

輪荷重走行試験の既往データの分析と 数値解析による床版疲労損傷要因の検証

Fatigue damage factors of bridge deck based on the analysis of wheel moving load tests and simulations.

藤山知加子*, 上條崇**, 前川宏一***

Chikako Fujiyama, Takashi Kamijou and Koichi Maekawa

*工博，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）

** 株式会社横河住金ブリッジ，設計センター大阪設計グループ（〒555-0004 大阪市西区靱本町 1-4-12）

*** 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 文京区本郷 7 丁目 3-1）

The subcommittee of long term damage of bridge deck had collected experimental data from nine domestic institutes that have wheel moving load testing machine. On the basis of 122 experiment data, three factors; compressive strength of concrete, thickness of slab and rebar arrangement, were extracted as influence factors, which affect fatigue life of bridge deck. Further analysis by numerical simulations showed the impacts of three factors respectively. It indicates that the thickness of slab and strength of concrete have strong correlation with fatigue life of deck subjected to wheel moving load.

Key Words: wheel moving load test, influence factors, thickness of slab, strength of concrete

キーワード：輪荷重走行試験，影響因子，床版厚，コンクリート強度

1. 背景

道路橋 RC 床版の疲労損傷に関する研究は、1970 年代の輪荷重走行試験機導入¹⁾以降、数多くの実験データとその分析に基づく知見が蓄積されてきた。これらの精力的な研究によって床版損傷のプロセスが広く認識されるようになっただけでなく、現在では、新たに開発した床版の性能照査や、既設床版の補強効果の確認等において輪荷重走行試験は幅広く活用されている。しかしながら、疲労試験で得られる RC 構造物の疲労寿命そのものが本来ある程度のばらつきをもっていることに加え、試験の目的によって載荷条件等も異なることから、床版疲労寿命に影響を及ぼす要因を定量的に分析することは容易ではない。その中で、国内で保有されているクランク式と自走式の 2 種類の輪荷重走行試験機の違いが実験結果に及ぼす影響については、鋼構造委員会道路橋床版の合理化検討小委員会での検討結果が報告されている²⁾。

本研究では、はじめに、国内で稼働している 9 つの研究機関の輪荷重走行試験機に関する 122 の実験データを収集し、試験結果に比較的大きな影響を与えていると言われている床版厚、コンクリート強度、配筋の異方性に着目してデータ分析を行った。次に、コンクリートの疲労損

傷を再現することのできる非線形有限要素解析プログラム³⁾を用いて、これら 3 つの影響因子をパラメータとするシミュレーションを実施し、実験データとの比較、分析を行った。床版疲労寿命に影響を与える要因とその影響度について、定量的な分析を試みたものである。

2. 輪荷重走行試験データの分析

2.1 分析手法

表—1 に、本研究で収集した輪荷重走行試験データの概要を示す。データの詳細については、参考文献⁴⁾（付録 3）を参照されたい。本論文ではこの中で特に、同一機関としては試験数が最も多く、S39 床版、S47 床版、H8 床版および補強床版という代表的な諸元をすべて実施されている土木研究所のデータについて分析を行う。輪荷重走行試験では、段階的に荷重を漸増させる場合と一定荷重で載荷を繰り返す場合とがあるため、実大床版の試験結果については 157kN を基準荷重として、式(1)によって換算走行回数を求めた。

$$N_{eq(157kN)} = \sum_i \left\{ \left(\frac{P_i}{157} \right)^{12.7} \cdot N_i \right\} \quad (1)$$

ここに、 $N_{eq(157kN)}$ は等価繰返し回数、 N_i は荷重 P_i

での破壊までの载荷繰返し回数である。また、試験体諸元の違いについては、1/2 モデルや 3/5 モデルを用いた輪荷重走行試験に関する既往の研究⁵⁶⁾を参照し、縮尺ごとの基準荷重を設定して等価繰返し回数を求めた。

