

## SFRC 床版の耐疲労性の評価および S-N 曲線式の提案

日大生産工(院) ○伊藤清志 日大生産工 阿部忠  
住友大阪セメント(株) 小堀規行 (株)オーシャン 深川克彦

## 1. はじめに

本研究では、SFRC 床版の耐荷力性能については、一面せん断強度試験および割裂試験から得られたせん断強度および引張強度を阿部ら<sup>1), 2)</sup>(以下、文献 1), 2)とする)が提案する RC 床版の押抜きせん断耐荷力式へ適用して SFRC 床版の破壊時の押抜きせん断耐荷力を評価する。次に、S-N 曲線式の S 値に基準荷重を本提案する SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力で除した値と輪荷重走行疲労実験から得られた SFRC 床版の等価走行回数との関係から、SFRC 床版の寿命予測式 S-N 曲線式を提案した。

## 2. RC床版・SFRC床版供試体の材料および寸法

(1) RC床版供試体の使用材料 RC 床版供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと 5mm 以下の砕砂および 5mm ~ 20mm の砕石を使用した。コンクリートの圧縮強度は材齢 28 日で  $24\text{N/mm}^2$  以上確保できる配合条件とする。ここで、RC 床版の示方配合を表-1に示す。

(2) SFRC床版供試体 供試体 SFRC-普1 に用いた配合は、普通セメントに鋼繊維を混入した SFRC の要求性能を RC 床版と同様にコンクリートの設計基準強度  $24\text{N/mm}^2$  が確保できるものとする。なお、鋼繊維には  $\phi 0.62\text{mm}$ 、長さ 30mm を混入量 1.27Vol.% で混入した。次に、供試体 SFRC-普2 に用いた配合は、普通セメントに鋼繊維を混入した SFRC の材齢 28 日の発現強度を  $40\text{N/mm}^2$  が確保できることを目標とし、ここで、供試体 SFRC-普1 および供試体 SFRC-普2 に用いた鉄筋は RC 床版供試体と同様に D10 を用い、各々の配合条件を表-1に併記する。

(3) 材料特性値 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-2に示す。

供試体 RC のコンクリートの圧縮強度は、材齢 28 日で  $34.8\text{N/mm}^2$  である。実験時の圧縮強度は  $35.0\text{N/mm}^2$  である。次に、床版供試体 SFRC-普1 の圧縮強度は材齢 28 日の圧縮強度は  $36.3\text{N/mm}^2$  であり、実験時の圧縮強度は  $37.5\text{N/mm}^2$  である。また、供試体 SFRC-普2 の圧縮強度は、材齢 48 時間で  $30.7\text{N/mm}^2$ 、材齢 28 日の圧縮強度は  $52.3\text{N/mm}^2$  であり、実験時の圧縮強度は  $53.6\text{N/mm}^2$  である。な

表-1 RC床版およびSFRC床版の配合

供試体	スラブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					SP (B×%)	AE (B×%)
				C	W	S	G	SF		
RC	8.0 ±2.5	53.0	45.0	302	160	803	1019		2.00	
SFRC-普1	8.0 ±2.5	53.0	45.0	302	160	803	1019	100	2.00	0.004
SFRC-普2	8.0 ±2.5	41.0	53.9	427	175	890	788	100	2.00	0.004
SFRC-早1	8.0 ±2.5	41.0	53.9	427	175	881	780	100	2.00	0.004

表-2 材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋 (SD295A, D10)		
		降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
RC	35.0	368	513	200
SFRC-普1	37.5	368	513	200
SFRC-普2	53.6	368	513	200
SFRC-早1	54.3	368	513	200

