

コンクリートの施工品質が合成床版の疲労耐久性に及ぼす影響

Study on fatigue durability of steel-concrete composite decks taking into account the quality of concrete

高須賀丈広*, 神田恭太郎**, 上村明弘**, 松井繁之***

Takehiro TKASUKA, Kyotaro KANDA, Akihiro UEMURA, Shigeyuki MATSUI

*工修 川鉄橋梁鉄構株 技術部 開発技術室 (〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4)

**川鉄橋梁鉄構株 技術部 開発技術室 (〒111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4)

***工博 大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

Steel-concrete composite decks are generally designed considering the performance of the fatigue durability based on the result of wheel load running test. The conditions of such performance-based design are to secure the execution quality which satisfies the preconditions for the design. In the real site works, it is sometimes concerned that concrete filling is executed without any problems since many steels such as shapes are used in this type of deck. For this problem the guarantee of performance is due to adopt the same execution method confirmed by full-size testing. However, quality of a laboratory level may not be always secured at site since quality of concrete changes depending on the season, the execution system and so on.

This paper describes on fatigue durability of steel-concrete composite deck based on wheel load running test which reflects artificial defect assumed in the real execution and the results of finite element method analysis considering the mentioned above.

Key Words : steel concrete composite deck, wheel load running test, quality of concrete, fatigue durability

キーワード：鋼コンクリート合成床版，輪荷重走行試験，コンクリート，品質，疲労耐久性

1. はじめに

鋼コンクリート合成床版（以下、合成床版という）は橋梁構造の合理化の伸展を背景に、新しい床版形式として普及しつつある。その適用にあたっては、各機関において提唱されている設計法¹⁾²⁾に準拠しながら道路橋示方書の鉄筋コンクリート床版等の規定を準用のうえ設計されている。このうち、床版の疲労耐久性については基準としては規定されていないが、現実的な手法として輪荷重走行試験により既往の鉄筋コンクリート床版との相対比較により評価³⁾されているのが慣用的であり、合成床版はプレレストコンクリート床版と同様に高耐久性床版としての期待がかかっている⁴⁾。

床版の疲労耐久性の評価にあたっては、設計の前提とする施工品質についても考慮することが必要である。合成床版は、コンクリート内部の鋼材量が多いためコンクリートの充填性等に対して懸念が持たれる場合もある。これに対しては、実物大モデルによる施工試験を実施のうえ密実なコンクリートの充填が可能となる施工管理方法に基づく等、施工品質の信頼性を高くするための配慮を行うのが一般的である。しかし、コンクリートの品質は地域や季節、さらには施工体制の変動による影響を受ける恐れもあるため、試験室レベルのコンクリートの品質が必ずしも確保されるという保証はない。したがって、

要求性能に対する解の明確化の観点からもコンクリートの施工品質が疲労耐久性にどのような影響を与えるかを検証することは重要な意味を持つ。

こうしたことを背景として、今回相対的に幅の広い形鋼を使用した合成床版について、想定し得るコンクリートの品質のばらつきを模擬した人工欠陥を有する供試体を用いて、実験と解析により疲労耐久性を評価することを試みた。

本文は、コンクリートの施工品質が合成床版の疲労耐久性に与える影響について、突起付きT形鋼ジベル合成床版（図-1.1参照）を対象として実施した輪荷重走行試験と構造解析の結果を中心として報告するものである。

