

## RC床版の疲労耐久性評価方法の提案

### Performance based design method for fatigue strength of the RC slab

川畑篤敬\*, 秋元礼子\*\*

Atsunori KAWABATA, Reiko AKIMOTO

\*工修 JFE エンジニアリング (株) 鋼構造事業部計画部開発技術室 (〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町 2-1)

\*\* 工修 早稲田大学大学院 理工学研究科 博士課程 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

Reinforced concrete slabs are the most common deck system for steel bridges. Though the evaluation method of the fatigue strength for RC slabs has not been completely established, the fatigue strength of PC slab and the other new types of deck system is compared with the fatigue strength of the RC slabs in many cases. Therefore, it is important to establish the evaluation method of RC slabs in order to validate other type deck systems.

In this paper, the authors propose a new evaluation method of the fatigue strength for the punching shear on RC slab using S-N curve form. The proposed method can show the fatigue strength with the index of safety factor. The fatigue strength that is calculated with the proposed method gives good agreement with experimental results. Therefore this method can be very effective and useful.

Key words: RC slab, Highway deck, fatigue strength, evaluation method

#### 1. はじめに

RC 床版は、鋼道路橋床版として、最も用いられてきた床版構造である。近年、公共事業費の縮減を目指して、PC 床版や合成床版などの各種床版が採用されつつあるが、それらの床版の各種性能の評価に際しては、道路橋示方書に準拠して設計された RC 床版との相对比较により評価されることが多い。

このように、新形式床版の性能を論じる場合の基準床版として位置づけられる RC 床版ではあるが、その疲労耐久性の評価方法については、かならずしも合理的な方法が確立されているとは言えない。RC 床版の疲労寿命を推定する S-N 線が提案されてはいる<sup>1)</sup>ものの、コンクリート強度や施工寸法の誤差により、疲労寿命が大きく影響を受けるため、S-N 線により計算された耐用年数の妥当性を評価することが困難である。

本論文では、RC 床版の押抜きせん断型の破壊に対する疲労耐久性について、S-N 線の形状に即した疲労耐久性評価手法を提案する。本論文で提案する性能評価手法により、設計された床版の保有する性能が安全率という概念で整理されるため、設計された床版の位置づけが明確となる。また、PC 床版や合成床版についても、ここで提案した評価手法の概念を応用することが可能であると考えられる。

#### 2. 移動輪荷重による疲労強度評価式

コンクリート標準示方書では、せん断補強鉄筋のな

い面材に対する設計押抜きせん断疲労耐力  $V_{rpd}$  として次式が提案されている<sup>3)</sup>。

$$V_{rpd}/V_{pcd} = (1 - V_{pd}/V_{pcd}) \{ 1 - (\log N) / 14 \} \quad \dots \textcircled{1}$$

$V_{rpd}$ : 設計押抜きせん断疲労耐力  
 $V_{pcd}$ : 設計押抜きせん断耐力  
 $V_{pd}$ : 永久荷重 (死荷重など) による設計せん断力  
 $N$ : 疲労寿命に至る荷重の繰返し回数

道路橋床版では、死荷重成分の占める割合は小さいと考えられるため、①式は下記のように近似される。

$$V_{rpd}/V_{pcd} = 1 - (\log N) / 14 \quad \dots \textcircled{2}$$

ここで、式①、②は定点繰返し載荷で求めた SN 曲線であり、輪荷重  $P$  が走行するような供用下での疲労とは、想定している荷重状態が異なる。

そこで、押抜きせん断疲労に対して、図-1 に示すような幅  $a$ 、奥行き  $b$  となる輪荷重載荷面を考え、荷重の換算を考える。輪荷重載荷面周辺に作用するせん断力を  $\tau$  とすると、その合力が  $P$  に等しくなるため式③が得られる。

$$P = 2 \times \tau \times a + 2 \times \tau \times b = 2 \times \tau \times (a + b) \quad \dots \textcircled{3}$$

