

報告 道路橋 RC 床版に関するせん断疲労耐力評価式の適用検討

岩立 次郎*1・大島 義信*2・渡辺 健*3

要旨：道路橋の RC 床版の劣化については、実橋梁の実態と様々な実験や解析から荷重の繰り返しによる疲労劣化の機構が検証され、その評価式が提案されている。一方、通常の道路橋設計においては、これまでの実橋梁の実態や設計基準の変遷により規定された最新の基準に基づき設計され、それらの評価式を用いて疲労に関する照査を行うことは一般的ではない。本稿では、せん断疲労耐力評価式の適用性を確認するため、実交通の軸重データを用いて既設橋床版の疲労耐力の照査や補強工法の効果検証、設計基準の適用条件に当てはまらない特殊な条件下における疲労耐力の照査を行い事例として報告する。

キーワード：道路橋 RC 床版, 移動荷重, せん断疲労耐力, 軸重データ

1. はじめに

道路橋においては、2014 年から 5 年に 1 回の点検の実施とその結果に基づく必要な措置の実施が法令により定められた。道路橋における鉄筋コンクリート床版(以下、RC 床版)は、走行車両の荷重の影響を直接受ける部材であり、古い路線や交通荷重条件や環境の厳しい路線においては劣化が著しく、補修、補強、取替え等の措置が必要な橋梁が多く確認されている。

道路橋の RC 床版の措置判断は、橋梁定期点検要領〔国土交通省〕¹⁾等に基づく点検および診断により総合的に行われるが、耐荷性能や残存供用期間における供用性を数値的に評価する手法は一般的に用いられておらず、膨大な構造物を限られたリソースで効果的に措置するために、客観的で定量的な評価手法が望まれている。

道路橋の RC 床版のように移動する荷重を受ける部材の疲労耐力の評価は、実験や解析による研究が進められてきたが、部材の形状寸法、部材の支持条件、作用荷重の大きさ、作用頻度、作用順序、作用位置、環境条件等についての十分な整理がなされておらず示方書等で一般化するまでには至っていない。土木学会のコンクリート標準示方書〔2012 年版〕では、当時の疲労設計法では面部材が移動荷重を受ける場合の疲労寿命を予測できないことが解説に記載され、〔2017 年版〕では、実験的評価、実験に基づいた評価、数値解析のいずれかの方法に基づ

いて行うことが解説に記載された。その後も、移動荷重を受ける面部材が繰り返し載荷を受けることでせん断破壊に至る過程については、実験および実験に基づく疲労耐力の定式化、解析的検討等様々な研究が行われており、一定の精度での評価が可能となってきている。

一方、RC 床版の劣化メカニズムは移動する繰り返し荷重によるせん断耐力の低下に加え、塩害、凍害、アルカリシリカ反応等による床版上面のコンクリートの劣化が床版の耐力を低下させている実態も確認されており、荷重の繰り返しによる疲労だけで床版の耐久性を評価できないことも分かってきている。

本稿では、既往の研究により提案されている RC 床版のせん断疲労耐力の評価式の適用性を確認するため、実交通の軸重データを用いて既設橋床版の疲労耐力の照査や補強工法の効果検証、設計基準の適用条件に当てはまらない特殊な条件下における疲労耐力の照査を行った。