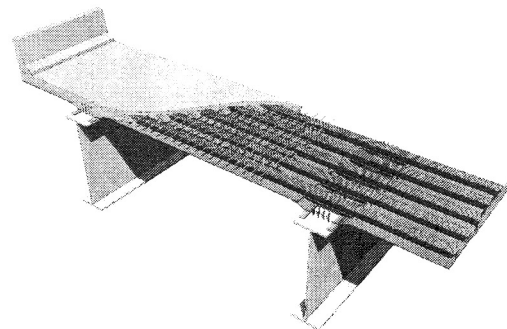


図-1.1 突起付きT形鋼ジベル合成床版

2. 想定するコンクリートの施工品質

2.1 合成床版におけるコンクリートの充填性

鋼コンクリート合成構造においては、所要の性能を満足するようにコンクリートの施工方法等を適切に設定することが重要であり、図-2.1に示すようにコンクリートの充填性に影響を与える構造条件、コンクリートの条件および施工条件に関して特に留意する必要がある⁵⁾。合成床版の場合、鋼殻構造と異なり未充填による局所的な空隙が発生することはないが、フランジ等の下面に小さな気泡が溜まる場合もあるとの報告例⁶⁾もある。本合成床版においても、写真-2.1に示すような比較的小さい気泡が溜まる場合があることを、条件の変動を反映した充填性試験により検証している。

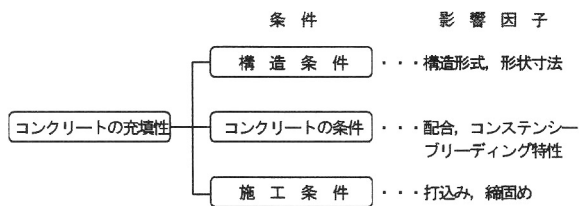


図-2.1 コンクリート充填性の影響因子

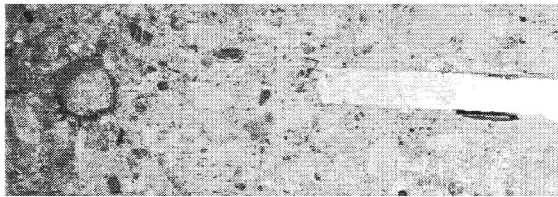


写真-2.1 フランジ下面の気泡

2.2 コンクリートの施工品質

合成床版のコンクリートの打込みにあたっては、締固め方法を適切に管理することにより気泡の発生をある程度コントロールすることが可能であるが、直接的に充填状況を確認することができないため完全に密実なコンクリートであることを保証することは困難である。そこで本合成床版においては、コンクリートの充填性に対しては充填性試験により、また、コンクリートの施工品質を考慮した場合の疲労耐久性については輪荷重走行試験と構造解析を併用した手法により評価することを試みた。

この場合、実験や解析にあたりどのような施工品質を考慮するかが課題となる。そこで、本合成床版の充填性試験より得られた次に示すような気泡の特徴を考慮のうえ、実際には発生しないが安全側の評価を得ることを目的として写真-2.2に示すようにフランジ長手方向に亘り空隙が存在しているというモデルを設定することとした。

- ① 形状は、丸みを帯びている。
- ② 大きさは、平均的に深さ2~3mm、幅20~30mm程度である。
- ③ 発生しても独立した気泡を形成して散在する。
- ④ ウェブに近い位置に滞留することが多い。

- ⑤ 一般的な縦断勾配の範囲においてその勾配の影響はあまりない。

ここで、人工欠陥は幅50mm、厚さ5mmの発砲スチロール板を用いてモデル化した。

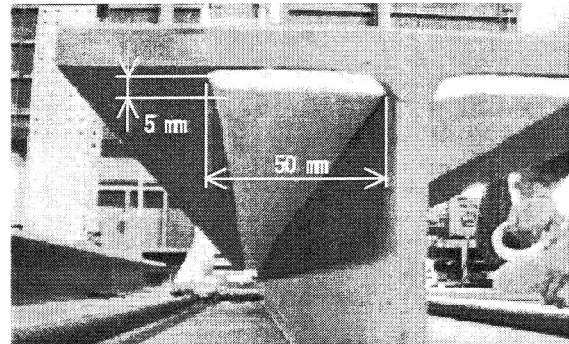


写真-2.2 設定する欠陥モデル

3. 輪荷重走行試験

3.1 供試体の諸元

供試体の形状寸法は、図-3.1および表-3.1に示すとおり床版支間2.5mに対して、幅2.8m、長さ3.0m、床版厚200mmとした。これは、各種合成床版の輪荷重走行試験において床版支間3.0mの連続版として設計された標準的なものと同様である。また、内部鋼材として突起付きT形鋼は高さ120mmのものを当該床版の標準間隔500mmで配置し、主鉄筋はD19@500mm、配力鉄筋はD16@200mm

