

合成床版の輪荷重走行試験の疲労損傷解析による再現

Fatigue damage simulation analyses on steel-concrete composite deck subjected to wheel running test loading

松村 寿男*, 上村 明弘**, 藤山 知加子***, 前川 宏一****
Toshio Matsumura, Akihiro Uemura, Chikako Fujiyama, Koichi Maekawa

*博（工），（社）日本橋梁建設協会，床版技術部会（〒105-0003 東京都港区西新橋 1-6-11）

**（社）日本橋梁建設協会，床版技術部会（〒105-0003 東京都港区西新橋 1-6-11）

*** 博（工），法政大学講師，デザイン工学部都市環境デザイン工学科（〒162-0843 新宿区市谷田町 2-33）

**** 工博，東京大学大学院教授，工学系研究科社会基盤学専攻（〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1）

Fatigue analyses on steel-concrete composite deck are carried out to investigate the damage behavior using non-linear finite element analysis method (COM3D). In particular, Robinson type composite deck with stud and rib-plates is examined under high cycle load. The interface between bottom steel and concrete as is modeled by coupling of two constitutive laws. One is the relationship between normal stress and joint opening; another is the relationship between shear stress to interface slip including resistance due to existence of studs. In order to represent the fatigue damage process and mechanism on steel-concrete composite, five fatigue analyses focusing on bond between steel plates and concrete are organized. The results indicate that an initial bond normal to interface plane is one of the most sensitive parameter to simulate damage process of steel-concrete composite deck.

Key Words: steel-concrete composite deck, non-linear finite element, initial bond

キーワード：鋼・コンクリート合成床版，非線形有限要素疲労解析(COM3D)，初期付着

1. はじめに

既往の研究において，鋼・コンクリート合成床版（以下，合成床版という）の静的な数値解析を実施された事例^{1) 2)}はあるが，コンクリートのひびわれ前後の挙動を連続的に再現し，合成床版の疲労損傷過程を追跡する試みは筆者らの知る限り少ない．一方，弾塑性・破壊構成モデルと分散ひび割れに基づく非線形有限要素解析(東京大学開発の COM3D^{3) 4)})において，RC 床版の輪荷重走行試験を対象とした数値解析で実験を精度良く再現できる⁵⁾ことが知られている．

本研究は，上記の解析手法を用いて，スタッド，リブ併用の合成床版(ロビンソン型)の疲労耐久性の評価を試みるものである．はじめに，鋼・コンクリート境界面の付着挙動をパラメータとする感度解析を実施し，本研究で対象とする合成床版の初期付着力を推定する．次に，1 千万回を超える移動荷重に対するたわみの進行を解析で予測し，本形式床版の疲労耐久性を評価する．また，実験では確認することができない載荷途中のコンクリ

ートひずみ分布を分析することによって，合成床版の疲労損傷過程と破壊機構についても考察を行う．

2. 疲労損傷を数量化した構成モデル

コンクリートおよび鉄筋コンクリート要素は，ひび割れを内在する有限体積に適用される構成モデルを使用した^{3) 4)}．構成モデルは，複数の微細なひび割れの挙動を有限体積上で平均化することにより，有限要素の平均ひずみー平均応力関係を規定する(分散ひび割れモデル)．ひび割れ以後の開口方向の直応力及び，ひび割れ面に沿ったせん断応力伝達機構，鉄筋とコンクリート間の付着とひび割れ位置での局所的な鉄筋の塑性化も，有限要素の平均ひずみー平均応力関係の中で規定される．これをひずみ経路に沿って経路積分することにより，応力とあわせて塑性・損傷状態を直接算出することが可能である．床版のように，構造内に分散して配置された鉄筋で多数のひび割れが分散する場合には，全体挙動を再現するのに合理的な手法と言える．