2.2 分析結果

破壊に至るまでの等価繰返し回数を、床版厚、コンクリート強度、配力鉄筋量に関して整理した結果を図一1～図一3 に示す。図中の破線は、4 節で述べる数値解析結果との比較である。

床版厚で整理した図一1 では、床版厚 250mm の H8 床版（図中△）は版厚 200mm の S47 床版（図中□）に比べて平均寿命は長い、双方グループ内で試験値のばらつきが大きく、版厚の影響度を明確にすることは難しい。仮に、版厚 30mm の差が 10 倍の疲労寿命差をもたらすとした場合（図中の 2 本の破線）、H8 床版（図中△）と S47 床版（図中□）のデータが概ね破線の範囲に含まれていることは興味深い。

一方、S39 床版（図中◇）と S47 床版（図中□）を比較した場合、版厚は 10mm しか変わらないが寿命は大きく異なる。以上より、版厚は疲労寿命にある程度の影響を及ぼすものと推察はされるが、影響度の大きさは、他の影響因子との組み合わせによる効果もあると考えられるため、本分析の範囲では明らかとは言えない。

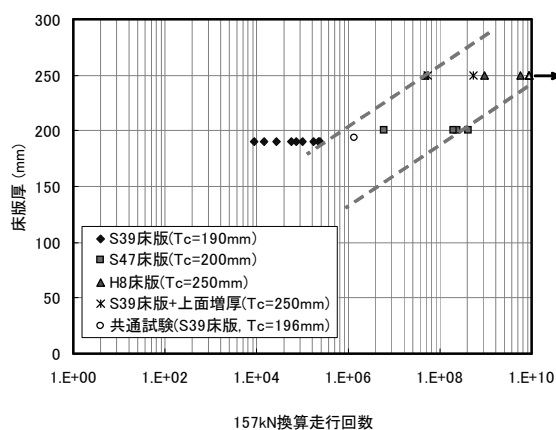
一方、図一2 では、H8 床版（図中△）は版厚 200mm の S47 床版（図中□）について、コンクリート圧縮強度の増加に伴い破壊までの等価繰返し回数も増加するように、概ね右上がりの領域に実験結果が分布している。これより、コンクリート圧縮強度と輪荷重走行試験における破壊までの走行回数には、一定の相関があると考えられる。図中の破線は、コンクリート圧縮強度 6N/mm^2 の増加が 10 倍の疲労寿命差をもたらすことを想定したものである。一方で、S39 床版（図中◇）および S39 上面増厚補強床版（図中×）については、圧縮強度と疲労寿命の相関は明確ではないと言える。

昭和 39 年道路橋示方書に基づいて設計・施工された S39 床版は、配力鉄筋量が他に比べて少ない。配力鉄筋量に着目した図一3 からは、S39 床版の疲労寿命が他に比べて特に短いという知見を、ほぼ裏付けているように思われる。しかしながら、S39 床版に上面増厚を施した試験体では従来の 100～1000 倍と大幅に寿命が増加していることから、配力鉄筋量は床版厚よりも疲労寿命に及ぼす影響度は低いと考えることもできるだろう。

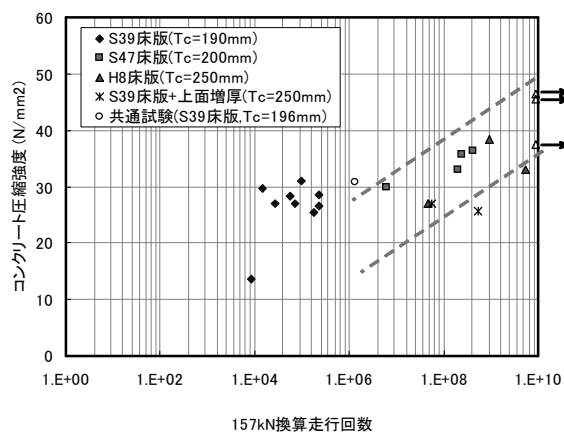
以上より、本研究で着目した床版厚、コンクリート強度、配筋の異方性はそれぞれ床版の疲労寿命に影響を及ぼしていることは概ね確認できたが、各影響度に