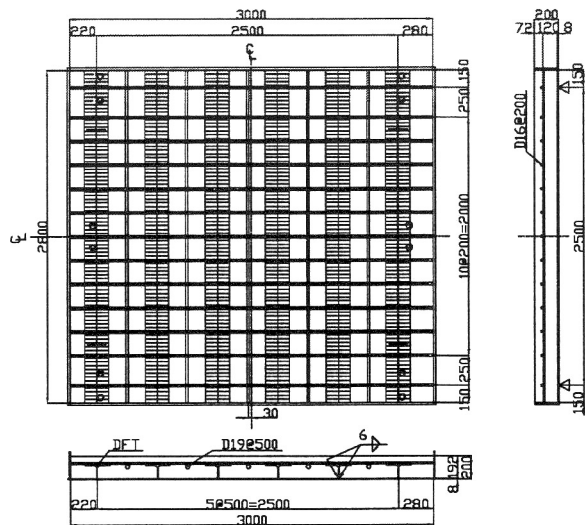


図-3.1 供試体の構造図

表-3.1 供試体の諸元試験の状況

項目	構造寸法	備考
幅	2,800 mm	橋軸直角方向
長さ	3,000 mm	橋軸方向
床版支間	2,500 mm	単純支持
床版厚	200 mm	底鋼板厚含む
底鋼板厚	t=8 mm	材質：SM400A
突起付きT形鋼	DFT204×120×8×12 @500 mm	材質：SM400A
鉄筋	主鉄筋：D19@500 mm 配力鉄筋：D16@200 mm	材質：SD345

とした。コンクリートは設計基準強度 $\sigma_{tk}=30\text{N/mm}^2$ の膨張コンクリートとし、その配合と材料試験の結果は表-3.2および表-3.3に示すとおりである。

なお、人工欠陥はすべてのT形鋼の全長に配置した。

表-3.2 コンクリート配合

配合の設計条件					
コンクリートの種類	呼び強度	スラン	粗骨材の最大寸法	セメントの種類	
普通	30	8 cm	20 mm	H	
配合表 (kg/m ³ , ℓ/m ³ : *印)					
セメント	膨張材	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤
325	30	163	707	1088	0.888 *

表-3.3 コンクリートの材料試験結果

項目	試験結果	試験日
圧縮強度	34.8 N/mm ²	輪荷重走行試験 開始日
割裂強度	2.3 N/mm ²	
ヤング係数	2.64×10^4 N/mm ²	
ポアソン比	0.2	

3.2 載荷方法と支持条件および測定項目

輪荷重走行試験は、独立行政法人北海道開発土木研究所の試験機(写真-3.1参照)を使用して行い、載荷プログラムは図-3.2に示すとおりで累積走行回数は48万回とした。載荷板1枚当たりの寸法は300×120mmで、走行範囲は供試体の中央から±1.0mである。供試体の支持方法は、設計で想定している一方向版としての挙動を再現できるように、長辺は架台上に丸鋼を配置して単純支持し、短辺はH200×200の横梁を配置して弾性支持した。

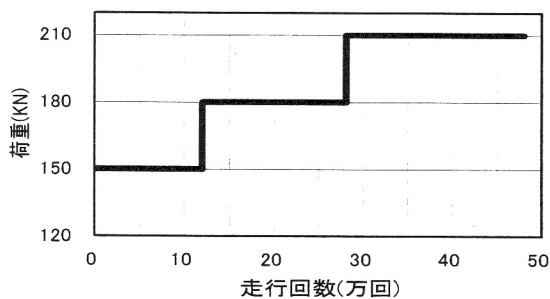


図-3.2 載荷プログラム

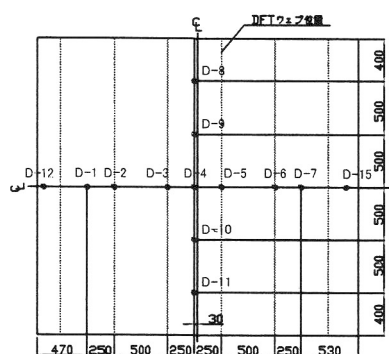


図-3.3 たわみ測定位置
(底鋼板下面)

