

鉄筋の付着特性が RC 床版の疲労劣化に及ぼす影響に関する解析的研究

Analytical research on the influence of adhesion characteristics of rebars on the fatigue degradation of RC decks

北海道大学大学院工学院

学生員

○加保 勇介 (Yusuke Kaho)

北海道大学大学院工学研究院

正会員

松本 高志 (Takashi Matsumoto)

北海道大学大学院工学研究院

F 会員

林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

北海道大学大学院工学研究院

正会員

何 興文 (Xingwen He)

1. はじめに

現在、日本の橋梁においては供用開始から 30 年経ったものが全体の 53%を占め、その維持管理の問題が顕在化している。昭和 40 年代中頃までは、RC 床版には丸鋼鉄筋が使用されており、これらの RC 床版の多くは供用開始後約 40 年が経過している。近年の道路橋床版の健全性調査¹⁾によると、これらの丸鋼鉄筋を用いた RC 床版は疲労損傷や凍害劣化によって、損傷劣化が顕在化し始めていることが明らかになっている。今後、損傷劣化がさらに急増することが考えられることから、丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労特性の解明は重要な課題であると言える。

これまで、鉄筋コンクリート構造物の長寿命化を目的とした維持管理計画の策定のために、丸鋼鉄筋が配置された RC 構造物に着目して、RC 部材としての基本的な力学的特性を明らかにする研究が行われている²⁾。この研究によると、丸鋼鉄筋を用いた RC 部材は、異形鉄筋に比べて付着強度が低いため、ひび割れ性状、変形、耐力等が異形鉄筋を用いた RC 部材と異なり、場合によっては基本的な力学的性能が低い場合もあることが明らかにされつつある。

このような問題のため、澤松ら³⁾は道路橋 RC 床版を対象として、丸鋼鉄筋が配置された RC 床版の疲労特性に関する基礎的な資料を得ることを目的に、丸鋼鉄筋を配置した RC 床版と異形鉄筋を配置した RC 床版を製作し、輪荷重走行試験を実施して、鉄筋の付着特性が RC 床版の疲労特性に与える影響に関して実験的な検討を行った。

しかしながら、丸鋼鉄筋を配置した RC 床版の疲労劣化に関する解析的な検討はなされておらず、実験の再現による詳細な挙動の検討が必要であるといえる。

そこで本研究では、鉄筋の付着特性が RC 床版の疲労特性に及ぼす影響を、澤松らが行った実験を対象として有限要素解析を用いてより詳細に検討することを目的とする。

2. RC 床版の輪荷重走行試験

ここでは、本研究の解析対象となる RC 床版の輪荷重走行試験³⁾の概要について簡潔に述べる。

実験供試体は、北海道内に昭和 39 年に架設された橋長 44m の 2 径間単純 RC 床版合成鈹桁橋をモデルとして製作した。モデルとした橋は、昭和 31 年鋼道路橋設計方書に準拠して設計されたものであり、厚さ 160mm の床版に丸鋼鉄筋が配置されていた。実験供試

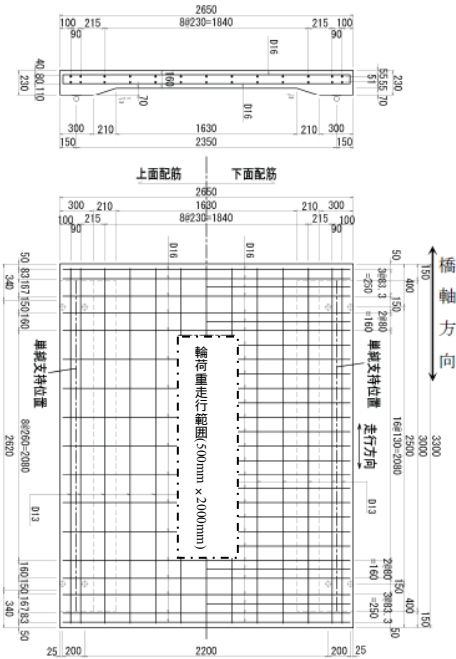


図-1 供試体配筋図

表-1 供試体一覧

供試体名称	鉄筋の種類	輪荷重載荷方法
RB-CON110	丸鋼鉄筋	輪荷重 110kN 一定載荷
RB-CON150		輪荷重 150kN 一定載荷
RB-CON190		輪荷重 190kN 一定載荷
DB-CON150	異形鉄筋	輪荷重 150kN 一定載荷

体は橋軸直角方向 2650mm×橋軸方向 3300 mm×厚さ 160 mm としている。供試体配筋図を図-1 に、供試体一覧を表-1 に示す。鉄筋は RB シリーズで SR295、 DB-CON150 で SD345 を用いている。また、材料試験により得られたコンクリートの材料特性は表 2 の通りである。