表一 収集した RC 床版の輪荷重走行試験データ

試験機関	データ数		試験概要
	新規床版	切出床版	
大阪大学	9		S39, S47 床版
日本大学	13	6	・ S55 床版 ・ 塩害で鉄筋が発錆した床版への補強
土木研究所	35		・ S39, S47, H8 床版 ・ 上面増厚、炭素繊維シート接着
寒地土木研究所	1	7	・ 凍害を受けた床版 ・ 鋼板接着補強から 30 年以上経過した床版
東京都	14	6	・ S39, S47 床版 ・ 30 年供用後の切出し床版
NEXCO 総研	6	9	・ 上面増厚 ・ 下面増厚 ・ 上部断面補修
I H I	7		
横河ブリッジ	2		
ショーボンド建設	7		S39 床版
合 計	122		



図一1 床版厚—等価破壊回数関係（土研）



図一2 コンクリート強度—等価破壊回数関係（土研）

については、さらに詳細な検証を行う必要があると考えられた。

3. 数値解析による影響因子の定量的分析

3.1 数値解析条件

前節までの輪荷重走行試験データの分析結果をさらに検証するため、コンクリートの疲労損傷を再現することのできる非線形有限要素解析プログラム³⁾を用いて、これら 3 つの影響因子をパラメータとするシミュレーションを実施した。解析モデルを図-4 に示す。橋軸方向 4500mm、橋軸直角方向 2800mm、厚さ 190mm、支間 4200mm および 2500mm となるよう節点の鉛直方向変位を拘束する 4 辺支持版で、対称性から半面のみをモデル化している。2 方向に配置されている鉄筋は、全厚を 5 等分（各層 38mm）した要素の上下に RC 要素層として解析に取り入れた。それ以外は鉄筋の付着機構が及ばない無筋コンクリート領域としてモデル化した。有限要素は 8 節点アイソパラメトリック要素を用いている。

解析に用いた諸元を表-2 に示す。標準配筋は S47 床版を想定している。コンクリートの引張強度および弾性係数は、コンクリート標準示方書⁷⁾に基づき、圧縮強度から推定した。引張軟化特性および応力-ひずみ関係を規定する構成則は参考文献 8 に準じている。

解析ケースとパラメータの一覧を表-3 に示す。床版厚を変更する場合、鉄筋を含む鉄筋コンクリート要素は変更せず、中間の無筋コンクリート要素で寸法を調節している。

載荷は、橋軸方向 200mm、橋軸直角方向 500mm の面積を順次移動することで、移動荷重を模擬した。鉄輪を用いた実際の輪荷重走行試験では、200mm×500mm 領域内で荷重は必ずしも一様に分布していない可能性もあるが、本研究では一様としている。荷重の大きさは 157kN 一定で、移動速度は約 18km/h である。移動荷重を一定回数繰返すシミュレーションの後に一旦除荷し、版中央の 200mm×500mm 領域に静的に 157kN を載荷し、最大たわみと除荷時のたわみ（残留たわみ）を記録した。最大たわみと残留たわみの差を活荷重たわみと定義し、以降の図に示す。

3.2 輪荷重走行試験シミュレーション結果

(1) 床版厚の影響

図-5 に、コンクリート強度と配筋量は同じで版厚のみが異なる 3 つのケースについて、版中央活荷重たわみと移動荷重通過回数の関係図を示す。版厚（有効高）を増した分だけ比例的にたわみを抑える効果がみられ、その差は破壊に至るまではほぼ均等に保たれていた。このことから、版厚が床版疲労寿命に及ぼす影響は、静的なたわみの比較からほぼ比例的に予測できる可能性があると言える。

