。

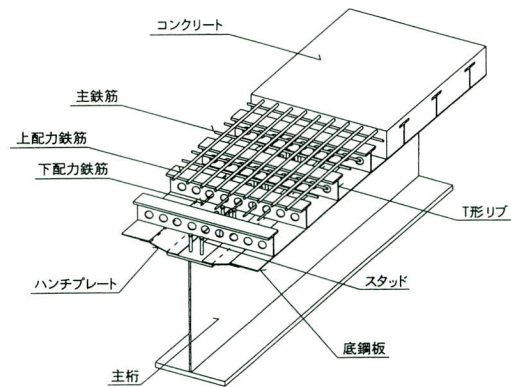


図-1 QS Slabの構造イメージ<sup>2)</sup>

\*技術本部技術開発部技術開発課課長代理  
\*技術本部技術開発部長

\*技術本部技術開発部技術開発課課長

RC床版の損傷メカニズムが明らかになるとともに、従来から行われてきた定点載荷による疲労試験に代わり、輪荷重走行実験によって実橋床版の損傷メカニズムが再現できることから、床版の耐久性の評価は輪荷重走行実験によって行われるようになってきている<sup>3)</sup>。QS Slabも将来の実橋への適用に際しては、輪荷重走行実験の実施が不可欠である。本稿ではQS Slabの特性および耐久性を確認するために実施した、輪荷重走行実験の概要を取り急ぎ報告する。

## 2. 試験概要

### (1) 輪荷重走行実験

走行実験は石川島播磨重工業(株)が神奈川県綾瀬市の試験研究所に所有する、輪荷重走行実験装置(図-2)を使用して行った。この実験装置の諸元は独立行政法人土木研究所の装置とほぼ同一の仕様である。実験装置の主要諸元を表-1に示す<sup>4)</sup>。

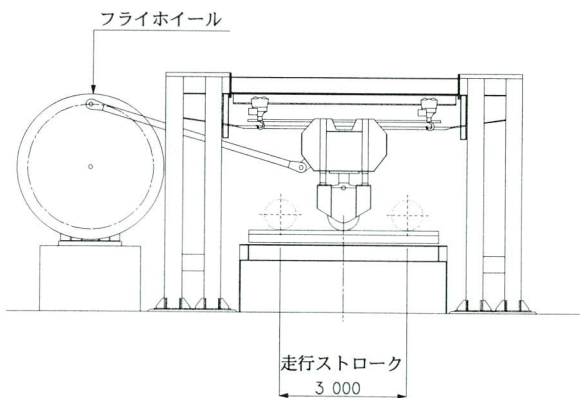


図-2 輪荷重走行実験装置

表-1 実験装置主要諸元

項目		仕様
形状・寸法	実験装置寸法	フレーム：高さ約5.8m×長さ約8m フライホイール：直径3.5m
	供試体寸法	標準：幅2.8m×長さ4.5m×厚さ0.16~0.35m (供試体最大幅5.3m)
	車輪の種類	鉄輪：直径750mm×幅320mm
駆動	電動機	90KW×6P×AC400V×f3×50Hz (インバータ制御)
	走行範囲	±1.5m (±0.5/±1.0/±1.25m対応可)
	フライホイール回転数	MAX 30rpm
載荷	載荷荷重	12tf ~ 50tf
	シリンダーストローク	400mm

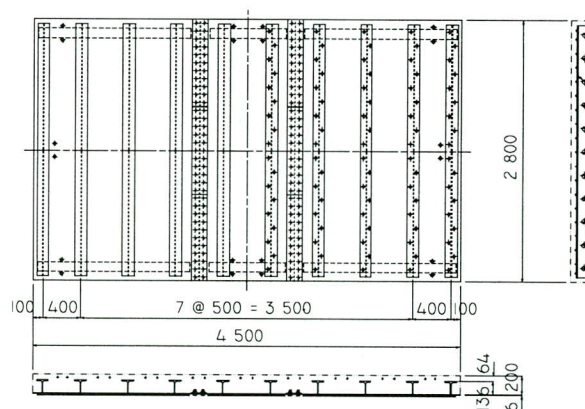
### (2) 試験供試体

#### 1) 供試体の設計

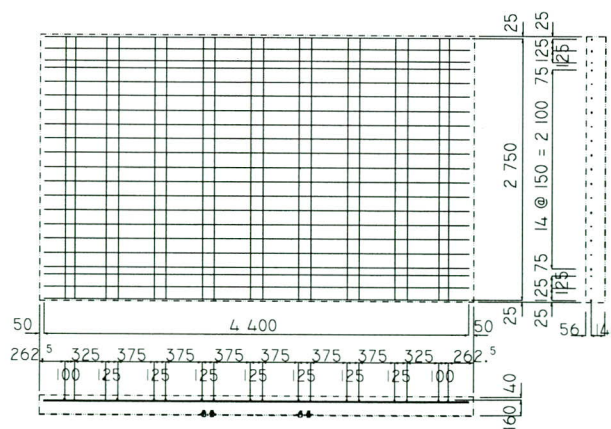
供試体は平成10年度に建設省土木研究所で行われた「道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究<sup>5)</sup>」と同様に、以下の条件により設計計算を行った。

- 1) 床版支間：L = 3.0 m (連続版の端支間)
- 2) 舗装厚：t = 8 cm
- 3) 床版コンクリート厚：hc = 2.5L + 10 ≥ 20 cm  
hc = 2.5 × 3.0 + 10 = 17.5、∴ hc = 20 cm とする
- 4) 設計荷重：P = 10,000 kgf (B活荷重)
- 5) 設計曲げモーメント：道路橋示方書、鋼橋編による曲げモーメントの割増係数：k = 1.0 + (L - 2.5) / 12 = 1.042

設計計算の結果、底鋼板はt = 6 (SM400)、補剛リブはI-250×125×7.5×12.5 (SS400、所定の高さで切断しT形として用いる)、主鉄筋および配力筋はともにD16 (SD295A) を用いることにした、供試体の概略形状・寸法を図-3に示す。



(a) 底鋼板

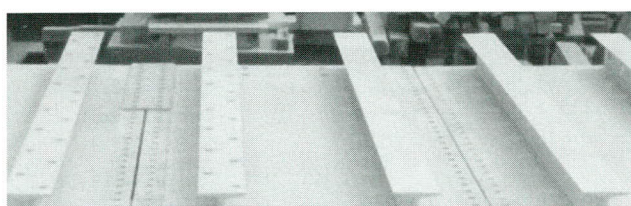


(b) 鉄筋配置

図-3 供試体の形状・寸法

## 2) 底鋼板の製作

QS SlabはT形の補剛リブを用いるため、フランジ下側へのコンクリート充填性に対する懸念がある。充填性を向上させるためには、フランジに孔をあけることが効果的である反面、製作コストは上がることになる。そこで、リブ構造とコンクリート充填性との関係、さらにはコンクリート硬化後の鋼とコンクリートとの付着性・一体性、および耐荷特性などへの影響を確認する目的で、1体の供試体の各1/2づつにフランジの孔あり、孔なしの2種類のリブ構造を設け、比較を行うことにした(写真-1)。



