

床版の補修を考慮した寿命推定に関する検討

Study on the Life-cycle Assessment Method Taking into account the Effect of Repair

大西弘志*, 本間雅史**, 嶽下裕一***, 佐藤辰巳****, 松本茂*****

Hiroshi ONISHI, Masashi HONMA, Yuichi DAKESHITA, Tatsumi SATO, Shigeru MATSUMOTO

*工修 大阪大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

** (株)ドーコン 東京支店 技術部 (〒105-0013 東京都港区浜松町 2-6-2)

***工修 日立造船(株) 橋梁設計部 (〒550-0002 大阪市西区江戸堀 2-6-33)

**** パシフィックコンサルタンツ(株) 交通技術本部 構造部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1)

***** 阪神高速道路公団 保全部 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

Recent incidents such as concrete falling from deteriorated concrete structure made the public realize the importance of proper maintenance works. Similar deficiency is observed at steel bridge superstructures, in particular on concrete slabs.

At present, there is no appropriate method to find out the best timing for the repair works for optimization of the relationship between effect of the repair works and total lifespan.

This study is a trial for estimating a lifespan of bridge concrete slabs taking into account the effects of repair works for minimizing the maintenance cost.

Key Words: RC decks, fatigue, maintenance, effect of repair, life-cycle assessment

1. はじめに

社会基盤全般における維持管理の問題は、構造物の経年劣化などが原因と考えられる事故が近年多発していることから、その解決が急務となっている。すでに土木研究所から複数の資料が発表されており、その中から図-1に国土交通省管轄の橋梁建設数の推移、図-2に橋梁の架替までの供用年数調査結果を示す。一般に構造物の寿命は、「物理的寿命」、「経済的寿命」、「機能的寿命」の3つに分類されるが、その中で橋梁の架替要因の一つである損傷について着目すると、図-3に示されるように床版の損傷による要因が49.8%と鋼材の腐食と並んで大きな比率を占め

ている。現在の社会経済情勢から、今後、鋼道路橋においては、維持管理に関わる設計・施工などが増大するものと考えられ、その中でも床版の維持管理は特に重要な課題として認識すべきである。このような状況から、最近では、設計の中で将来の維持管理費を考慮するなど、ライフサイクルコストの概念を意識してコスト削減を図る計画・設計を行うことが多くなっている。

また、新設の鋼道路橋においても、第2東名・名神高速道路で建設中の橋梁群などを中心に、構造の合理化を目的とした少数主桁橋梁の導入が盛んに行われている。本形式は、床版支間が長くなるため、PC床版や合成床版の採用が前提となるが、RC床版と比較して耐久性の向上が期待できる。しかし、床版の打換が生