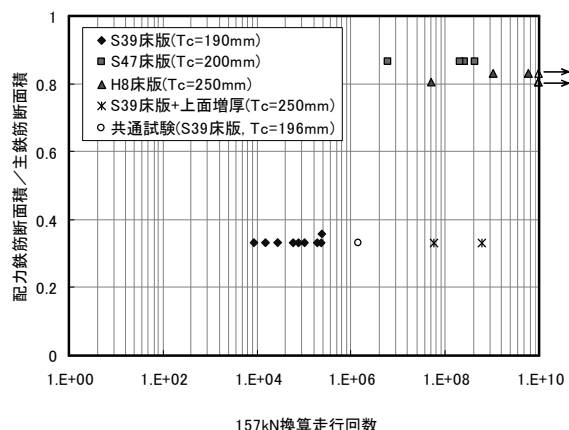


図-3 配力鉄筋量一価破壊回数関係（土研）

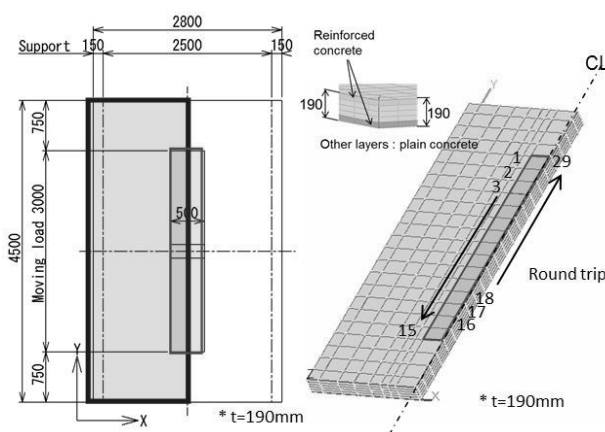


図-4 解析モデル

表-2 解析に用いた諸元

標準配筋	支間方向	配力筋方向
上面	D16ctc300	D13ctc300
下面	D16ctc150	D10ctc300

(各ケース共通)

鉄筋降伏点	鉄筋強度	鉄筋弾性係数
345 N/mm ²	500 N/mm ²	200,000 N/mm ²

表-3 解析ケースとパラメータ

T170 版厚 170mm 強度 24N/mm ² 標準配筋	Proto 版厚 190mm 強度 24N/mm ² 標準配筋	T210 版厚 210mm 強度 24N/mm ² 標準配筋
F18 版厚 190mm 強度 18N/mm ² 標準配筋		F30 版厚 190mm 強度 30N/mm ² 標準配筋
H-0.5 版厚 190mm 強度 24N/mm ² 配力筋標準の 1/2		H-2.0 版厚 190mm 強度 24N/mm ² 配力筋標準の 2 倍

数値解析では大変形が生じた後も計算が続けられるため数値解析結果から破壊基準をどのように定めるかは問題ではあるが、たとえば、活荷重たわみが床版支間の1/500となる5mmを破壊の水準とみなした場合、版厚30mmの差で疲労寿命が10倍あるいはそれ以上異なることがわかる。

(2) コンクリート強度の影響

次に、版厚と配筋量は同じでコンクリート強度のみが異なる3つのケースについて、版中央活荷重たわみと移動荷重通過回数の関係を図-6に示す。版厚のみを変化させた場合と同様に、コンクリート強度の違いに応じて初期に生じたたわみ量の差が、破壊に至るまでほぼ均等に保たれていた。本研究ではコンクリートの圧縮強度をパラメータとして検討しているが、圧縮強度に連動してコンクリートの引張強度も変化しているため、たわみ差は圧縮強度だけでなく引張強度が関与したものである。

ここで、版厚の比較のときと同様に活荷重たわみ5mmを破壊の水準とみなした場合、コンクリート強度が 6.0N/mm^2 異なるごとに疲労寿命が1オーダー異なることがわかる。

