

論文

鋼道路橋 RC 床版の疲労設計に関する一提案

東山浩士*, 大久保宣人**, 久保圭吾***, 桐川潔****, 小坂崇*****

*博 (工), 近畿大学教授, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

**博 (工), 高田機工㈱, 技術本部 (〒556-0011 大阪市浪速区難波中 2-10-70)

***博 (工), 宮地エンジニアリング㈱, 関西支社設計・開発部 (〒550-0001 大阪市西区土佐堀 1-4-11)

****修 (工), ピーエス・コンストラクション㈱, 技術本部技術部 (〒105-7365 東京都港区東新橋 1-9-1)

*****博 (工), 阪神高速道路㈱, 建設事業本部神戸建設部 (〒650-0023 神戸市中央区栄町通 1-2-10)

本研究では, 輪荷重の走行位置を考慮した鋼道路橋 RC 床版の疲労設計を提案するため, RC 床版に作用するせん断力に着目した検討を行った. まず, 各研究機関にて実施された RC 床版に対する輪荷重走行試験結果を収集し, 数値解析から得られる作用せん断力と梁状化した RC 床版の押抜きせん断耐力から S-N 線を求めた. また, 数値解析により輪荷重の走行位置を考慮した作用せん断力の回帰式を作成するとともに, 国土交通省国土技術政策総合研究所が実施した軸重測定結果を用いて各床版支間長を有する RC 床版の疲労寿命の試算を行った. その結果, 床版支間長が短い RC 床版では耐用年数 100 年を下回る可能性があることを示唆するとともに, 設計基準強度を考慮した疲労設計の必要性を示した.

キーワード: 鋼道路橋 RC 床版, せん断力, 疲労設計, 設計 S-N 曲線

1. はじめに

現行の道路橋示方書・同解説¹⁾における鋼道路橋 RC 床版の設計では, 床版支間に応じた最小全厚および大型車交通量による係数から床版厚を求め, 設計曲げモーメントに対してコンクリートおよび鉄筋の応力度が制限値以下であれば疲労に対する耐久性を満足する見なし規定となっている. また, 自動車荷重による疲労損傷のみならず, 塩害や凍害などによる材料劣化の進行による RC 床版の変状も顕在化しつつある.

一方, いくつかの研究機関が所有する輪荷重走行試験機を用いた RC 床版の疲労試験がこれまでに行われてきた. それぞれの輪荷重走行試験機の仕様が異なっていることもあり, 各研究機関において得られた試験結果を基に, それぞれの輪荷重走行試験機に応じた S-N 曲線が提案されている^{2)~4)}. 土木学会鋼構造委員会に設置された「道路橋床版の調査研究小委員会⁵⁾」および「道路橋床版の合理化検討小委員会⁶⁾」は, 各研究機関と協働して同一構造の RC 床版に対する共通疲労試験を実施し, 各試験機の仕様や特徴が疲労試験結果(疲労寿命)に及ぼす影響を検討している. このなかで, 載荷板寸法や載荷板自体の構造の違いによる短辺付近に作用するせん断力, 載荷板幅と床版支間長の違いなどが試験結果に影響を及ぼしているとされている⁶⁾.

川井ら⁷⁾は各研究機関にて実施された RC 床版の輪荷重走行試験結果を収集し, 試験結果のばらつきを確率統計分析により評価し, RC 床版の疲労設計に適用するための破壊確率に応じた設計 S-N 曲線を提案している. また, 竹田ら⁸⁾は, S-N 曲線を構築する際のせん断耐力に着目し, RC 床版が梁状化したときの押抜きせん断耐力について実験と解析から検討している. さらに, 上記と同様に, 各研究機関の輪荷重走行試験結果を用いた S-N 曲線を提案している.

ここで, いずれの S-N 曲線も RC 床版の中央に輪荷重を走行させた試験結果を基に構築されている. しかし, 実橋床版における自動車荷重は必ずしも床版支間中央を走行せず, 支持桁間隔や車線間隔などにより走行位置が変動する. 佐光ら⁹⁾は有限要素法を用いて自動車荷重の作用位置を変化させた際の床版に作用するせん断力を算出し, 疲労寿命と自動車荷重の作用位置との関係について考察している. 一般に輪荷重が床版支間中央から支持桁へ近づくに伴って作用せん断力は増大する. この現象を考慮した RC 床版の輪荷重走行試験による研究は非常に少ない^{10), 11)}.