←フランジ孔あり      フランジ孔なし→  
写真-1 供試体のリブ構造

合成床版の特長の一つに現場での足場を削減できることを挙げたが、これは床版下側での作業をほとんど行わないことを前提としているため、底鋼板を足場代わりとして用いるなど、合成床版の施工は全て上側からの作業としたいと考えている。当然、底鋼板パネルの接合も上側からの施工とするために、他の形式の合成床版も継手構造をいろいろと工夫している<sup>6)</sup>。また、QS Slabは連続合成桁への適用を想定した場合、底鋼板を補強鋼材として有効断面に算定したいと考えている。したがって、底鋼板の継手は応力伝達を行える相応の構造として、現時点では高力ボルト摩擦接合を考えている。ただし、上面側からのみの作業とするために引張ボルトによる接合構造が適用されている例もあるが、今回の試験では接着剤を用いてあらかじめ高力ボルトを底鋼板に接着し、片面摩擦で上面側から添接作業を行う施工法とした(写真-2)。



写真-2 接着剤を用いた底鋼板継手部の施工

接着剤を用いた底鋼板の接合後(写真-3)、鉄筋の配筋を行った。QS Slabでは通常鉄筋は上段のみに設置し、下段の鉄筋はハンチ部など限られた位置のみへ配置する。鉄筋はT形リブのフランジに載せて配置できるため、配筋作業は非常に容易である。供試体の配筋後の鋼製部材完成状況を写真-4に示す。

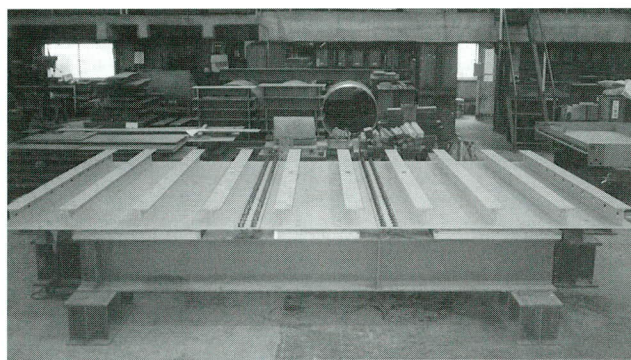


写真-3 底鋼板組立後

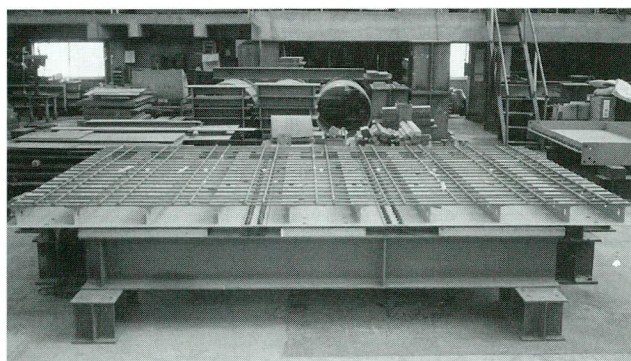


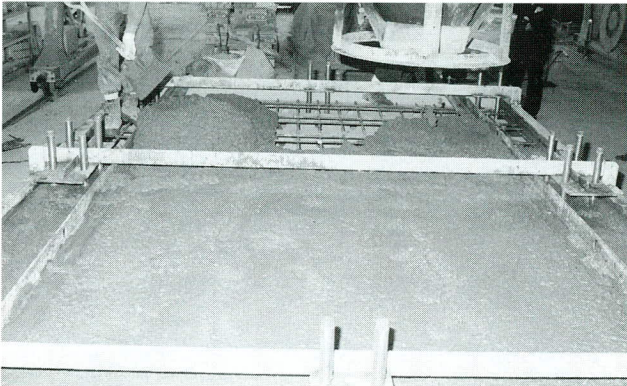
写真-4 鋼製部材完成状況

## 3) コンクリート施工

合成床版のコンクリートは、一般的に普通コンクリートが使用され、混和材として収縮補償のための膨張材が用いられている。QS SlabはT形補剛リブを採用しているため、リブのフランジがコンクリートの充填性を損なう要因となる恐れがある。充填性を確保するために流動化コンクリートの適用を検討してみたが、コスト面からは通常用いている範囲のスランプのコンクリートが望ましい。実験における充填性の評価は、コンクリート施工中の充填状況とともに、実験終了後の切断面の観察結果を合わせて判断するものとした。コンクリート配合設計はコンクリートのスランプを8~12cm、また実験開始時の圧縮強度が30N/mm<sup>2</sup>となるようにコンクリート呼び強度を27N/mm<sup>2</sup>として行った。コンクリート配合およびコンクリート試験結果を表-1に示し、写真-5にコンクリート打設状況を示す。

表一-1 コンクリートの配合および試験結果

配 合	粗骨材最大寸法	20 mm
	スランプ	12±2.5 cm
	空気量	4.5±1.5 %
	水セメント比 (W/C+E)	53.0 %
	細骨材率 (s/a)	46.1 %
	水 W	170 kg/m <sup>3</sup>
	単 位 量	
	セメント C	291 kg/m <sup>3</sup>
	混和剤 (AE減水剤) A	4.173 kg/m <sup>3</sup>
	混和材 (膨張材) E	30 kg/m <sup>3</sup>
試 験 結 果	スランプ	9.5 cm
	空気量	3.4 %
	コンクリート温度	25.7 °C
	塩化物含有量	0.035 kg/m <sup>3</sup>

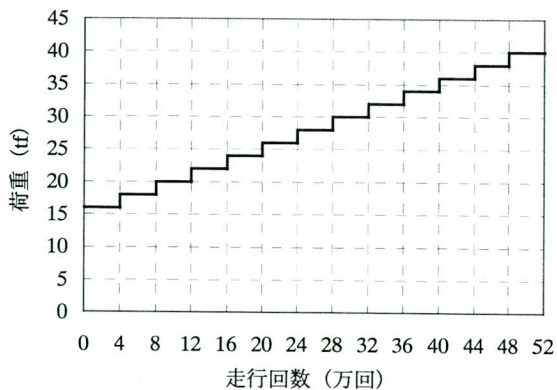


写真一-5 コンクリート打設状況

### (3) 実験要領

#### 1) 荷重載荷要領

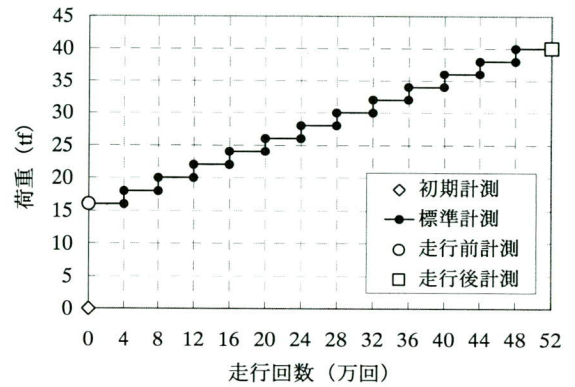
土木研究所における階段状荷重漸増載荷と同様に、初期荷重を16 tfとし、4万回走行毎に2 tfづつ荷重を増加させながら、最終的に走行回数52万回・載荷荷重40 tfまでの載荷を行った。載荷要領を図一-4に示す。