供試体支持条件は 2 辺単純支持、2 辺弾性支持で、輪荷重は一定荷重とし、RB シリーズでは RB-CON110、RB-CON150、RB-CON190 の順に 110kN、150kN、190kN、また DB-CON150 で 150kN とした。

実験には、クランク式輪荷重走行試験機を用いており、幅 500 mm の載荷板上を橋軸方向に 2000 mm の範囲で鉄輪を往復させ、ひび割れ密度およびひび割れ間隔、残留ひび割れ幅、破壊状況、床版下面のたわみ、鉄筋ひずみを計測している。

表-2 コンクリートの材料特性(N/mm²)

供試体名称	圧縮強度	弾性係数
RB-CON110	43.0	25.9×10 ³
RB-CON150	41.7	25.4×10 ³
RB-CON190	36.6	26.0×10 ³
DB-CON150	38.6	23.9×10 ³

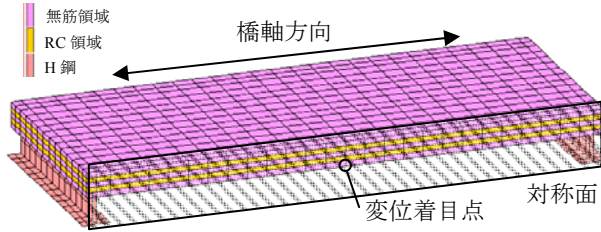


図-2 有限要素分割図

3. 有限要素解析

3.1 有限要素モデル

図-2 は有限要素分割図であり、実験供試体と同様の寸法とし、対称性を考慮した 3 次元 1/2 モデルとしている。床版部分はコンクリートと鉄筋の構成則を重ね合わせた RC 要素を適用するため 8 節点ソリッド要素としている。弾性支持辺の H 鋼は 4 節点シェル要素でモデル化している。

3.2 材料モデル

(1) RC 要素の概要

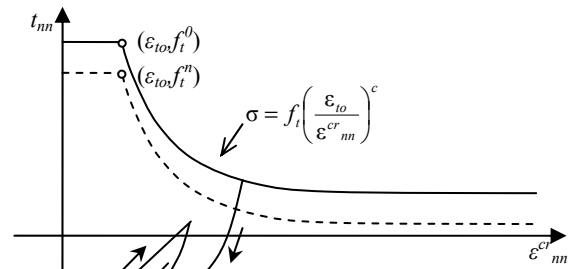
本研究ではコンクリートと鉄筋を個別に要素化するのではなく、コンクリートと鉄筋の構成則を重ね合わせた RC 要素として定義している。

また、分散ひび割れモデルのうち、Rots ら⁴⁾が定式化した多方向固定ひび割れモデルを採用している。このモデルの特徴としては、平均ひずみを非ひび割れ成分とひび割れ成分に分解することでひび割れ面の挙動を再現することが挙げられる。

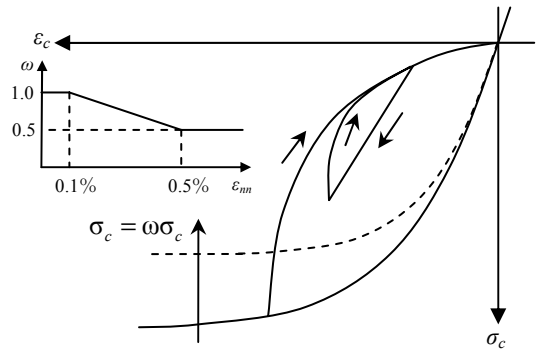
コンクリートは表-2 の材料特性の値を、鉄筋は RB シリーズでは弾性係数 200kN/mm²、降伏応力 295 N/mm²、DB-CON150 では弾性係数 200kN/mm²、降伏応力 345 N/mm²を用いている。

