

コンクリート強度と鉄筋量の増加による RC床版の疲労耐久性向上効果について

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム ○角間 恒
岡田 慎哉
西 弘明

道路橋 RC 床版の打替え工事においては、取り付け道路との取り合い条件等により現行の道路橋示方書に規定される最小床版厚の確保が困難になる場合がある。本研究では、このような場合の対策として、コンクリート強度と鉄筋量を調整することで、既設床版厚のまま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する方法を検討した。また、本方法により設計した RC 床版の輪荷重走行試験を実施し、疲労耐久性の検証を行った。

キーワード：床版打替え、疲労耐久性、コンクリート強度、鉄筋量

1. はじめに

北海道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広く進行し、コンクリートの抜け落ちに至る事例も報告されている¹⁾。1950年代後半から1970年代前半の高度経済成長期に建設された膨大な数の道路橋の老朽化に伴い、今後、同様の劣化損傷事例の増加が予想されることから効率的な維持管理を実施していくことが望まれる。

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合い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、死荷重の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疲労耐久性の検証や適用範囲の明確化も必要である。

以上より本研究では、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、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

設計する方法を検討した。また、本方法により設計した床版について輪荷重走行試験を実施し、疲労耐久性を検証した。

2. 各種要因の影響分析

RC 床版の疲労耐久性に影響を及ぼす主たる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。

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。

(1) 分析方法

a) 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 関係上にプロットする。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。

b) 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

表-1 検討対象試験の一覧

No.	試験機関	適用基準	t (mm)	a×b (mm)	f _c (N/mm ²)	p _m (%)	p _d (%)	P (kN)	P _{sx} (kN)	N _{eq} [*] (万回)	文献
1	寒地土木研究所	S39	64	200 × 80	40.8	1.31	0.56	30	50.0	65.2 3663.7	—
2					52.3				56.6	136.7 7677.1	—
3			160	300 × 120	38.6	1.27	0.52	150	254.7	4.8	3)
4	大阪大学		190		28.2	1.32	0.35	139	299.1	93.4	4)
5					18.5			196	245.0	23.0	
6					16.7			157	230.1	18.3	
7					30.1			157	293.7	74.8	
8					32.0			139	305.3	127.0	
9					S47			40.7	1.14	216	
10	31.4		260			301.7	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、a: 走行直角方向の載荷ブロック寸法、b: 走行方向の載荷ブロック寸法

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}: 押抜きせん断耐力⁵⁾、N_{eq}: 等価走行回数 (150kN換算)

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)、t₀: 補正前の床版厚 (mm)、P': 補正後の荷重 (kN)、P₀: 補正前の荷重 (kN)、n: 縮小比である。縮小比 n は床版厚より計算し、160mm に補正するとき n=0.40、190mm に補正するとき n=0.34 である。

c) 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。係数 m は、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変わらないことから、次式で表される松井式⁹⁾より 12.76 (=1/0.07835) を用いた。

$$\text{Log} \left(\frac{P}{P_{sx}} \right) = -0.07835 \text{Log} N + \text{Log} 1.52 \quad (4)$$

ここに、P: 輪荷重 (kN)、P_{sx}: 押抜きせん断耐力 (kN)、N: 走行回数 (回) である。

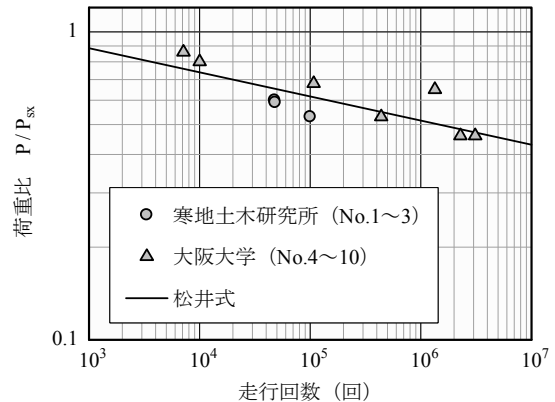


図-1 S-N関係

(2) 分析結果

a) 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、LogN-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。