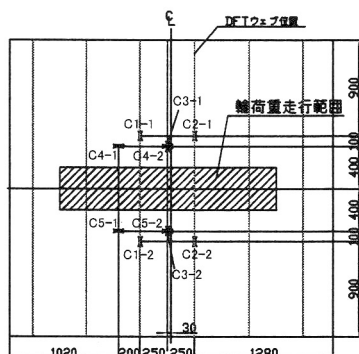


図-3.4 ひずみ計測位置
(コンクリート上面・内部鋼材)

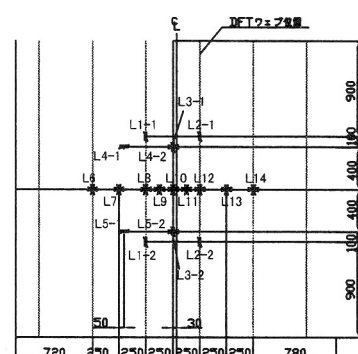


図-3.5 ひずみ計測位置
(底鋼板下面)



写真-3.1 輪荷重走行試験の状況

測定項目は、供試体のたわみ、コンクリート上面のひずみ、突起付きT形鋼や鉄筋および底鋼板下面のひずみとし、測定位置は図-3.3～図-3.5に示すとおりとした。また、コンクリート上面のひび割れ状況は試験中に随時確認し、内部のひび割れ状況については試験終了後に供試体を切断して確認した。

3.3 試験結果

測定項目のうち、たわみおよび底鋼板ひずみと走行回数の関係ならびにコンクリートのひび割れ状況について以下に示す。なお、測定値は98kN換算した値を示す。

供試体中央における弾性たわみは、図-3.6に示すとおり走行回数によらずほぼ一定値である。また、底鋼板下面の橋軸方向および橋軸直角方向ひずみについても、図-3.7および図-3.8に示すとおり概ね一定の値と見ることができる。

コンクリートのひび割れについては、試験終了時の上面においては観測されなかった。一方、コンクリート内部については、図-3.9に示すとおり輪荷重の走行範囲直下の切断面において引張側コンクリートに1本の微細なひび割れが観測されたが、これは人工欠陥の存在との関連性はなく、橋軸方向(配力鉄筋方向)の曲げモーメントによるものと考えられる。

これらの結果から、今回の載荷に対して人工欠陥が疲労耐久性に与える影響は極めて小さいものと推察される。

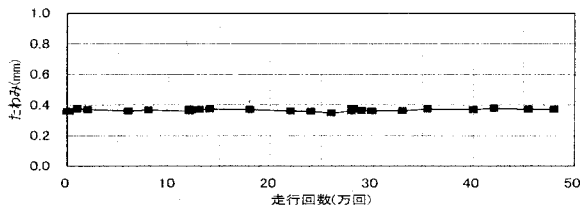


図-3.6 供試体中央点のたわみ(D-4)

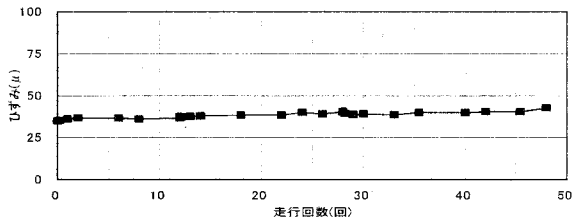


図-3.7 底鋼板ひずみ(L10)：橋軸方向

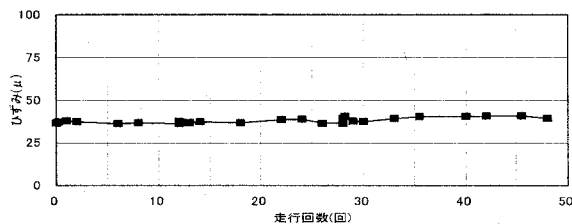


図-3.8 底鋼板ひずみ(L10)：橋軸直角方向



図-3.9 コンクリート内部のひび割れ状況
(輪荷重走行範囲直下の断面)