支持桁付近の RC 床版にはハンチが設けられ, また連続版の支持桁近く(支点から $L/6$ の断面, L は支持桁の中心間隔)においては, 支間中央の引張側主鉄筋の 1/2 が上段へ折り曲げられる. また, 支持点の境界条件や一

表-1 各研究機関で実施された輪荷重走行試験

研究機関	試験体名	出典元
大阪大学	DR-1, DR-2, DR-5, DR-7, DR-8, B-1~B-5, N-1, N-2, 共通-1, 共通-2	5), 13)~15)
土木研究所	RC-39-1~RC39-9, RC-47-1, N, D, 共通-1	3), 5), 18)
寒地土木研究所	RB-CON110, RB-CON150, RB-CON190, DB-CON150	16)
横河ブリッジ	共通-1	5)
IHI	IHI-1, IHI-2, IHI-4~IHI-6, 共通-1	5), 17)

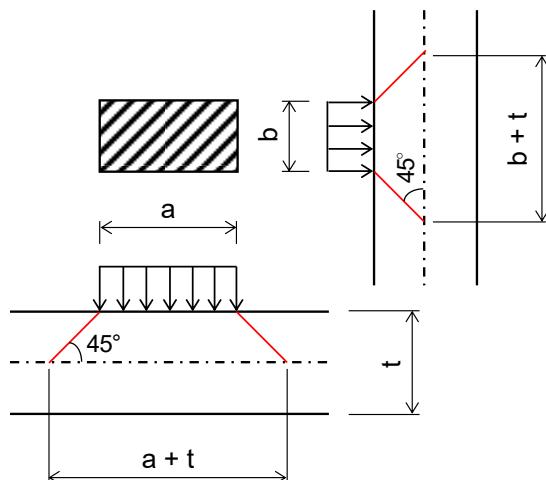


図-1 輪荷重の分布幅

手効果などによってもせん断抵抗機構が変化することから、床版の中央点からある範囲以上の偏心載荷の場合、疲労寿命の低下は生じないとも考えられるが、不明な点が多く残されている。

そこで、鋼道路橋 RC 床版の疲労設計に向けた一助とする目的で、既往の輪荷重走行試験結果と数値解析結果を基に検討を行った。まず、各研究機関にて実施された輪荷重走行試験に供された RC 床版について、輪荷重載荷時に主鉄筋断面に作用する単位幅あたりの最大せん断力を数値解析により求めた。次に、この最大せん断力が梁状化した RC 床版の梁幅に作用するとして、松井²⁾が提案した梁状化した RC 床版の押抜きせん断耐力との関係から S-N 曲線を再整理することにした。さらに、川井ら⁷⁾の設計 S-N 曲線の提案を参考に、疲労試験結果のばらつきを確率統計処理することにより非破壊確率に対応した設計 S-N 曲線を新たに示すことにした。また、単純版および 3 本主桁を想定した連続版について、自動車荷重の作用位置と主鉄筋断面に作用する単位幅あたりの最大せん断力を数値解析により求め、自動車荷重の載荷位置、床版支間長および床版厚をパラメータとした単位幅あたりの最大せん断力の算定式を提案した。最後に、これら提案した式を用い、実橋梁での軸重測定結果¹²⁾に対する疲労寿命の試算を行った。