次に輪荷重  $P$  が走行する場合には、輪荷重の移動にともなって、輪荷重の進行方向に直角な辺ではせん断力が交番し、輪荷重の進行方向に平行な辺では、定点

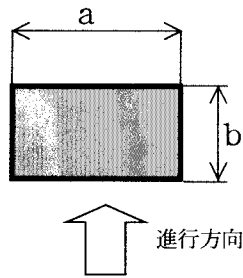


図-1 輪荷重載荷面

載荷と同じ片振りのせん断力  $\tau$  が作用すると考えられる。したがって、輪荷重の移動により発生するせん断力の合計  $V$  は、次式で表される。

$$V = 2 \times 2 \times \tau \times a + 2 \times \tau \times b \\ = 2 \times \tau \times (2 \times a + b) \quad \dots \textcircled{4}$$

式③、④より  $\tau$  を消去し、移動輪荷重  $P$  を定点荷重に換算する式⑤が得られる。

$$V = \{(2 \times a + b) / (a + b)\} \times P \quad \dots \textcircled{5}$$

式②と式⑤より、移動輪荷重  $P$  で表した設計押抜きせん断疲労耐力  $V_{pd}$  は次式⑥で評価される。

$$V_{pd} / V_{pcd} = \{(2 \times a + b) / (a + b)\} \times P / V_{pcd} \\ = 1 - (\log N) / 14 \quad \dots \textcircled{6}$$

式⑥より、移動輪荷重  $P$  により疲労破壊に至る繰り返し回数  $N$  は、式⑦で与えられる。

$$\log N = 14 \times \{1 - k \times P / V_{pcd}\} \quad \dots \textcircled{7}$$

ここで、  $P$  : 移動輪荷重の大きさ  
 $V_{pcd}$  : 設計押抜きせん断耐力  
 $k = (2 \times a + b) / (a + b)$

### 3. 輪荷重走行試験結果との比較

2章に示した移動輪荷重による疲労強度評価式の適用性を判断するために、旧土木研究所で実施された試験結果と比較する<sup>4)</sup>。設計押抜きせん断耐力  $V_{pcd}$  は、安全率  $\gamma = 1.3$  が考慮された値であるため、式⑦の適用に際しては、 $\gamma$  が 1.0~1.3 の範囲でばらつくものと考えられる。

すなわち、移動輪荷重  $P$  による破壊回数  $N$  は最小せん断破壊回数  $N_{min}$  と最大せん断疲労破壊回数  $N_{max}$  による範囲として与えられる。

$$N_{min} \leq N \leq N_{max} \quad \dots \textcircled{8}$$

ここで、

$$\log(N_{max}) = 14 \times \{1 - k \times P / (1.3 \times V_{pcd})\} \\ \log(N_{min}) = 14 \times \{1 - k \times P / V_{pcd}\}$$

輪荷重走行試験における輪荷重載荷面の大きさは、幅  $a$  が 50cm、奥行き  $b$  が 20cm であったため式⑦より  $k$  は 1.7 となる。

また、輪荷重走行試験は  $P = 157\text{kN}$  より開始し、4万回の繰り返し毎に荷重を 19.6kN ずつ増加させた階段状載荷により破壊荷重が求められている。

そこで、階段載荷の各荷重下での載荷回数である 4万回を、式⑧により求められる各荷重段階での破壊回数で除し、その載荷段階での疲労被害を計算する。この結果を式⑨のように各荷重段階毎に累加し、疲労被害  $D$  が 1 を超える荷重を破壊荷重の予想値とする。ただし、載荷荷重 392kN でも累加疲労被害が 1 を超えない場合は未破壊と定義する。

$$\text{疲労被害 } D = \sum (40,000 / N_i) \quad \dots \textcircled{9}$$

ここで、

$N_i$  : 式⑧で計算される階段載荷の各荷重段階  $i$  での破壊回数

式⑧、式⑨により求めた階段載荷輪荷重走行試験の破壊荷重の予想値(範囲)と実験結果の比較を表-1に示す。試験体記号で最初に RC8, S47 とあるものは、それぞれ平成 8 年、昭和 47 年の道路橋示方書に準拠して設計された床版であることを示している。