4. 三次元有限要素解析

前章で述べた輪荷重走行試験の供試体の状態を再現することを目的として、三次元有限要素解析（以下、FEM解析と略す）を行った。解析コードはDIANA ver8.1を用い、コンクリートのみ材料非線形を考慮した。

4.1 解析モデル

解析モデルは、既往の研究事例⁷⁾を参考に図-4.1および表-4.1に示すような三次元モデルとし、図-3.1に示す供試体の構造を人工欠陥も含めて忠実に再現した。ここで、突起付きT形鋼のフランジ上面および鉄筋とコンクリートは試験後の供試体において設計の前提条件である一体性を確認していることから、両者は完全結合とした。一方、その他の鋼とコンクリートの界面は、輪荷重の走行により完全に付着が切れた状態と底鋼板のみ付着が切れた状態（以下、底鋼板付着切れと略す）および完全結合状態の3ケースを想定し、付着切れについては界面に垂直方向の圧縮力のみを伝達させた。

材料定数については、鋼材はヤング係数 $E_s=2.0 \times 10^5$ N/mm²、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。コンクリートは表-3.3に示す材料試験の値を用いるとともに、コンクリート標準示方書に準じて材料非線形性を考慮した。

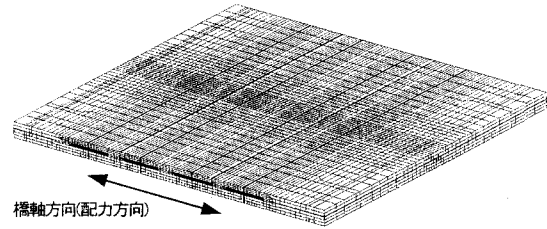


図-4.1 解析モデルの要素分割

表-4.1 使用する要素の種類

部 位	要素の種類	備 考
コンクリート	ソリッド要素	構成則：Drucker-Prager
突起付き T形鋼	ソリッド要素	荷重載荷位置近傍の4本のT形鋼。板厚方向に2層とする。突起はモデル化しない。
	シェル要素	上記以外のT形鋼
底鋼板	シェル要素	
鉄 筋	バー要素	埋め込み鉄筋モデル
鋼・コンクリートの界面	接触要素	突起付きT形鋼フランジ上面・鉄筋を除く
弾性支持横梁	ビーム要素	Euler-Bernoulli梁

4.2 荷重条件と支持条件

荷重条件は輪荷重の走行を模擬したものではなく、走行範囲の中央位置において載荷板1枚の範囲（橋軸方向120 mm×橋軸直角方向300 mm）に、150kN、180kNおよび210kNを等分布載荷することとした。

支持条件は輪荷重走行試験に合わせ、単純支持する長辺は鉛直変位のみを拘束し、弾性支持する短辺は横梁と等価な曲げ剛性のビーム要素を単純支持してモデル下面に配置した（鉛直下向き力のみビーム要素に伝達される）。

4.3 測定値と解析値との比較

活荷重たわみの橋軸方向および橋軸直角方向分布について、測定値と解析値を比較したものは図-4.2および図-4.3に示すとおりである。ここで、解析値は正しいものと仮定して載荷位置近傍に着目すると、150kNの初期載荷時の供試体は鋼とコンクリートの界面が完全結合の状態より底鋼板付着切れ状態に近いことになり、輪荷重走行後のたわみ値の増大は、付着切れの進展を示すことになる。一方、本供試体ではコンクリート打込み後の早い段階で輸送を行ったこと等の影響により、試験開始前において底鋼板とコンクリートは付着切れが生じていた。こうしたことから前述の仮定は正しく、供試体の状態は解析によって比較的精度良く再現されていると考えられる。また、210kNの輪荷重走行後においても測定値は底鋼板付着切れ状態の解析値とほぼ一致していることから、今回の試験に対して供試体の底鋼板以外の鋼とコンクリートの界面では付着が有効であると推察される。なお、測定値は供試体の橋軸方向端部（弾性支持辺）に近づくほど解析値より大きな値となる傾向が見られるが、一般にたわみ値が最大となる載荷位置近傍の状態を評価するうえでの影響は小さいと考えられる。