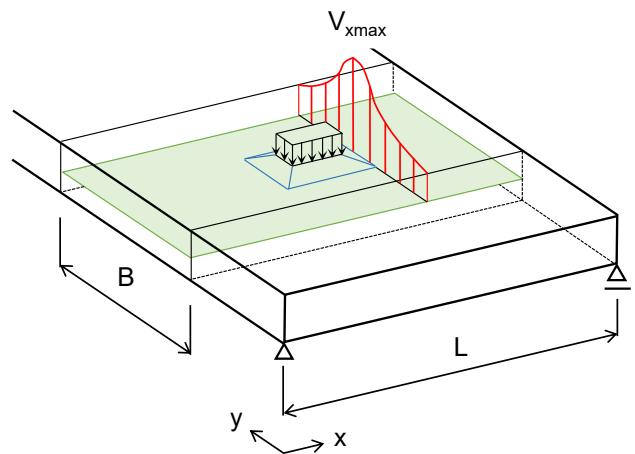


図-2 床版に作用するせん断力

2. 設計 S-N 曲線

2.1 輪荷重走行試験データ

国内の各研究機関にて実施された輪荷重走行試験結果を収集した^{3), 5), 13)~18)}。ここで、本研究に使用したデータは RC 床版の構造詳細およびコンクリートの圧縮強度が明示されており、さらに載荷板ブロックを用いた鉄輪による乾燥状態での走行試験に限定した。表-1 に使用したデータの試験体名および出典元を記載する。

2.2 輪荷重走行試験における最大せん断力

2.1 に示した各 RC 床版の中央点に輪荷重が作用した際の主鉄筋断面に作用する単位幅あたりの最大せん断力を薄板理論に基づく数値解析により求めた。解析モデルは等方性版とし、輪荷重の分布幅は図-1 に示す床版厚の 1/2 まで 45° に拡張した寸法とした。したがって、単位幅あたりの最大せん断力は、図-2 に示すように、この拡張した載荷範囲のエッジに生じる値を用いる。

2.3 設計 S-N 曲線

一例として、松井²⁾が提案した RC 床版の S-N 曲線（乾燥状態）を以下に示す。

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835\log N + \log 1.51965 \quad (1)$$

$$P_{sx} = 2B(f_v x_m + f_t C_m) \quad (2)$$

$$B = b + 2d_d \quad (3)$$

ここに、 P は輪荷重、 P_{sx} は梁状化した RC 床版の押抜きせん断耐力、 N は破壊回数、 B は梁幅、 f_v および f_t はコンクリートのせん断強度および割裂引張強度、 x_m は引張側コンクリートを無視したときの主鉄筋断面の中立軸深さ、 C_m は引張側主鉄筋のかぶり深さ、 b は載荷板の橋軸方向の寸法、 d_d は配力鉄筋の有効高さである。

文献 19)では、床版厚、配筋量およびコンクリート強度を同じとし、床版支間長のみ変化させた RC 床版の輪荷重走行試験の結果が示されている。式(2)より求まる梁状

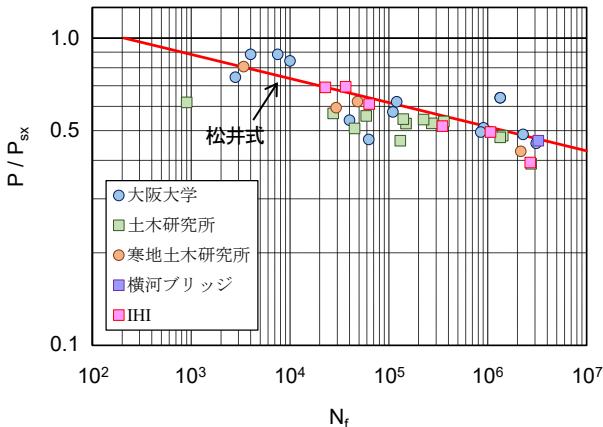


図-3 P/P_{sx} でまとめた S-N 線図

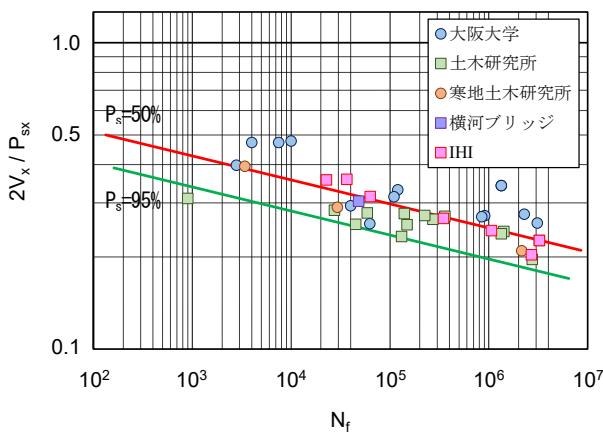


図-4 $2V_x/P_{sx}$ でまとめた S-N 線図

化した RC 床版の押抜きせん断耐力が同じであっても床版支間長の大きい RC 床版の方が疲労寿命は長く、RC 床版の疲労破壊形式が主にせん断力に起因するためであることは周知である。