	圧縮モデル	引張りモデル	ひびわれ面せん断伝達モデル
基本構成則	応力-ひずみ曲線 $\sigma = E_0 K_0 \varepsilon_e \quad \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$	応力-ひずみ曲線 $\sigma = E_0 K_0 \varepsilon_e \quad \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p$	せん断応力-せん断変形/せん断ひずみ関係 $\tau = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} R'_c(\omega, \delta, \theta) \sin \theta d\theta$
高サイクル疲労拡張モデル	破壊パラメータ K_C に高サイクル疲労を表現する関数 λ を導入 $dK_C = \left(\frac{\partial K_C}{\partial t} \right) dt + \left(\frac{\partial K_C}{\partial \varepsilon_e} \right) d\varepsilon_e$ El-Kashif and Maekawa 2004	破壊パラメータ K_T に、繰返し荷重による損傷を表す項が含まれる $dK_T = Fdt + Gd\varepsilon_e + Hd\varepsilon_e$ Maekawa et al. 2003, Hisasue 2005	オリジナルのモデルに、繰返し荷重による応力低下を示す係数 X を導入 $\tau = X \tau_0(\delta, \omega)$ $X = 1 - \frac{1}{10} \log_{10} \left\{ 1 + \int d(\delta/\omega) \right\} \geq 0.1$ Li & Maekawa 1989 Gebreyouhannes 2006
物理的意味	コンクリート内部に発生する微細なクラックによる連続的な組織破壊に伴う 圧縮剛性の低下	コンクリートのひびわれ以後、鉄筋とコンクリートの付着疲労で生じる 引張剛性の低下	繰返し荷重によりコンクリートひび割れ表面が平滑化し、ひびわれに沿った方向の せん断伝達力が低下

図-1 COM3D におけるコンクリート要素の基本構成則(1次元)⁶⁾

平均ひずみ-平均応力関係は、図-1 に示す 1 次元の圧縮、引張、ひび割れ面せん断伝達のモデルから構成される。3 次元の非線形構造解析における多方向複数のひび割れは、多方向非直交固定ひび割れモデルを組み込むことで再現した。これより、荷重の履歴に応じたひび割れ発生前後の挙動を 3 次元で再現することができる³⁾。

コンクリートの高サイクル疲労損傷は、図-1 の 1 次元の基本構成モデルのレベルで考慮されている。繰返し荷重を受けるコンクリートでは、塑性変形が進行するだけでなく、コンクリート内部に発生する微細なひび割れの進展により、除荷および再載荷時の弾性剛性の低下(損傷)が徐々に進行する。この挙動は圧縮と引張の基本構成モデルにおいて、破壊パラメータ(図-1)として組み込まれている。鉄筋とコンクリートの付着疲労に起因する剛性低下は、引張側の損傷として解析に反映される。一方、コンクリートのひび割れ面に沿った方向のせん断伝達モデルでは、繰返し回数に応じてせん断力伝達機能を低下させる微小損傷項が導入されている⁶⁾。通常、骨材を含む普通のコンクリートでは、ひび割れ面には凹凸が生じる。この凹凸が、繰返し荷重による擦り磨き効果で平滑化し、かみ合わせ作用が低下する現象をモデル化したものである。

3. 解析概要

3.1 実験供試体

本研究の対象床版の試験体寸法を、図-2 に示す。幅 2800mm、長さ 4500mm、床版支間 2500mm、版厚は 209mm(うち 9mm が底鋼板厚)で、横リブおよびスタッドの寸法は 100mmx16mm、φ16mmx120mm である。移動