表-1 階段載荷輪荷重走行試験結果との比較

試験体 記号	破壊荷重予想値(kN)		実験 結果 破壊荷重 (kN)	適 合 性
	$N_{min}$	$N_{max}$		
RC80-1	274.6	372.6	274.6	○
RC80-2	372.6	未破壊	未破壊	○
RC80-3	353	未破壊	未破壊	○
RC8n-1	294.2	392.2	392.2	○
RC8n-2	333.4	未破壊	333.4	○
RC8n-3	313.8	未破壊	未破壊	○
S47-2	255	333.4	314	○
S47-3	255	333.4	314	○
S47-4	255	313.8	314	○

表-1より、階段載荷の破壊荷重に対して式⑧は良好な予想値を与えることがわかった。

次に、昭和 39 年の道路橋示方書により設計された床版に対して実施された一定荷重による輪荷重繰り返し試験について、式⑧を適用した結果を表-2に示す。

表-2 一定荷重輪荷重走行試験結果との比較

試験体記号	載荷荷重 (kN)	破壊回数予想値 (千回)		実験結果	適合性
		Nmin	Nmax	破壊回数 (千回)	
S39-2	176	30	4,950	59	○
S39-3	105	607	47,790	1,423	○
S39-4	196	5	1,038	1	×
S39-5	167	228	22,498	45	×
S39-6	147	1,095	75,240	130	×
S39-7	152	198	20,200	272	○
S39-8	118	28,733	928,910	2,750	×
S39-9	157	164	17,470	224	○

表-2 より、式⑧による破壊回数の予想値と実験結果の適合性は 50%程度であり、一定荷重による破壊回数の予想は非常に困難である。これは、対象とした床版が昭和 39 年の道路橋示方書により設計されており、配力筋が非常に少なく異質性が大きいことの影響も想定されるが、式①で表されるコンクリート床版の S-N 曲線の傾きが 14 と水平に近いため、実験結果の予想が困難である影響が大きいと考えられる。すなわち、鋼部材の S-N 線における疲労限のような傾きとなるコンクリート床版の疲労強度を求めるには、破壊に至るまでの回数で評価するよりも、設計繰返し回数により、床版が破壊に至る輪荷重の大きさを評価する方法が適していると考えられる。

#### 4. 押抜きせん断疲労耐久性評価法

道路橋床版では、設計荷重 100kN に衝撃係数の最大値 1.4 を乗じた 140 kN が設計最大輪荷重となる。そこで、RC 床版の疲労耐久性階段載荷試験による輪荷重走行試験による破壊荷重と設計最大輪荷重の比率を疲労耐久性の安全率と定義する。表-2 で求めた破壊回数予想値の最小値  $N_{min}$  と設計最大輪荷重により計算した設計安全率を表-3 に示す。表-3 より、昭和 48 年の道路橋示方書により設計された S47 シリーズ床版の疲労耐久性は、衝撃を考慮した設計最大輪荷重に対して 1.8 倍の安全率を有している床版と評価できる。また、平成 8 年度の道路橋示方書により設計された RC8 シリーズ床版の疲労耐久性は、同様に 1.9 倍から 2.6 倍の安全率を有している床版として評価できる。RC 床版の疲労耐久性を破壊荷重と設計最大輪荷重を用いた安全率による評価方法を採用することにより、輪荷重の走行回数によらず床版の疲労耐久性を評価することができる。たとえば、大型車交通の少ない路線では、安全率が 2 倍程度となる床版を採用し、重交通路線では、安全率が 2.5 倍以上となる床版を採用するなどの疲労

耐久性能の規定が可能となる。図-2 に安全率による押抜きせん断疲労耐久性評価方法の概念図を示す。この方法は、S-N 線の傾きが小さい他の床版構造へも応用が可能である。

表-3 疲労耐久性の安全率

試験体記号	破壊荷重の最小予想値 (kN)	設計荷重 (衝撃合) に対する設計安全率	実験結果による実安全率
RC80-1	274.6	1.9	1.9
RC80-2	372.6	2.6	2.8 以上
RC80-3	353	2.5	2.8 以上
RC8n-1	294.2	2.1	2.8
RC8n-2	333.4	2.3	2.3
RC8n-3	313.8	2.2	2.8 以上
S47-2	255	1.8	2.2
S47-3	255	1.8	2.2
S47-4	255	1.8	2.2

