

炭素繊維材料補強RC床版の耐疲労性の評価 およびS-N曲線に関する研究

日大生産工(院) ○元 燦豪 日大生産工 阿部 忠
日大生産工 澤野利章 新日鉄マテリアルズ(株) 小森篤也

1. はじめに

高度経済成長期に建設された道路橋の RC 床版は損傷が著しく、荷重、床版厚、鉄筋量など 2002 年改訂の道路橋示方書・同解説(以下、道示とする)¹⁾の基準と比較して不足しており、2002 年改訂の道示の規定に対応できる補強対策を講じる必要がある。そこで本研究では、床版寸法が異なる 2 タイプの RC 床版に炭素繊維材料による接着補強した供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行い、補強効果および耐疲労性を評価する。また、3/5 モデルとした供試体に炭素繊維シートによる(以下、CFS とする)接着補強を施した RC 床版供試体を用いて 1/2 モデルによる CFS 接着補強 RC 床版の S-N 曲線式との整合性を検証し、道路橋 RC 床版の CFS 接着補強法における余寿命推定の一助とする。

2. 供試体材料および寸法

2.1 供試体概要

本実験に用いる供試体は、道示¹⁾の規定に基づいて設計し、本実験装置の輪荷重、すなわち車輪幅と道示に規定する輪荷重幅(500mm)の比によるモデル化を行うものとする。本実験は 2 タイプの輪荷重装置を使用することから、幅 250mm の車輪を使用する供試体は 1/2 モデルとし、供試体記号を A タイプとする。また、幅 300mm の車輪を用いる供試体は 3/5 モデルとし、供試体記号を B タイプとする。

2.2 使用材料

(1) RC 床版

A タイプおよび B タイプの 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(JIS A 5005)を使用した。また、鉄筋には A タイプの RC 床版供試体に SD295A、D10 を配置し、B タイプの RC 床版供試体の鉄筋に SD295A、D13 を配置した。実験時におけるコンクリートの圧縮強度および鉄筋の材料特性値を表-1に示す。

(2) 炭素繊維シート(CFS)

本実験に用いた CFS は、目付量 200g/m²、設計厚 0.111mm の連続繊維シートおよびプライマー、CFS 専用の接着材を用いた。ここで、CFS の材料特性を表-2に示す。

(3) 炭素繊維ストランドシート(CFSS)

新材料である炭素繊維ストランド(以下、CFSS とする)は、樹脂を含浸・硬化させた炭素繊維補強プラスチック(CFRP)ストランドをすだれ状に加工した材料である。本

表-1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

供試体	コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)		鉄筋 (SD295A)		
	RC,CFSS	CFS	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
A タイプ	35	32	368	516	200
B タイプ	30	30	370	511	200

表-2 CFSおよびCFSSの材料特性値

補強材料	目付量 (g/m ²)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
CFS	200	0.111	4,420	235
CFSS	600	0.333	4,310	245

実験には CFS を全面接着補強した場合の CFS 目付量と同等とした。よって、CFSS には目付量 600g/m²、設計厚 0.333mm を用いた。CFSS の材料特性を表-2に併記する。

2.3 供試体寸法および鉄筋の配置

A タイプの RC 床版供試体の寸法は、全長 1,470mm、支間 1,200mm、床版厚 130mm とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の主鉄筋および配力筋ともに D10 を 100mm 間隔で配置し、有効高はそれぞれ 105mm、95mm とした。圧縮側は引張鉄筋量の 1/2 を配置した。供試体名称は A-RC とする。次に、B タイプの RC 床版供試体は全長 1,600mm、支間 1,400mm、床版厚 150mm である。鉄筋は、D13 を 120mm 間隔で配置し、有効高は 125mm、105mm とした。供試体名称は B-RC とする。ここで、A タイプおよび B タイプの RC 床版供試体寸法および鉄筋配置を図-1に示す。

