

RC 床版の疲労耐久性に及ぼす各種要因の影響について

Influences of various factors on fatigue resistance of RC deck slabs

(独)土木研究所 寒地土木研究所 ○正 会 員 岡田慎哉 (Shin-ya Okada)
(独)土木研究所 寒地土木研究所 正 会 員 角間 恒 (Ko Kakuma)
(独)土木研究所 寒地土木研究所 正 会 員 西城能利雄 (Norio Saijoh)
(独)土木研究所 寒地土木研究所 正 会 員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)

1. はじめに

寒冷地における道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）では、床版上面コンクリートの凍害が進行し、コンクリートの抜け落ちに至る事例が報告されている¹⁾。一般に、床版コンクリートの劣化損傷が著しく、広範囲に広がっている場合、全面あるいはパネル単位での床版打替えが検討される。しかしながら、打替え工事においては、取り付け道路や隣接する床版パネルとの取り付け条件により現行の道路橋示方書²⁾が規定する最小床版厚の確保が困難になることがある。また、床版厚の増加が可能な場合であっても、死荷重増加に伴い下部工の補強が必要となれば施工規模やコストの増大を招く。

このような場合の対策として、打替え後の床版が現行示方書に準ずる床版と同等の疲労耐久性を有することを予め確認した上で、一部の規定（ここでは、最小床版厚）を例外的に満足しないことを許容する設計方法が考えられる。このとき、床版厚不足による疲労耐久性の不足をコンクリート強度や配筋などで担保することになるが、各諸量を決めるためには、RC 床版の疲労耐久性に及ぼす内的要因の影響を明らかにしなければならない。また、輪荷重走行試験による設計方法の検証と適用範囲の明確化も必要である。

本研究では、一連の検討における基礎的段階として、

既往の輪荷重走行試験結果^{3), 4)}を使用して RC 床版の疲労耐久性に及ぼす各種要因の影響を分析した。また、分析結果に基づき、床版厚の制約を受ける条件下で現行示方書に準ずる RC 床版と同等の疲労耐久性を有する RC 床版を設計する方法について検討した。

2. 各種要因の影響分析

2.1 概要

RC 床版の疲労耐久性に影響を及ぼす支配的要因にコンクリート強度、床版厚、鉄筋量がある⁵⁾。これらの要因については、土木学会の「道路橋床版の維持管理評価に関する検討小委員会」⁶⁾が国内 9 機関で実施された輪荷重走行試験結果を収集し、疲労耐久性との関係を整理しているが、統一的な評価方法を示すには至っていない。そこで、本章では、既往の試験データから、上記 3 要因の影響を総合的に評価できるデータを抽出し、疲労耐久性への影響度を分析する。

2.2 分析方法

2.2.1 対象データ

本検討には表-1 に示す合計 10 個の輪荷重走行試験結果を使用した。また、図-1 には各試験結果を S-N 関係上にプロットしている。対象とする試験は、昭和 39 年の鋼道路橋設計示方書⁷⁾あるいは昭和 47 年の道路

表-1 検討対象試験の一覧

No.	試験 機関	適用 基準	t (mm)	f'c (N/mm ²)	pm (%)	pd (%)	P (kN)	P/psx	Neq※ (万回)	文献	
1	寒地土木 研究所	S39	64	40.8	1.31	0.56	30	0.60	65.2 3663.7	—	
2				52.3				0.53	136.7 7677.1	—	
3			160	38.6	1.27	0.52	150	0.59	4.8	3)	
4	190		1.32	0.35	139	0.46	93.4	4)			
5					18.5	196	0.80		23.0		
6					16.7	157	0.68		18.3		
7					30.1	157	0.53		74.8		
8					32.0	139	0.46		127.0		
9					S47	40.7	1.14		216	0.65	9618.6
10						31.4			260	0.86	450.2