そこで著者らは、2.2において述べた解析方法により求めた各 RC 床版の単位幅あたりの最大せん断力を基にした S-N 曲線として、次式を構築することにした。

$$\log\left(\frac{2V_x}{P_{sx}}\right) = -m\log N + \log C \quad (4)$$

$$V_x = V_{xmax} B \quad (5)$$

ここに、 V_x は梁幅に作用するせん断力、 V_{xmax} は単位幅あたりの最大せん断力である。なお、 P_{sx} および B は式(2)および式(3)から求めることとする。

式(1)の P/P_{sx} 、式(4)の $2V_x/P_{sx}$ のそれぞれで試験結果を S-N 線図にまとめることにした。ただし、大きい荷重を載荷した輪荷重走行試験結果（破壊回数 4 万回未満）は他のデータに比べてばらつきが大きくなっている。これらを含めた確率統計処理を行うと、大きい荷重の結果に引きずられることになる。そこで、川井ら⁷⁾の検討方法と同様に、破壊回数 4 万回未満のデータは使用せず、S-N 曲線の傾き m は式(1)と同じ値として検討することに

表-2 縦軸 S のばらつき

S-N 曲線	平均値	標準偏差
松井式	0.937	0.115
提案式	1.000	0.143

した。その結果を図-3 および図-4 に示す（破壊回数 4 万回未満も図示）。図-4 に示した平均 S-N 曲線は次式で表される。

$$\log\left(\frac{2V_x}{P_{sx}}\right) = -0.07835\log N + \log 0.73356 \quad (6)$$

次に、輪荷重走行試験における P/P_{sx} と試験時の破壊回数 N_f を式(1)の S-N 曲線に代入して求めた P/P_{sx} 、同様に、輪荷重走行試験における $2V_x/P_{sx}$ と試験時の破壊回数 N_f を式(6)の S-N 曲線に代入して求めた $2V_x/P_{sx}$ からそれぞれの縦軸 S に対するばらつきを評価すると表-2 の結果となった。提案式(6)の標準偏差がやや高い値である。

次に、設計に用いる S-N 曲線を構築するために、表-2 に示した標準偏差から非破壊確率 95% に対する S-N 曲線を求めると、図-4 中の緑線および次式となる。

$$\log\left(\frac{2V_x}{P_{sx}}\right) = -0.07835\log N + \log 0.58077 \quad (7)$$

3. 荷重の移動を考慮した最大せん断力

輪荷重走行試験の結果は床版中央に輪荷重を走行させて得られた破壊回数であるが、実橋梁では必ずしも輪荷重が床版中央を走行するとはいえない。そこで、単純版および 3 本主桁を想定した連続版について、自動車荷重の走行位置に応じた RC 床版に作用する最大せん断力を数値解析により求めることにした。解析方法は 2.2 に述べたのと同様であり、床版支間長 2.0m～4.0m (0.5m 間隔)、床版厚は床版支間長に応じて道路橋示方書・同解説¹⁾の最小・全厚および大型交通量に関する割増しを考慮した。載荷方法は、図-5 に示すように、T 荷重を支点から x 方向に移動した。特に、連続版では外桁に相当する支点付近と中桁に相当する支点付近でのせん断力の大きさが異なり、外桁に比べて中桁に近い方がせん断力は大きくなる。解析結果の一例として、床版支間 3.0m の単純版における最大せん断力（単純版）と載荷位置の関係を図-6 に示す。ここで、 $x/L=0.3$ 付近から最大せん断力の減少が緩やかになっているのは、T 荷重の右側輪荷重が支点を超えた影響である。