2.4 CFS接着およびCFSS格子接着補強方法

(1) CFS 接着補強方法

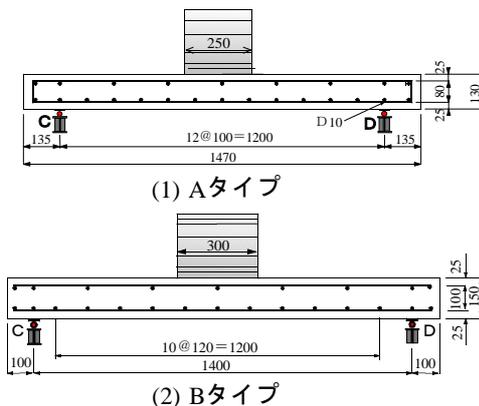


図-1 RC床版の寸法および鉄筋の配置

Study on evaluation of the fatigue resistance of RC slabs strengthened by Carbon Fiber Materials and S-N Curve

Chanho WON, Tadashi ABE, Toshiaki SAWANO and Atsuya KOMORI

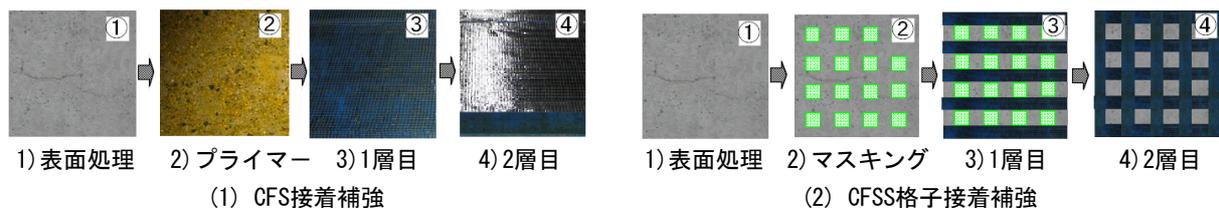


図-2 CFS接着およびCFSS格子接着補強法の手順

CFS 接着補強方法は、RC 床版供試体下面の不純物の除去および不陸修正のためにコンクリートサンダーで研磨する(図-2(1)、1))。次に、コンクリートと CFS の付着性を高めるためにプライマーを塗布・含浸させて 12 時間以上の養生を行う(図-2(1)、2))。その後、CFS を専用のエポキシ系含浸樹脂で軸直角方向に全面接着し、12 時間以上の養生を行う(図-2(1)、3))。同様に、軸方向に 2 層目を接着し、12 時間以上の養生を行う(図-2(1)、4))。ここで、A タイプおよび B タイプの RC 床版供試体に CFS 接着補強を施した供試体名称をそれぞれ A-CFS、B-CFS とする。

(2) CFSS 格子接着補強方法

CFSS 格子接着補強法は、RC 床版下面をコンクリートサンダーで研磨し、平滑に仕上げる(図-2(2)、1))。次に、RC 床版の下面に CFSS 格子接着補強する以外の面、すなわち格子間にマスキングテープを接着する(図-2(2)、2))。その後、CFSS を 150mm 間隔で軸直角方向に仮止めし、すだれ状の空間部から CFSS 専用のエポキシ系樹脂接着剤を浸透させる(図-2(2)、3))。その後、軸方向に CFSS を接着して格子状を形成させ(図-2(2)、4))、12 時間以上の養生を行う。CFSS の設計量は、床版支間内の範囲に軸直角方向および軸方向に CFS(目付量 200g/m²、設計厚 0.111mm)を各 1 層全面接着した量と同等とした。ここで、A、B タイプの RC 床版供試体に CFSS 格子接着補強を施した供試体名称をそれぞれ A-CFSS、B-CFSS とする。

3. 実験方法および等価走行回数

3.1 実験方法

輪荷重走行による疲労実験における CFS 接着補強および CFSS 格子接着補強法における補強効果および耐疲労性の評価は、20,000 回ごとに荷重を段階的に増加させることから基準荷重に対する実験荷重と実験走行回数から等価走行回数を評価する。

(1) A タイプ床版

A タイプの RC 床版供試体の輪荷重走行疲労実験における車輪幅は 250mm であることから、供試体も 1/2 モデルとして設計した。よって、基準荷重は道示に規定する活荷重 100kN の 1/2 に安全率 1.2 を考慮して 60kN とする。輪荷重走行疲労実験は供試体中央から軸方向に ±450mm の範囲を連続走行させる。初期荷重は 80kN、100kN で、それぞれ 20,000 回走行し、荷重 100kN 以降は 20,000 回走行ごとに荷重を 10kN ずつ増加させる。