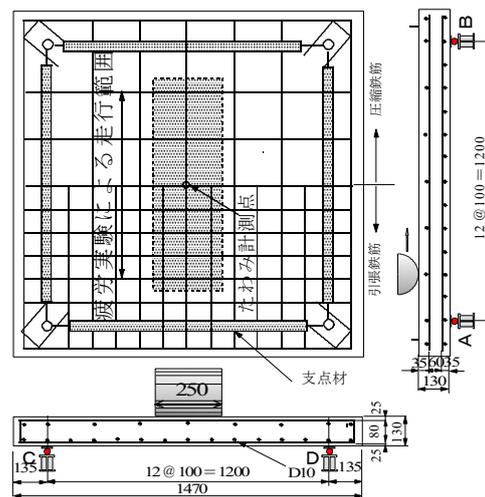


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

お、疲労試験に用いる床版供試体 SFRC-早1 の供試体の圧縮強度は  $54.3\text{N/mm}^2$  である。

(4) 供試体寸法および鉄筋配置 RC 床版供試体および SFRC 床版供試体は 1994 年改訂以降の道示<sup>3)</sup>に準拠し、その 1/2 モデルとする。よって、RC 床版および SFRC 床版の供試体寸法は、全長 1,470mm、支間 1,200mm、厚さ 130mm、鉄筋は D10 を用いて複鉄筋配置とした。引張側は軸直角方向および軸方向ともに 100mm 間隔に配置し、圧縮側の鉄筋量は引張鉄筋量の 1/2 とする。供試体寸法お

Proposal of Fatigue Resistance Rating and S-N Curve Equation in SFRC slabs

by

Kiyoshi ITO, Tadashi ABE, Noriyuki KOZAKAI and Katuhiko FUKAGAWA

よび鉄筋配置を図-1に示す。次に、SFRC 床版供試体寸法および鉄筋配置も RC 床版供試体と同様であり、図-1に併記した。

### 3. 輪荷重走行疲労実験および等価走行回数

(1) 輪荷重走行疲労実験 輪荷重走行疲労実験は、床版中央から ±450mm の範囲 (900mm) を連続走行させる実験である。荷重載荷方法は、RC 床版供試体および SFRC 床版供試体ともに初期走行荷重を 80kN とし、20,000 回走行ごとに 20kN ずつ増加する。なお、RC 床版および SFRC 床版の耐疲労性の評価は等価走行回数を得て評価する。

(2) 等価走行回数 等価走行回数  $N_{eq}$  は、マイナー則に従うと仮定すると式(1)で与えられる。なお、式(1)における基準荷重  $P$  は、1994 年改訂以降の道示の活荷重 100kN に安全率を考慮し、60kN (=  $100 \times 1.2 \times 1/2$ ) とする。また、式(1)における S-N 曲線の傾きの逆数  $m$  には、松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値  $m = 12.7$  を適用する<sup>4), 5)</sup>。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n (P_i / P)^m \times N_i \quad (1)$$

ここで、 $P_i$  : 載荷荷重 (kN)、 $N_i$  : 実験走行回数 (回)

### 4. 輪荷重走行疲労実験における等価走行回数

輪荷重走行疲労実験における等価走行回数を表-3に示す。

(1) RC床版供試体 RC 床版供試体の等価走行回数は、供試体 RC-1, 2 で、それぞれ  $7.34 \times 10^6$  回、 $8.52 \times 10^6$  回である。等価走行回数の平均は  $7.93 \times 10^6$  回であり、この等価走行回数の平均を基準に SFRC 床版の耐疲労性を評価する。

(2) SFRC-普1 普通セメントを用いた供試体 SFRC-普 1-1 および SFRC-普 1-2 の等価走行回数はそれぞれ  $73.24 \times 10^6$  回、 $109.17 \times 10^6$  回であり、等価走行回数の平均は  $91.20 \times 10^6$  回となり、供試体 RC の等価走行回数の 11.5 倍となる。

(3) SFRC-普2 普通セメントを用いた供試体 SFRC-普 2-1 が  $571.21 \times 10^6$  回、供試体 SFRC-普 2-2 は  $378.02 \times 10^6$  回であり、等価走行回数の平均は  $474.62 \times 10^6$  回となり、供試体 RC の等価走行回数の 59.8 倍となる。