次に、載荷位置 x/L 、床版支間長 L および床版厚 t をパラメータとした最大せん断力の回帰式を次式のように求めた。

単純版

$$\frac{V_{xmax}}{P} = 1.0507 + 0.0022L - 0.0007t$$

$$-1.3959\left(\frac{x}{L}\right) + 1.0923\left(\frac{x}{L}\right)^2 \quad (8)$$

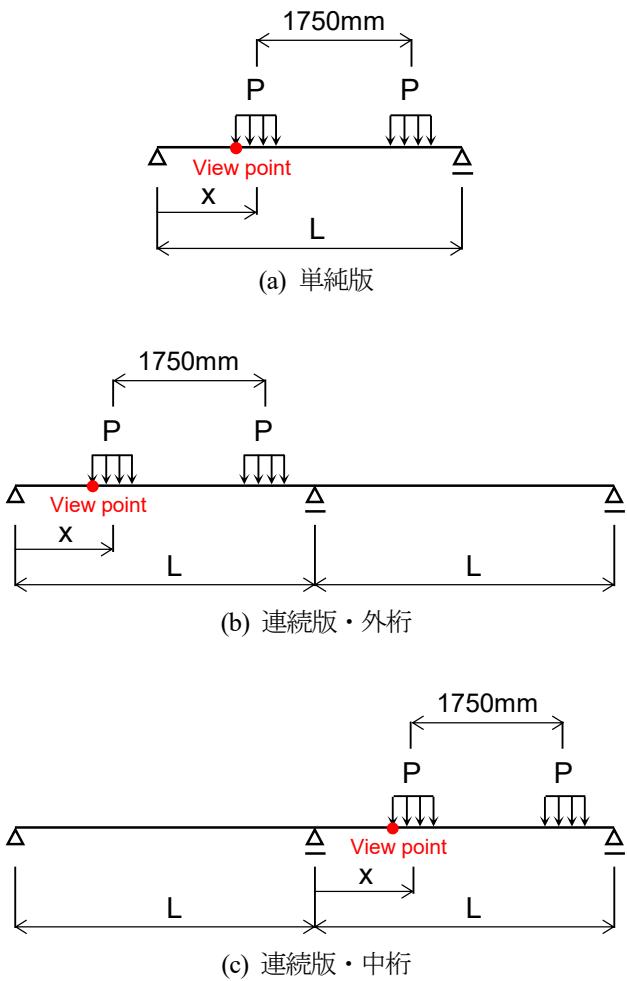


図-5 載荷方法

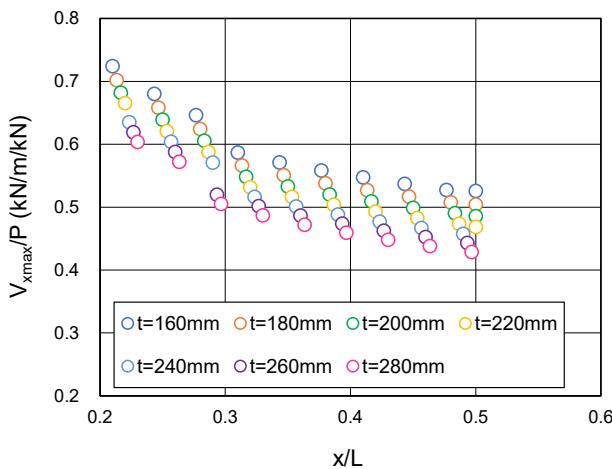


図-6 床版支間 3.0m の最大せん断力（単純版）

連続版・外桁

$$\frac{V_{xmax}}{P} = 1.0979 + 0.0035L - 0.0007t$$

$$-1.7735 \left(\frac{x}{L}\right) + 1.4751 \left(\frac{x}{L}\right)^2 \quad (9)$$

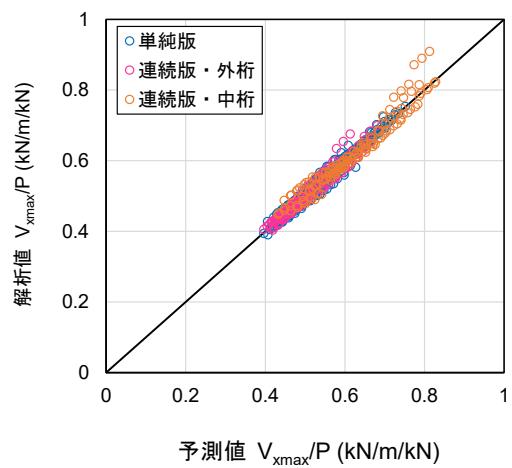


図-7 最大せん断力の予測精度

連続版・中桁

$$\frac{V_{xmax}}{P} = 1.5614 + 0.0441L - 0.0007t$$

$$-2.5655 \left(\frac{x}{L}\right) + 2.1077 \left(\frac{x}{L}\right)^2 \quad (10)$$