(2) B タイプ床版

B タイプの RC 床版供試体は、車輪幅が 300mm である

ことから、供試体寸法も 3/5 モデルとして製作した。よって、基準荷重は活荷重の 3/5 に安全率 1.2 を考慮して 72kN とする。輪荷重走行疲労実験は供試体中央から軸方向に ±500mm の範囲を連続走行させる。初期荷重は 100kN、120kN で、それぞれ 20,000 回走行させる。120kN 以降は、荷重を 10kN ずつ増加して 20,000 回走行し、荷重の増加と走行を破壊するまで繰り返す。

3.2 等価走行回数および補強等価走行回数

(1) 等価走行回数

本実験では、20,000 回走行ごとに荷重を増加させることから、基準荷重と載荷荷重および実験走行回数の関係から等価走行回数 N_{eq} を算出して補強効果および耐疲労性を評価する。輪荷重走行による等価走行回数 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]に適用する S-N 曲線の傾きの逆数 m には、松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線の傾きの逆数 12.7 を適用する²⁾。

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

ここで、 N_{eq} : 等価繰返し走行回数(回)、 P_i : 載荷荷重(kN)、 P : 基準荷重(A タイプ : 60kN、B タイプ : 72kN)、 n_i : 実験走行回数(回)、 m : S-N 曲線の傾きの逆数(=12.7)²⁾

(2) 補強等価走行回数

CFS 接着補強した RC 床版の等価走行回数は、松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線式より算定している。これは、RC 床版を用いた輪荷重走行疲労実験による S-N 曲線の傾きの逆数(m)であることから、CFS 接着補強した RC 床版の等価走行回数から算定される余寿命は数百年に相当し、実橋床版の疲労寿命と大きな差違が生じる。そこで、筆者らは CFS 接着補強した RC 床版の等価走行回数に輪荷重走行疲労実験から得られた D-N 曲線から得られる劣化値および種々の劣化係数を適用した CFS 接着補強 RC 床版の補強等価走行回数(N_{D0-eq})を式[2]として提案している³⁾。

$$N_{D0-eq} = \sum_{i=1}^n (N_{eqi} \cdot D_{Di} \cdot D_c \cdot D_s \cdot D_E) \quad [2]$$

$$N_{eqi} = (P_i/P)^m \times n_i \quad [2.1]$$

$$D_{Di} = -0.0541 \log N_{eqi} + 1.1 \quad [2.2]$$

ここで、 N_{eqi} : 等価走行回数、 D_{Di} : CFS 接着補強における劣化係数、 D_c : 湿潤状態におけるコンクリート劣化係数(=0.70)⁴⁾、 D_s : 使用鉄筋係数(= f_{yd-sR}/f_{yd-sD})、 D_E : 建設地域の環境条件による係数(= 1.0)

4. 実験結果および考察

4.1 等価走行回数

本実験における等価走行回数の結果を表-3に示す。また、CFS 接着補強した RC 床版に D-N 曲線式による劣化係数、湿潤状態による劣化係数および使用鉄筋に対する補正係数を適用して既存 RC 床版が 1964 年(以下、S39 床版とする)および 1968 年(以下、S43 床版とする)を式[2]より算定し、それぞれの補強等価走行回数を表-3に併記する。

(1) 乾燥状態における等価走行回数

A タイプ RC 床版供試体 A-RC の平均等価走行回数 N_{eq} を基準に CFS 接着補強した RC 床版供試体 A-CFS の平均等価走行回数を比較すると 18.7 倍の補強効果が得られた。また、CFSS 格子接着補強した RC 床版供試体 A-CFSS の平均等価走行回数は 21.1 倍の補強効果が得られた。

B タイプ RC 床版供試体 B-RC の平均等価走行回数 N_{eq} を基準に CFS 接着補強した RC 床版供試体 B-CFS の平均等価走行回数を比較すると 20.6 倍となり、CFSS 格子接着補強した RC 床版供試体は 25.3 倍の耐疲労性が得られた。