2. 道路橋鉄筋コンクリート床版の劣化メカニズム

RC 床版の劣化メカニズムは、移動する輪荷重による押抜きせん断力の繰り返しによる疲労と(図-1)、床版上面の劣化(土砂化)の複合と想定されている。

移動する荷重を受ける面部材の押抜きせん断による疲労については、定点の繰り返し載荷に対し、ひび割れの進展や材料の劣化の過程で応力の再配分が生じ、合わ

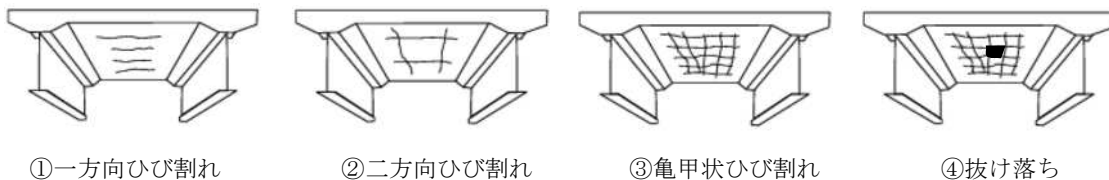


図-1 床版の疲労劣化のメカニズム

*1 中日本高速道路株式会社 (正会員)

*2 株式会社ナカノドー建設 (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 (正会員)

せて荷重の移動による応力の方向が刻々と変わる状況等から、鉄筋やコンクリートの個々の材料的な強度の低下だけでは評価できない複雑な劣化機構となっていると想定される。これらのことは、移動荷重による多数の実験結果から、破壊までの過程と実床版の劣化現象が関連付けられ、乾燥状態と湿潤状態において疲労の評価式が提案されている²⁾。水を上面に張った湿潤状態での移動荷重による実験においては、床版内に浸入した水の水圧により床版上面の劣化（土砂化）が促進され抵抗断面の減少によるせん断耐力の低下が再現されているものと推測される。

土砂化については、水圧の影響に加え、塩化物イオンの浸入による鋼材の腐食膨張、凍害、アルカリシリカ反応等の作用が時間の経過とともに複合的に生じていると考えられ³⁾、その劣化過程は更に複雑となり、現在のところ定量的な評価にまでは至っていない。

これら RC 床版の劣化メカニズムについては、解析的なアプローチによっても検証されており⁶⁾⁷⁾、実験結果の再現が一定の精度で可能にはなっている。

3. RC 床版のせん断疲労耐力の評価式

本稿では、道路橋の鉄筋コンクリート床版のせん断疲労耐力の評価式として、これまで実施されてきた実験結果を基に導き出された評価式⁴⁾を適用する。

本式は二辺支持もしくは四辺支持された鉄筋コンクリートの床版において、支持点の中央に移動する一定荷重を受ける場合の設計疲労耐力 V_{rpd} が以下のように求められるとされている。

$$V_{rpd} = 2V_{bc} (1 - K \log N) / \gamma_b \quad (1)$$

ここに、 K ：乾燥状態では 0.057、湿潤状態では 0.061

N ：繰り返し回数（回）

γ_b ：部材係数であり、 V_{rpd} では一般に 1.0 とし
てよい。

V_{bc} ：移動する一定荷重を受ける鉄筋コンクリート
床版のせん断耐力

$$V_{bc} = \alpha_e \cdot \alpha_B \cdot \beta_{p1} \cdot \beta_{p2} \cdot \beta_d \cdot f_{vmcd} \cdot b_{w,e} \cdot d / \gamma_b \quad (2)$$

α_e ：環境条件を表す係数で、乾燥状態では 1.0、湿潤状態では 0.69

α_B ：支持条件を表す係数

二辺単純・二辺弾性支持の場合は 1.0

二辺単純・二辺自由として扱える場合は 0.64

四辺単純支持として扱える場合は 1.5

β_{p1} ：主鉄筋の影響を表す項

$$\beta_{p1} = (100 p_1)^{\left\{ \frac{1}{3} + 0.5(100 p_2) \right\}}$$

β_{p2} ：配力鉄筋の影響を表す項

$$\beta_{p2} = 1 + 0.125 \frac{p_2}{p_1}$$

p_1 ：主鉄筋比

p_2 ：配力鉄筋比

$\beta_d = \sqrt[4]{1000/d}$ ただし、 $\beta_d > 1.5$ となる場合は 1.5 とする。

$$f_{vmcd} = 0.32 \sqrt[3]{f'_{cd}} \quad (3)$$

f'_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度 (MPa)