※No.1 と No.2 で、上側は t=160mm へ補正した値、下側は t=190mm へ補正した値

記号の説明 t：床版厚、f'c：コンクリート強度、p_m：主鉄筋比、p_d：配力鉄筋比、P：輪荷重

P_{sx}：床版梁状化後の押抜きせん断耐力⁵⁾、N_{eq}：等価走行回数（150kN 換算）

橋示方書⁸⁾に準ずる床版（以下、S39 床版および S47 床版）であり、いずれもクランク式の輪荷重走行試験機を使用した一定走行荷重の下で試験が実施されている。

なお、表中の No.1 および No.2 は、本検討に併せて新規に実施した試験であるが、ここでは結果のみを示す。

2.2.2 データの補正

(1) 相似則

表－1 中の No.1 および No.2 は縮小モデルを用いた試験結果であり、結果の整理には床版寸法および載荷荷重を実物大スケールに補正して用いる。

$$t' = \frac{t_0}{n} \quad (1)$$

$$P' = \frac{P_0}{n^2} \quad (2)$$

ここに、 t' ：補正後の床版厚（mm）、 t_0 ：補正前の床版厚（mm）、 P' ：補正後の荷重（kN）、 P_0 ：補正前の荷重（kN）、 n ：縮小比である。

(2) 等価走行回数

各試験はそれぞれ異なる荷重で試験が実施されていることから、疲労耐久性の整理には一定荷重（基本荷重）に換算した等価走行回数を用いる。

$$N_{eq} = \left(\frac{P'}{P} \right)^m \cdot N \quad (3)$$

ここに、 N_{eq} ：等価走行回数（回）、 N ：実験走行回数（回）、 P ：基本荷重（kN）、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数である。基本荷重 P は、法定軸重 100kN に衝撃等の影響を考慮した 150kN とした。また、図－1 において試験機関が異なるデータを統合しても S-N 曲線の傾きが大きくは変わらないことから、係数 m には松井式⁵⁾の 12.76 を用いた。

2.3 分析結果

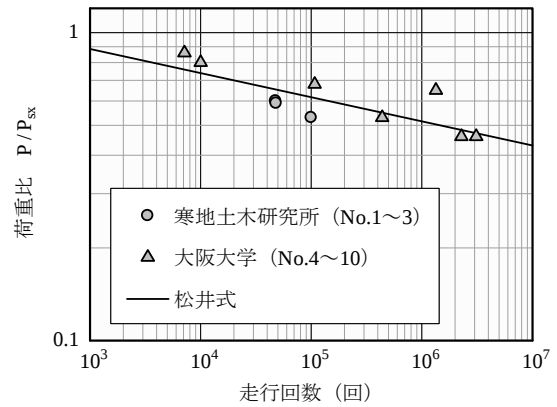
2.3.1 コンクリート強度

図－2 に、等価走行回数とコンクリート強度の関係（以下、 $\log N - f'_c$ 関係）を示す。図より、コンクリート強度の増加により等価走行回数は増加し、両者の間には片対数プロット上で線形関係が成り立つ。また、線形補間式は床版厚ごとに定義できるが、その傾きは同程度である。このことは、同一床版厚の下では、次式を用いてコンクリート強度の変化から等価走行回数の変化を一義的に決めることができることを示唆する。

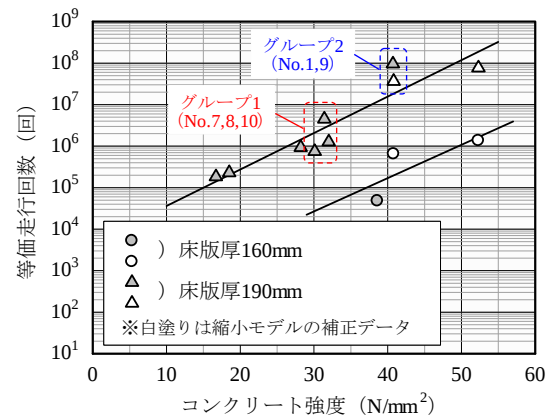
$$\tilde{N}_f = 10^{\alpha_f \cdot \Delta f'_c} \quad (4)$$

ここに、 $\tilde{N}_f$ ：コンクリート強度の変化による等価走行回数比、 $\Delta f'_c$ ：コンクリート強度の変化（N/mm²）、 α_f ：係数である。 $\log N - f'_c$ 関係の傾きを表す係数 α_f は、床版厚 160mm および 190mm における $\log N - f'_c$ 関係の傾きの平均値とすると $\alpha_f = 0.084$ であり、コンクリート強度 10N/mm² の増加により、疲労耐久性は 7 倍程度となる。