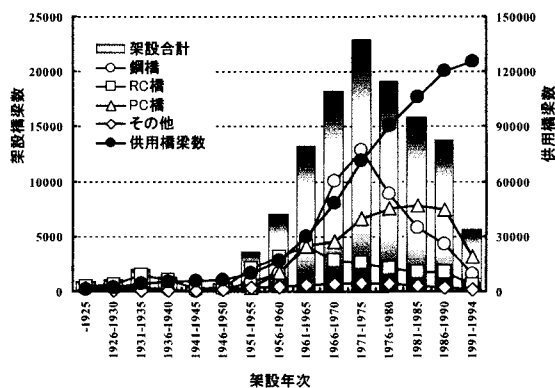


図-1 橋梁架設数の推移¹⁾

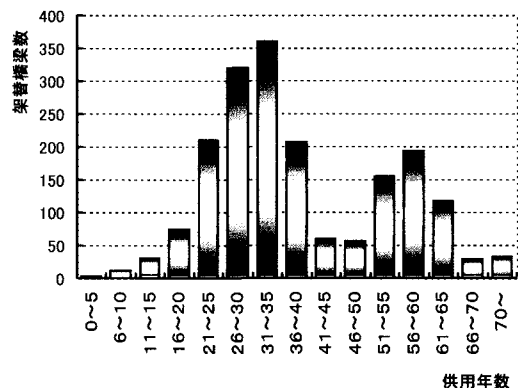


図-2 橋梁架替えまでの供用年数調査結果¹⁾

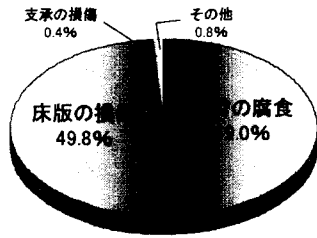


図-3 架替えの原因となる損傷の内訳¹⁾

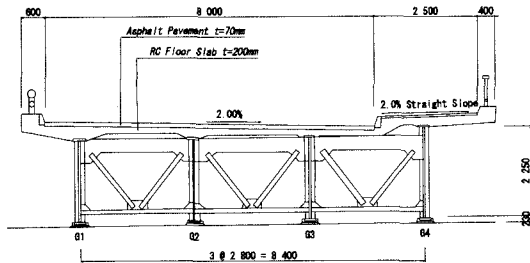
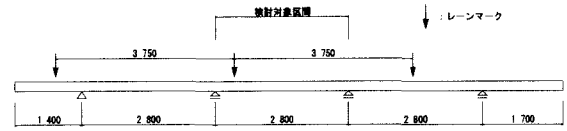
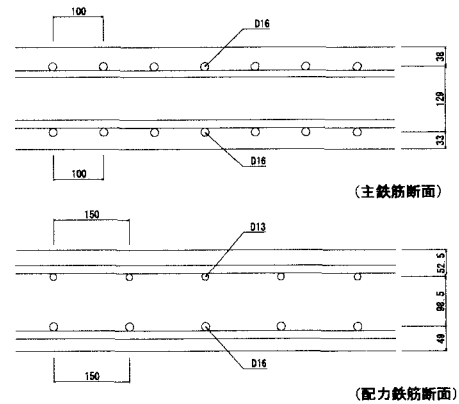


図-4 検討モデル橋梁断面



(a) 検討モデル



(b) 検討モデル橋梁床版配筋図

図-5 検討モデル

じた場合にはその施工が極めて困難という問題があり、床版の耐久性を確保するため、適切な維持管理を行うことが重要となる。

また、図-3に示すように、現時点で供用されている床版の損傷に対しても対処が必要であるが、特に、損傷を防止するための補修・補強をどの時点で施せば最も効率的であるかということに関しては研究事例も少なく不明な点が多い。そこで、本論文では床版の補修・補強を検討する際、その基本となる寿命の推定方法について、補修が行なわれる場合の影響も考慮して検討し、その手法について提示することを試みた。

2. 寿命推定条件

2.1. 検討モデル

本研究ではモデル橋梁として昭和44年度に施工された橋梁を採用することにした。本橋は、支間4@40.2mの4径間連続鋼桁で、図-4に示す断面図のように有効幅員10.5m(車道8m, 歩道2.5m)、床版支間2.8m、床版厚200mmである。また、適用示方書はS39である。本研究では計算を簡略化するため、断面形状を図-5(a)に示す検討モデルに置き換えて計算を行なうことにした。また、今回の検討対象とした橋梁の床版は、当時の設計図より、図-5(b)に示す配筋となっており、本研究においてはこの配筋をもとに計算を行った。

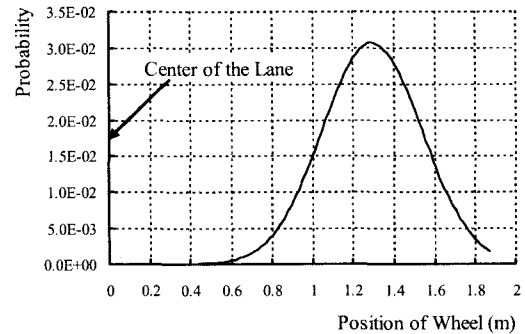
2.2. 材料定数²⁾

今回の検討では、以下の材料定数を計算に用いることにした。(コンクリート)

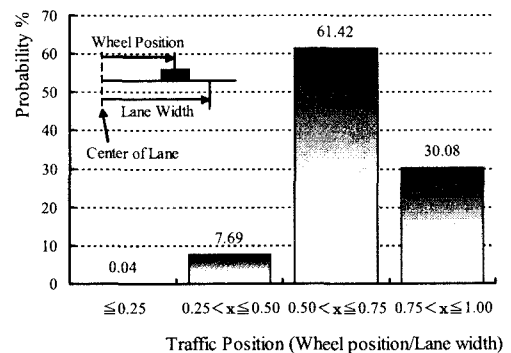
- 圧縮強度 : $\sigma_{ck} = 24\text{MPa}$
- ヤング係数 : $E_c = 2.5 \times 10^4 \text{MPa}$
- ポアソン比 : $\nu = 0.2$