$b_{w,e}$ ：腹部の幅 (mm)

$$b_{w,e} = b + 2d_a$$

b ：載荷版の橋軸方向の辺長 (mm)

d_a ：主鉄筋の有効高さ
と配力鉄筋方向の有効高さの平均 (mm)

d ：主鉄筋の有効高さ (mm)

γ_b ：部材係数であり、 V_{bc} では一般に 1.3 とし
てよい。

床版の上面が湿潤状態の場合は、乾燥状態の場合に比べ疲労耐力が著しく低下することが実験により確認されており、式(1)では環境条件の係数 α_e として設定している。式(3)に用いる f'_{cd} は、コンクリートの設計基準強度 f'_{ck} を材料係数 γ_c で除した値である。また、部材係数 γ_b は V_{rpd} に対しては 1.0 を、 V_{bc} に対しては 1.3 を用いてよい。

なお、実際の道路橋 RC 床版においては移動荷重の繰り返しによる疲労に加え、塩害、凍害、アルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化や鋼材の腐食も同時に進行しており、床版の耐力の評価においては、それらを複合的に考慮する必要があるが、式(1)は、移動荷重による押抜きせん断の疲労と、水の影響を実験的に確認し考慮したものであり、塩害、凍害、アルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化や鋼材の腐食は考慮されていない。

一般に、道路橋 RC 床版の設計においては、防水層の設置により内部に進入する水を抑制することを前提としており、塩害、凍害、アルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化等に対しては、床版厚や配筋を変更するのではなく、別の方法による抑制を検討する必要がある。

道路橋 RC 床版は道路橋示方書⁵⁾に基づき設計され以下の 1) から 7) が前提となっていることから、式(1)を用いて RC 床版を評価する場合においては留意が必要である。

- 1) 辺長比が 1 : 2 以上の 1 方向版としてモデル化できる床版
- 2) 設計基準強度 24 N/mm² 以上の鉄筋コンクリート床版
- 3) 鉄筋は、異形鉄筋 13, 16, 19, 22 mm を、中心間隔 100 mm 以上かつ 200 mm 以下で配置

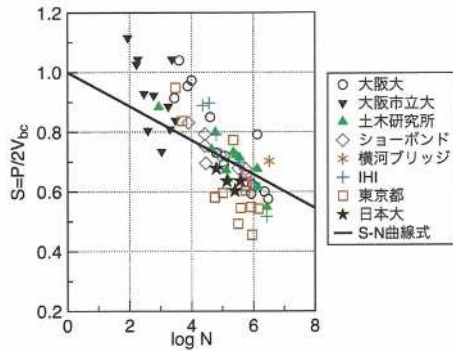


図-2 実験と推定式の比較⁴⁾

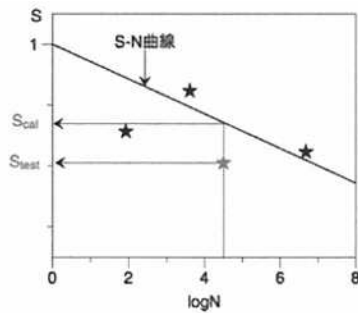


図-3 Scal と Stest の定義⁴⁾

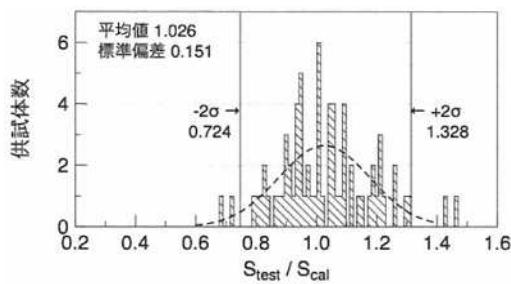


図-4 推定式の精度分析⁴⁾

- 4) 床版支間方向の引張主鉄筋の中心間隔は床版厚さを超えない
- 5) 作用荷重に対して鉄筋の応力度が 120 N/mm^2 を超えない
- 6) 鉄筋のかぶり 30 mm 以上で最小床版厚は 160 mm
- 7) 圧縮側には引張側の $1/2$ 以上の鉄筋を配置