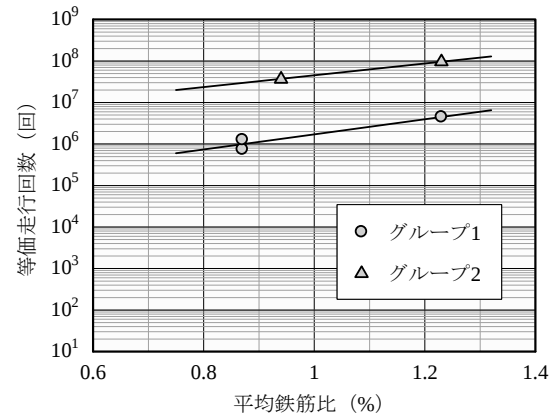
なお、図－2 中に図示するグループ 1 および 2 では、それぞれ床版厚およびコンクリート強度が同程度のグループにも関わらず等価走行回数がばらつく傾向があるが、



図－1 S-N 関係



図－2 等価走行回数とコンクリート強度の関係



図－3 等価走行回数と平均鉄筋比の関係

この影響については 2.3.3 項にて後述する。

2.3.2 床版厚

上述のように、同一床版厚のとき $\log N - f'_c$ 関係の傾きは床版厚によらない。これは、同一コンクリート強度のときにはその値によらず等価走行回数の変化が床版厚変化により決まることと同義である。また、松井式をベースにすると、床版厚変化と対数スケールでの等価走行回数変化には比例関係が成り立つ。したがって、等価走行回数と床版厚との関係は、コンクリート強度との関係と同様、次のように定義できる。

$$\tilde{N}_t = 10^{\alpha_t \cdot \Delta t} \quad (5)$$

ここに、 $\tilde{N}_t$: 床版厚の変化による等価走行回数比、 Δt : 床版厚の変化 (mm)、 α_t : 係数である。LogN-f_c 関係の切片に着目すると $\alpha_t=0.055$ であり、床版厚が 30mm 増加することで疲労耐久性は 45 倍程度となる。

2.3.3 鉄筋量

図-2 の LogN-f_c 関係におけるグループ 1 および 2 は、それぞれ床版厚およびコンクリート強度が同程度の試験データのグループであるが、同一グループ内で等価走行回数がばらつく傾向が見られ、S47 床版で等価走行回数が大きくなる。S39 床版と S47 床版の最も大きな違いは、S47 床版において配力鉄筋量の規定が強化されたことであり、S39 床版において主鉄筋量の 25%以上とされていた配力鉄筋量が、S47 床版では 70%以上とされたことで RC 床版の疲労耐久性は大きく改善される。松井式では、押抜きせん断耐力（あるいは走行回数）の算出に配力鉄筋量は影響しないが、図-2 を見るにその影響は明白である。

本検討では、配力鉄筋量の影響を考慮するため、下側主鉄筋比と下側配力鉄筋比の平均値（以下、平均鉄筋比 p_{mean} ）に着目して等価走行回数を整理する。図-3 には、グループ 1 および 2 について、等価走行回数と平均鉄筋比の関係（以下、LogN- p_{mean} 関係）をプロットする。図より、データ数が少ないものの両グループともに平均鉄筋比の増加により等価走行回数が増加することがわかる。さらに、床版厚が同一であればコンクリート強度ごとに LogN- p_{mean} 関係が定義でき、その勾配は一定となる傾向が見られる。したがって、平均鉄筋比においても、コンクリート強度および床版厚の影響と同様の式により等価走行回数比を算出できると推察される。

$$\tilde{N}_p = 10^{\alpha_p \Delta p_{mean}} \quad (6)$$

ここに、 $\tilde{N}_p$: 平均鉄筋量の変化による等価走行回数比、 Δp_{mean} : 平均鉄筋量の変化 (%)、 α_p : 係数である。LogN- p_{mean} 関係の傾きを表す係数 α_p は、グループ 1 およびグループ 2 における LogN- p_{mean} 関係の傾きの平均値とすると、 $\alpha_p=1.621$ であり、平均鉄筋比が 0.5%増加すると疲労耐久性は 6 倍程度となる。