(2) コンクリートの構成則

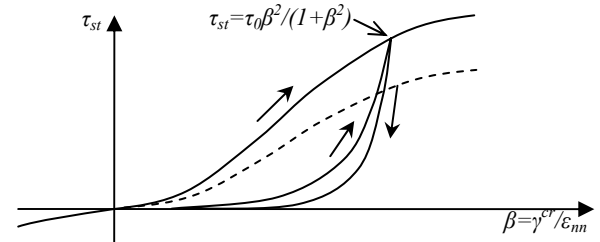
RC 要素中のコンクリートの応力-ひずみ関係は、岡村前川モデル⁵⁾に基づき定義した。コンクリートの直方向の応力-ひずみ関係を図-3(a), (b)に示す。引張側のひび割れ挙動はひび割れ成分でモデル化し、異形鉄筋とコンクリートの付着に起因するテンションスティフニングは係数 c により考慮している($c=0.4$)。一方で、丸鋼鉄筋とコンクリートの間の付着は異形鉄筋に比べて低いいためテンションスティフニングは働かない。また、無筋領域も同様である。そこで、丸鋼鉄筋を用いる場合や無筋領域ではひび割れ発生後にコンクリートは引張応力を負担しないと仮定した材料モデルとしている。引張側の弾性範囲と圧縮側の非線形挙動は非ひび割れ成分によりモデル化し、ひび割れ平行方向の圧縮剛性の低下は ω によって考慮している。引張、圧縮ともに除荷モデルは 2 次曲



(a) 引張(ひび割れ成分)



(b) 圧縮(非ひび割れ成分)



(c) せん断(ひび割れ成分)

t_{nn} : ひび割れ直交方向応力
σ_c : 圧縮応力
τ_{st} : ひび割れ面に沿ったせん断応力
ε_{nn}^{cr} : ひび割れ直交方向クラックひずみ
ε_c : 圧縮ひずみ
β : 正規化せん断ひずみ
γ^{cr} : ひび割れ面に沿ったせん断ひずみ
ε_{nn} : ひび割れ直交方向平均ひずみ
f_t : 引張強度
ε_{to} : 軟化開始時のひび割れ直交方向クラックひずみ
c : 付着特性を表す係数
τ_0 : 最大せん断応力 ($= \tau_{du} / (1 + 25700 \cdot (\varepsilon_{nn}^{cr})^2)$)
τ_{du} : 直接せん断強度

図-3 コンクリートの材料構成則

線、再載荷モデルは直線としている。

コンクリートのひび割れ面でのせん断応力-せん断ひずみ関係を図-3(c)に示す。ここではひび割れ幅の影響を考慮するため、横軸にせん断ひずみをひび割れ直交方向平均ひずみで除した正規化せん断ひずみを用いている。

(3) 鉄筋の構成則

鉄筋の応力-ひずみ関係は修正 Menegotto-Pinto モデル⁶⁾を用いている。

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = H \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} + \frac{(1-H) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}}{\left(1 + \left|\frac{\varepsilon}{\varepsilon_y}\right|^R\right)^{\frac{1}{R}}} \quad (1)$$

$$R = R_0 - \frac{a_1 \varepsilon_{\max}}{a_2 + \varepsilon_{\max}} \quad (2)$$

ここで、 σ :現在の応力、 σ_y :降伏応力、 ε :現在のひずみ、 H : ひずみ硬化率、 $\varepsilon_{\max}$:それまでに経験した最大塑性ひずみ、 R_0 , a_1 , a_2 :曲線形状を決めるパラメータである。除荷および再載荷曲線は式(1)において σ/σ_y を $(\sigma-\sigma_i)/2\sigma_y$, $\varepsilon/\varepsilon_y$ を $(\varepsilon-\varepsilon_i)/2\varepsilon_y$ とする。ここで、 σ_i , ε_i は載荷方向が反転する点の応力とひずみである。また、曲線形状を決めるパラメータ R_0 , a_1 , a_2 は、それぞれ 20.0, 18.5, 0.00015 である。

(4) 応力劣化関数

本研究では、輪荷重走行の繰返しによるコンクリートの劣化を引張強度とひび割れ面に沿った最大せん断応力の劣化によって考慮している(図-3)。ひび割れなどの損傷を受けていない輪荷重走行回数 1 回目の時点のコンクリートの引張強度 f_t^0 に対する輪荷重走行回数 n 回目のコンクリートの引張強度 f_t^n の比を引張応力劣化関数(式(3))によって求めている。

また、ひび割れ面に沿った最大せん断応力においても同様に τ_0^0 に対する τ_0^n の比をせん断応力劣化関数(式(4))によって求めている。

$$\frac{f_t^n}{f_t^0} = 1 - (0.008 + 4.0 \times \varepsilon_{t,\max} \times l) \log_{10} n \quad (3)$$

$$\frac{\tau_0^n}{\tau_0^0} = 1 - (0.035 + 5.0 \times \varepsilon_{t,\max} \times l) \log_{10} n \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon_{t,\max}$:コンクリートがそれまでに経験した最大塑性ひずみ、 l :要素サイズ、 n :輪荷重の走行回数である。式(3)は Zhang⁷⁾によって定式化されたもので、最大ひび割れ幅($\varepsilon_{t,\max} \times l$)と輪荷重走行回数をパラメータとしている。式(4)は式(3)を基に後述する解析結果を与えるものである。