ここに, V_{xmax} は単位幅当たりの最大せん断力 (kN/m), P は輪荷重 (kN), L は床版支間長 (m), t は床版厚 (mm), x/L は支点からの距離を床版支間長で無次元化した値である。

回帰式による推定値の精度を確認するため, V_{xmax}/P の解析値と比較した結果を図-7 に示す. 単純版では平均値 1.009, 標準偏差 0.024, 連続版・外桁では平均値 0.981, 標準偏差 0.029, 連続版・中桁では平均値 0.999, 標準偏差 0.037 であった.

4. 疲労設計

4.1 試算に用いた RC 床版の断面諸元

道路橋示方書・同解説¹⁾に基づいて疲労設計の試算に用いる RC 床版（連続版）の断面諸元を決定した. 算定条件は, ①最小全厚に対して大型自動車の計画交通量による係数 1.25 を考慮, ②主鉄筋中心までのかぶり高さは 40mm, ③アスファルト舗装の厚さを 80mm とし, 床版コンクリートと共に死荷重による設計曲げモーメントを主鉄筋方向に作用, ④コンクリートおよび鉄筋の応力度がそれぞれコンクリートの応力度制限値 $f_{ck}/3$, 引張鉄筋の応力度制限値 120N/mm² 以下となるように鉄筋の種類および配置間隔を決定, ⑤ヤング係数比は 15, ⑥上段鉄筋量は下段鉄筋量の 1/2 とした. 表-3 に断面諸元を示す.

4.2 軸重測定結果

国土交通省国土技術政策総合研究所は, 全国活荷重実態調査として, 21 路線（うち, 1 路線データ無し）における平日 72 時間の連続測定を橋梁上にて BWIM により

表-3 RC床版(連続版)の断面諸元

床版支間長(m)	床版厚t(mm)	主鉄筋(mm)	配力鉄筋(mm)	梁幅B(mm)
2.0	220	D16@135	D16@175	528
2.5	240	D16@120	D16@165	568
3.0	250	D16@100	D16@145	588
3.5	270	D19@130	D16@140	625
4.0	290	D19@115	D16@135	665

表-4 軸重測定基本データ

橋梁No.	軸数 ¹²⁾ (1/日)	100kN換算輪荷重数 (1/年)
1	1,620	4.999×10^5
2	860	3.033×10^5
3	2,187	1.291×10^7
4	7,878	4.219×10^7
5	1,487	1.413×10^4
6	2,134	8.573×10^4
7	6,994	6.311×10^6
8	8,522	9.091×10^4
9	6,014	1.719×10^5
10	18,103	5.979×10^4
11	12,173	8.486×10^6
12	8,688	1.353×10^7
13	9,542	5.981×10^6
14	28,631	4.913×10^5
15	19,423	1.268×10^7
16	5,177	5.902×10^5
18	10,016	2.088×10^5
19	10,799	5.736×10^5
20	5,107	6.450×10^6
21	8,989	2.453×10^6

実施し、2006年にその測定データを報告している¹²⁾。詳細は文献を参照されたいが、表-4に基本データを示す。ここで、軸数は各橋梁において複数車線あるうちの等価繰返し回数が最も多い車線を著者らが選定した。また、100kN換算輪荷重数はS-N曲線の傾きの逆数12.763を用いてT荷重の片側荷重100kNに換算した1年間の等価繰返し回数である。これら20路線の軸重測定データを用いて、表-3に示した断面諸元のRC床版について100年間の等価繰返し回数に対する照査を試みた。

4.3 疲労照査例

ここでは式(7)に示した非破壊確率95%のS-N曲線を使用する。一例として、輪荷重の走行位置が連続版の床版支間中央の場合について、 V_{max}/P を式(10)から算出し、疲労寿命を計算した。コンクリートの設計基準強度は24, 30, 40, 50N/mm²の4水準とした。 P_{eq} の算出におけるコンクリートのせん断強度および割裂引張強度はそれぞれ次式を用いた²⁰⁾。