(鉄筋)

- ヤング係数 : $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{MPa}$
(ヤング係数比 $n = E_s / E_c = 8.0$)



(a) 荷重走行の確率密度分布



(b) 床版各部位における荷重走行確率

図-6 荷重走行位置計算結果

2.3. 交通荷重条件

(1) 交通荷重走行位置分布³⁾

本研究では、寿命推定において荷重走行位置の影響を考慮するため、参考文献3)に記載されている内容をもとに、車両走行位置の確率が平均0.69a、標準偏差0.13a(a:車線幅)の正規分布に従うと仮定し、走行位置の算出を行った。その結果を図-6に示す。今後の計算ではこの図に示された確率分布と図-5で示した検討モデルのレーンマークとの位置関係に基づいて荷重走行台数を算出し、計算を実施することにする。

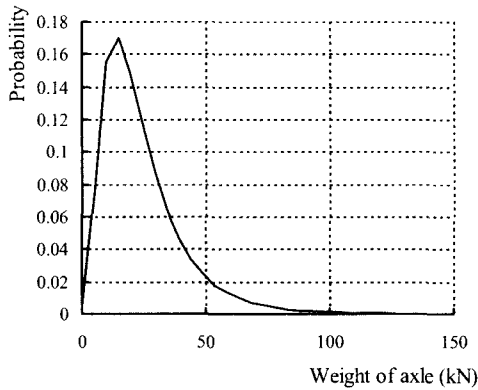


図-7 軸重確率密度分布 (産業道路タイプ)⁴⁾

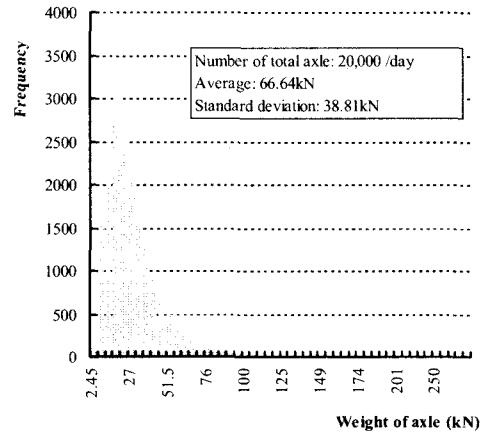


図-8 軸重頻度分布 (日交通量 20,000 台時)⁴⁾

(2) 交通荷重頻度分布⁴⁾

本研究で使用する荷重頻度分布に関しては、実交通荷重を考慮した検討手法を提示するために、既往の研究で示されている軸重荷重頻度分布を利用することにした。本研究では、実際に荷重の実測を行った結果を提示している参考文献⁴⁾の記述に基づき、軸重の確率密度分布を対数正規分布に従うと仮定し、さらに文献⁴⁾に示される「産業道路タイプ」の分布を採用することにした。この分布を図-7に示す。また、この確率密度分布をもとに日交通荷重を20,000台としたときに軸重頻度分布を図-8に示す。ただし、本研究の検討においては日交通量を30,000台と仮定して計算を行っている。

2. 4. 補修効果の考慮

本研究では補修効果の影響を考慮するために、供用開始後10年、20年、50年の段階で1回のみ補修による影響を導入することにした。本研究では導入による効果を評価するにあたり、比較的既往の研究データが豊富な炭素繊維シート補強工法を想定することにした。既往の研究⁹⁾によれば、炭素繊維シートにより補強を行った場合、補強後の床版の断面諸量はそれまでの損傷状態とあまりかわり無く、炭素繊維シートを鉄筋に換算して得られる値で評価できることが示されており、本研究においても同様の手法を用いて検討を行うことにしている。なお、今回の検討においては補強時における床版損傷の回復は50%を見込むことにした。