(4) SFRC-早1 早強コンクリートに鋼繊維を混入した SFRC-普 2 と同様な配合条件としたことから SFRC の圧縮強度は  $54.3 \text{N/mm}^2$  である。供試体 SFRC-早 1-1 が  $641.91 \times 10^6$  回、供試体 SFRC-早 1-2 は  $387.40 \times 10^6$  回であり、等価走行回数の平均は  $514.656 \times 10^6$  回となり、供試体 RC の等価走行回数の 64.8 倍となる。

以上より、輪荷重走行疲労実験による RC 床版および SFRC 床版供試体の等価走行回数を基に S-N

表-3 等価走行回数および等価走行回数比

供試体	等価走行回数 (回)	等価走行回数の平均 (回)	等価走行回数比
RC-1	7,347,504	7,938,359	—
RC-2	8,529,213		
SFRC-普1-1	73,236,822	91,202,545	11.49
SFRC-普1-2	109,168,269		
SFRC-普2-1	571,213,748	474,619,093	59.79
SFRC-普2-2	378,024,438		
SFRC-早1	641,910,007	514,656,741	64.83
SFRC-早2	387,403,475		

曲線式との整合性を検証する。

### 5. S-N曲線および押抜きせん断耐荷力

(1) 阿部らが提案するRC床版のS-N曲線 阿部らが提案する RC 床版の S-N 曲線式は、1994 年改訂の道示に基づいて設計し、その 1/2, 3/5 モデルとした RC 床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を実施し、S-N 曲線式(2)を提案している<sup>1), 2)</sup>。なお S-N 曲線式には文献 1), 2)に示す輪荷重走行実験から得られた破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max}$  が適用されている。

$$\log(P/P_{s,max}) = -0.06417 \log N + \log 0.995 \quad (2)$$

ここに、 $P$  : 基準荷重、 $P_{s,max}$  : 押抜きせん断耐荷力 (SFRC 床版の場合は SFRC 床版の破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max,s}$  (kN))、 $N$  : 繰り返し回数 (回) (本論文では等価走行回数  $N_{eq}$  を適用する)

(2) RC床版の押抜きせん断耐荷力 文献 1), 2)に示す破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力式は、輪荷重の軸直角方向の設置面幅  $A$  と軸方向の設置面幅  $B$  の位置からが 45 度下縁に分布するものとし、限界状態における等価応力ブロック  $a$  の範囲にはコンクリートのせん断強度  $f_{cv0}$  の影響、ダウエル効果の影響をうける範囲には岡村によるコンクリートの引張強度  $f_t$  が及ぼすものとしてモデル化している。ここで、RC 床版の破壊荷重付近の押抜きせん断力学モデルを図-2、耐荷力式を式(3)として与えられている。

$$P_{s,max} = f_{cv0} \{2(B+2a)a + 2(A \times a)\} + f_t \{4(2d_d + B)C_d\} \quad (3)$$

$$f_{cv0} = 0.688 f_c^{0.606} \leq f_c = 80 \text{N/mm}^2$$

$$f_t = 0.269 f_c^{2/3}$$

ここで、 $A$  : 載荷版の主鉄筋方向の辺長 (mm)、 $B$  : 載荷版の配力筋方向の辺長 (mm)、 $a$  : 主鉄筋方向 ( $a_x$ ) と配力鉄筋方向 ( $a_y$ ) の等価応力ブロックの平均値 ( $a = (a_x + a_y)/2$  (mm))、 $C_d$  : 主鉄筋のかぶり ( $C_x$ ) と配力筋方向のかぶり ( $C_y$ ) の平均値 ( $= (C_x + C_y)/2$  (mm))、 $d_d$  : 主鉄筋の有効高さ ( $d_x$ ) と配力筋方向の有効高さ ( $d_y$ ) の平均値 (mm) ( $= H - C_d$ )、 $H$  : 床版全厚 (mm)、 $f_{cv0}$  : コンクリートのせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