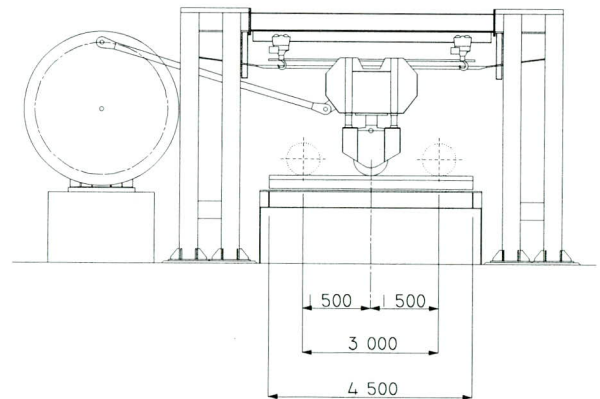
図一-4 載荷荷重—走行回数の関係

#### 2) 静的載荷実験

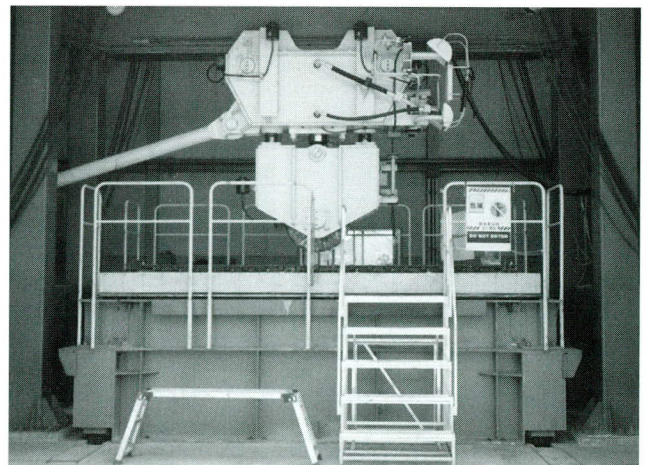
静的載荷実験は荷重載荷前の無載荷時を初期値とし、以降の各階段載荷において同一荷重の載荷開始時および載荷終了時（走行回数4万回毎）に、供試体の中央に輪荷重を載荷した状態で実施した。図一-5に静的載荷実験要領、図一-6に荷重載荷要領図、また写真一-6には実験状況をそれぞれ示す。



図一-5 静的載荷実験要領



図一-6 荷重載荷要領図



写真一-6 実験状況

### 3. FEM解析概要

実験結果の検証を目的とする3次元FEM解析は、当社が所有する汎用有限要素法プログラム「MARC」を用い、下図に示すように供試体の橋軸中心線上で対称とする境界条件を与えた1/2モデルにより行った。

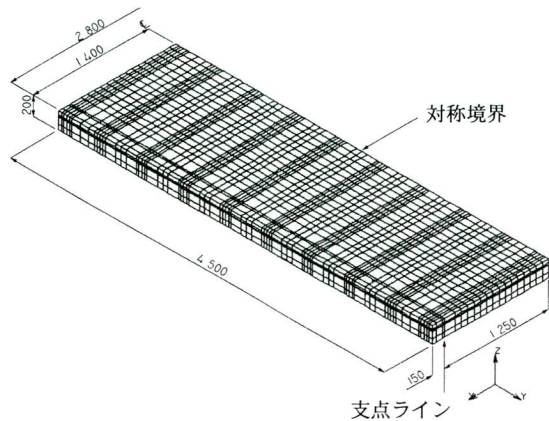


図-7 解析モデル

材料要素は、鋼板にシェル要素、コンクリートにソリッド要素、鉄筋にトラス要素を用いている。また、底鋼板は添接部で分離し、添接板と高力ボルトを介して接合している。高力ボルトはすべりを生じないと仮定し、3次元はり要素を用いてモデル化している。

荷重は実験に合わせ、床版中央に載荷版の分布荷重として $P = 16\text{tf}$  から $40\text{tf}$  まで $2\text{tf}$  毎の漸増荷重を与えている。