3. 寿命推定手法

3.1. 検討モデルにおけるせん断応力発生状況の確認

本研究における寿命予測は、既往の実験により求められているS-N曲線を用いることを想定しているが、その適用に当たっては実験時の状況と検討対象となる橋梁床版の置かれた状況の違いを十分に考慮しておくことが重要である。特に、床版の押し抜きせん断破壊までの寿命には、床版に作用するせん断力の大きさが密接に関わっているという知見が既に得られている⁹⁾ことから、対象橋梁に発生すると思われるせん断応力と輪荷重走行試験時のせん断応力の比を確認し、寿命予測に反映させることとした。以下に今回行った発生せん断力の確認手法の詳細を示す。

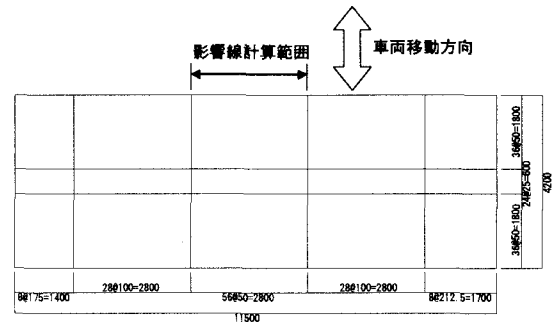
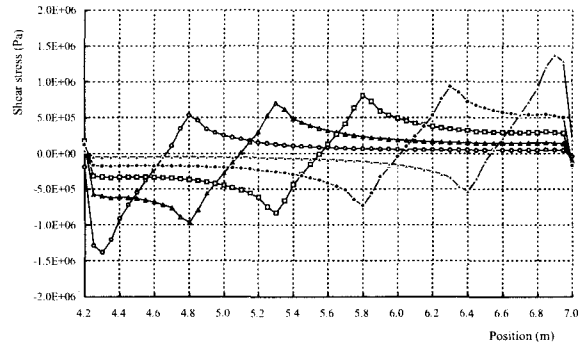
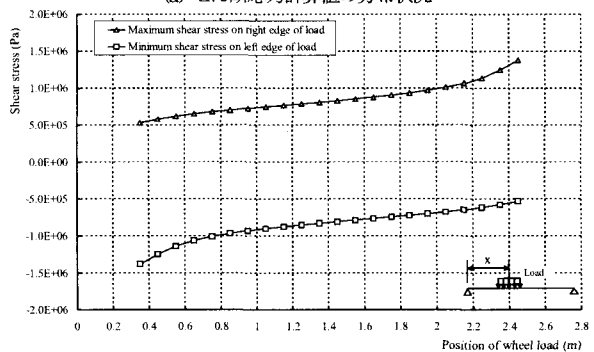


図-9 影響線計算モデル



(a) せん断応力計算値の分布状況



(b) 荷重位置とせん断応力最大・最小値の関係

図-10 せん断応力計算結果 (検討モデル)