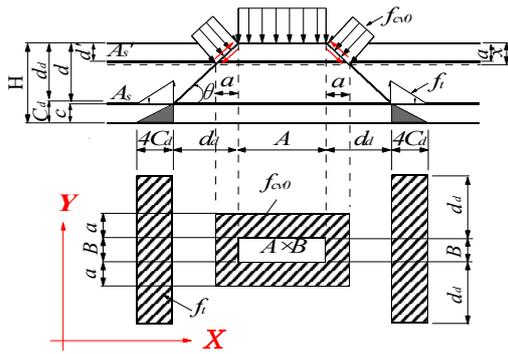


図-2 押抜きせん断力学モデル

等価応力ブロック : a

$$a/d = m/2 [p - p'(\epsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y)] + \sqrt{\{p - p'(\epsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y)\}^2 + p' \cdot 4\beta/m \cdot d'/d \cdot \epsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y} \quad (4)$$

ただし,  $m = f_y/0.85f_c$ ,  $p = A_s/b \cdot d$ ,  $p' = A'_s/b \cdot d$ ,  $\beta = 0.8$

ここで,  $f_y$ : 鉄筋の引張強度 (=513N/mm<sup>2</sup> (表-2)),  $A_s$ : 引張側の鉄筋量 (mm<sup>2</sup>),  $A'_s$ : 圧縮側の鉄筋量 (mm<sup>2</sup>),  $d$ : 有効高さ (mm),  $d'$ : 圧縮縁から圧縮鉄筋の図心までの距離 (mm),  $b$ : 部材幅 (=  $L - (2.5d_y \times 2)$ ,  $d_y$ : 配力筋方向の有効高) (mm),  $E_s$ : 鉄筋のヤング係数 (= 200kN/mm<sup>2</sup>),  $\epsilon'_{cu}$ : コンクリートの終局ひずみ (=0.0035),  $f_c$ : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

(3) SFRC床版の押抜きせん断耐荷力 文献1)で示すRC床版の押抜きせん断耐荷力式において, 等価応力ブロック a にはコンクリートのせん断強度  $f_{cv0}$  の影響, ダウエルの影響を受ける範囲にはコンクリートの引張強度  $f_t$  が適用されている。そこで, SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力の推定には, 等価応力ブロック a には SFRC 材の一面せん断試験から評価したせん断強度  $\tau_{max,S}$  を適用する。また, ダウエルの影響を受ける範囲には割裂試験から評価した引張強度  $\sigma_{t,S}$  を RC 床版の押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max}$  に適用する。

SFRC 材のせん断強度  $f_{cv0,S}$  については, 筆者らは圧縮強度 25N/mm<sup>2</sup> ~ 75N/mm<sup>2</sup> の範囲の  $\phi 100 \times 200$ mm の円柱試験体を用いて一面せん断試験および割裂試験を行い, 圧縮強度とせん断強度式および圧縮強度と引張強度をそれぞれ式(5), (6)を提案している。

SFRC のせん断強度 :  $f_{cv0,S}$

$$f_{cv0,S} = 0.9685f_{c,S}^{0.5568} \leq f_{c,S} = 80\text{N/mm}^2 \quad (5)$$

ここで,  $f_{cv0,S}$ : SFRC のせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $f_{c,S}$ : SFRC の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

SFRC の引張強度 :  $f_{t,S}$

$$f_{t,S} = 0.5086f_{c,S}^{0.5627} \leq f_{c,S} = 80\text{N/mm}^2 \quad (6)$$

ここで,  $f_{t,S}$ : SFRC の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $f_{c,S}$ :

表-4 押抜きせん断耐荷力およびS値

供試体	押抜きせん断耐荷力 (kN)	規準荷重 (kN)	S値 ( $P/P_{s,max}$ , $P/P_{s,max,S}$ )	等価走行回数 ( $N_{eq}$ )
RC-1	166.3	60.0	0.361	7,347,504
RC-2	166.3	60.0	0.361	8,529,213
SFRC-普1-1	209.5	60.0	0.286	73,236,822
SFRC-普1-2	209.5	60.0	0.286	109,168,269
SFRC-普2-1	233.3	60.0	0.257	571,213,748
SFRC-普2-2	233.3	60.0	0.257	378,024,438
SFRC-早1-1	234.3	60.0	0.256	641,910,007
SFRC-早1-2	234.3	60.0	0.256	387,403,475