また、CFS 接着補強した RC 床版供試体と CFSS 格子接着補強した RC 床版供試体を比較すると A、B タイプの供試体ともに新材料および新工法である CFSS 格子接着補強法が 1.1 ~ 1.2 倍の等価走行回数が上回った。

(2) 各種劣化要因を適用した補強等価走行回数

A タイプで既設 RC 床版が S39 年の基準で設計された RC 床版に CFS 接着補強した場合の補強等価走行回数の平均は RC 床版の 6.9 倍、CFSS 格子接着補強した場合は 7.8 倍の補強効果が得られた。乾燥状態における等価走行回数の 37%である。次に、既設 RC 床版が S43 年改訂の基準で設計された RC 床版に CFS 接着補強した場合の補強等価走行回数の平均は RC 床版の 10.9 倍、CFSS 格子接着補強した場合は 12.3 倍の補強効果が得られた。乾燥状態における等価走行回数の 58 %である。

B タイプで既設 RC 床版が S39 年の RC 床版に CFS 接着補強した場合の補強等価走行回数の平均は RC 床版の 7.5 倍、CFSS 格子接着補強した供試体は 9.1 倍の補強効果が得られた。次に、既設 RC 床版が S43 年の床版に CFS 接着補強した場合の補強等価走行回数の平均は RC 床版の

11.8 倍となり、CFSS 格子接着補強した供試体は 14.3 倍の補強効果が得られた。乾燥状態における等価走行回数比は A タイプと同様である。したがって、筆者らが提案する CFS 接着補強床版の D-N 曲線から算定される劣化係数 (D_{DB}) および各種劣化要因を適用して算定された補強等価走行回数 (N_{D0-eq}) を用いて S-N 曲線式を評価する必要がある。

4.2 RC床版、CFS接着補強RC床版のS-N曲線

(1) 松井および土木研究所の S-N 曲線

RC 床版の耐疲労性の評価方法には、S-N 曲線が用いられている。松井²⁾が提案する RC 床版の S-N 曲線式は式[3]として与えられている。

$$\log (P/P_{ss}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad [3]$$

ここで、P：基準荷重、 P_{ss} ：RC 床版の押抜きせん断耐荷力、N：走行回数

(2) RC 床版の押抜きせん断耐荷力

RC 床版の S-N 曲線式(式[3])に適用するはり幅 B を考慮した押抜きせん断耐荷力 P_{ss} は式[4]として与えられる。

$$P_{ss} = 2B(\tau_{max} \cdot X_m + \sigma_{max} \cdot C_m) \quad [4]$$

$$B = b + 2d_d$$

$$\tau_{max} = 0.688f_c^{0.610} \leq f_c = 80N/mm^2 \quad [4.1]$$

$$\sigma_{max} = 0.269f_c^{2.3} \quad [4.2]$$

ここで、b：輪荷重の軸方向の辺長(mm)、 X_m ：主鉄筋方向の中立軸の位置(mm)、 C_m ：引張主鉄筋のかぶり(mm)、 d_d ：配力筋の有効高さ(mm)、 τ_{max} ：コンクリートのせん断強度(N/mm^2)⁵⁾、 σ_{max} ：コンクリートの引張強度(N/mm^2)、 f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

(3) CFS 接着補強 RC 床版の S-N 曲線

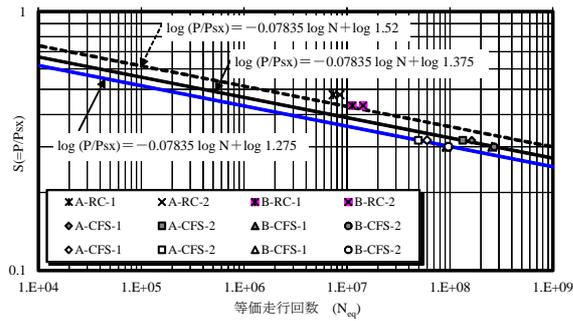
筆者らは、CFS 接着補強した RC 床版供試体を用いて輪荷重走行実験を行い、等価走行回数を得て S-N 曲線式を提案した³⁾。CFS 接着補強 RC 床版の S-N 曲線における $S(=P/P_{ss})$ は、実験による基準荷重 P を CFS 接着補強した RC 床版の押し抜きせん断耐荷力で除した値を松井らが提案する RC 床版の傾きを基本とし、スライドさせて評価したものである。CFS 接着補強 RC 床版の乾燥状態および各種劣化要因を考慮した場合の S-N 曲線式[5]、[6]、[7]に示す。

a) CFS 接着補強 RC 床版の S-N 曲線(乾燥状態)