(1) 検討モデルにおけるせん断応力の発生状況の確認

本研究では、検討モデルに輪荷重が作用したときに発生するせん断応力を確認するために、図-9に示すFEMモデルを用いて計

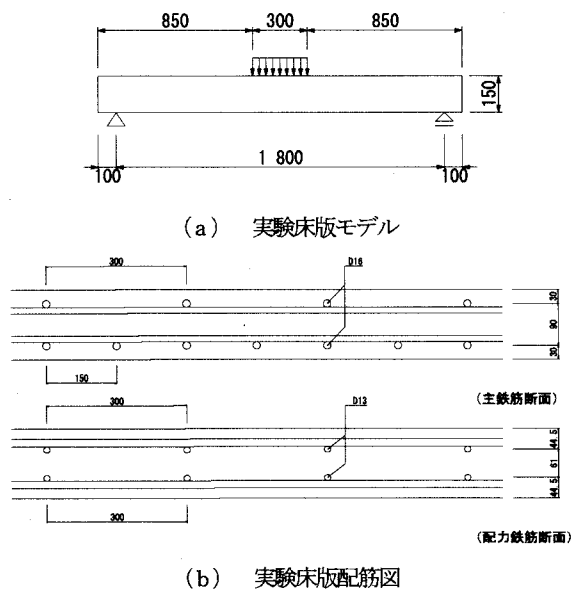


図-11 輪荷重走行試験床版モデル

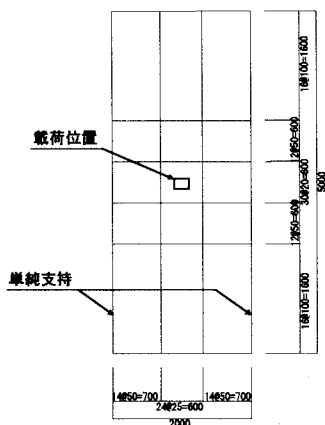


図-12 せん断力計算モデル

算を行った。このモデルに作用させた荷重は98kNであり、作用面積は500mm×200mmとしている。荷重の位置は評価対象部であるが、荷重の位置による影響を確認するため、その位置を変化させ、その都度、せん断応力の発生量を確認した。この計算により得られた結果の一部を図-10に示す。この図に示されるように、計算で求められたせん断応力は輪荷重の端部と主桁との距離により大きく変動し、その大きさには約3倍の開きがあることがわかる。したがって、本研究における寿命推定においても、この影響を考慮する必要がある。

(2) S-N 曲線を利用するためのせん断応力の比較

現在、鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性を評価するためのS-N曲線として提示されているものは全て実験式であり、その支持条件、載荷条件により曲線自体が変動する可能性が大きいことがわかっている⁹⁾。そこで、本研究では検討対象橋梁に発生するせん断応力と実験時に発生するせん断応力の比を求めることで実験式の実橋梁への適応が可能であると仮定して計算を進める

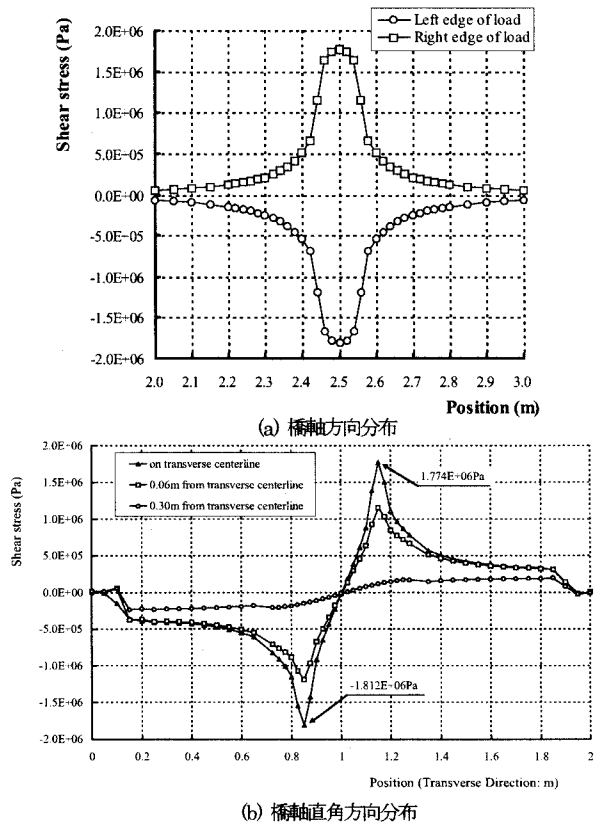


図-13 せん断応力計算結果

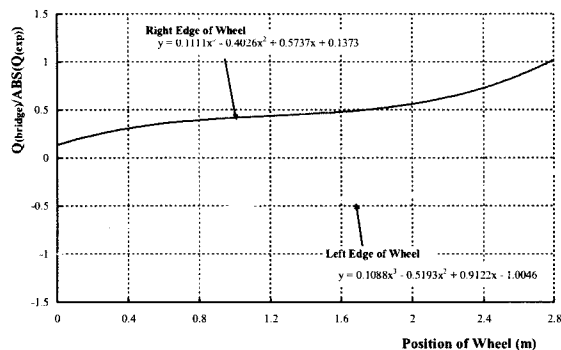


図-14 荷重位置によるせん断応力発生量の変化

ことにした。ここで、参考文献6)により提示されているS-N曲線を求めるときに使用されたと考えられる床版のモデルを図-11に示す。本モデルは、検討対象橋梁と比較して床版の配筋や支持条件等に相違があり、このモデルについても図-12に示すFEMモデルを用いてせん断応力の計算を行った。このときの荷重載荷条件、床版支持条件は実験時の条件をモデルに与えて計算を実施している。この計算により得られた結果を図-13に示す。この図を見ると、実験モデルにおいて発生するせん断応力は検討対象モデルで計算されたものよりも大きいことがわかる。そこで、検討対象橋梁モデルで得られたせん断応力の最大値と実験モデルにより得られたせん断応力の最大値の比を求めたところ、図-14のような結果となった。以後、荷重位置によるせん断応力の変動による影響は図-14を用いて確認し、計算を進めることにした。