SFRC の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

よって, SFRC 床版の破壊付近の押抜きせん断耐荷力式には, せん断強度式(5), 引張強度式(6)を RC 床版の押抜きせん断耐荷力式(3)に適用すると式(7)として与えられる。

SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力 :  $P_{s,max,S}$

$$P_{s,max,S} = f_{cv0,S} \{2(B + 2a)a + 2(A \times a)\} + f_{c,S} \{4(2d + B)C_d\} \quad (7)$$

$$f_{cv0,S} = 0.9685f_{c,S}^{0.5568} \leq f_{c,S} = 80\text{N/mm}^2$$

$$f_{t,S} = 0.5086f_{c,S}^{0.5627} \leq f_{c,S} = 80\text{N/mm}^2$$

以上より, 本実験に用いた RC 床版供試体および SFRC 床版供試体の押抜きせん断耐荷力は文献<sup>7)</sup>に適用して算定し, S-N 曲線式における縦軸の S 値を算定する。

## 6. SFRC床版のS値と走行回数Nの関係

### (1) 本実験供試体のS値および等価走行回数 $N_{eq}$

道示の規定に準拠して 1/2 モデルとした RC 床版供試体および SFRC 床版供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行った場合の基準荷重 P (60kN) を押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max}$  および  $P_{s,max,S}$  で除して無次元化した S 値と本実験の等価走行回数  $N_{eq}$  の関係より RC 床版の S-N 曲線式との整合性を検証する。SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max,S}$  算定においては, 本提案する SFRC 材のせん断強度  $f_{cv0,S}$  および割裂試験による引張強度  $f_{t,S}$  の推定式(5), (6)を適用する。ここで, SFRC の押抜きせん断耐荷力式(7)より算出した結果を表-4に示す。また, S-N 曲線式の S 値は基準荷重 P をコンクリートおよび SFRC の圧縮強度, 鉄筋の材料特性値を用いて算定したそれぞれの押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max}$ ,  $P_{s,max,S}$  で除して無次元化し表-4に併記した。なお, 表-4に示す等価走行回数  $N_{eq}$  は輪荷重走行疲労実験において等価走行回数である。

(2) S-N曲線 表-4に示した縦軸 S 値と横軸等価走行回数の関係を図-3に示す。

RC 床版の本実験における S 値 ( $P/P_{s,max}$ ) と等価走行回数の関係は図-3に示すように阿部らが提案している S-N 曲線式上にプロットされている。次に, SFRC-普1 の供試体は圧縮強度が RC 床版とほぼ同等であるが, 鋼繊維の混入により押抜きせん

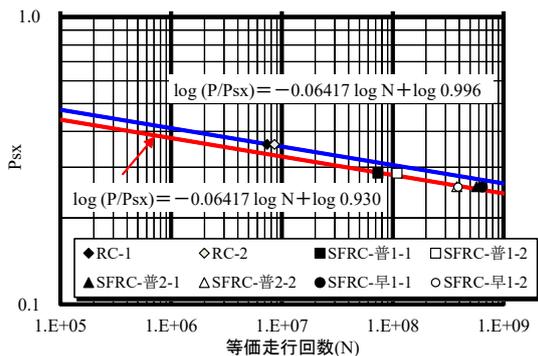


図-3 RC床版およびSFRC床版のS-N曲線

断耐荷力が 209.5kN であり、等価走行回数  $N_{eq}$  も RC 床版の 11.5 倍である。よって、基準荷重  $P$  を押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max,S}$  で除した  $S$  値 ( $P/P_{s,max,S}$ ) は RC 床版の 0.361 に対して 0.286 である。