### 4. 実験および解析結果

#### (1) 変位性状

##### 1) 走行回数-変位関係

静的載荷実験の荷重を図-7に示し、供試体の中心位置(図-8)における走行回数-鉛直変位関係を図-9に示す。

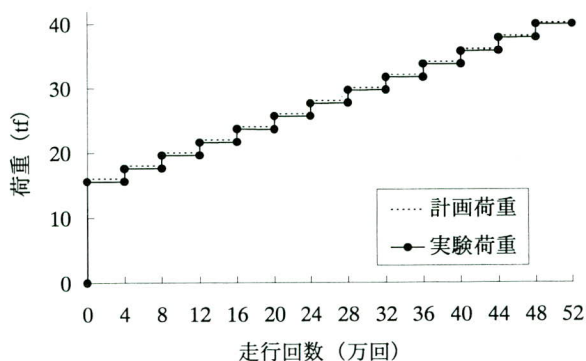


図-7 静的載荷実験荷重

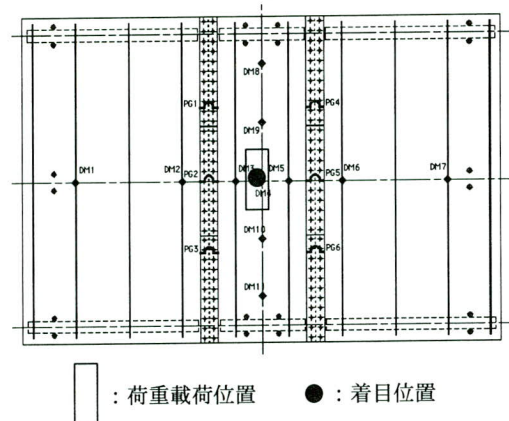


図-8 荷重位置と着目位置

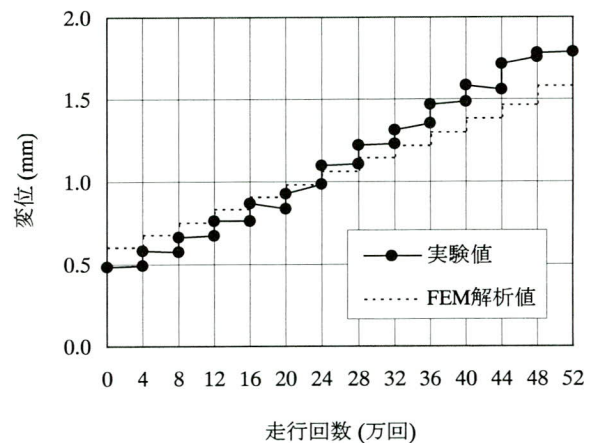


図-9 走行回数-変位関係図

##### 2) 荷重-変位関係

図-9に示した走行回数と変位との関係を荷重と変位との関係に置き換えて、図-10に示す。

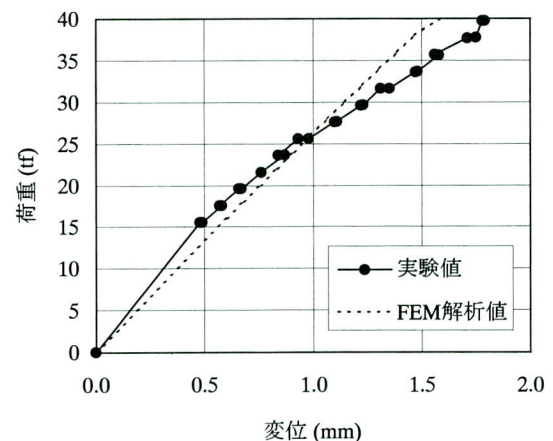
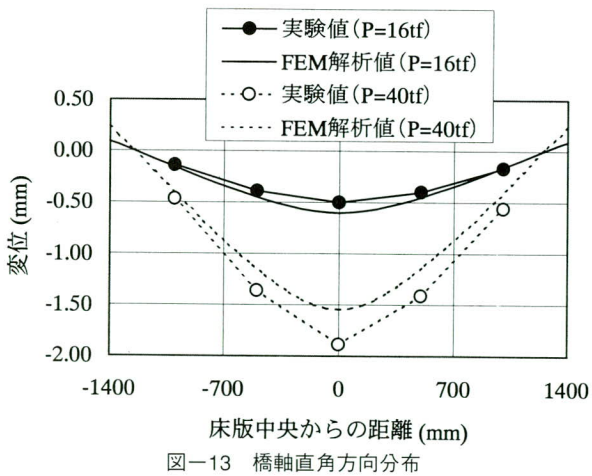
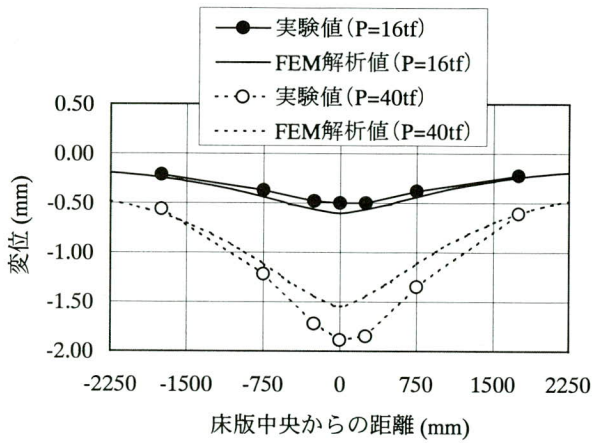
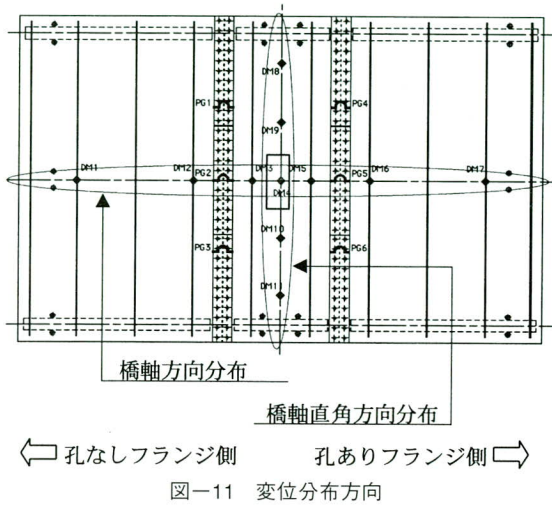


図-10 荷重-変位関係図

### 3) 変位分布

初期荷重である $P = 16 \text{ tf}$ 、および最大荷重である $P = 40 \text{ tf}$ における変位分布を以下に示す。

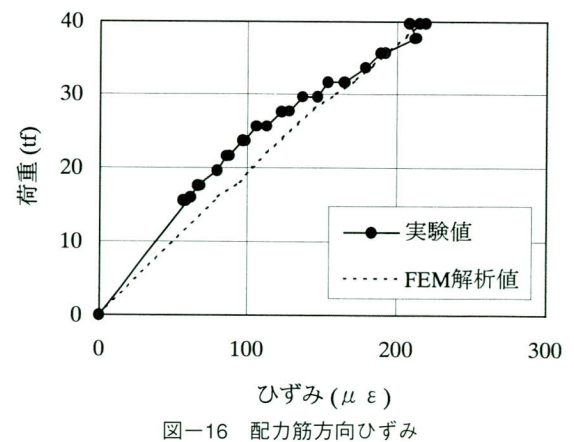
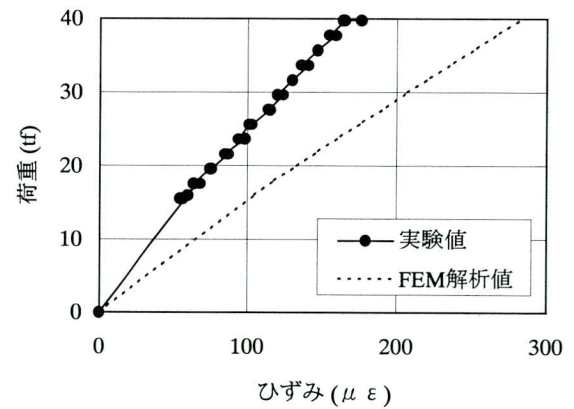
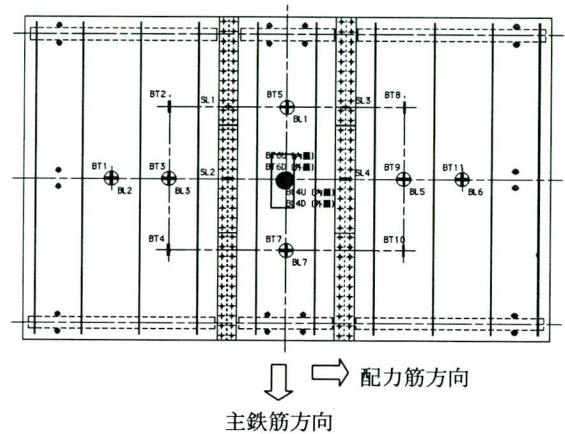