3. 床版厚の制約を受ける打替え床版の設計例

3.1 概要

2 章では、既往試験データの分析により、RC 床版の疲労耐久性がコンクリート強度、床版厚および鉄筋量のそれぞれと相関関係を持つことを示した。本章では、それらの関係を踏まえ、床版打替え時に床版厚の制約を受ける場合において、既設床版厚を保持したまま平成 24 年の道路橋示方書（以下、H24 道示）に順ずる床版（以下、H24 床版）と同等の疲労耐久性を有する床版（以下、H24 等価床版）を設計する方法を、設計例を用いて説明する。

3.2 設計例

3.2.1 設計条件

本検討では、打替え時の設計条件として、打替え前の床版厚 180mm、床版支間 2.35m の連続版、1 方向あたりの大型車の計画交通量 1,000~2,000 台を仮定し、床版

厚 180mm とする H24 等価床版を設計する。ここで、上記の床版支間および計画交通量のと看、H24 道示に規定される最小床版厚は 220mm であり、床版厚が 40mm 不足することになる。なお、床版厚以外に制約条件はないものとし、また、鉄筋径および鉄筋間隔は設計細目であるとして、本検討では設計時の変数としては扱わないものとした。

3.2.2 設計フロー

図-4 および表-2 には、それぞれ H24 等価床版の設計イメージおよび設計過程を示しており、以下に詳細を説明する。

(1) 目標性能の設定 : a (H24 床版)

最初のステップでは、打替え後の H24 等価床版が保有すべき性能を決める。ここでは、床版厚の制約条件がないものとして設計した床版、すなわち、H24 床版の押抜きせん断耐力 P_{sx} が目標性能となる。表-2 中の a に、本検討で目標とする H24 床版を示しており、押抜きせん断耐力は 347.3kN である。

(2) 制約条件による床版厚の減少 : a → b

次に、床版厚の制約条件を考慮して H24 床版を単純にスケールダウンさせる。このときの相似比は H24 床版の厚さ 220mm と打替え床版の厚さ 180mm の比 0.81 とし、相似モデルではコンクリート強度や鉄筋比が変化しないことを利用して式(5)から床版厚減少による等価走行回数比 $\tilde{N}_t$ を求める。

$$\tilde{N}_t = 10^{0.055 \times (180 - 220)} = 0.006 \quad (7)$$

表-2 中の b には、H24 床版から床版厚の制約条件の下でスケールダウンさせた床版を示しており、押抜きせん断耐力は 70%程度まで低下している。以降のステップでは、この床版厚減少に伴う押抜きせん断耐力の減少を、コンクリート強度および鉄筋量の増加で補うことになる。

(3) 鉄筋量の増加 : b → c

次に、鉄筋量あるいはコンクリート強度の増加を考える。このとき、目標性能を決定する H24 床版の諸元により検討する順序は異なるが、最終的に設計曲げモーメントに対して断面照査を行うことを踏まえると、先に曲げ剛性に与える影響が大きい鉄筋量に着目するほうが効率的である。したがって、鉄筋の応力度が規定値以下となるような鉄筋量を決定し（表-2 中の c）、このときの等価走行回数比 $\tilde{N}_p$ を式(6)により求める。

$$\tilde{N}_p = 10^{1.621 \times (1.19 - 0.78)} = 4.620 \quad (8)$$

(4) コンクリート強度の増加 : c → d (H24 等価床版)

最後に、押抜きせん断耐力が目標値と同等以上にするために必要なコンクリート強度を求める。このとき、

$$\tilde{N}_t \times \tilde{N}_p \times \tilde{N}_f \geq 1 \quad (9)$$

が成り立つことから、式(4)より、

$$\tilde{N}_f = 10^{0.084 \times \Delta f_c} \geq \frac{1}{\tilde{N}_t \times \tilde{N}_p} \quad (10)$$