$$\tilde{N}_f = 10^{\alpha_f \cdot \Delta f_c'} \quad (5)$$

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。LogN-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 LogN-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/mm^2 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、この影響についてはc)項にて後述する。

b) 床版厚

上述のように、同一床版厚のとき $\text{LogN}-f_c$ 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。

$$\tilde{N}_t = 10^{\alpha_t \cdot \Delta t} \quad (6)$$

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。 $\text{LogN}-f_c$ 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。

c) 鉄筋量

図-2の $\text{LogN}-f_c$ 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検討するため、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、 $\text{LogN}-p_{\text{mean}}$ 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 $\text{LogN}-p_{\text{mean}}$ 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。

$$\tilde{N}_p = 10^{\alpha_p \cdot \Delta p_{\text{mean}}} \quad (7)$$

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} : 平均鉄筋比の変化(%)、 α_p : 係数である。 $\text{LogN}-p_{\text{mean}}$ 関係の傾きを表す係数 α_p は、グループ1およびグ

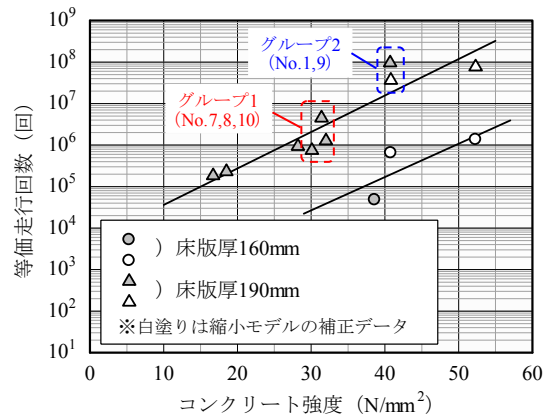


図-2 等価走行回数とコンクリート強度の関係

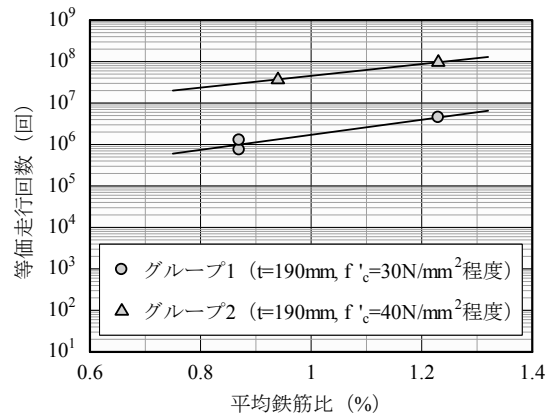


図-3 等価走行回数と平均鉄筋比の関係

ープ2における $\text{LogN}-p_{\text{mean}}$ 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法

2章では、既往の輪荷重走行試験結果の分析により、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。これらの関係を踏まえ、本章では、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現行示方書(以下、H24道示)に準ずる床版(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)を設計する方法を具体的な設計例により説明する。なお、本検討では、押抜きせん断耐力の計算値により疲労耐久性を評価することとする。

(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

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。

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、本検討では、床版厚以外には制約条件がないものとし、また、鉄筋径および鉄筋間隔は設計細目であるとして設計時の変数としては扱わない。

(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。

a) 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。

b) 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 (6) から床版厚減少による等価走行回数比を求める。

$$\tilde{N}_t = 10^{0.055 \times (180 - 220)} = 0.006 \quad (8)$$

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。

c) 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

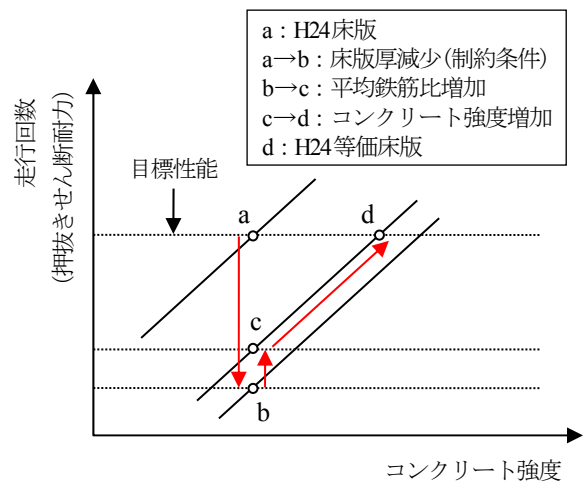


図-4 H24等価床版の設計イメージ

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を式(7)により求める。

$$\tilde{N}_p = 10^{1.621 \times (1.19 - 0.78)} = 4.620 \quad (9)$$

d) コンクリート強度の増加 : c → d (H24 等価床版)