### (2) ひずみ性状

#### 1) 荷重-ひずみ関係

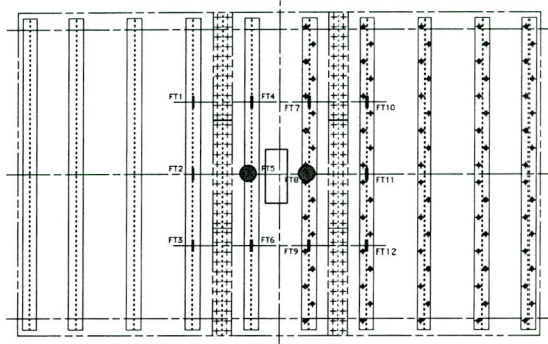
##### (a) 底鋼板ひずみ

ひずみの着目位置、主鉄筋方向（橋軸直角方向）のひずみ測定結果、配力筋方向（橋軸方向）のひずみ測定結果をそれぞれ図-14～図-16に示す。



(b) Tリブフランジひずみ

ひずみの着目位置、孔なしフランジの軸ひずみ、孔ありフランジの軸ひずみの測定結果をそれぞれ図-17～図-19に示す。



← 孔なしフランジ側      孔ありフランジ側 →

図-17 ひずみの着目位置

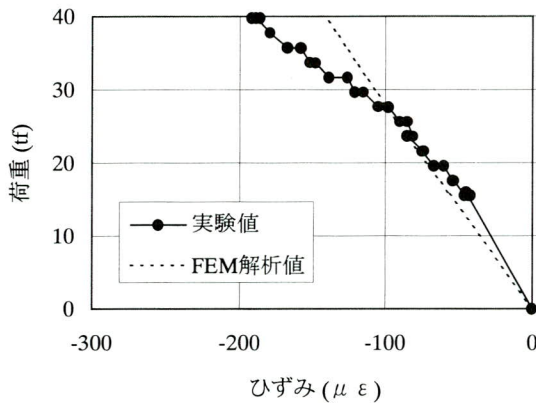


図-18 孔なしフランジのひずみ

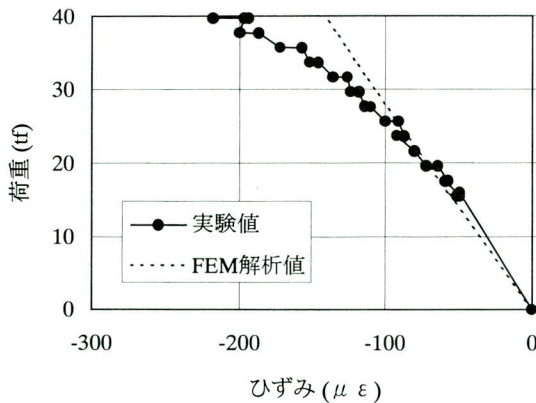
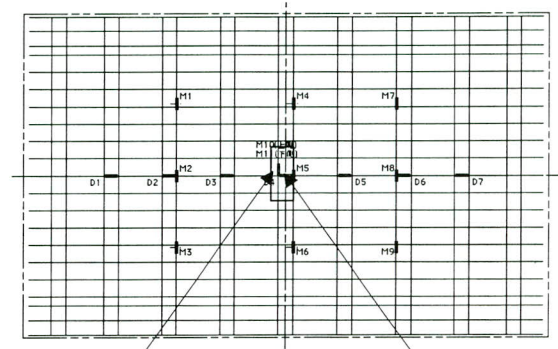


図-19 孔ありフランジのひずみ

(c) 鉄筋ひずみ

ひずみの着目位置、主鉄筋の軸ひずみ、配力筋の軸ひずみの測定結果をそれぞれ図-20～図-22に示す。



主鉄筋                      配力筋

図-20 ひずみの着目位置

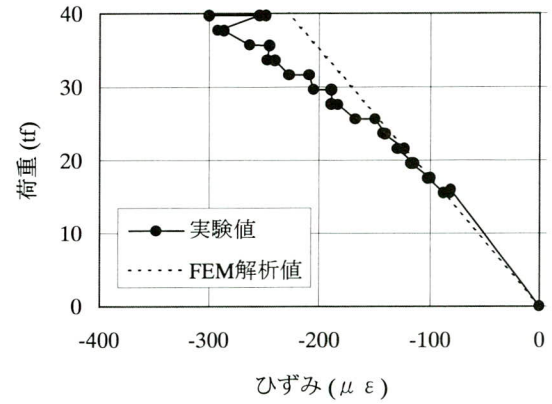


図-21 主鉄筋ひずみ

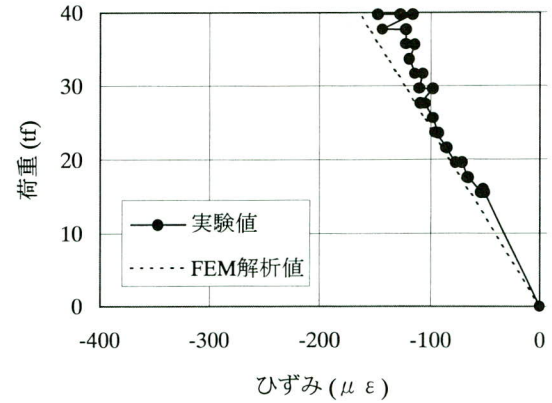


図-22 配力筋ひずみ

(d) コンクリートひずみ

ひずみの着目位置、主鉄筋方向（橋軸直角方向）のひずみ測定結果、配力筋方向（橋軸方向）のひずみ測定結果をそれぞれ図-23～図-25に示す。

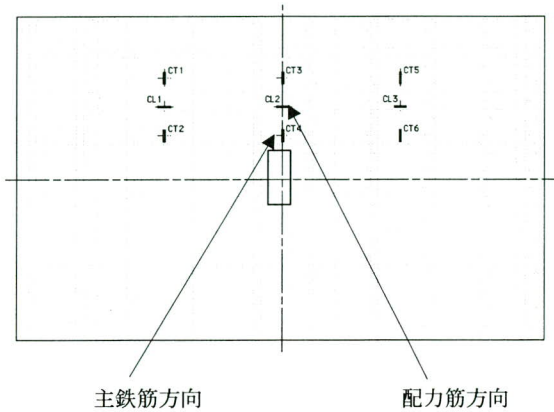


図-23 ひずみの着目位置

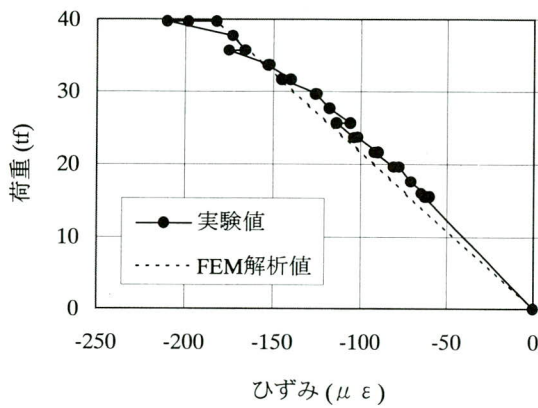


図-24 主鉄筋方向ひずみ

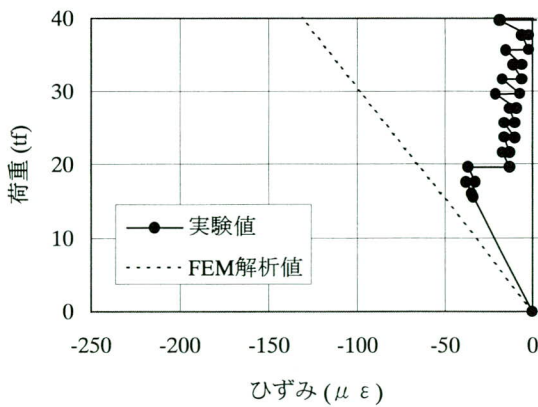
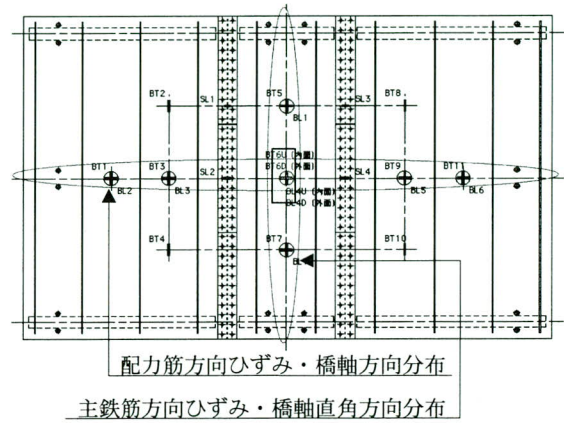