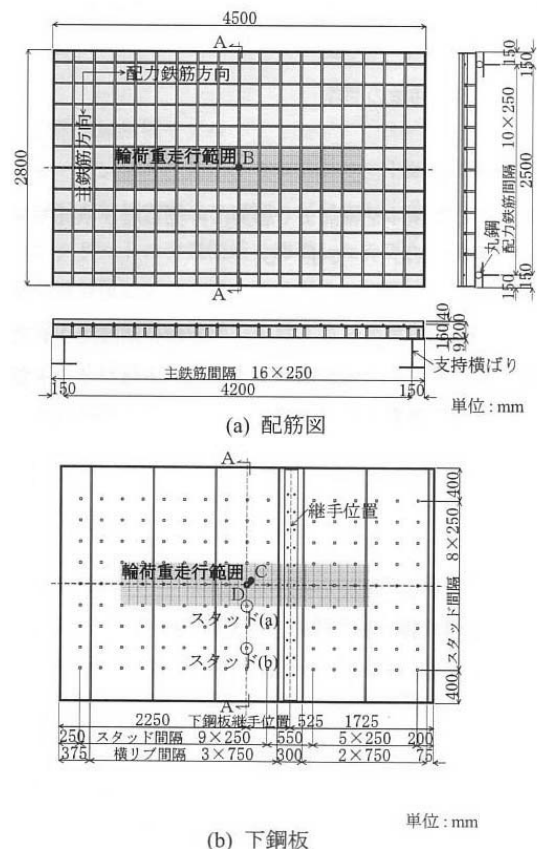


図-2 解析対象床版²⁾

荷重は幅 500mm、長さ 200mm の一様な載荷面を順次移動することで模擬した。走行範囲 3.0m で往復進行し、実験の載荷条件の通り 4 万回走行ごとに 19.6kN (2tf) ずつ、157kN (16tf) から 392kN (40tf) まで段階的に増加させた。

表－1 材料諸元

	N/mm ²	弾性係数N/mm ²	ポアソン比
コンクリート	圧縮強度 $f_c = 37.6$	2.94×10^4	0.20 (0.199)
	引張強度 $f_t = 2.58$		
鉄筋 (D16)	降伏点 $f_y = 352.6$	2.0×10^5	0.30
底鋼板	降伏点 $f_y = 281.6$	2.0×10^5	0.30
リブ	降伏点 $f_y = 281.6$	2.0×10^5	0.30

表－2 解析ケース

解析ケース	ア) 初期付着の有無	イ) 初期付着強度 (N/mm ²)		ウ) 繰り返し回数(回)
		開口方向	せん断方向	
CASE-1	無し	0	0	520,000
CASE-2	有り	5.0	25.0	520,000
CASE-3	有り	5.0	10.0	520,000
CASE-4	有り	1.0	10.0	520,000
CASE-5	有り	5.0	25.0	100,000,000

材料諸元は文献 2) に準じ、正曲げ試験および輪荷重走行試験における材料試験の結果⁷⁾に基づき、表－1 の通り設定した。

3.2 解析ケース

対象とした床版の試験体の版中央のたわみ履歴を精度よく再現し、試験体の内部性状を解析的に考察することを試みる。このため、解析結果に影響を及ぼすと思われる以下の 1), 2) の項目に着目し解析ケース(表－2)を選定した。

1) 鋼－コンクリート間の付着の影響

ア) 初期付着の有無

イ) 初期付着が有る場合の強度

付着強度の設定理由については 3.4 節にて詳述する。

2) 輪荷重の繰り返し回数の影響

ウ) 実験を超えた輪荷重の繰り返し回数

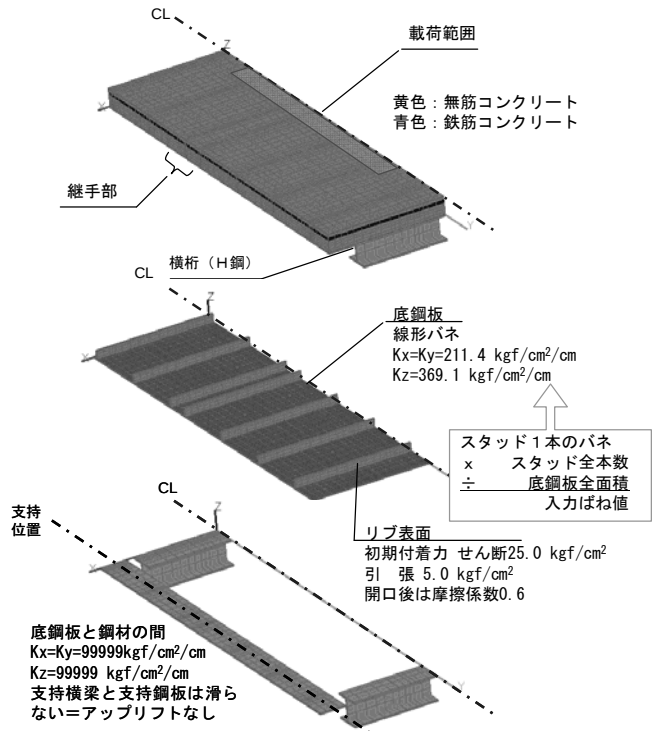
なお、実験と解析結果の比較は、横軸に輪荷重の繰り返し回数(回)、縦軸に版中央のたわみ(mm)の履歴を用いて行うこととして考察を行う。また、繰り返し履歴におけるひずみの分布性状を図示し考察を試みる。

