

COM3D を用いた鋼・コンクリート合成床版の疲労損傷解析

(社)日本橋梁建設協会 正会員 ○松村 寿男, 正会員 上村 明弘
 東京大学 正会員 藤山知加子, フェロー 前川 宏一

1. 研究の背景と目的

既往の研究において鋼・コンクリート合成床版の静的な数値解析実施された事例はあるが^{1),2)}, 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 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報告がなされている⁵⁾。

本研究では, コンクリート構造の高サイクル疲労損傷を再現する履歴経路積分型の疲労非線形有限要素解析 (COM3D・東京大学開発) を利用し, スタッド, リブ併用の合成床版 (ロビンソン型) の評価を試みる。輪荷重走行試験の実験データとの比較に加え, スタッドを含む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を実施し, 同タイプの合成床版の疲労損傷過程と破壊機構について考察を行う。なお, 鋼材疲労は本研究の検討対象外とし, コンクリート部の損傷で部材寿命が決定される機構に関して検討を行う。

2. 疲労損傷を再現する構成モデル

床版コンクリートには, ひび割れを内在する有限体積に適用される鉄筋コンクリート (RC) 要素の構成モデルを使用した^{3), 4)}。すなわち, 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 - 平均応力関係を規定する分散ひび割れモデルを用いている。ひび割れ以後における, ひび割れ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, さらに鉄筋とコンクリート間の付着とひび割れ位置での鉄筋の塑性局所化は, 有限要素内の平均ひずみ - 平均応力関係で規定される。

床版のように, 構造内に分散して配置された鉄筋により, 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。図 - 1 に 1 次元の圧縮, 引張, ひび割れ面せん断伝達のモデルを示す。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。これにより, 荷重の履歴に応じたひび割れの発生と発生後の挙動を 3 次元で再現することができる³⁾。

3. 解析モデル

三次元要素モデルを図 - 2 に示す。対象性を考慮し, 中心線より片側の半分をモデル化した。底鋼板に溶接されたリブは本来の形状で再現したが, スタッドはスタッド剛性によるバネを底鋼板とコンクリートとの境界面に設定しモデル化した。実験における底鋼板下の幅 300mm の支持鋼板を考慮し, そのセンターラインを鉛直支持することで, 丸鋼による支持を再現した。

	Compression model	Tension model	Crack shear model
Core Constitutive law	Stress-strain $\sigma = E_c \epsilon_c$ $\epsilon_c = \epsilon_e + \epsilon_p$	Stress-strain $\sigma = E_c \epsilon_c$ $\epsilon_c = \epsilon_e + \epsilon_p$	Shear stress-shear strain $\tau = \tau_0 + \tau_1 \sin \alpha \theta$
Enhanced model for High cycle fatigue	Fracture parameter K_c considers time dependent plasticity & fracturing and cyclic fatigue damage $dK_c = \left(\frac{\partial K_c}{\partial \epsilon_p} \right) d\epsilon_p + \left(\frac{\partial K_c}{\partial \epsilon_c} \right) d\epsilon_c$ time dependent cyclic fatigue $\left(\frac{\partial K_c}{\partial \epsilon_c} \right) = \lambda \cdot \text{when } \dot{\epsilon}_c = 0$ $\left(\frac{\partial K_c}{\partial \epsilon_p} \right) = - \left(\frac{\partial F_1}{\partial \epsilon_p} \right) \left(\frac{\partial F_1}{\partial K} \right) + \lambda \cdot \text{when } \dot{\epsilon}_p = 0$ $\lambda = K^{-1} (1 - K^{-1}) \epsilon_c \cdot R$ El-Kachl and Maekawa 2004	Fracture parameter K_t considers time dependent fracturing and cyclic fatigue damage $dK_t = F_1 dt + G d\epsilon_c + H d\epsilon_p$ Time dependent fracturing Cyclic fatigue damage Maekawa et al. 2003, Haseue 2005	Accumulated path function X reduce shear associated with cyclic fatigue damage $\tau = X \tau_0(\delta, \omega)$ function original model $X = 1 - \frac{1}{10} \log_{10} \left\{ 1 + \int k(\delta/\omega) \right\} \geq 0.1$ Contact density model by Li & Maekawa 1999 Modification of accumulated path function by Gebreyohannes 2005
Physical meaning	Decrease of stiffness and plasticity accumulation by continuous fracturing of concrete	Decrease of tension stiffness by bond fatigue	Decrease of shear transfer normal to crack by continuous deterioration of rough crack surface

図-1 コンクリート構成モデル

節点数 12,700
 要素数 10,408 (うち, solid 8,246, interface elem 2,162)

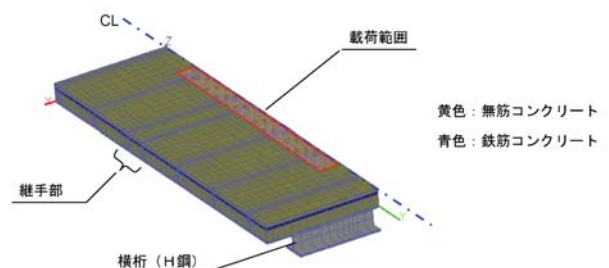


図-2 解析モデル全体図

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), 分散ひび割れモデル, 初期付着

連絡先 〒454-8517 名古屋市中川区清川町 2-1 瀧上工業 (株) 技術開発グループ TEL 052-351-2269

コンクリートの圧縮強度 $f_c=37.6\text{N/mm}^2$ ，鉄筋（D16）降伏点 $f_y=352.6\text{N/mm}^2$ ，底鋼板，リブ $f_y=281.6\text{N/mm}^2$ の材料諸元を用いた．鋼・コンクリートの接合部は図