図-25 配力筋方向ひずみ

4) ひずみ分布

P = 16tf および P = 40 tf 载荷時のひずみ分布を示す。

(a) 底鋼板



◁ 孔なしフランジ側      孔ありフランジ側 ▷

図-26 ひずみ分布方向

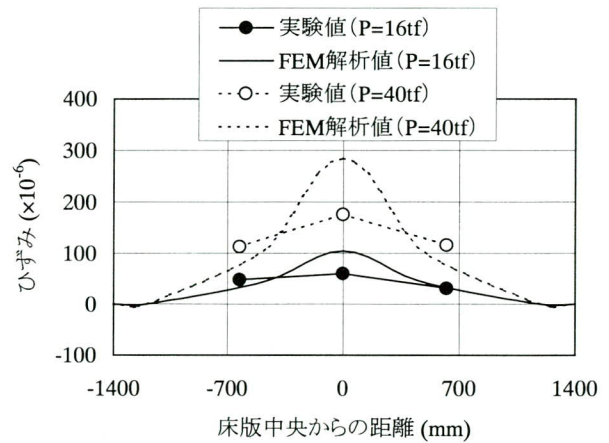


図-27 主鉄筋方向ひずみ・橋軸直角方向分布

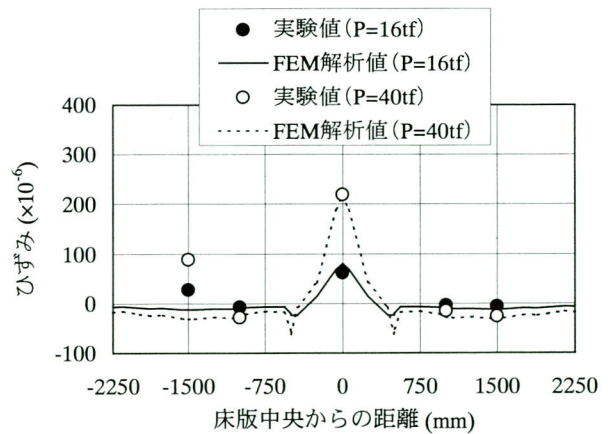


図-28 配力筋方向ひずみ・橋軸方向分布



(b) Tリブ

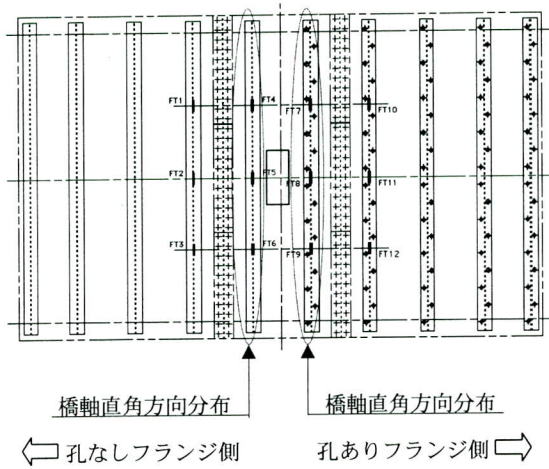


図-29 ひずみ分布方向

(c) 鉄筋

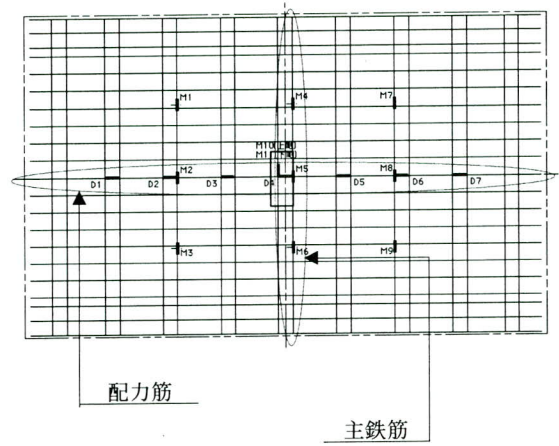


図-32 ひずみ分布方向

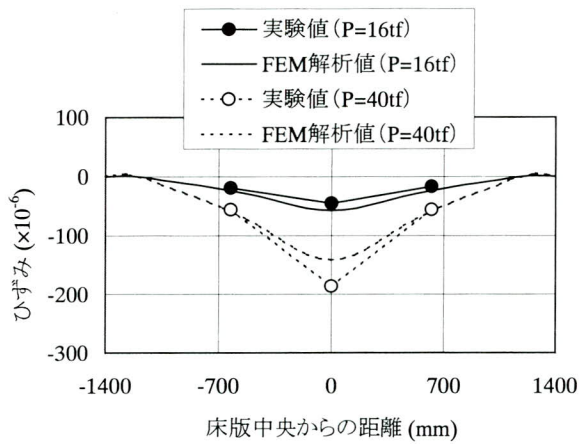


図-30 孔なしフランジ

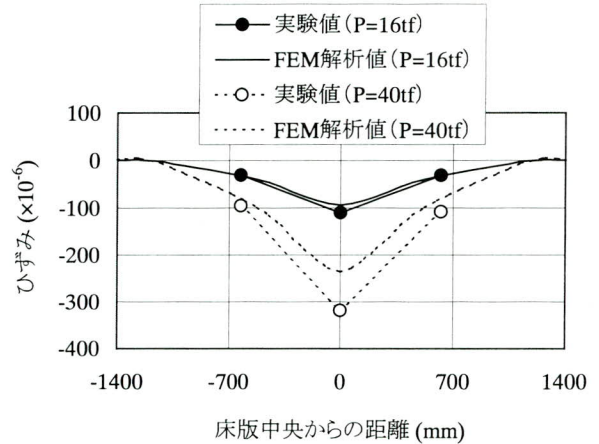


図-33 主鉄筋

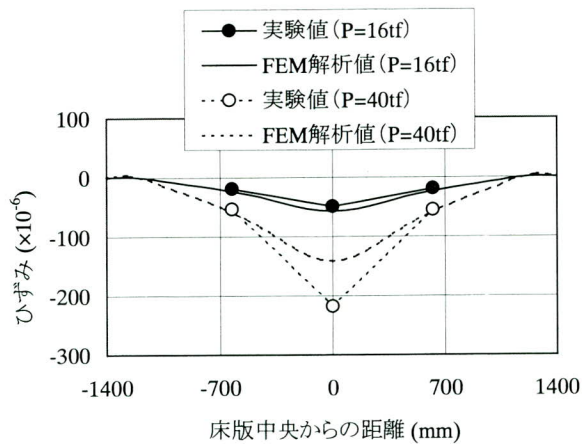