(3) 配筋の影響

最後に、版厚とコンクリート強度は同じで配筋鉄筋量のみが異なる3つのケースについて、版中央活荷重たわみと移動荷重通過回数の関係を図-7に示す。これによると、初回たわみ～10,000回程程度の載荷までは3ケースはほぼ同じ程度のたわみを示している。10,000回程以降からは、配筋鉄筋量が少ない方がたわみの進行が速くなる傾向はあるが、版厚やコンクリート強度をパラメータとした場合に比べれば、その影響感度は高いとは言えない。これまでの比較と同様に活荷重たわみ5mmを破壊の水準とみなした場合、配筋鉄筋量が最も少ないH-0.5と最も多いH-2.0とで比較すれば（配筋鉄筋量4倍）、疲労寿命に1オーダー程度の差がみられる。

4. 床版疲労寿命に対する影響因子の考察

2節の既往の試験データの分析、3節の数値解析結果から、床版厚とコンクリート強度は、鉄筋コンクリート床版の疲労寿命と相関があることが示唆された。床版厚をパラメータとしてみた場合、試験結果（図-1）ではばらつきが多いものの、S39床版を除けば版厚差50mm程度で等価破壊回数が2オーダー程度異なることは、妥当な結果と言える。また、コンクリート強度に着目して整理した試験結果（図-2）については、S39床版を除けば、コンクリート強度が 6.0N/mm^2 異なるごとに疲労寿命が1オーダー異なるという数値解析結果は、矛盾しない。