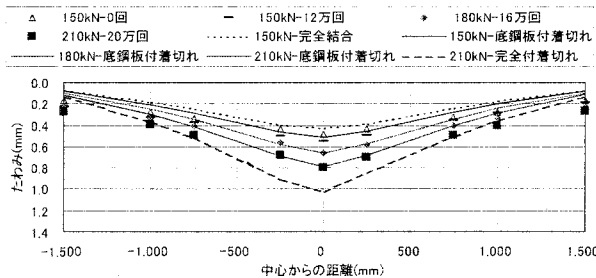


図-4.2 たわみの橋軸方向分布

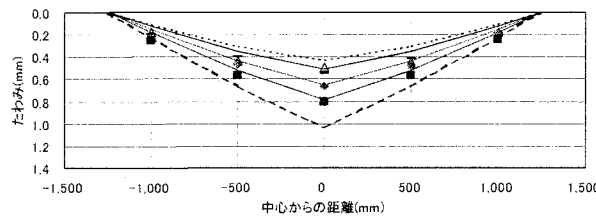


図-4.3 たわみの橋軸直角方向分布

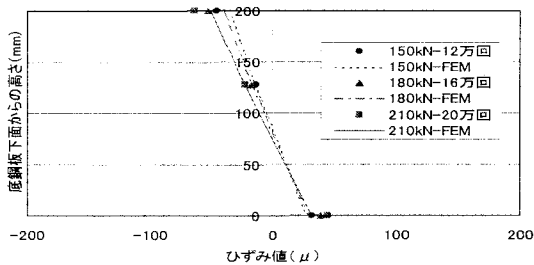


図-4.4 断面内ひずみ分布(橋軸直角方向:C1-1)
Con 上面-DFT 上面-底鋼板下面

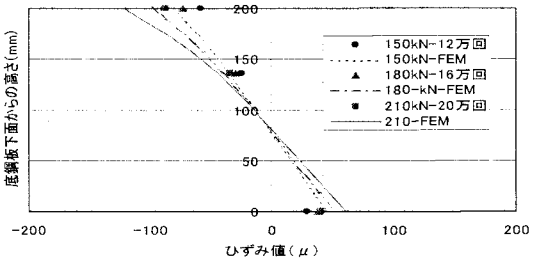


図-4.5 断面内ひずみ分布(橋軸方向:C4-2)
Con 上面-配力鉄筋-底鋼板下面

つぎに、供試体中央付近の床版断面内のひずみ分布について、測定値と解析値を比較したものは図-4.4および図-4.5に示すとおりである。測定値については設計の前提となる平面保持が成立しているとともに、底鋼板付着切れ状態の解析値は各荷重レベルにおいて測定値と概ね一致していることが分かる。

これらの結果から、長期供用後の合成床版の性状をFEM解析によって安全側に評価するには、本章で示した完全付着切れに対するモデル化の手法は概ね妥当であると推察される。一方、荷重方法については、輪荷重の移動の影響を適切に反映させることが課題であり、これについては現在検証中のため、機会をあらためて報告する。

5. 欠陥が疲労耐久性に及ぼす影響の検証

今回の輪荷重走行試験では、人工欠陥が床版の疲労耐

久性に与える影響は小さい可能性が示された。これを踏まえて長期の耐久性に与える影響の評価を目的として、欠陥の有無に対する荷重位置近傍の応力分布性状を解析により相対比較した。なお、本合成床版の破壊メカニズムは未解明であるものの、ここではコンクリートの局所的な引張応力によるひび割れが疲労耐久性に大きな影響を及ぼすものと考え、解析は前章で示した手法に従った。