3.3 有限要素解析モデル

輪荷重走行試験を再現する非線形有限要素解析には、東京大学開発の解析コード COM3D^{3,4)}を使用した。有限要素は全て 8 節点固体要素を採用した。

試験体寸法に基づいた三次元要素モデルを図－3 に示す。対称性を考慮し、中心線より片側の半分のみをモデル化し、節点数 12,700、要素数 10,408 (うち, solid 8,246, interface element 2,162) を有する解析規模とした。

底鋼板に溶接された補強リブは本来の形状のまま再現したが、スタッドは、スタッド剛性によるバネを底



図－3 三次元有限要素モデル

鋼板とコンクリートとの境界面に設定し、スタッドそのものはモデル化しなかった。実験時の条件に合わせ、底鋼板下に幅 300mm の支持鋼板を考慮し、そのセンターラインを鉛直支持とすることで、丸鋼による支持を再現した。中間横桁 H-300x300x15x10 も、解析モデルに取り入れた。2 方向に配置されている D16 鉄筋は、両方向の鉄筋を含む 40mm 厚の RC 要素層として解析に取り入れた。それ以外は無筋コンクリート領域と規定し、それぞれに引張軟化特性を設定^{3,4)}した。

3.4 鋼－コンクリート間の構成モデル

合成床版底鋼板の補強リブとコンクリートとの間のような鋼・コンクリートの界面は、載荷以前には固着しており、載荷が進むに従い剥離が生じて摩擦機構に移行する、すなわち、初期付着力が存在すると考えられる⁸⁾。初期付着力の大きさは、コンクリートの養生条件や鋼材の表面処理状況により異なるが、本研究が対象とした試験体について境界面特性を明らかにするための計測は行われていない。

試験体のコンクリートは膨張剤を使用していなかったため、乾燥収縮により初期付着力が低下している可能性も考えられることから、リブおよび底鋼板の初期付着を考慮しない摩擦則のみのケース(図－4(a) : CASE-1)と、リブの初期付着を伴った摩擦則のケース(図－4(b) : CASE-2～CASE-4)の検討を行うものとした。初期付着強度は文献⁸⁾に準じて、CASE-2 の開口方向 5.0 N/mm² (1mm あたり : 以下同様に表現)、せん断方向 25.0 N/mm²

を基本とし、各方向と初期付着の無いケースとの中間的な値である CASE-3(せん断方向を 10.0 N/mm^2 に低減)および CASE-4(CASE-3 に加え開口方向を 1.0 N/mm^2 に低減)を追加した。また、摩擦係数は一様に $\mu=0.6$ を仮定した⁹⁾。高サイクル疲労による摩擦係数の変化は考慮していない。

スタッドを有する底鋼板とコンクリートの境界面では、スタッドの剛性バネのみを接合要素として定義した。スタッド全本数を底鋼板面積で除したバネ値を底鋼板全体に一樣に与えた。簡単のためスタッドは破損しないものと仮定し、バネは線形とした。バネの値は文献 10) に準じている。

4. 鋼-コンクリート境界面の剛性をパラメータとする感度解析

はじめに、実験で得られた版中央のたわみ-載荷回数を精度よく再現するための解析上のパラメータを特定するため、3.4 節で記述したア)「初期付着の有無」、イ)「初期付着が有る場合の強度」に関する解析を実施した。次に、ウ)「実験を超えた輪荷重の繰り返し回数」についても解析的に考察を加えることとした。