配筋による異方性の影響については、試験結果の分析と数値解析結果は整合しない。版厚およびコンクリート強度を含めた総合的な観点から考察するならば、S39床

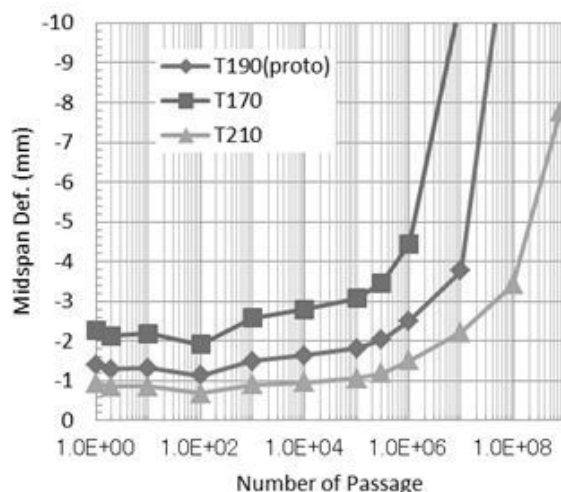


図-5 床版厚が異なる床板の版中央たわみの推移

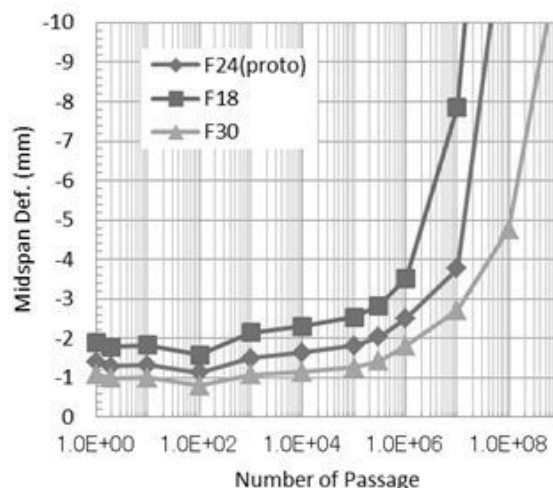


図-6 コンクリート強度が異なる床板の版中央たわみの推移

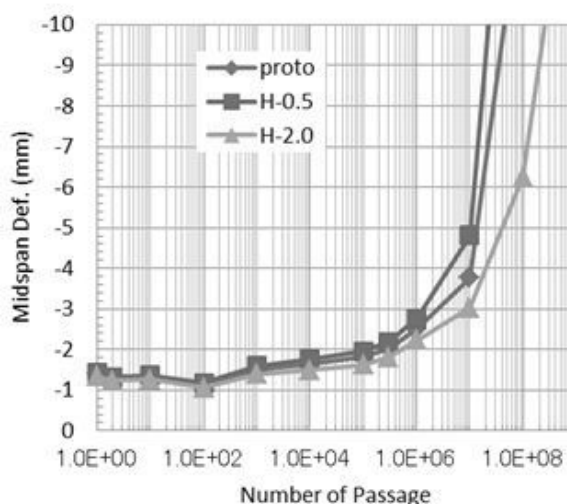


図-7 配筋鉄筋の異なる床板の版中央たわみの推移

版の疲労寿命が一般に短い原因として、配力鉄筋量よりも他の2つの要因の影響が大きいものと推察される。

さらに、実橋において、昭和39年道路橋示方書に基づいて設計・施工された床版で多くの深刻な損傷が報告されている背景には、高度経済成長期の過積載車の問題や施工品質の問題など、他の多くの問題があることを考慮しなければならないだろう。たとえば、本研究では乾燥収縮の影響は含んでいないが、乾燥収縮によって床版疲労寿命が大幅に低下する可能性があること、また、板厚が薄いほど乾燥収縮の影響が大きくなることは推察される。これらの他の要因についても、今後定量的な検討を進めていきたい。

5. 結論

本研究では、既往の輪荷重走行試験を収集し、試験結果に比較的大きな影響を与えてきた床版厚、コンクリート強度、配筋の異方性に着目してデータ分析を行うとともに、数値解析を用いたパラメトリックスタディを実施し、床版疲労寿命に影響を及ぼす因子の分析を行った。本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 輪荷重走行試験データの分析からも、数値解析結果からも、床版厚は床版の疲労寿命に大きな影響を及ぼす影響因子であると言える。両者の結果から、版厚30mmの差で疲労寿命が1オーダー異なる可能性が示唆された。
- 2) 同様に、コンクリート強度は床版の疲労寿命に大きな影響を及ぼすもう一つの影響因子であると考えられる。両者の結果から、コンクリート強度が 6.0N/mm^2 異なるごとに疲労寿命が1オーダー異なる可能性が示唆された。
- 3) 配力鉄筋量は、床版の疲労寿命に影響を及ぼすと考えられるが、その影響度は、他の2つの影響因子に比べれば小さいと推察される。

多様な条件下にある実橋梁床版の性能を評価するた

め、これまで蓄積されてきた輪荷重走行試験のデータに数値解析などの新しい技術を取り入れた適切な分析手法の研究・開発に努めていきたい。

謝辞

実験データの収集にご協力頂いた9つの研究機関にここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987.
- 2) 道路橋床版の合理化検討小委員会: 道路橋床版の要求性能と維持管理技術, 社団法人土木学会・鋼構造委員会, 2008.
- 3) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-scale modeling of structural concrete., Taylars and Francis, 2009.
- 4) 土木学会鋼構造委員会道路橋床版の維持管理評価に関する検討小委員会: 道路橋床版の維持管理マニュアル, 土木学会, 2012.
- 5) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 川井豊: 道路橋RC床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.1, pp.39-54, 2011.
- 6) 阿部忠, 木田哲量, 水口和彦, 川井豊: 輪荷重走行疲労実験における車輪寸法がRC床版の耐疲労性に及ぼす影響および評価法, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1305-1315, 2011.
- 7) 土木学会: 2007年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2008.
- 8) Maekawa, K., Pimammas, A. and Okamura, H. : Nonlinear mechanics of reinforced concrete., Spon Press, 2003.