また、式(1)の根拠となる実験に用いられた床版は、床版厚さが $70 \sim 220 \text{ mm}$ 、主鉄筋比 p_1 が $0.74 \sim 1.74\%$ 、配力鉄筋比 p_2 が $0.26 \sim 1.4\%$ 、コンクリートの実圧縮強度が $13.6 \sim 54.0 \text{ MPa}$ のものであり、式(1)を用いる対象の部材が、この範囲を超える場合は注意が必要である。なお、床版厚が 70 mm の実験は、床版支間や載荷荷重も小さい縮小モデルの実験であり、 70 mm の床版厚の評価を式(1)で行ってよいということではない。

移動する荷重を載荷した多数の実験結果と式(1)に基づく S-N 曲線式の関係が 図-2 のように整理されている⁴⁾。また、式(1)の精度を確認するため、参考文献⁴⁾で

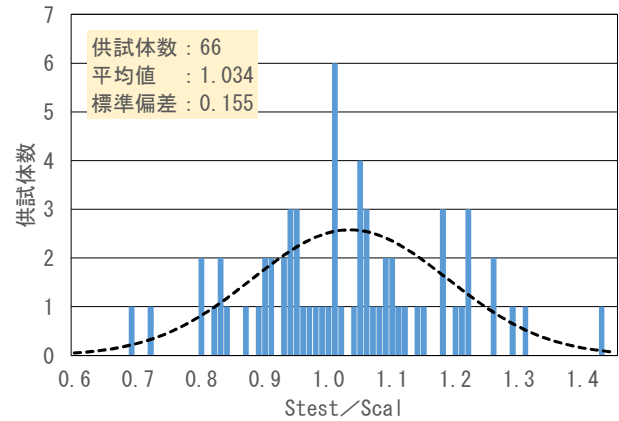


図-5 データ選別後の推定式の精度分析(公開 66 体)

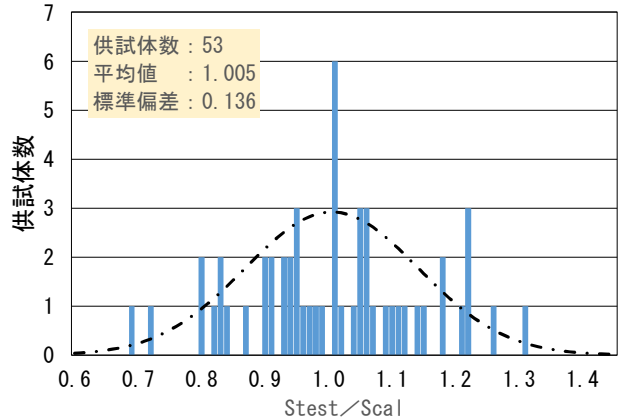


図-6 データ選別後の推定式の精度分析(縮小モデル除外)