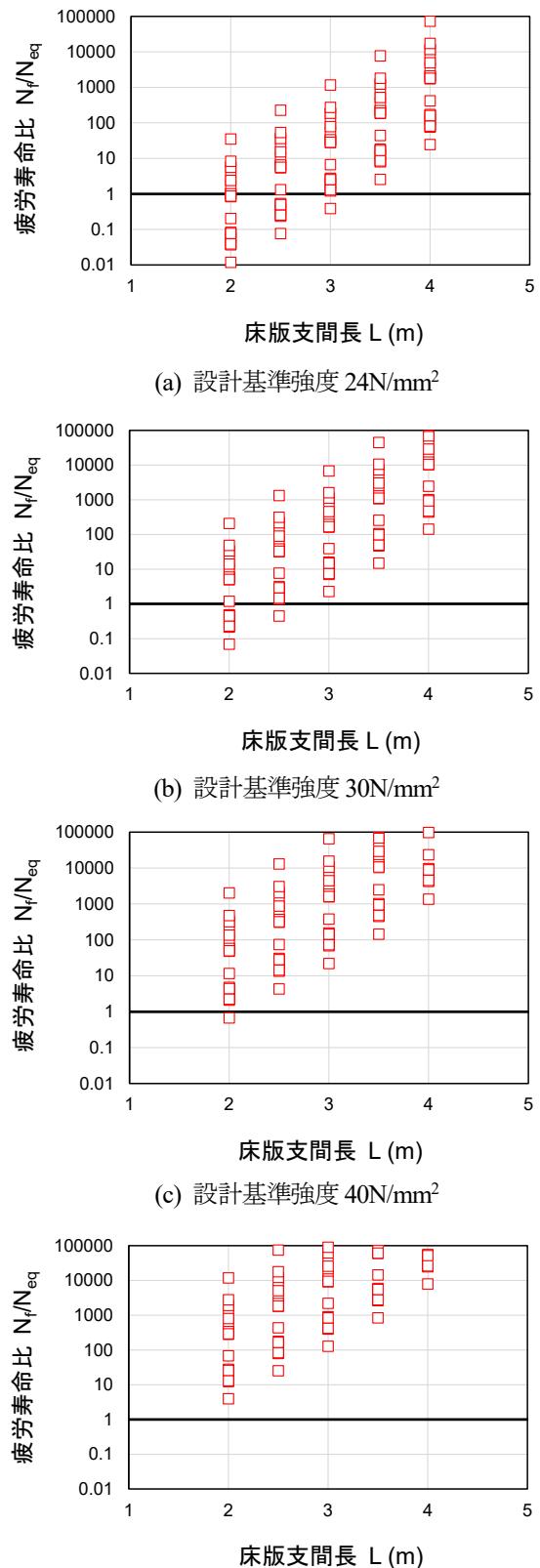


図-8 疲労寿命比

$$f_v = 0.656 f'_{ck}^{0.606} \quad (11)$$

$$f_t = 0.269 f'_{ck}^{0.667} \quad (12)$$

ここに、 f'_{ck} はコンクリートの設計基準強度(N/mm²)

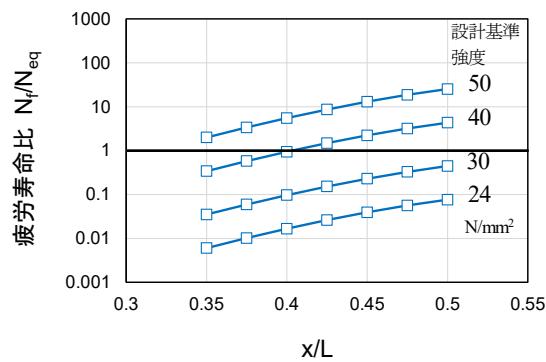


図-9 疲労寿命比（連続版・中桁、床版支間長 2.5m）

である。

図-8 に各設計基準強度に関する疲労寿命比と床版支間長の関係を示す。ここで、疲労寿命比は 100 年間の等価繰返し回数 N_{eq} に対する非破壊確率 95% の S-N 曲線から求まる疲労寿命 N_f の比である。設計基準強度 24N/mm^2 では床版支間長 2.0m および 2.5m、設計基準強度 30N/mm^2 では床版支間長 2.0m で耐用年数 100 年を下回るケースが比較的多く生じる結果となった。