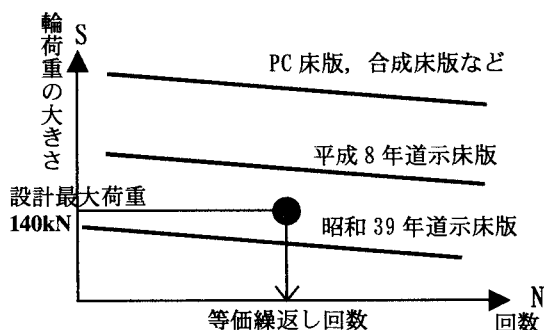


図-2 安全率による疲労耐久性評価

#### 5. 疲労耐久性の照査フロー

押抜きせん断疲労耐久性の評価フローは以下のように整理される。

(1) 設計輪荷重の設定

荷重頻度の実測値あるいは、規定された輪荷重分布による疲労被害と、最大輪荷重  $P_{max}$  による疲労被害が等価となるように換算した等価繰返し回数  $N_{eff}$  を計算する。

(2) 疲労破壊荷重の計算

等価繰返し回数が作用した場合の押抜きせん断疲労破壊荷重  $P$  を計算する。式⑧より、

$$P = \{1 - \log(N_{eff}) / 14\} \times V_{pcd} / k \quad \dots \textcircled{8}$$

(3) 対象床版の保有する安全率の計算

押抜きせん断疲労破壊荷重  $P$  と最大輪荷重  $P_{max}$  より保有安全率  $\nu$  を計算し、所定の安全率  $\nu_{req}$  が確保されていることを照査する。

$$\nu = P / P_{max} \geq \nu_{req} \quad \dots \textcircled{9}$$

## 6. 疲労耐久性の評価計算例

前章までに示した疲労耐久性の照査フローにより、荷重条件を変化させて、各年代の道路橋示方書で設計された床版の疲労耐久性の評価を試みる。

検討にあたっては、設計基準強度に対するコンクリート強度のマイナス側へのばらつきの影響や、日交通量および大型車混入率の安全率への影響についても分析を行う。

### 6.1 対象床版

対象とする床版は、「3. 輪荷重走行試験結果との比較」に述べた旧土木研究所で実施された試験供試体(床版支間  $L=2.5m$ )のうち、供試体記号 RC80-1 および S39-2 を基本ケースとする。なお、3. の破壊荷重予測値は、強度試験によって得られたコンクリート圧縮強度を用いて算出しているが、ここでは、道路橋示方書に示される設計基準強度が確保された場合と、施工環境等の要因によって所要の設計基準強度から2割不足した場合の2ケースについて検討する。さらに、施工誤差等により、設計版厚から20mm不足した場合についても検討を行う。

部材安全率については部材耐力のばらつきを勘案して安全側の設定となるよう、 $\gamma_b=1.3$  を考慮する。

表-4 に対象床版の諸元を示す。

### 6.2 設計疲労荷重

疲労耐久性を照査する交通荷重は、表-5 に示す実測に基づく大型車混入率別輪荷重分布を使用する。

また、既往の調査結果<sup>6)</sup>によれば、日本国内の重交通路線における1車線1日あたりの全走行車両台数(以下、日交通量とする)は最大級の路線で1.5万台程度であることから、日交通量は0.5万台、1.0万台、

表-4 対象床版

検討ケース	適用示方書	床版厚 d(mm)	コンクリート圧縮強度 $f^c_{ck}(N/mm^2)$	押抜きせん断耐力 $V_{pcd}(kN)$
H8-o	平成8年 道示	250	24	660
H8-a		250	19.2 (2割減)	591
H8-b		230 (20mm減)	24	598
H8-c		230 (20mm減)	19.2 (2割減)	535
S39-o	昭和39年 道示	190	21	378
S39-a		190	16.8 (2割減)	338
S39-b		170 (20mm減)	21	334
S39-c		170 (20mm減)	16.8 (2割減)	298

1.5万台の3ケースとする。

なお、表-5において大型車混入率50%以上の分布データは、測定地点数が少なく有意な結果が得にくいことや、大型車が半数以上を占める路線は特殊な供用状態であると考えられることなどから、本検討においては10%から50%までの値を採用する。