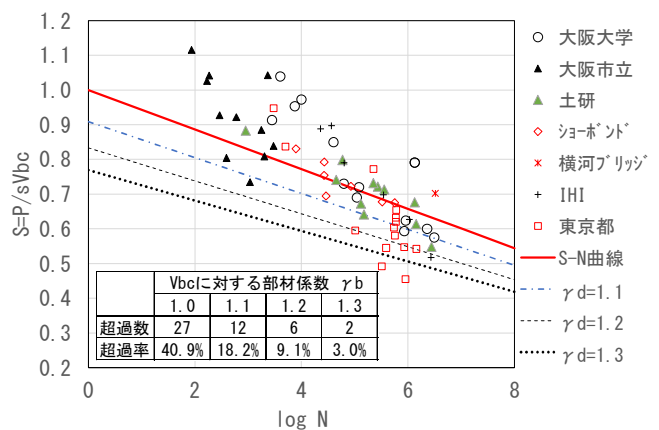


図-7 部材係数の検討

は S-N 曲線式に実験結果を代入することにより逆算して得られる荷重比 $Scal$ と、S-N 曲線式により得られるせん断耐力と実験荷重の比 $Stest$ を 図-3 のように定義して整理している(図-4)。ここでは、同様の手法で公開されている実験データ 66 体(図-5)と、供試体のプロポーシオンが縮小モデル(床版厚 70 mm)のデータを除いたもの 53 体(図-6)を整理した。平均値および標準偏差とも大きな差はなく、実験と評価式の精度は一定程度あると考えられる。

式 (1) および式(2)における部材係数 γ_b を設定する

表-1 試算に用いる床版の諸元

	ケース A	ケース B	ケース C
適用示方書	S39 鋼道路橋設計示方書	S47 道路橋示方書	H8 道路橋示方書
床版厚 (mm)	190	200	250
設計基準強度 (N/mm ²)	24	24	24
主鉄筋 () は圧縮側	D16@150 mm (D16@300 mm)	D19@125 mm (D19@250 mm)	D19@150 mm (D19@300 mm)
配力鉄筋 () は圧縮側	D13@300 mm (D10@300 mm)	D16@125 mm (D16@250 mm)	D16@125 mm (D16@250 mm)
床版支間 (mm)	3000	3000	3000

※参考文献 8) で提示されている諸元を適用

ために実験データ 66 体に対し、部材係数を変化させて図-7 のように整理した。その結果、 V_{rpd} に対しては 1.0 を、 V_{bc} に対しては 1.3 を用いることで非超過確率 5% を担保できることを確認した。

4. 評価式を用いた計算例

4.1 既設 RC 床版の疲労耐力評価

道路橋の RC 床版の設計基準は、その時々々の設計基準で建設された橋梁の床版が現場の条件によって変状する状況を踏まえ、床版厚や鉄筋応力の制限値が見直され変遷してきた。ここでは過去の基準で設計された床版と現在の基準で設計された床版の疲労耐力について、式(1)を用いて比較を行った。なお、以下の試算では、道路橋を対象としているため荷重や断面力の算出は道路橋示方書（以下、道示）を参考にした。

(1) 床版の諸元

試算に用いる床版は、昭和 39 年、昭和 47 年、平成 8 年のそれぞれの道示^{9) 10) 11)} に従い設計されたものとし、表-1 のとおりの諸元とした。

(2) 使用する実交通荷重の頻度

疲労耐力の算定にあたって使用する実交通荷重の頻度については、実際の路線において軸重を調査した高速道路における一つのデータ、一般国道における三つのデータの計四つのデータとした（図-8）。

(3) 等価断面力への変換

式(1)から強度比を $\frac{V_{rpd}}{2 V_{bc}} = S_i$ とすると S-N 曲線は

$$S_i = 1 - K \log N_i \quad (4)$$

となり（ただし、乾燥の場合 $K = 0.057$ 、湿潤の場合 $K = 0.061$ ）

$$\log N_i = \frac{1-S_i}{K} \quad (5)$$

となることから、以下のように変形できる。

$$N_i = 10^{\frac{1-S_i}{K}} \quad (6)$$

よって、100 年間（＝設計耐用期間）において強度比 S_i の荷重が n_i 回繰り返されたことによる累積損傷度

D_I は、次のようになる。

$$D_I = \Sigma \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = \Sigma \left(\frac{n_i}{10^{\frac{1-S_i}{K}}} \right) \quad (7)$$