である。したがって、式(7)、(8)を代入し展開すると、

表-2 H24 等価床版の設計過程

項目		単位	設計段階 (図-4 を参照)			
			a (H24 床版)	b	c	d (H24 等価床版)
床版厚		mm	220	180	180	180
コンクリート強度		N/mm ²	24.0	24.0	24.0	42.5
主鉄筋	かぶり	mm	40.0	32.0	32.0	32.0
	鉄筋比	%	0.88	0.88	1.29	1.29
配力鉄筋	かぶり	mm	57.5	49.5	49.5	49.5
	鉄筋比	%	0.68	0.68	1.09	1.09
平均鉄筋比		%	0.78	0.78	1.19	1.19
押抜きせん断耐力		kN	347.3	248.0	272.1	367.3

※設計は a → b → c → d の順で行い、ハッチング部は各段階で変化した項目を表す。

$$\Delta f'_c \geq \frac{1}{0.084} \cdot \text{Log} \left(\frac{1}{0.006 \times 4.620} \right) = 18.5 \quad (11)$$

となる。表-2 中の d は、最終的に導かれた H24 等価床版であり、押抜きせん断耐力 367.3kN が H24 床版の値 347.3kN を上回ることがわかる。また、H24 等価床版を H24 道示により照査したとき、設計曲げモーメントに対し鉄筋およびコンクリート圧縮縁の応力度が許容応力度を下回ることを確認している。

以上より、打替え時に床版厚の制約を受ける条件において、鉄筋量およびコンクリート強度を調整することで、現行示方書において最小床版厚を除く設計規定を満足し、かつ現行示方書に準ずる床版と同等以上の疲労耐久性を有する床版を設計できるものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、既往の輪荷重走行試験結果に基づき、RC 床版の疲労耐久性とコンクリート強度、床版厚、鉄筋量の相関関係を分析した。また、設計時の床版厚不足による疲労耐久性の不足をコンクリート強度および鉄筋量で補う方法を検討した。

その結果、疲労耐久性と各要因の間にはそれぞれ強い相関関係があること、ならびに、その相関関係を用いることで床版厚の制約を受ける条件下で現行示方書に準ずる RC 床版と同等の疲労耐久性を有する床版を設計できることを示した。

なお、本研究で示した設計概念は、疲労耐久性等価の観点から現行示方書の最小床版厚規定を例外的に逸脱することを許容するものであり、その他の規定には原則準拠しなければならないことを改めて記しておく。また、各相関関係式は限られた試験結果から整理・分析したことから、今後は、データの蓄積による相関関係の精緻化を図るとともに、輪荷重走行試験により本設計方法の検証を行っていく。

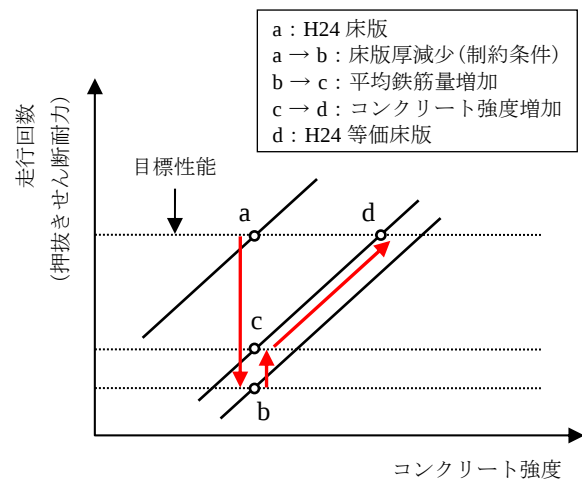


図-4 H24 等価床版の設計イメージ

参考文献

- 岡田慎哉：寒冷地域の床版の現状と維持管理、土木施工、Vol.55、No.6、pp.73-76、2014.
- 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、2012.
- 赤代恵司、三田村浩、渡辺忠朋、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.
- 前田幸雄、松井繁之：輪荷重移動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.
- 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理、森北出版、2007.
- 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：輪荷重走行試験の既往データ、第 7 回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp.285-312、2012.
- 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書、1964.
- 日本道路協会：道路橋示方書、1972.