3.3 解析方法

非線形有限要素解析ソフト MSC.MARC を用いて解析を行う。

載荷方法は、輪荷重を載荷ブロック 1 つの範囲に等分布荷重として載荷し、1 載荷範囲ごとにずらして行き、端まで行ったらまた戻る。これを繰返して元の位置に戻り解析上での 1 サイクルとする。応力劣化関数を用いて解析上の 1 サイクルごとに実際の輪荷重走行回数を考慮することで、解析コストを抑え、数十万回の輪荷重走行を再現している。サイクルごとに床版中央下面(図-2 中○)の鉛直変位を出力し、応力劣化関数 ≤ 0 となった時に解析を強制終了している。

4. 解析結果

4.1 変位と走行回数の関係

各供試体の床版中央鉛直変位と輪荷重走行回数の関係を図-4に示す。実験では図中矢印の時点で変位が急増し、コンクリートが押抜きせん断破壊に到ったと考えられている。解析では全ての供試体でせん断応力劣化関数が0となり解析を強制終了した時点までを示した。

また、実験では全ての供試体で破壊に到るまでの間鉄筋の降伏は確認されなかったが、解析においても鉄筋の降伏は確認されなかった。

RBシリーズで比較すると、輪荷重が大きくなるほど実験結果をよく再現できているが、RB-CON110では少ない走行回数でもRC床版の疲労劣化を再現できていないことがわかる。これは、応力劣化関数が高レベルの輪荷重走行を想定して定式化されているため、パラメータの1つであるひび割れ幅も相応に大きい値を対象としている。RB-CON110では輪荷重が110kNと小さいため走行回数を増やしてもひび割れ幅があまり増加せず応力劣化への影響が少なくなったためと考えられる。

また、付着特性の違いによる挙動に着目するためにRB-CON150とDB-CON150を比較すると、解析による破壊時走行回数はRB-CON150 (4万回)がDB-CON150(8万回)の半分の走行回数で破壊に到るが、破壊時の床版中央鉛直変位はRB-CON150($\delta=6.1\text{mm}$)とDB-CON150($\delta=6.4\text{mm}$)で近い値となり実験と同様の挙動を得た。

4.2 S-N曲線

解析結果と実験結果より得られたS-N曲線を図-5に示す。また、既往の研究⁸⁾により提案されている異形鉄筋を配置したRC床版の疲労寿命予測式である松井式(式(5))も併せて示す。

$$\log_{10} \left(\frac{P}{P_{sx}} \right) = -0.07835 \cdot \log_{10} N + \log_{10} 1.52 \quad (5)$$

縦軸はせん断強度比 $\log_{10}(P/P_{sx})$ 、横軸は破壊時の輪荷重走行回数 $\log_{10} N$ であり、 P :輪荷重、 P_{sx} :梁状化した押抜きせん断耐力、 N :破壊時走行回数である。

丸鋼鉄筋を配置したRC床版の疲労寿命予測式である実験結果より提案されているS-N曲線²⁾を式(6)に、本研究で得られた解析結果より提案するS-N曲線を式(7)に示す。

$$\log_{10} \left(\frac{P}{P_{sx}} \right) = -0.09121 \cdot \log_{10} N + \log_{10} 1.52 \quad (6)$$

$$\log_{10} \left(\frac{P}{P_{sx}} \right) = -0.07780 \cdot \log_{10} N + \log_{10} 1.40 \quad (7)$$

両式を比較すると式(6)の切片と傾きが式(7)より大きいため、本研究で対象としたレベルのせん断強度比ではいずれも解析によって得られた丸鋼鉄筋を配置したRC床版の疲労寿命が長いという結果が得られた。