3.2. 床版部位ごとの走行荷重の頻度

本研究においては計算を簡略化するため、レーンマーク間を8等分し、各区間の中央部に輪荷重が走行するものとして計算を行った。ここで、本研究で用いた検討対象橋梁の主桁位置とレーンマークがずれていることから、その分布状態は図-15に示すようになっている。ここで、本研究においては、床版各部位に対して区別を行うため、図-15の支点すぐ左から順にArea1, Area2, … Area6と定義した。

また、レーンマーク間を8等分したことにより、各区間の幅が輪荷重の幅より小さくなったため、輪荷重による影響は荷重走行位置となる区間ではなく、その両隣にあたる区間に発生するとして計算を行った。今回の検討においては荷重の左右どちらの端に当たったことによる影響は考慮せず、等価な影響を受けるものとして計算を実施した。ここで、本研究における走行輪荷重の頻度は次式で求めた。

$$N_{pi} = n \cdot p_{pi} \cdot p_x \quad (1)$$

ここで、 N_{pi} ：輪荷重 P_i の走行回数 (day)

n ：1日あたりの1レーン走行数 (=30,000台)

p_{pi} ：輪荷重 P_i の走行確率 (図-7)

p_x ：各区間の輪荷重走行回数比率 (図-15)

式(1)により与えられる輪荷重の一日あたりの走行回数は式からも明らかのように各区間で異なると同時に想定する荷重 P_i によっても異なる。そこで、本研究では検討対象範囲に含まれる全ての区間・荷重についてその数量を求めている。

3.3. S-N 曲線を用いた寿命の推定

本研究では評価に使用するS-N曲線として、文献6)に示されている次の式を使用することにした。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.520 \quad (2)$$

ここで、 P ：輪荷重 (tf)

P_{sx} ：床版の押し抜きせん断荷重 (tf)

N ：輪荷重 P の走行回数

この式を用いることにより、様々な輪荷重が走行した影響を基準となる輪荷重の走行回数 (以後、等価繰り返し回数と呼ぶ) に変換し比較することができる。等価繰り返し回数は次の式で与えられる。

$$N_{eq,i} = (P_i/P_0)^{12.76} \times N_i \quad (3)$$

ここで、 $N_{eq,i}$ ：基準輪荷重 P_0 に変換された等価繰り返し回数

P_i ：輪荷重 (tf)

P_0 ：基準輪荷重 (tf)

N_i ：輪荷重 P_i の走行回数

本研究では、検討対象部位の床版を分割して評価することにした結果、輪荷重走行位置と輪荷重の影響を受ける区間とが異なるという条件で計算を実施することになった。そこで、本研究ではArea i の受ける損傷を次の式により評価することにした。

$$N_{eq,j} = \sum_l Q_{inf,l} \cdot (P_j/P_0)^{12.76} \cdot N_{pj,l} + \sum_r Q_{inf,r} \cdot (P_j/P_0)^{12.76} \cdot N_{pj,r} \quad (4)$$