繰返し回数算出に用いる供用期間は、昭和39年道示床版では40年、平成8年道示床版では40年および100年とし、輪荷重載荷面は20cm×50cm ( $k=1.7$ )とする。輪荷重の載荷回数は、タンデム車においては中輪および後輪が大型輪荷重に該当することから、走行台数に対して2倍の回数とする。

また、最大荷重  $P_{max}$  は、大型車混入率や日交通量の大小に関わらず全国的に  $P=137.2kN$  以上の荷重が観測されている<sup>5)</sup> ことから、 $P_{max}=137.2kN$  とする。

表-5 大型車混入率別輪荷重分布\*

(単位：%)

輪荷重(kN)	大型車混入率						
	10%~20%	20%~30%	30%~40%	40%~50%	50%~60%	60%~70%	70%~80%
0 ~ 19.6	85.00	75.00	65.00	55.00	45.00	0.00	25.00
19.6 ~ 29.4	7.3661	12.4363	17.5172	20.8053	24.2556	0.0000	28.8053
29.4 ~ 39.2	3.5942	5.8788	8.2030	10.7415	13.1780	0.0000	24.0165
39.2 ~ 49.0	1.9014	3.0603	4.4993	5.8662	7.0340	0.0000	12.4965
49.0 ~ 58.8	1.1402	1.8043	2.5666	3.5280	4.9242	0.0000	5.6130
58.8 ~ 68.6	0.5433	0.9515	1.2751	1.8842	2.9733	0.0000	2.9153
68.6 ~ 78.4	0.2447	0.4245	0.5418	0.8784	1.4064	0.0000	0.7538
78.4 ~ 88.2	0.1178	0.2045	0.2303	0.4136	0.7123	0.0000	0.2535
88.2 ~ 98.0	0.0482	0.1110	0.0994	0.1881	0.3322	0.0000	0.0900
98.0 ~ 117.6	0.0308	0.0985	0.0525	0.1508	0.1810	0.0000	0.0473
117.6 ~ 137.2	0.0108	0.0295	0.0137	0.0590	0.0039	0.0000	0.0090
137.2 ~	0.0027	0.0010	0.0014	0.0351	0.0000	0.0000	0.0000
合計	100.00	100.00	100.00	99.55	100.00	0.00	100.00

\*参考文献 5) 限界状態設計法における設計活荷重に関する検討Ⅱ, pp.8 表-1.3 を、全走行車両の百分率の合計が100となるよう補正。(参考文献 5) では輪荷重 19.6kN 以上の大型車両の合計を100としている)

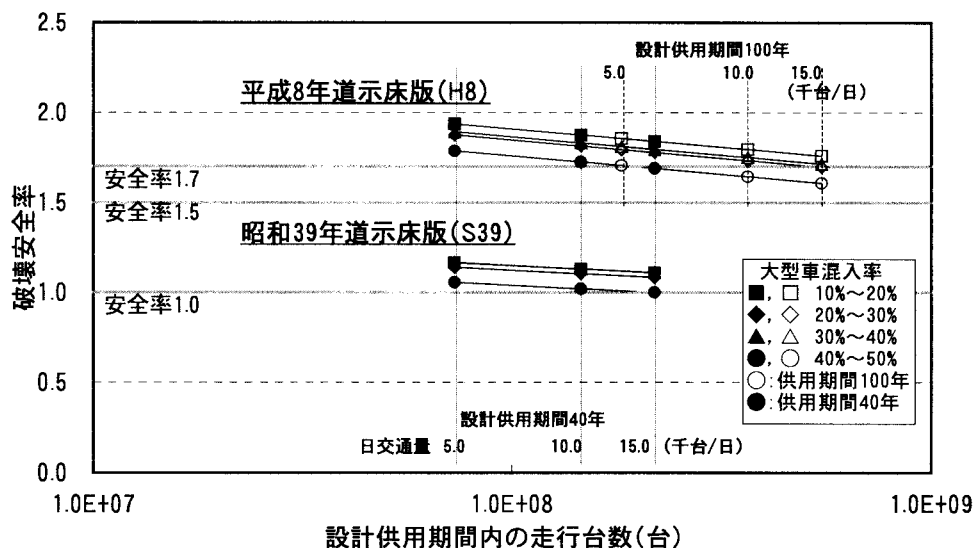


図-3 安全率による疲労耐久性評価

### 6.3 疲労耐久性照査

(1) 現行道路橋床版の保有する安全率

図-3に、検討ケース H8-o および S39-o の床版を用いて、日交通量、大型車混入率ごとに算定した鉄筋コンクリート床版の破壊安全率を示す。

昭和39年道示床版では、ほとんどの荷重ケースで安全率1.0以上を確保しているものの、大型車混入率45%、日交通量1.5万台のケースでは40年目に0.99まで安全率が低下しており、この床版は損傷している可能性があることがわかる。