次に、輪荷重が床版支間中央から支持桁へ近づいた場合を想定した疲労寿命比を試算した。ここでは、表-4 に示した 100kN 換算輪荷重数が最も多いケース（No.4）を用い、連続版・中桁（床版支間長 2.5m）を対象とした結果を一例として図-9 に示す。上述したように、支持桁付近の RC 床版にはハンチが設けられ、また、支持桁近くにおいては、いくらかの引張側主鉄筋が上段へ折り曲げられる。それゆえ、輪荷重が床版支間中央を走行するとした $x/L=0.5$ から支持桁へ近づいた際に作用せん断力の増大による疲労寿命の低下をどの範囲まで考慮するかをここでは明確にできないが、 $x/L=0.35$ と 0.5 を比較すると、疲労寿命がおよそ 1/10 に低下する試算となった。

5. あとがき

本研究では、輪荷重の走行位置を考慮した鋼道路橋 RC 床版の疲労設計について、作用せん断力を基本とした設計 S-N 曲線を用い、測定された軸重データから疲労寿命の比較を行った。しかし、輪荷重の走行位置による RC 床版の破壊モードの変化など不明な点が未だ多く残されており、今後も検討が必要であることを記す。

参考文献

- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編、2017.
- 松井繁之：橋梁の寿命予測—道路橋 RC 床版の疲労寿命予測—、安全工学、Vol.30、No.6、pp.432-440、1991.
- 中谷昌一、内田賢一、西川和廣、神田昌幸、宮崎和彦、川間重一、松尾伸二：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、No.28、2002.
- 阿部忠、木田哲量、高橋真希子、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、pp.39-54、2011.
- 道路橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上、土木学会鋼構造委員会、2004.
- 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、土木学会鋼構造委員会、2008.
- 川井豊、中村聖三、阿部忠：信頼性を考慮した道路橋 RC 床版の疲労耐久性設計について、構造工学論文集、Vol.62A、pp.1160-1167、2016.
- 竹田京子、佐藤靖彦：繰返し移動荷重を受けるコンクリート床版の疲労寿命予測法、土木学会論文集、Vol.79、No.12、23-00078、2023.
- 佐光浩継、古市亭、東山浩土、松井繁之：車両走行位置から検討した道路橋 RC 床版の疲労耐久性、構造工学論文集、Vol.62A、pp.1149-1159、2016.
- 秦裕彰、碇山晴久、櫻井孝、大西弘志、松井繁之：アーチ効果による鋼－コンクリート合成床版の疲労耐久性向上度、第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集、pp.211-216、2004.
- 加藤貴久、細川真利、西弘明、渡辺忠朋：輪荷重走行試験機を用いた中央載荷・偏心載荷による CFRP プレート補強 RC 床版の疲労耐久性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.2、pp.427-431、2013.
- 玉越隆史、中洲啓太、石尾真理：道路橋の設計自動車荷重に関する試験調査報告書—全国活荷重実態調査—、国土技術政策総合研究所資料、No.295、2006.
- 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究、大阪大学学位論文、1984.
- 奥本武司、前田幸雄、松井繁之、川口裕義：道路橋 RC 床版の疲労に関する研究、土木学会第 40 回年次学術講演会、I-493、pp.985-986、1985.
- 松井繁之：床版損傷に関する水の振舞い、土木学会第 43 回年次学術講演会、PSI-3、pp.6-7、1988.
- 赤代恵司、三田村浩、渡辺忠明、岸徳光：丸鋼鉄筋を用いた RC 床版の疲労特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.57A、pp.1297-1304、2011.
- 大西弘志、松井繁之、渡邊裕一：分割型載荷板を用いた輪荷重走行試験による RC 床版の S-N 曲線の検討、第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集、pp.223-228、2003.
- 田中良樹、村越潤、長尾優子：道路橋 RC 床版の疲労損傷過程における上面かぶりの剥離の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.3、pp.913-918、2008.
- 阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター：道路橋 RC 床版のひびわれ損傷と耐久性、1991.
- 松井繁之 編著：道路橋床版—設計・施工と維持管理—、森北出版、2007.

（2024 年 7 月 12 日受付）