4.1 初期付着の影響

(1) 初期付着の有無

鋼-コンクリート間の初期付着の影響について、CASE-1(初期付着無し)と CASE-2(初期付着有りの基本ケース)の版中央たわみ履歴の比較により考察する。

載荷回数と支間中央の版のたわみ履歴を、実験結果²⁾とともに図-5 に示す。図中、実験結果は載荷たわみの最大値(○青印実線)および除荷たわみの最小値(□赤印実線)を示している。実験では、一定回数の載荷を終えるごとに輪荷重走行を停止、除荷した後、版中央での静的載荷を行って、最大および最小たわみを記録している。解析では、輪荷重が往復進行している間の動的なたわみの履歴も併せて示している。動的なたわみは実験データと比較することはできないが、解析で示されるたわみ(青実線)が実験の上下限内に収まっていれば、解析精度は概ね高いと考えられる。

図-5(a)CASE-1 初期付着無し(摩擦のみを考慮)のたわみ履歴より、載荷 2 回目の残留たわみ(約 0.7 mm)が、その後の繰り返し回数で生じるたわみに累加される性状を示し、実験値よりも過大に算出されている。これは載荷 1 回目から鋼とコンクリートとの間のすべりが過大に生じ、変形が進んでいることが原因と推察できる。

一方、図-5 (b)CASE-2 初期付着有りのたわみ履歴では、1 回目の載荷から 20 万回程度まで実験値と精度よく一致していることが分かる。20 万回を超えた載荷回数では実験よりも解析のたわみ値が小さく、その差は回数の増加とともに顕著となり、載荷 52 万回では実験値(4.5 mm)に比べ解析値(2.6 mm)と約 2 mm 差が生じている。

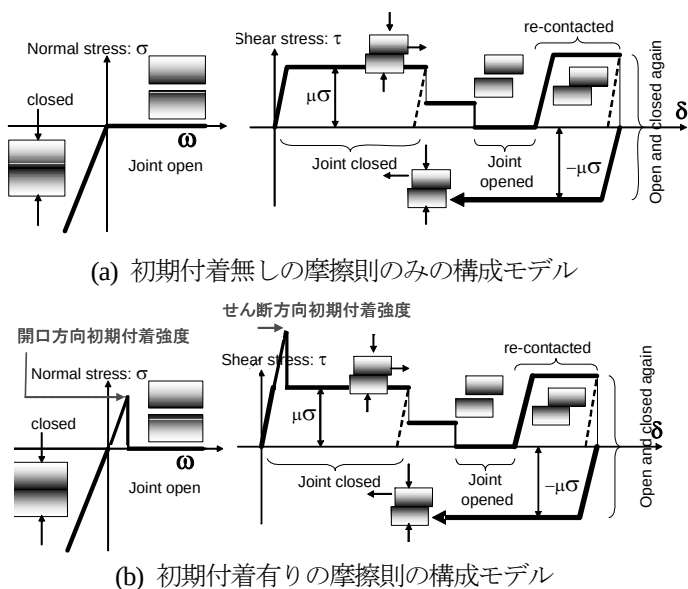
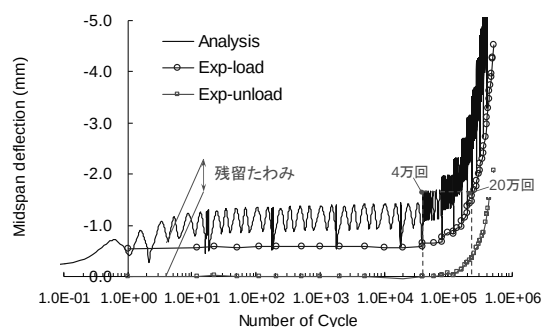
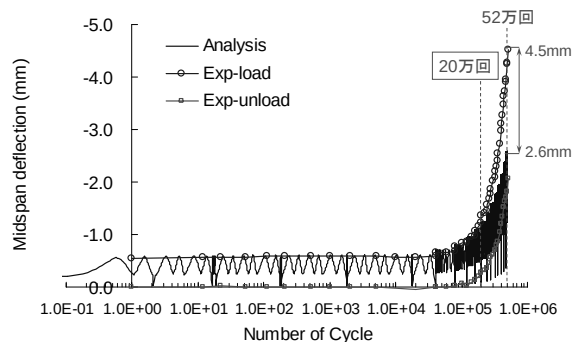


図-4 接合要素モデル



(a) CASE-1(初期付着無し)



(b) CASE-2(初期付着有り)