最後に、H24 等価床版の押抜きせん断耐力を目標値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、

$$\tilde{N}_t \times \tilde{N}_p \times \tilde{N}_f \geq 1 \quad (10)$$

が成り立つことから、式(5)より、

$$\tilde{N}_f = 10^{\alpha_f \cdot \Delta f_c} \geq \frac{1}{\tilde{N}_t \times \tilde{N}_p} \quad (11)$$

である。したがって、式(8)、(9)を代入し展開すると、

$$\Delta f'_c \geq \frac{1}{0.084} \cdot \text{Log} \left(\frac{1}{0.006 \times 4.620} \right) = 18.5 \quad (12)$$

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も確認している。

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と考えられる。

4. H24等価床版の輪荷重走行試験

本章では、輪荷重走行試験によりH24等価床版の疲労耐久性を検討する。

(1) 試験方法

a) 供試体

供試体諸元を表-3に示す。本供試体は、3章において設計したH24等価床版(表-2中のd)に相当し、試験機の性能を考慮して4/5モデルに縮小した。

コンクリートには普通ポルトランドセメント、最大寸法20mmの粗骨材、最大寸法5mmの細骨材を使用した。鉄筋にはSD345を使用した。各材料の材料特性を表-4および表-5にまとめる。

b) 載荷方法および支持条件

本研究の疲労試験には、写真-1に示すクランク式の輪荷重走行試験機を使用した。

輪荷重は、走行位置に載荷ブロックを敷設し、その上を供試体中央から前後1,000mmずつ(全長2,000mm)の範囲で鉄輪を往復走行させた。載荷ブロック1組による載荷面積は、走行直角方向500mm、走行方向200mmである。試験は一定荷重の下で床版が破壊に至るまで実施した。荷重Pは160kN($P/P_{ss}=0.65$)とし、このとき松井式により算出される走行回数は5.1万回である。

供試体の支持条件は、走行方向は主桁を模した単純支持、走行直角方向は横桁を模した弾性支持とした。

(2) 試験結果

図-5に供試体中央たわみと走行回数の関係を示す。H24等価床版の疲労損傷過程は、従来から知られているRC床版の疲労損傷過程⁹⁾と同様に、走行回数が増加するにつれて床版下面における2方向ひび割れの進展とともにたわみが漸増し、最終的に床版コンクリートの押抜きせん断破壊に至りたわみが急増した。破壊時の走行回

表-3 供試体諸元

項目	単位	諸量	
寸法	mm	2,650×3,300×140	
床版支間	mm	2,350	
横桁間隔	mm	3,125	
載荷ブロック寸法	mm	500×200	
主鉄筋(D16)	有効高	mm	110(30)
	間隔	mm	140(140)
	鉄筋比	%	1.29(1.29)
配力鉄筋(D13)	有効高	mm	95.5(44.5)
	間隔	mm	120(120)
	鉄筋比	%	1.11(1.11)

※()内は上側鉄筋の諸量

表-4 コンクリートの材料特性

圧縮強度(N/mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)
39.6	28.6

※試験開始時の材齢

表-5 鉄筋の機械的性質(ミルシート)

種類	降伏強度(N/mm ²)	引張強さ(N/mm ²)	伸び(%)
主鉄筋D16,SD345	392	563	22
配力鉄筋D13,SD345	393	545	24