5.1 解析モデル

欠陥のない突起付きT形鋼ジベル合成床版の輪荷重走行試験は、平成14年に独立行政法人土木研究所にて実施しており、たわみ等の急増やコンクリートの著しいひび割れは観測されなかった⁸⁾。これより本研究における欠陥のないモデルの対象は、鉄筋コンクリート床版や他の合成床版との相対比較も可能な上記の供試体とする。

解析モデルの構造諸元は、図-3.1および表-3.1に示すものに対して長さ寸法を4.5mに変更し、突起付きT形鋼は8本で供試体端部から500mmの位置を起点として500mm間隔で配置した。鋼とコンクリートの界面には前章で示した完全付着切れを考慮し、欠陥は写真-2.2に示すものを全てのフランジ全長に考慮した。

材料定数については、全て設計値を用いるものとし、鋼材はヤング係数 $E_s=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、コンクリートはヤング係数 $E_c=2.8 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、設計基準強度 $\sigma_{ck}=30 \text{ N/mm}^2$ 、引張強度 $\sigma_t=2.22 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.167$ としてコンクリート標準示方書に準じて非線形性を考慮した。

5.2 荷重条件と支持条件

本検討は荷重位置近傍の応力分布性状に着目した相対比較であることから、荷重位置の移動の影響は考慮せずに、供試体中央付近の荷重板1枚の範囲(橋軸方向200mm×橋軸直角方向500mm)に、衝撃係数や安全率を考慮した157kNを等分布荷重することとした。なお、荷重位置はT形鋼に対する相対位置の影響を確認するため、図-5.1に示す5ケース(Case1, 2, 2', 3, 3')とした。

支持条件は、試験条件に合わせて単純支持される長辺は鉛直方向の変位のみを拘束し、弾性支持される短辺に

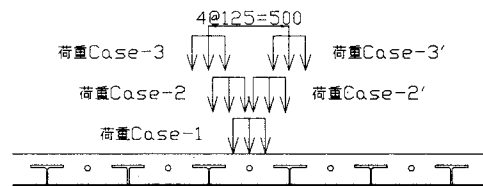


図-5.1 輪荷重位置

は横梁(H300×300)と等価な曲げ剛性を有する支間2.5mで両端ピン支持のビーム要素を配置した。

5.3 解析結果

全荷重ケースを通してコンクリートの局所的な最大主応力(引張)は、完全モデルと欠陥モデルのいずれにおいてもCase-1の場合に発生した。その変位状態と応力コ

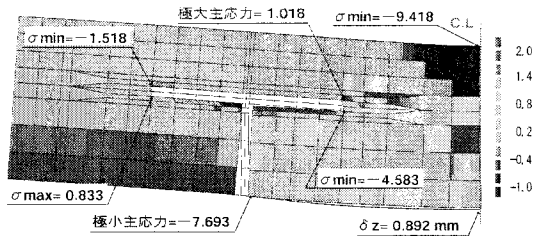


図-5.2 完全モデル・最大主応力コンター
(荷重 Case-1 : 単位 N/mm²)

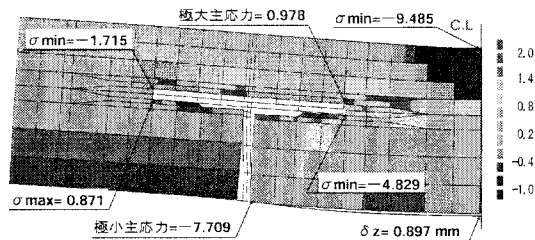


図-5.3 欠陥モデル・最大主応力コンター
(荷重 Case-1 : 単位 N/mm²)

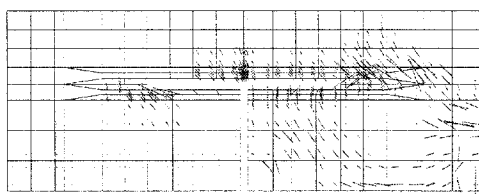


図-5.4 欠陥モデル・最大主応力ベクトル
(荷重 Case-1)