- 3 に示す(a)初期付着を考慮しないモデル，(b)初期付着を考慮したモデルを用いた．

4. 解析結果

輪荷重走行試験を模擬した対数加速係数⁴⁾による直接経路積分型疲労解析を実施した．移動荷重は走行範囲 3.0m で往復進行し，実験通り 4 万回走行ごとに 19.6kN (2tf) ずつ，157kN から 392kN まで段階的に増加させた．载荷回数と支間中央のたわみの経過（動的）を実験結果²⁾とともに図 - 4 に示す．

静的解析においては，ケース(a)とケース(b)の相違は顕著ではなかったが，移動荷重を载荷下場合には摩擦のみを考慮したケース(a)では，たわみが過大に算出された．

初期付着がない場合，荷重が版端部にあっても鋼とコンクリートとの間のすべりで変形が進むため，荷重が版中央に到達したときには，静的载荷で版中央のみに载荷した場合よりもたわみが過大となったと考えられる．図 - 5 にケース(a)の 20 万回目走行時の変形図（変位 200 倍）を示す．初期付着を考慮したケース(b)では，20 万回程度まで実験値と良好な一致がみられるが，以降は実験よりも解析のたわみが小さく，その差は回数の増加とともに顕著となった．ケース(b)のたわみは実験値と乖離し始める 20 万回以降であること，また底鋼板のたわみ（支間方向）が実験値と乖離し始めるのが 24 万回程度であることから，今後は 20 万回～24 万回周辺のデータ分析を試みたい．

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：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.1119-1130，2004.
- 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.

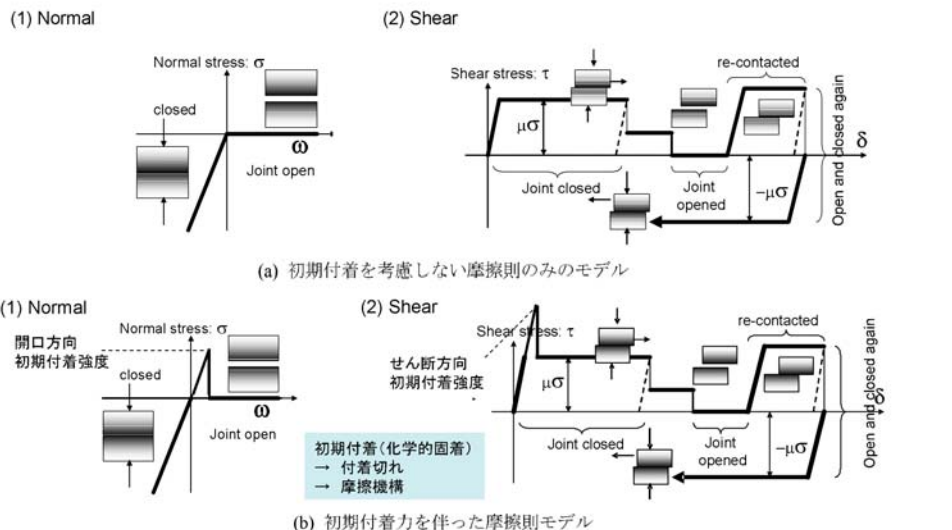


図-3 鋼・コンクリートの接合要素モデル

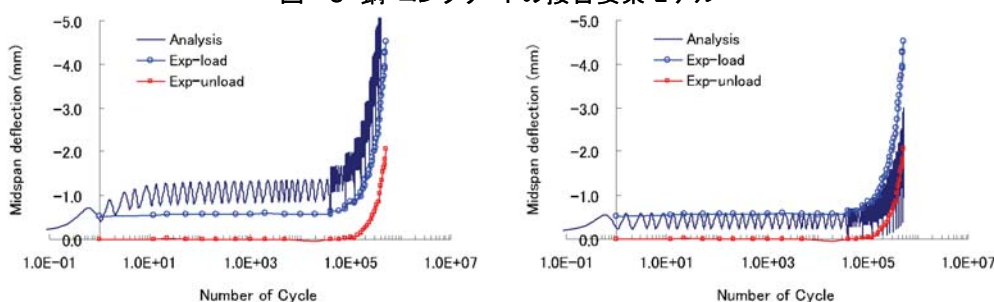


図-4 床版中央たわみ

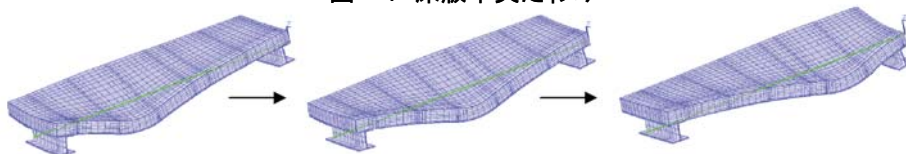


図-5 ケース(a)移動荷重20万回走行時変形(200倍に誇張)