図-5 版中央のたわみ履歴

ただし、図-5 から(a)初期付着無し(CASE-1)に比べ(b)初期付着有り(CASE-2)の方が、実験値のたわみ性状の再現精度を大幅に改善していることが分かる。

このことから、「鋼-コンクリート間の初期付着」の設定は、対象とした合成床版の輪荷重走行試験のたわみ挙動を再現するのに必要であると思われる。

しかしながら、載荷 20 万回以降、繰り返し回数の増加にしたがい徐々にその差が増加している要因として、解析モデルの疲労損傷に関する仮定が適切でなかったことは容易に想像できる。要因として、1) 初期付着強

度が過大、2) 摩擦係数が大きい、3) 高サイクル荷重による摩擦係数の低下が考慮されなかった、などが挙げられる。これらの中から解析的に影響のある要因と思われる、1)初期付着強度について、次項(2)で考察を深める。

なお、試験後に行われた試験体切断面の観察においてスタッドの破損はなかったと報告されている⁷⁾ことから、本解析でスタッドを含む底鋼板とコンクリートとの境界に線形バネを設定した影響は少ないと判断している。

(2) 初期付着の強度

鋼-コンクリート間の初期付着の強度の影響について、解析結果 CASE-2 から CASE-4(開口方向 1.0, 5.0N/mm², せん断方向 10.0, 25.0N/mm²)の载荷回数と支間中央の版のたわみ履歴について、(1)項と同様に図-6 に示す。

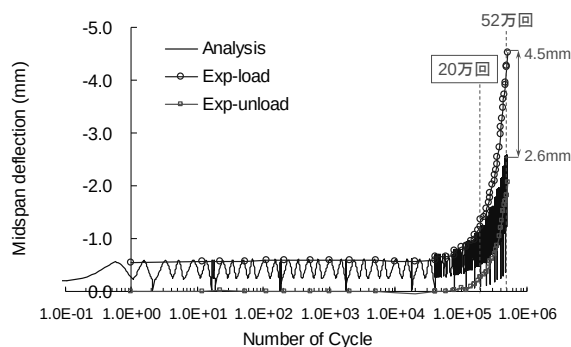
図-6(a)CASE-2(開口方向 5.0N/mm², せん断方向 25.0 N/mm²)および(b)CASE-3(開口方向 5.0N/mm², せん断方向 10.0 N/mm²)のたわみ履歴を考察する。载荷 52 万回において CASE-2(2.6mm)に比べ、CASE-3(3.1mm)のたわみの方が実験値(4.5mm)を再現するのに若干の改善は見られるが、最小たわみ(除荷時)をも踏まえた履歴の再現には至っていないことが分かる。

一方、同じ繰り返し回数における図中(c)CASE-4(開口方向 1.0N/mm², せん断方向 10.0 N/mm²)のたわみ履歴は、载荷 52 万回で最大たわみ(载荷時)は実験値(4.5mm)を上回ったが、概ね 20 万回から 40 万回の範囲で最小たわみ(除荷時)を含め精度よく再現できていることが分かる。解析結果の CASE-3 に比べ CASE-4 の方が実験値を再現するたわみ精度の改善が見られることから、初期付着強度について、CASE-3 でせん断方向を 15.0 N/mm² 低減するよりも、CASE-4 で開口方向を 4.0N/mm² 低減した方が改善効果の高いことが分かる。すなわち、「開口方向の初期付着強度」は、繰り返しの輪荷重载荷を受ける合成床版の疲労損傷を精度よく再現するにあたり、感度の高いパラメータであるといえる。

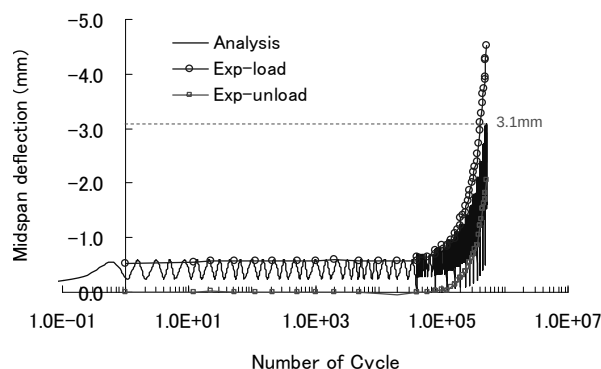
4.2 繰り返し回数の影響

本節では、実験ではたわみが大きくなりすぎて再現できない繰り返し回数の影響について、解析的に考察を試みる。CASE-2(開口方向 5.0N/mm², せん断方向 25.0 N/mm²)の繰り返し回数を 52 万回から 1 億回に増加させた解析 CASE-5 のたわみ履歴を図-7 に示す。なお、52 万回以降は、荷重 392kN(40tf)一定で载荷し続けた。