一方、T 荷重（T=100 kN）を繰返し回数 n_T 回繰り返しした場合の累積損傷度 D_T は、強度 V_{bc} に対する比率 $S_T = 100/2V_{bc}$ として、次のようになる。

$$D_T = \frac{n_T}{N_T} = \frac{n_T}{10^{\frac{1-S_T}{K}}} \quad (8)$$

よって、100 年間の荷重履歴（ S_i, n_i ）と同等の累積損傷度を与える T 荷重による繰返し回数 n_T は、

$$D_T = D_I \quad (9)$$

として、

$$n_T = N_T D_I = 10^{\frac{1-S_T}{K}} D_I \quad (10)$$

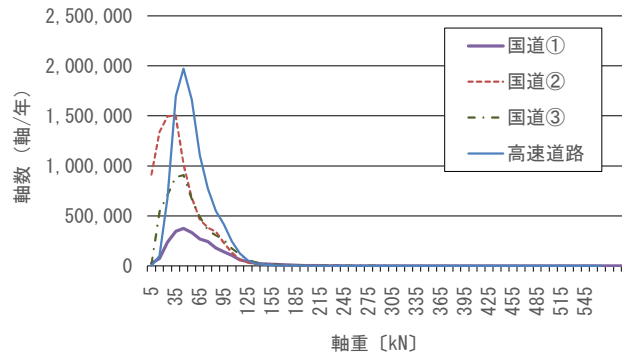


図-8 軸重の頻度分布

で与えられる。また、 n_T 回の繰返し荷重によって破壊する強度比 S_{n_T} は、次のようになる。

$$S_{n_T} = 1 - K \log n_T \quad (11)$$

100 年間の荷重履歴による作用、すなわち T 荷重による n_T 回の繰返し作用により疲労破壊が生じないためには、T 荷重による強度比 S_T が、 n_T 回繰返し荷重すると破壊する強度比 S_{n_T} よりも小さければよい。すなわち、以下を照査すればよい。

$$S_T \leq S_{n_T} \quad (12)$$

(4) 余裕度の試算

ここでは、断面力ベースでの疲労照査を行う。上述のとおり、ある軸重分布から算出された繰返し回数 n_T で

表-2 余裕度の試算結果

	軸重データ	ケース A		ケース B		ケース C	
		乾燥	湿潤	乾燥	湿潤	乾燥	湿潤
余裕度 S_T/S_{nr}	高速道路	0.12	0.10	1.22	1.19	1.33	1.29
	国道①	0.45	0.42	1.40	1.33	1.48	1.41
	国道②	0.72	0.68	1.70	1.64	1.79	1.73
	国道③	0.05	0.02	1.06	1.01	1.15	1.10
適用示方書		S39 道示		S47 道示		H8 道示	
V_{bc} (kN)		103.7		168.2		174.1	

破壊に至る強度比を S_{nr} とし、以下では余裕度を S_T/S_{nr} と定義した。試算結果を表-2 に示すが、S39 道示により設計された床版（ケース A）は全ての軸重データで耐力不足となり、S47 道示（ケース B）および H8 道示（ケース C）は強度比として 1.0~1.7 倍程度の疲労耐力を有することになった。H8 道示の場合、余裕度は想定する荷重履歴によって異なるが、過積載が最も過酷な軸重データにおいても 1.1 程度の余裕度が確保されていた。

4.2 補強効果の比較

S39 道示によって設計された床版（表-1 のケース A）を、上面増厚工法を適用して補強する場合、増厚の厚さの違いによる補強の効果について、式(1)を用いて疲労耐力を試算し比較した。

補強方法として、既設の床版を 10 mm 切削し、鉄筋は追加設置せず鋼繊維補強コンクリートを 60 mm 敷設した上面増厚工法¹²⁾の例の断面図を図-9 に示す。補強効果の試算における設計疲労耐力の算定にあたっては、既設コンクリートと同等のコンクリートが増厚されたものとし、床版厚を 190 mm から 250 mm まで変化させ、図-8 の国道②の軸重データを用いて計算を行った。床版厚が大きくなると、式(2) で示されるせん断耐力が増加し、設計疲労耐力も大きくなる。