式(6)、(7)と松井式を比較すると実験結果より得られた式(6)は松井式と比較すると切片が等しく傾きが大きいため、せん断強度比が大きいと丸鋼鉄筋を配置した

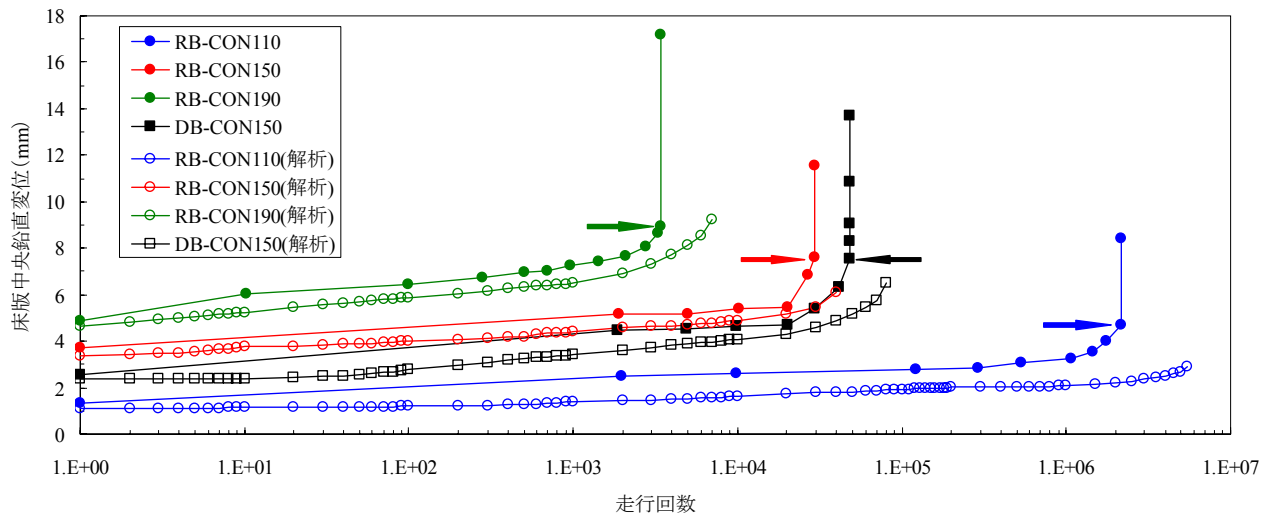


図-4 床版中央鉛直変位と走行回数の関係

RC床版の破壊時走行回数は松井式による異形鉄筋を配置したRC床版の破壊時走行回数に近くなる。

一方で解析結果より得られた式(7)は松井式と傾きが近く切片が小さいため、松井式を平行移動させた形の式となる。式(7)による丸鋼鉄筋を配置したRC床版の破壊時走行回数は松井式による異形鉄筋を配置したRC床版の破壊時走行回数の約0.39倍となる。

5. まとめ

本研究では応力劣化関数を導入したRC要素を用いた有限要素解析により丸鋼及び異形鉄筋を配置したRC床版の輪荷重走行試験を再現した。結果として定性的ではあるが床版鉛直変位と輪荷重走行回数の関係では実験での挙動を再現することができた。

また、解析結果より得られた丸鋼鉄筋を配置したRC床版の疲労寿命予測式より、丸鋼鉄筋を配置したRC床版の破壊時の輪荷重走行回数は異形鉄筋を配置したRC床版の破壊時の輪荷重走行回数の約0.39倍になるという結果が得られた。

謝辞

本研究で比較対象とした実験資料を提供していただいた寒地土木研究所に謝意を示す。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路施設現況調査, 2009.
- 2) Mohd, W., 中村光, 国枝稔, Pamavanh, K., 河村精一：丸鋼を用いた低鉄筋比RCはりの挙動の評価, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.453-454, 2009.
- 3) 澤松俊寿, 三田村浩, 西弘明：鉄筋の付着特性がRC床版の疲労特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, pp.727-732, 2010.

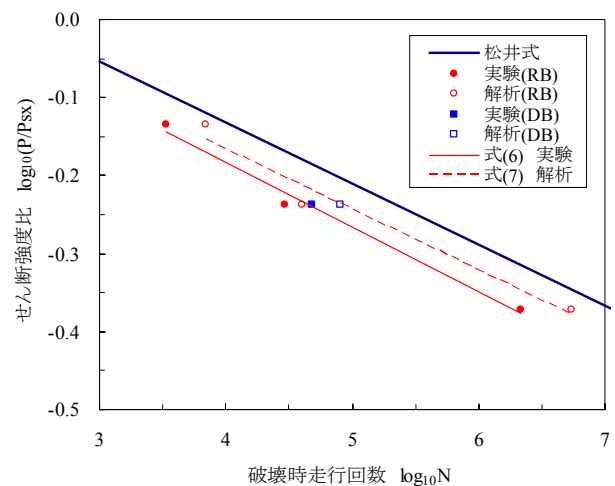


図-5 S-N曲線

- 4) Rots, J. G. : Computational Modeling of Concrete Fracture, Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, 1988
- 5) 岡村甫, 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 6) Ciampi, V., et al : Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars under Generalized Excitation, No.UCB/EERC-82/23, University of California, Berkeley, 1982.
- 7) Zhang, J. : Fatigue Fracture of Fiber Reinforced Concrete-An Experimental and Theoretical Study, Ph. D. Thesis, Technical University of Denmark, 1998.
- 8) 前田幸雄, 松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.221-224, 1984.