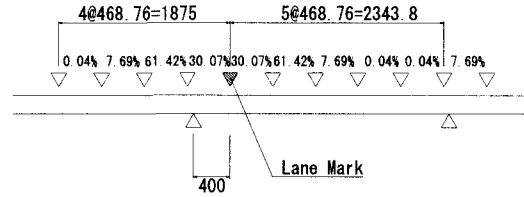
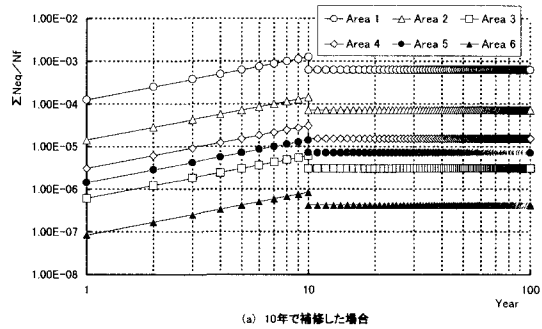
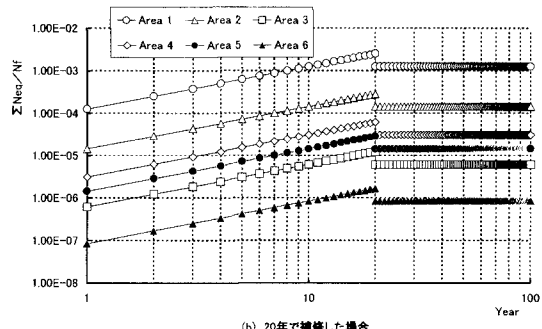


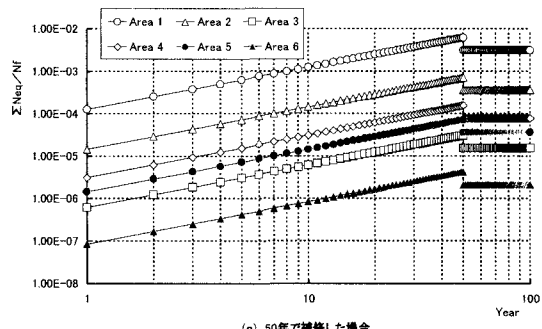
図-15 検討区間における荷重走行頻度の分布状況



(a) 10年で補修した場合



(b) 20年で補修した場合



(c) 50年で補修した場合

図-16 損傷蓄積度計算結果

ここで、 $N_{eq,i}$ ：Area i が1日に与えられる等価繰り返し回数

$Q_{inf,l}$ ：Area i の左側のAreaに輪荷重があるときのせん断応力比 (Q_{bridge}/Q_{exp} ：図-14参照)

$Q_{inf,r}$ ：Area i の右側のAreaに輪荷重があるときのせん断応力比 (Q_{bridge}/Q_{exp} ：図-14参照)

P_j ：走行輪荷重 (tf)

P_0 ：基準輪荷重 (tf：本研究では10tfとして計算)

$N_{pj,l}$ ：Area i の左側区間の輪荷重 P_j 走行数 (回/day)

$N_{pj,r}$ ：Area i の右側区間の輪荷重 P_j 走行数 (回/day)

この結果、1年に基準となる輪荷重がどれだけの回数走行したのかを知ることができるが、このままでは寿命との相関が不明確で

あるので、本研究では次式の中に示される損傷蓄積度を定義し、以下の式が成立する場合に床版が寿命を迎えたと判定することにした。

$$\sum N_{eq} / N_f = 1.0 \quad (5)$$

ここで、 $\sum N_{eq} / N_f$: 損傷蓄積度
 N_{eq} : 等価繰り返し回数
 N_f : 基準輪荷重における破壊回数

本研究では式(5)に使用する N_f として走行輪荷重を $10t$ にしたときに式(2)により与えられる N_f を用いることにした。本研究で検討対象とした床版の補修前・後の床版の状態から得られる1年あたりの損傷蓄積度を表-1に示す。この表に示された結果から得られる床版各部位における損傷蓄積度の変動から床版寿命の推定を行い、補修時期と寿命の関係について考察を加えることにした。

4. 推定結果と考察

本研究の検討対象橋梁で補修時期を供用開始10年後、20年後、50年後と仮定して算出された損傷蓄積度の変動を図-16に示す。この図を見ると明らかのように床版の損傷の蓄積はその部位に影響を与える車両の数量に大きく影響されており、Area1とArea6のように、主桁との位置関係が同じような部位であっても損傷蓄積の度合いが全く異なる (Area1:Area6=1000:1) ことがわかる。したがって、床版の疲労寿命を推定するためには、床版の部位を特定するのではなく、床版の上を走行する荷重の位置、頻度、大きさを正確に把握することが重要であると考えられる。