一方、平成8年道示床版は、安全率は概ね1.5以上を確保している。また、供用期間を40年とした場合の安全率は1.69~1.93の間で変化するが、100年とした場合でも1.61~1.86の間となり、大型車混入率等の荷重条件の影響と比べ、供用期間の影響はあまり大きくないといえる。これは、疲労耐久性を示す曲線の勾配が非常に緩やか ( $m=14$ ) であるためと考えられる。

表-6に昭和39年道示で設計された床版が、実測された交通荷重<sup>6)</sup>を40年間受けた場合の残存安全率を示す。

表-6 実測荷重\*における建設後40年の残存安全率

交通荷重点	日交通量 (台/日・車線)	大型車 混入率	残存 安全率
重交通路線 (千葉)	18969	41%	0.99
重交通路線 (有明)	8858	36%	1.14
主要幹線 (草加)	13084	28%	1.09
地方幹線 (八戸)	8549	14%	1.14

\*荷重データ：参考文献 6)平成4年の調査データより

(2) 大型車台数増加に対する荷重条件の影響

床版の疲労耐久性は大型車輪荷重の影響を強く受ける。ここでは、大型車台数が増加した場合、その荷重形態の変化が破壊安全率に与える影響を検討する。

図-4に、日交通量1.0万台、大型車混入率15%で平

成8年道示により設計された床版(H8-o, 供用期間100年)が、大型車混入率15%のまま日交通量が30000台まで増加した場合、日交通量は変化せずに混入率のみ45%まで増加した場合の安全率を示す。

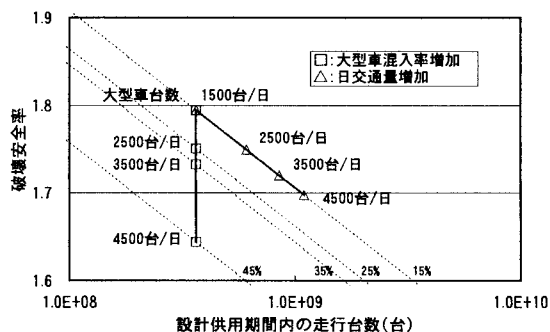


図-4 大型車台数の増加の影響

図-4より、同じ大型車台数で比較すると、大型車台数4500台において、大型車混入率を45%に増大させたケースの方が安全率の低下が著しいことがわかる。これは、表-5に示す混入率45%の頻度分布では、大型車の中でも疲労耐久性に影響の大きい100kN程度以上の輪荷重の割合が増加するためである。

荷重形態は個々の計測地点によって状況が異なるため、実際には個別の調査が必要であるが、例えば、ある荷重分布条件を想定して設計された路線が、地域全体の発展による利用者の増加で日交通量が増大し、結果的に大型車台数が増大した場合に比べ、大規模な工業地域の開発等で大型車台数のみが増大し、大型車混入率が上がった場合の方が、疲労による劣化が顕著となる可能性もあると考えることができる。