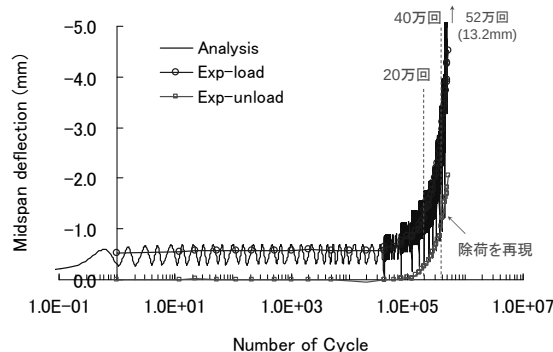
その結果、载荷回数が 1.5×10^7 (15,841,535)回で、実験の最大たわみ(4.5mm)を上回るたわみ値が算出された(図-7)。この結果、環境条件が良好で、初期付着が十分發揮できるような仮定が成り立つのであれば、本合成床版は高い疲労耐久性を有すると推測される。しかしながら、実橋梁では、たわみの急激な増加はなくとも舗装や舗装下コンクリートの局所的な損傷は起こると考えられる。走行安全性に関しては別途検討が必要であろう。



(a) CASE-2(開口方向 5.0N/mm², せん断方向 25.0 N/mm²)



(b) CASE-3(開口方向 5.0N/mm², せん断方向 10.0 N/mm²)



(c) CASE-4(開口方向 1.0N/mm², せん断方向 10.0 N/mm²)

図-6 版中央のたわみ履歴(初期付着有り)

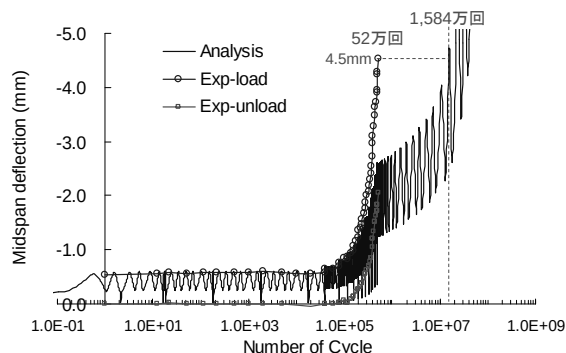


図-7 実験を超えた輪荷重の繰り返し回数におけるたわみ履歴

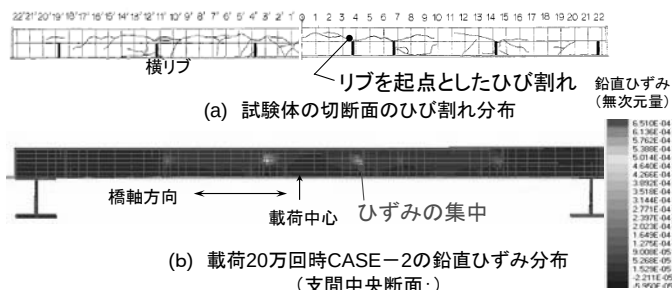


図-8 床版切断面の内部性状の比較

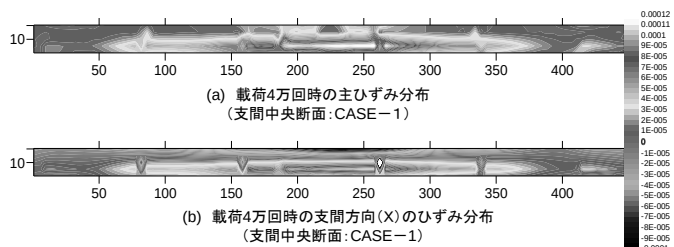


図-9 床版切断面におけるひずみ分布(解析結果)