図-31 孔ありフランジ

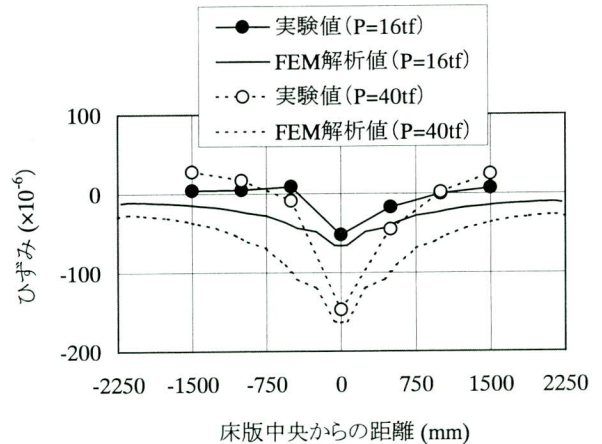


図-34 配力筋

(d) コンクリート

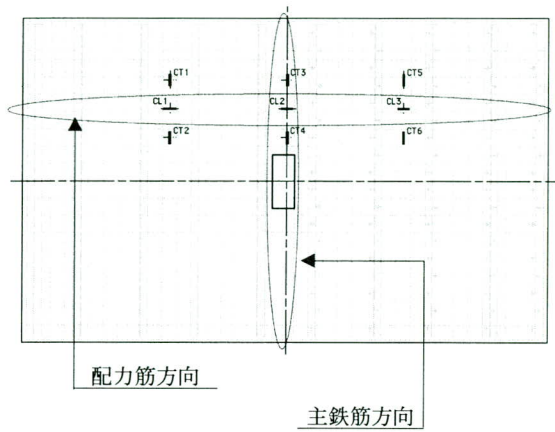


図-35 ひずみ分布方向

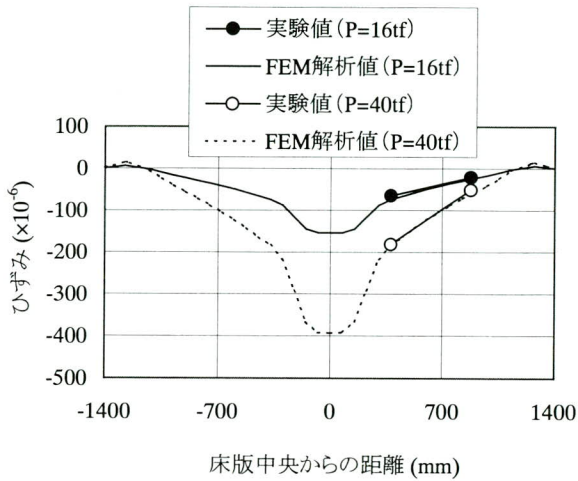


図-36 主鉄筋方向

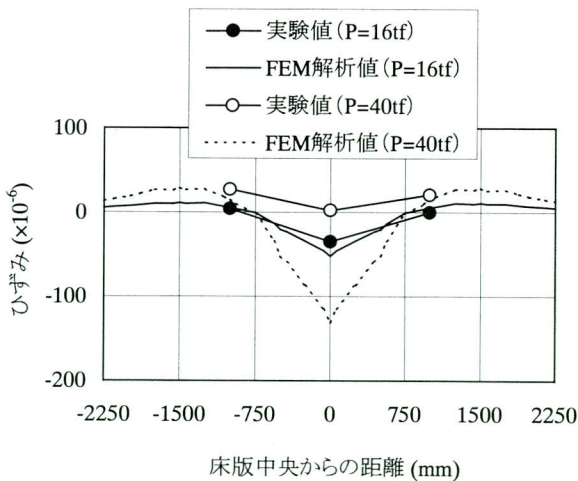


図-37 配力筋方向

(3) ひびわれ性状

ひびわれ発生の変化が見られた走行回数36万回から40万回、および所定の走行回数である52万回走行後の供試体上面および側面のひびわれ観察結果を図-38に、供試体の切断後の断面観察結果を図-39に示す。

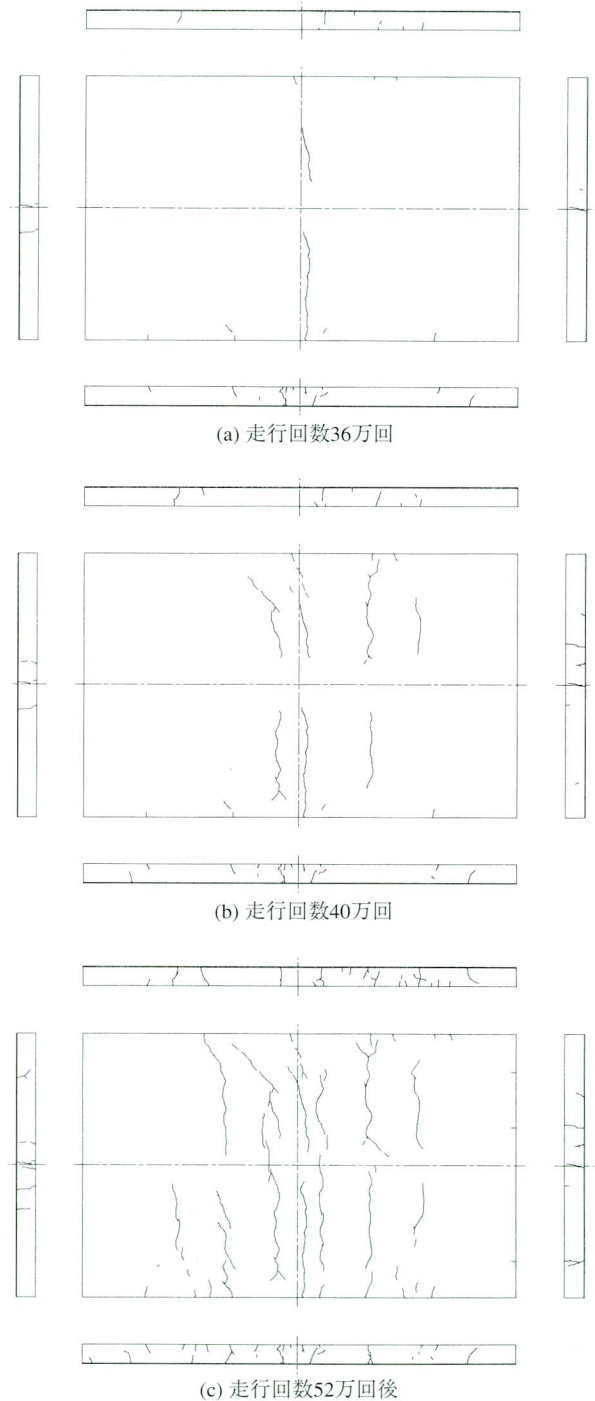


図-38 クラックマップ

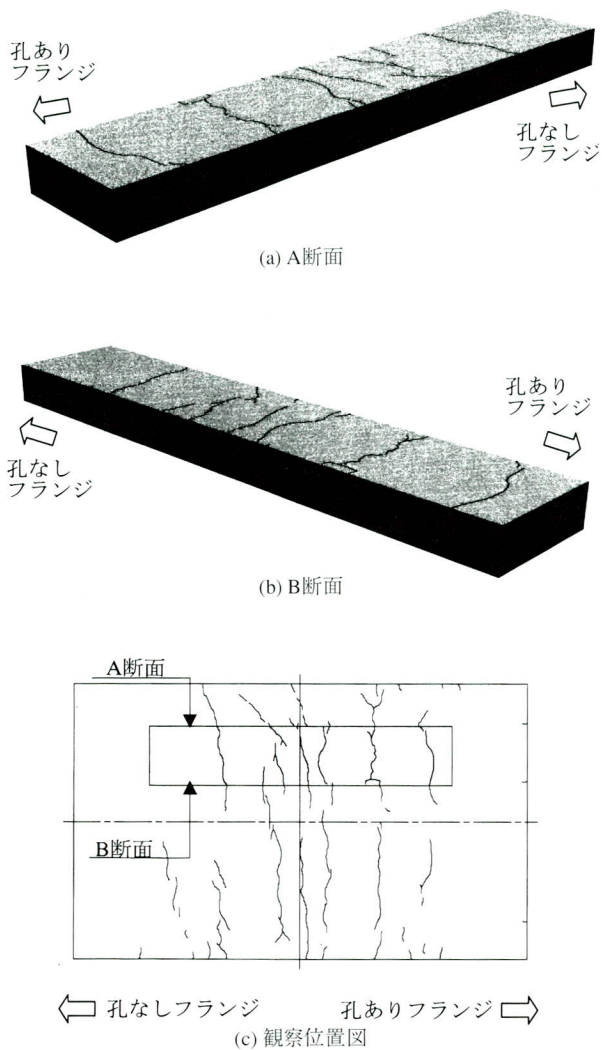
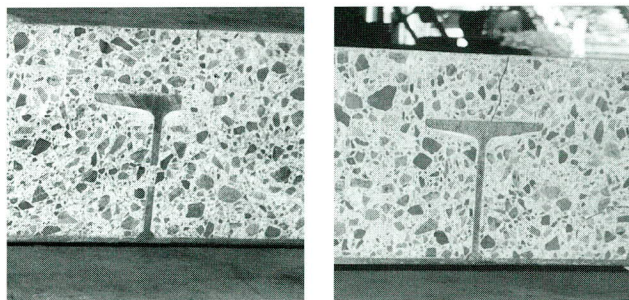