表-3 および 図-10 に示すように、床版厚が 220 mm 以上あれば設計耐用期間 100 年に対する余裕度 1.0 を超える結果となる。なお、式(1) は本試算のような補強された床版の実験データを踏まえた式ではないため、この結果の取り扱いについては留意する必要がある。

4.3 道路橋示方書の基準値を超える荷重が想定される床版の設計例

(1) 設計の条件

工場内の道路において、重機が往来する工場内の道路橋床版等、道示で想定する標準値を超える荷重が繰返し作用する状況を想定した。この場合、道示による標準設計では疲労耐力が不足する可能性があるため、予想される荷重履歴に基づき、疲労耐力について検討を行った。荷重条件は、軸重 500 kN の重車両が年間 10,000 軸走行するとし、設計耐用期間は 100 年とした。

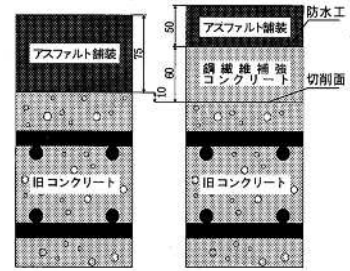


図-9 上面増厚工法の断面図

表-3 補強を行った場合の余裕度の試算結果

床版厚 (mm)	設計疲労耐力 (kN)	余裕度	
		湿潤	乾燥
190 (補強前)	103.7	0.68	0.72
200	111.6	0.80	0.84
210	119.8	0.92	0.96
220	128.4	1.05	1.09
230	136.9	1.18	1.22
240	144.0	1.28	1.33
250	151.4	1.40	1.45