(3) 押抜きせん断強度のばらつき

本検討において床版の疲労耐久性評価の基準となる押抜きせん断耐力は、コンクリートの圧縮強度や床版

厚等の影響を受ける。ここでは、これらの変化に対し、日交通量 1.5 万台、大型車交通量 35%（重交通路線）の場合を例に、安全率への影響を検討する。

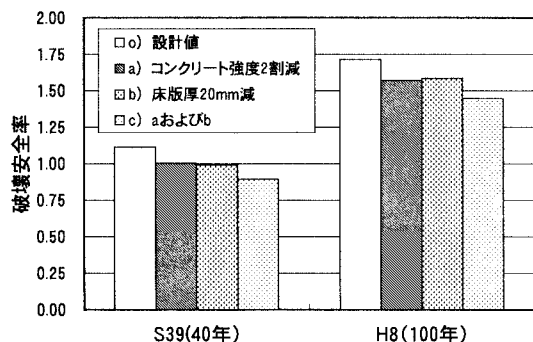


図-5 施工誤差等による安全率の変化

図-5 より、設計値どおりに施工した場合に比べ、a) コンクリート圧縮強度が 2 割低減した場合、b) 床版厚が 20mm 少なかった場合のそれぞれで約 1 割、c) 両者が同時に起こった場合で 1.5 割～2 割程度、安全率が低下することがわかる。この時、(1) に示した昭和 39 年道示床版の安全率は、ほとんど全てのケースで 1.0 を下回り、損傷する可能性が高くなる。

実際の施工環境のもとで、このような誤差がどの程度の頻度で発生するかは明らかではないが、確保すべき安全率の設定においては、このような施工時の状態が安全率に及ぼす影響を定量的に把握し、設計および施工を合わせて所要の安全率が確保できるように計画する必要がある。

#### (4) 所要安全率の検討

ここで述べた検討方法で求められる安全率が、設計上の必要な安全率以上である場合、疲労耐久性が確保されていると判断することとなる。安全率をいくつ確保するかは、施工環境の影響や、公共構造物としての重要度などを踏まえ、今後、詳細な現地状況調査を行って決定してゆく必要があるが、暫定案として鋼部材と同様な 1.7 程度の安全率を確保することを一つの目安と考えることができる。

安全率を 1.7 以上確保する場合、図-3 より、大型車混入率が 45% 以上の路線や、日交通量が 1.0 万台を超えるような路線においては、平成 8 年道示床版以上の耐久性を有する床版を選択する必要がある。

## 7. 結論

- 1) コンクリート標準示方書に示される押抜きせん断疲労耐力  $V_{rpd}$  の評価式を用いて、輪荷重を受ける鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性の評価を行うことが可能である。
- 2) 床版の供用期間を 40 年とした場合、損傷の発生し

ている昭和 39 年道示床版では、概ね安全率は 1.5 以下となる。一方、平成 8 年道示床版は 1.5 以上の安全率を有している。

- 3) さらに、H8 床版について供用期間を 40 年、100 年で比較すると安全率の差は大きくない。これは、疲労耐久性を表す S-N 曲線が  $m=14$  という緩やかな傾きをもつことによる。従って、鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性は、載荷回数の安全率より、破壊予想荷重の設計最大荷重に対する安全率によって評価する方が合理的であるといえる。
- 4) 大型車交通量が同じでも、日交通量と大型車混入率の関係によって、疲労耐久性に対する安全率が変わってくる。従って、設計においてはこれらの交通荷重に関する影響を実態に基づき具体的に考慮する必要がある。
- 5) 所要安全率の設定には、さらに詳細な現地状況調査を必要とするが、鋼部材と同様な 1.7 と仮定した場合、重交通路線においては、平成 8 年道示床版以上の耐久性を必要とする可能性がある。

## おわりに

道路橋床版の性能照査型設計の実現には、合理的かつ実用的な疲労耐久性の照査方法の確立が不可欠であり<sup>8)</sup>、土木学会鋼構造委員会道路橋床版の調査研究小委員会性能照査 WG における「道路橋床版の性能照査型設計指針(案)」作成の過程で、照査方法確立の重要性を再認識したことが、本研究を行うに至った一因である。WG メンバーには、本論文の参考となる貴重なご意見を頂いた。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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報告集、9-2、pp.627-632,1987
- 2) (社)土木学会鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計、p300,2000.10
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]、pp.117-118,2002
- 4) 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、国総研資料第 28 号、2002.3
- 5) 藤原実、岩崎泰彦、田中良樹：限界状態設計法における設計活荷重に関する検討Ⅱ、土木研究所資料第 2700 号、1988.1
- 6) 中村俊行、桐山孝晴、西尾隆：車両重量調査結果の解析(その 4)、土木研究所資料第 3321 号、1995.2
- 7) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針、2002.3
- 8) (社)土木学会道路橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の性能照査型設計指針(案)、2004.11