コンターは図-5.2 および図-5.3 に示すとおりである。図中には最大主応力値のほか、突起付き T 形鋼のフランジ周辺における局所的な主応力値を併記した。本図より、変位および最大主応力分布の状態は欠陥の有無によらずほぼ同等であると言える。また、コンクリートの圧縮領域における局所的な応力についても欠陥の有無によらず T 形鋼フランジの縁端部に存在しており、その値は圧縮応力が支配的となっており、両者はほぼ同等である。

主応力の方向についてもモデルによる差異はほとんど生じておらず、T 形鋼フランジの縁端部の局所的な引張応力については図-5.4 に示すように水平面から 45 度に近い方向となっている。また、これは平成 14 年の輪荷重走行試験においてわずかに観測されたコンクリートの内部ひび割れ(鉛直に近い方向)の一要因とも考えられる。

これらの結果より、本研究でモデル化した人工欠陥のある供試体は、欠陥のない既往の輪荷重走行試験の供試体との相対比較において、同程度の疲労耐久性を有するものと推察され、この種のコンクリート品質のバラツキが床版の疲労耐久性へ与える影響は有意なものではないと考えられる。

6. まとめ

コンクリートの施工品質が合成床版の疲労耐久性に与える影響を評価することを目的として実施した輪荷重走

行試験と構造解析の結果を中心として報告した。本研究を通して得られた知見は次のとおりである。

- ① 突起付き T 形鋼ジベル合成床版のコンクリート内部にある鋼材下面に通常想定される大きさの気泡が滞留した場合においても、今回の輪荷重走行試験の範囲では疲労耐久性に与える影響は小さいと考えられる。
- ② 突起付き T 形鋼ジベル合成床版のコンクリート内部にある鋼材下面に通常想定される大きさの気泡が滞留した場合においても、コンクリートの応力分布性状や局所的な引張応力値の変化は極めて小さく、疲労耐久性に与える影響は有意なものではないと考えられる。

今回実施した輪荷重走行試験をもとに疲労耐久性の全てを解明することはできないが、構造モデルの妥当性を検証のうえ解析的に内部応力を評価することにより耐久性への影響を推定することは可能であると考えられる。合成床版の適用事例が増加する中、高耐久性床版の新しい床版形式として長期の供用を期待できる性能を保證することが重要であると考えている。

謝辞

本研究の遂行にあたり独立行政法人・北海道開発土木研究所の主任研究員 三田村 浩氏には輪荷重走行試験において技術指導を頂いた。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 土木学会編：鋼構造物設計指針，PART B 合成構造物，平成 9 年 9 月。
- 2) 日本橋梁建設協会編：鋼・コンクリート合成床版の設計・施工マニュアル，平成 15 年 2 月。
- 3) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 I 鋼橋編，平成 14 年 3 月。
- 4) 松井 繁之：合理化橋梁の切り札 高耐久性床板，土木学会誌 84 巻 4 号 pp9-11，1999 年 4 月。
- 5) 土木学会編：2002 年制定 コンクリート標準示方書【構造性能照査編】，2002 年 3 月。
- 6) 斎藤憲彦，鶴巻正行，川岡靖司，原田康弘，吉永文英：鋼コンクリート合成床版の品質管理に関する確認実験，橋梁と基礎 Vol. 39 No. 10，pp. 33-39，建設図書，平成 17 年 10 月。
- 7) 街道浩，渡辺滉，橋吉宏，松井繁之，堀川都志雄：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よる疲労耐久性評価，構造工学論文集，VOL. 50A，pp. 1119-pp. 1130，2004 年 3 月。
- 8) 田中祐人，末田明，上村明弘：突起付き T 形鋼ジベル合成床版の構造特性と疲労耐久性，鋼構造年次論文報告集，第 10 巻，pp. 157-164，2002 年 11 月。
(平成 18 年 3 月 31 日投稿)