図-39 断面の観察結果

また、Tリブフランジ下側へのコンクリート充填状況の観察結果から、孔ありフランジ部、孔なしフランジ部の切断面の写真を以下に示す。



(a) 孔ありフランジ

(b) 孔なしフランジ

写真-7 Tリブ下側のコンクリート充填状況

#### (4) 実験・解析結果の考察

##### 1) 変位性状

静的荷重実験の荷重は、計画値に対して1~3%低い値であり、概ね一致していた。床版中央の鉛直変位の実験値は、走行実験での初期段階において解析値より小さく、走行回数の増加とともに変位も大きくなる傾向が見られた。最終荷重では、実験値は解析値に対して約20%大きい結果となっている。P = 20 tf の段階で床版上面のひびわれ発生が確認されていること、解析ではひびわれが考慮されていないことから、このような結果はひびわれによる剛性低下の影響であると思われる。全体的に床版の変位は、実験値と解析値は概ね整合しており、変形形状もよく一致している。

##### 2) ひずみ性状

各部材のひずみ性状もまた、変位性状と同様の傾向を示している。荷重-ひずみ関係は一部のデータを除き、実験値と解析値は比較的よく合っている。底鋼板の主鉄筋方向ひずみは、荷重載荷点の直下のゲージが解析値に比較して小さくなる傾向が表れている。この現象は載荷位置を変えた場合の荷重載荷点直下でも表れるため、原因について分析を行っているところである。コンクリート配筋方向ひずみ(図-25)は、P = 20 tf で急激なひずみの変動が表れているが、ひずみゲージの近傍にひびわれが発生した段階と一致しており、ひびわれにより測定位置のひずみが解放されたものと推定される。ひずみ分布に関しても、データの一部に不良箇所はあるものの、解析値は実験結果の性状をよく追跡できていると思われる。なお、実験の着目点の一つであるTリブフランジに設けた孔の影響に関しては、有意差は特に認められない。

##### 3) ひびわれ性状

床版上面のひびわれは、走行回数12万回 (P = 20 tf) 時に床版のほぼ中央部に発生した。このひびわれは走行回数36万回にかけて徐々に進展しており、この間は新たな位置のひびわれ発生は見られなかった。走行回数40万回 (P = 36 tf) 以降は床版の中央から端部に広がるようにひびわれが発生し、最終的には橋軸直角方向(主鉄筋方向)に大きく7本のひびわれが確認された。これらのひびわれは全てひびわれ幅が0.2mm以下である。そのほか、走行路盤の近傍で圧壊、せん断ひびわれ、橋軸方向(配筋方向)のひびわれは一切確認されなかった。また、走行実験終了後に供試体を切断し断面の観察を行ったところ、Tリブフランジの先端部、もしくは鉄筋位置からひびわれが発生している様子が見られた。ただし、

床版厚さ方向に貫通しているひびわれはなく健全な状態が保持されていることから、耐久性に全く問題はないものと思われる。

#### 4) その他

コンクリートの充填性については、コンクリート打設中の状況では、Tリブフランジに孔をあけた側で孔を通過してコンクリートが流動している様子が見られた。切断面の観察によれば、コンクリートは孔あり、孔なしともにTリブフランジの下側へも回っており、良く充填されていた。コンクリートのスランプは9.5cmであり、通常の床版コンクリートに用いるスランプ8cm程度のコンクリートによる施工にも十分対応可能である。切断面では両者ともエアの残留している箇所が一部に見られ、フランジに孔を設けることによる充填性への効果は確認できなかった。

また接着剤を用いた底鋼板の高力ボルト継手部は、すべりは全く生じなかった。合成床版継手部への接着剤の適用に関しては、耐荷性能および耐久性に問題のないことが確認できたため、費用対効果など今後さらに検討を行った上で判断したいと考えている。

## 5. まとめ

QS Slabの輪荷重走行実験により、以下の項目を確認した。

- ① QS Slabは実験の最終段階（P = 40 tf、走行回数52万回）においても破壊しなかった。また、破壊の予兆となるようなひびわれは認められず、健全な状態が保持され優れた疲労耐久性を有している。
- ② 荷重載荷による床版の変位および各部材のひずみは、解析により予測される範囲内で推移しており、耐荷力の低下は見られない。
- ③ 解析結果との比較によれば、QS Slabはスタッドシアコネクタを設けなくとも、合成構造として機能している。
- ④ コンクリートは鋼部材内に十分充填されており、通常のスランプのコンクリートを用いた施工が可能である。

⑤ Tリブフランジの孔の有効性は、力学性状およびコンクリート充填性とも特に認められなかった。

⑥ 実橋においては、雨水の浸入が重大な状況をもたらすため、防水性に対しては十分検討する必要がある。

QS Slabは優れた耐荷力と耐久性を有する合成床版であり、他の形式の合成床版との比較においても同等と評価することができた。今後は設計・施工マニュアルの整備を進めるとともに、さらに継手構造などの検討を行う予定である。

本実験を実施するに当たりまして石川島播磨重工業(株)、石川島建材工業(株)、リブコンエンジニアリング(株)の関係者の皆様には、多大なるご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

## <参考文献>

- 1) 西川, 村山, 吉崎, 古賀, 田中, 八部: 鋼連続開断面箱桁における鋼・コンクリート合成床版の適用について, 第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp. 203~206, 平成12年10月, 土木学会
- 2) 日本橋梁建設協会: 新しい鋼橋の「鋼・コンクリート合成床版」橋建協標準合成床版, 平成13年1月
- 3) 内田, 西川: 既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, pp. 37~42, 平成10年11月, 土木学会
- 4) 鈴木, 石井, 森安, 松井: RC床版の輪荷重移動載荷疲労試験, 第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp. 155~160, 平成12年10月, 土木学会
- 5) 建設省土木研究所, 他: 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1)~(その3)
- 6) 松井, 金, 宮川: 梁供試体を用いた合成床版ボルト継手の挙動に関する実験的研究, 第4回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp. 231~236, 1999年11月, 土木学会

2001. 10. 29 受付