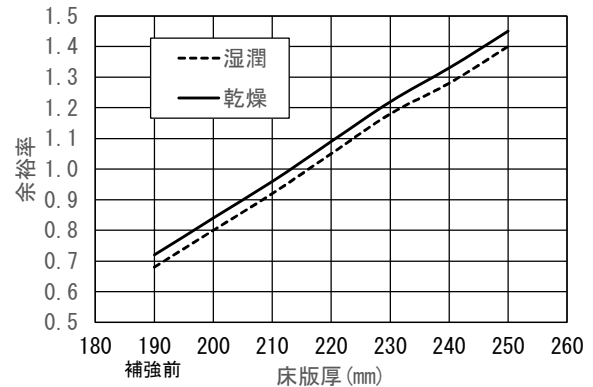


図-10 床版厚と余裕率

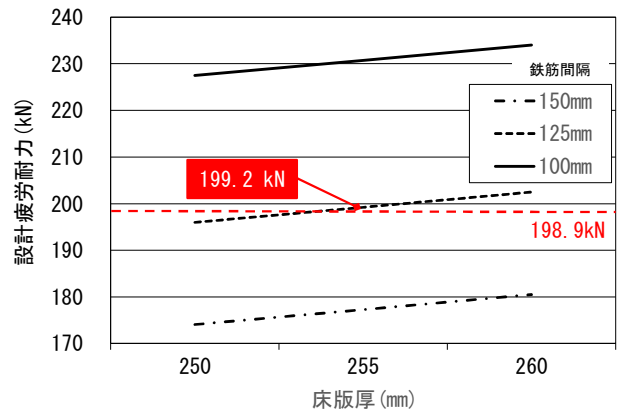


図-11 床版厚・鉄筋間隔と設計疲労耐力

(2) 設計手順

以下の手順で照査を行った。

手順 1 道示を用いた標準設計を行う（荷重条件は一般的な値 $T=100\text{kN}$ を使用。ここでは、表-1 ケース C の諸元データを用いる）。

手順 2 評価式 式(1) を用いて、疲労照査を行い、設計耐用期間における余裕度を照査し、余裕度が 1.0 を下回る場合、諸元をアップする。

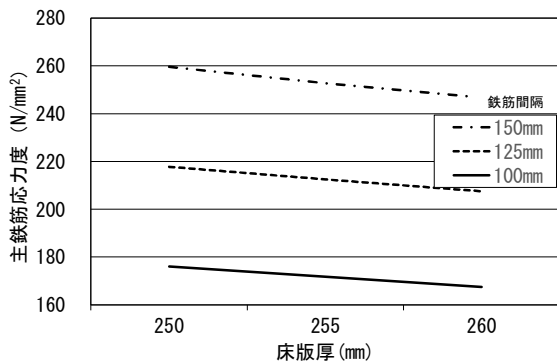


図-12 床版厚・鉄筋間隔と主鉄筋の応力度

(3) 試算結果

表-1 のケース C の諸元データを用いて算定を行うと、軸重 500 kN が年間 10,000 軸走行した場合に湿潤状態の余裕度が 1.0 以上となるのは、設計疲労耐力が 198.9 kN 以上の場合であった。

ケース C の設計疲労耐力は 174.1 kN であるが、床版厚と主鉄筋間隔を変化させると、設計疲労耐力は 図-11 のようになる。この結果から、主鉄筋の間隔を 150 mm から 125 mm に、床版厚を 250 mm から 255 mm にすることで設計疲労耐力が 199.2 kN となり、余裕度は 1.0 を上回る。

一方、道示で示されている床版の曲げモーメント式を使い、 $P=250\text{kN}$ とした断面力（軸重 500 kN の輪荷重とし、床版支間 3,000 m を想定）から鉄筋応力度を算出すると 図-12 のような値となり、主鉄筋間隔 125 mm、床版厚 255 mm の場合でも道示に規定されている鉄筋応力度の制限値 120N/mm^2 を超過していた。

なお、道示における鉄筋応力度の制限値 120N/mm^2 は、 $P=100\text{kN}$ を前提とした RC 床版の疲労耐力を担保する規定であり、 $P=250\text{kN}$ とする等前提条件が異なる場合の制限値については示されていない。

5. まとめ

本稿では、既往の研究により提案されている RC 床版のせん断疲労耐力の評価式の適用性を確認するため、実

交通の軸重データを用いて既設橋床版の疲労耐力の照査や補強工法の効果検証、設計基準の適用条件に当てはまらない特殊な条件下における疲労耐力の照査を行った。

新設の道路橋床版は、道示に基づき設計されるため、新設橋の実設計において本稿で紹介した疲労耐力評価式が標準として使われることは想定されない。しかし、本稿で紹介したとおり、既設構造物の疲労耐力の比較・評価や補強効果の確認、道示では想定していない条件での設計等では、その判断の指標として本評価式を活用することができると思慮する。

今後ますます増加する道路橋床版の維持管理において、限られたリソースの中で効率的かつ効果的に措置を実施していくことが求められており、本稿の事例がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局 国道・技術課：橋梁定期点検要領（平成 31 年 3 月），2019.3
- 2) 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集，Vol.9，No.2，pp.627-632，1987
- 3) 道路橋コンクリート床版の土砂化対策に関する調査研究，土木研究所資料，2020.3
- 4) 竹田京子：道路橋コンクリート床版の疲労損傷機構と寿命予測，早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻 構造設計研究，2021.2
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成 29 年 12 月，2017.12
- 6) 土木学会構造工学委員会：数値解析による道路橋床版の構造検討小委員会報告書，2019.9
- 7) 土木学会鋼構造委員会：道路橋床版の維持管理マニュアル 2020，2020.10
- 8) 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国土技術政策総合研究所資料，第 28 号，2002.3
- 9) 日本道路協会：鋼道路橋示方書，昭和 39 年 6 月，1964.6
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，昭和 47 年 3 月，1969.3
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成 8 年 11 月，1996.11
- 12) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領第二集 橋梁保全編，令和 2 年 7 月，2020.7