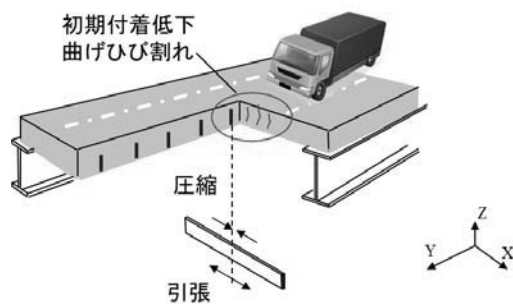


図-10 合成床版の破壊性状の模式図

5. 内部性状に関する考察

本節では、実験後の試験体で生じているひび割れ分布と解析結果の内部性状(ひずみ分布)を考察する。図-8に試験体の支間中央切断面のひび割れ性状および載荷20万回時のCASE-2(初期付着有り)の解析結果の鉛直ひずみ分布を示す。解析ではリブ付近でひずみの集中がみられるが、実験のひび割れと整合するような連続した引張ひずみの分布は得られなかった。すなわち、既往の研究⁸⁾から推定された付着強度を用いたCASE-2では本研究で対象とする床版の内部性状を再現できていない。

一方、CASE-2の20万回時と同程度のたわみを生じているCASE-1(初期付着無し)の4万回走行時のひずみ分布(図-9)をみると、リブ上端付近で版厚方向にひずみが2層化した分布を呈している。また、図-9(a)主ひずみ分布と(b)支間方向のひずみ分布とがほぼ一致していることから、主要なひずみは支間方向の曲げ(図-10)によるものと推察できる。CASE-1(初期付着無し)では2回目載荷後の除荷の時点で実験値を大きく上回る残留たわみが算出されていることから、初期付着がない場合は合成床版の鋼とコンクリートとの一体性が早期に失われていると推察された。

6. 結論

スタッドとリブを有する合成床版の疲労解析を実施し、得られた知見を以下に示す。

- 1) 「鋼-コンクリート間の初期付着」の設定は、対象とした合成床版の輪荷重走行試験のたわみ挙動を再現するのに必要であると思われる。
- 2) 「開口方向の初期付着強度」は、繰り返しの輪荷重載荷を受ける合成床版の疲労損傷を精度よく再現するにあたり、感度の高いパラメータであるといえる。
- 3) 合成床版の損傷において、リブ上付近で版厚方向に2層化したひずみ分布であること、支間方向の曲げが卓越した破壊形態であることが解析的に推察できる。

参考文献

- 1) 櫻井信彰, 藤川敬人, 水上繁樹, 松井繁之, 長井正嗣: 形鋼橋梁の構造合理化に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 2005, No. 794/I-72, pp.67-86, 2005.
- 2) 街道浩, 渡辺滉, 橘吉宏, 松井繁之, 堀川都志雄: 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.1119-1130, 2004.
- 3) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003.
- 4) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, London, 2008.
- 5) Maekawa, K., Gebreyouhannes, E., Mishima, T. and An, X.: Three-dimensional fatigue simulation of RC slabs under traveling wheel-type loads, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.4, No.3, pp.445-457, 2006.
- 6) 藤山知加子, 商峰, 櫻井信彰, 前川宏一: 直接経路積分法に基づく合成床版の疲労寿命推定と損傷モード, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 1, pp.106-116, 2010.
- 7) 建設省土木研究所他: 道路橋床版の輪荷重走行試験機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5), 共同研究報告書, 第221, 233, 250, 262, 277号, 1999-2001.
- 8) 藤山知加子, 櫻井信彰, 中山逸人, 前川宏一: 鋼・コンクリート境界面特性が合成床版疲労破壊機構に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 第32巻, 第2号, pp.1-6, 2010.
- 9) Rabbat, B. G. and Russell, H. G.: Friction coefficient of steel on concrete or grout, Journal of Structural Engineering, Vol.111, No.3, pp.505-515, 1985.
- 10) 倉田幸宏, 鈴木統, 橘吉宏, 小林潔, 上村明弘: 合成床版の解析のモデル化に関する検討, 第5回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.199-204, 2006.