写真-1 輪荷重走行試験機

数13.4万回は、松井式による計算値の2.6倍であり、H24等価床版で疲労耐久性が向上する結果となった。松井式はS39床版の試験結果を主要データとして導かれたものであり、これらの鉄筋比は、表-1に示すように、主鉄筋および配力鉄筋でそれぞれ1.32%および0.35%である。一方、本供試体の鉄筋比は主鉄筋および配力鉄筋でそれぞれ1.29%および1.11%であり、平均鉄筋比は松井のS39床版から0.36%増加している。このとき、式(7)から算出される平均鉄筋比の増加による等価走行回数比は、

$$\tilde{N}_p = 10^{1.621 \times (1.20 - 0.84)} = 3.8 \quad (13)$$

である。本試験において疲労耐久性の増加が小さい結果となったが、式(7)が5体の試験結果から導いたものであることや、松井らの試験と本試験では床版寸法等が異なることを考慮すると、本試験および式(7)から得られる走行回数の増加は概ね同程度であると判断できる。

(3) H24 等価床版の S-N 曲線

最後に、H24 等価床版の S-N 曲線について検討する。ここでは、表-1 中の S47 床版 (No.9 および No.10) が最小床版厚および鉄筋間隔を除き H24 道示の設計規定を満たすこと、また荷重ブロック寸法を 500×200mm としたときの押抜きせん断耐力 (No.9 で 400.6kN、No.10 で 363.9kN) が H24 床版の 347.3kN (表-2 中の a) を上回ることから、両供試体を H24 等価床版に分類した。

図-6 に H24 等価床版の S-N 関係を図示し、その近似直線として式(14)を定義した。

$$\text{Log} \left(\frac{P}{P_{sx}} \right) = -0.05537 \text{Log} N + \text{Log} 1.36 \quad (14)$$

供試体 3 体の結果からは、H24 等価床版では従来の疲労耐久性評価式とは異なる S-N 曲線が定義でき、その関係は全体的に疲労耐久性が向上する方向にシフトすることが明らかである。なお、現段階において本曲線は、検討に用いた供試体 3 体から、コンクリート強度 30~40N/mm² 程度、床版厚 140~190mm 程度、平均鉄筋比 1.2% 程度の場合に適用できるものとし、詳細な適用範囲については今後検討していく。

5. おわりに

本研究では、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、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り、その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。また、コンクリート強度と鉄筋量によりせん断耐力を向上させた床版では、従来の疲労耐久性評価式とは異なる S-N 曲線が定義できることを示唆した。

なお、現段階では検討した設計方法に基づく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実験的に検証していないことから、今後は輪荷重走行試験により設計方法の妥当性を示す必要がある。併せて、データの蓄積による各相関関係の精緻化を図っていく。

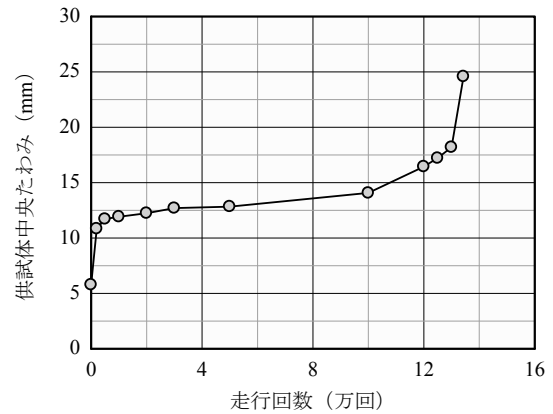


図-5 供試体中央たわみと走行回数の関係

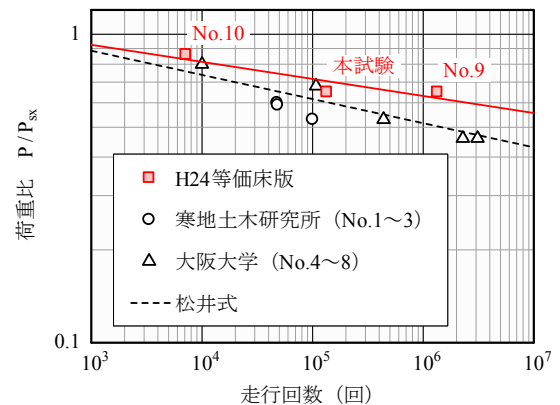


図-6 H24等価床版の S-N 関係

最後に、本研究で示した設計概念は、現場条件の制約から最小床版厚規定を例外的に逸脱せざるを得ない場合を想定したものであり、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。

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：鋼道路橋設計示方書、1972。