また、同じ部位でも補修の時期が違うことで損傷蓄積度の変動にどのような違いが生じるのかを図-17に示す。この図を見ると供用年数100年目の損傷蓄積度は補修時期の損傷蓄積度によってほぼ決定されているといっても過言ではなく、このことから、床版の耐久性を損なわないためには、早期に補修を実施することが効果的であることがわかる。また、この計算結果から損傷蓄積度が1.0となる供用年数、すなわち床版の寿命となる年数を推定したところ表-2のような算定結果を得た。この結果を見ると最短でも 7.99×10^3 年の寿命があるとの結果となり、今回の検討対象とした橋梁の床版は想定した荷重状態に対して十分な耐久性を有していることがわかった。さらに、補修の有無や補修時期による違いに着目すると、補修の前後では床版の寿命に $1:10^4$ ほどの差が認められるのに対し、補修時期の違いによっては大きな差を見出すことはできなかった。これは、床版の補修の前後で床版の押し抜きせん断荷重 (P_{sk}) が大きく変化したことと、各補修時期における補修直前の損傷蓄積度が1よりも十分に小さいことによりもたらされた結果であると考えられる。

表-1 検討対象床版の損傷蓄積度算定結果

	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6
N/Nf (/year:補修前)	1.25E-04	1.42E-05	6.14E-07	3.09E-06	1.43E-06	8.43E-08
N/Nf (/year:補修後)	1.92E-08	2.18E-09	9.41E-11	4.74E-10	2.19E-10	1.29E-11

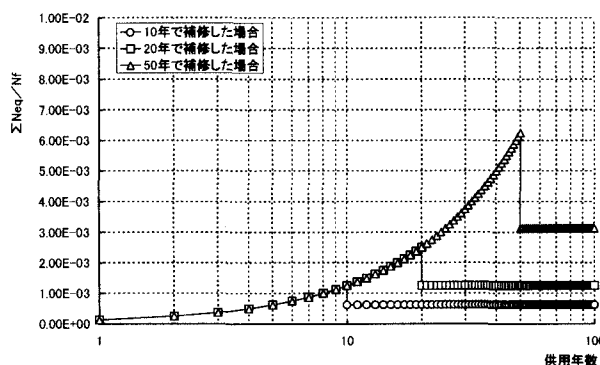


図-17 補修時期による損傷蓄積度の変動の違い

表-2 検討対象床版の損傷蓄積度算定結果

	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6
補修なし	7.99E+03	7.02E+04	1.63E+06	3.24E+05	7.00E+05	1.19E+07
10年目に補修	5.21E+07	4.58E+08	1.06E+10	2.11E+09	4.57E+09	7.75E+10
20年目に補修	5.20E+07	4.58E+08	1.06E+10	2.11E+09	4.57E+09	7.75E+10
50年目に補修	5.18E+07	4.58E+08	1.06E+10	2.11E+09	4.57E+09	7.75E+10

5. まとめ

本研究では、既往の研究により与えられている鉄筋コンクリート床版のS-N曲線から、実際の橋梁において補修を行った場合の寿命推定を実施する順と実際に計算した結果を示した。今回の検討では、採用した橋梁の床版の建設時期が昭和40年代半ばであったにもかかわらず十分な床版厚を有していたために、現実的でない計算結果を得るという結果になり、計算結果の妥当性については適切な検討を加えるまでには至らなかった。今後は実際に損傷が発生した橋梁のデータを入手し、同様の計算手法によって寿命推定がどの程度の精度でできるのかを検討する必要がある。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：ミニマムメンテナンス橋に関する研究，土木研究所資料第3506号，平成9年6月
- 2) (社)日本道路協会：道路標示方書・同解説 I 共通編，平成14年3月
- 3) 建設省土木研究所：設計活荷重に関する研究，土木研究所資料第701号，昭和46年11月
- 4) 谷垣博司：近畿管内の道路橋における交通荷重の実態から見た路線別交通特性と橋梁部材の確率論的安全性評価に関する基礎的研究，大阪大学大学院修士論文，平成8年2月
- 5) 板野次雅，松井繁之：炭素繊維シートによる床版補強に関する研究，第1回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.277-282，1998.
- 6) 松井繁之：橋梁の寿命予測，安全工学 Vol. 30, No.6, pp.432-440, 1991