$S$  値と等価走行回数の関係は RC 床版供試体の S-N 曲線の下方にプロットされる。同様に SFRC-普通 2 の床版供試体は圧縮強度が  $53.6\text{N/mm}^2$  と早強コンクリートの強度である。鋼繊維混入することで押抜きせん断耐荷力  $233.3\text{kN}$  であり、大幅に向上している。よって、基準荷重  $P$  を押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max,S}$  で除して無次元化した  $S$  値は 0.257 となり、RC 床版供試体の S-N 曲線式の下方にプロットされる。また、供試体 SFRC-早 1 も供試体 SFRC-普通 2 とほぼ同等な材料特性値であることから基準荷重  $P$  を押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max,S}$  で除して無次元化した  $S$  値は 0.256 となり、RC 床版供試体の S-N 曲線式の下方にプロットされる。

(3) SFRC床版のS-N曲線式の提案 RC 床版の疲労寿命予測には鉄筋に異形鉄筋が使用された以降の道示の基準で設計された RC 床版に対しては筆者らが提案する S-N 曲線式 (式(2)) および S-N 曲線式における  $S$  値の算定においては本提案する押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max,S}$  (式(7)) を適用することで評価できる。

一方、SFRC 床版は普通セメントおよび早強セメントに  $\phi 0.6\text{mm}$ 、長さ  $30\text{mm}$  の鋼繊維を  $1.27\text{Vol.}\%$  で混入することで、押抜きせん断耐荷力の算定に大きく寄与するせん断強度および引張強度が普通コンクリートに比して 1.5 倍以上となることから耐荷力性能および耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。よって、S-N 曲線式においては SFRC 床版の  $S$  値と  $N$  の関係より、新たな推定式として式 (8)を提案する。よって、破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max,S}$  に対する S-N 曲線式は式(8)として与えられる。

SFRC 床版の S-N 曲線式

$$\log(P/P_{s,max,S}) = -0.06417 \log N + \log 0.930 \quad (8)$$

ここに、 $P$ ：基準荷重、 $P_{s,max,S}$ ：押抜きせん断耐荷力 (kN) (式(7))、 $N$ ：繰返し回数 (回) (本論文では等価走行回数  $N_{eq}$  を適用する)

以上より、SFRC 床版の寿命推定には破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力  $P_{s,max,S}$  を本提案する SFRC 床版の S-N 曲線式に適用することで寿命推定が可能になるものと考えられる。

## 7. まとめ

- (1) 輪荷重走行疲労実験においては RC 床版供試体の等価走行回数に対して普通セメントを用いた圧縮強度  $37.5\text{N/mm}^2$  の供試体 SFRC-普通 1 は 11.5 倍、圧縮強度  $53.6\text{N/mm}^2$  の供試体 SFRC-普通 2 は 59.8 倍の等価走行回数を得られている。また、早強セメントを用いた SFRC の圧縮強度  $54.3\text{N/mm}^2$  の供試体 SFRC-早 1 は 64.8 倍となった。したがって、SFRC 床版は鋼繊維が引張強度を分担し、耐疲労性が大幅に向上することから実用的である床版となる。
- (2) RC 床版供試体の S-N 曲線式との整合性については、SFRC 床版は鋼繊維の配合により、耐荷力性能の向上が図られることから、等価走行回数も大幅に向上するものの、 $S$  値は RC 床版供試体の下方にプロットされる結果となったが、本提案する SFRC の押抜きせん断耐荷力および S-N 曲線式より寿命推定が可能になるものと考えられる。
- (3) 実橋床版への適用においては従来の普通セメントおよび早強セメントを用いた RC 床版の配合条件に  $\phi 0.62\text{mm}$ 、長さ  $30\text{mm}$  の鋼繊維を混入量  $1.27\text{Vol.}\%$  で混入した鋼繊維を混入するが、鋼繊維は比較的安価であり、混入することで耐久性に優れた床版となることが実証された。

## 参考文献

- 1) 阿部忠, 木田哲量, 徐銘謙, 澤野利章：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価式に関する研究, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.199-207, 2007.3
- 2) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 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, 2011.1
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, 2012.3
- 4) 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
- 5) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007
- 6) 伊藤清志, 阿部忠, 澤野利章, 深川克彦：SFRC 材の特性値および SFRC 床版の押抜きせん断耐荷力の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.367-372, 2018.7