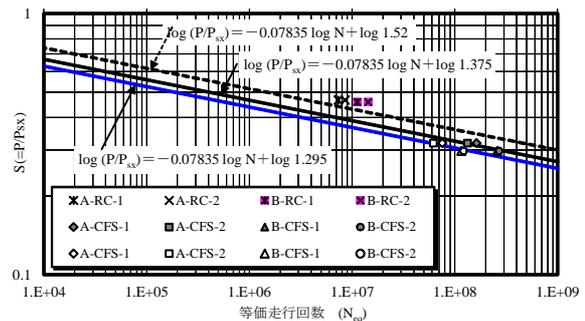
$$\log (P/P_{ss}) = -0.07835 \log N + \log 1.375 \quad [5]$$

表-3 等価走行回数および補強等価走行回数

供試体	実験等価走行回数			補強等価走行回数 (回) (S39slab)			補強等価走行回数 (回) (S43slab)		
	等価走行回数 (回)	平均等価走行回数 (回)	走行回数比	補強等価走行回数 (回)	平均補強等価走行回数 (回)	走行回数比	補強等価走行回数 (回)	平均補強等価走行回数 (回)	走行回数比
A-RC-1	7,346,848	7,938,030	—	7,346,848	7,938,030	—	7,346,848	7,938,030	—
A-RC-2	8,529,213			8,529,213			8,529,213		
A-CFS-1	163,317,396	148,256,151	18.7	60,228,204	54,846,673	6.9	94,909,180	86,428,823	10.9
A-CFS-2	133,194,905			49,465,142			77,948,465		
A-CFSS-1	181,083,502	167,775,558	21.1	66,530,190	61,799,685	7.8	104,840,014	97,385,561	12.3
A-CFSS-2	154,467,615			57,069,180			89,931,108		
B-RC-1	11,238,624	12,814,782	—	11,238,624	12,814,782	—	11,238,624	12,814,782	—
B-RC-2	14,390,941			14,390,941			14,390,941		
B-CFS-1	258,123,028	263,822,131	20.6	93,650,842	95,643,227	7.5	147,577,447	150,717,100	11.8
B-CFS-2	269,521,233			97,635,612			153,856,752		
B-CFSS-1	302,173,738	324,110,759	25.3	109,017,132	116,628,019	9.1	171,792,049	183,785,484	14.3
B-CFSS-2	346,047,779			124,238,906			195,778,919		



(1) S39床版



(2) S43床版

図-3 RC床版のS-N曲線およびCFS接着補強RC床版のS-N曲線

b) 各種劣化要因を考慮した場合の S-N 曲線

S39 床版 : $\log (P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.275$ [6]

S43 床版 : $\log (P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.295$ [7]

(4) CFS 接着補強 RC 床版の押抜きせん断耐力

走行荷重が作用する CFS 接着補強 RC 床版の押抜きせん断耐力 $V_{cp,RC}$ は、RC 床版が分担する押抜きせん断耐力 P_{sx} と補強 CFS が分担する押抜きせん断耐力 $V_{cp,CFS}$ を合計したものである。よって、CFS 接着補強 RC 床版の押抜きせん断耐力は式[8]として与えられる⁵⁾。

$$V_{cp,RC} = P_{sx} + V_{cp,CFS} \quad [8]$$

また、CFS 接着補強が分担する 1 層目および 2 層目の耐力は CFS の引張強度に軸方向および軸直角方向、それぞれの低減係数を適用して算出し、両者を合計したものが CFS の補強耐力 $V_{cp,CFS}$ の分担能を示すこととなる。よって、CFS を 2 層補強した場合の CFS が分担する押抜きせん断耐力 $V_{cp,CFS}$ は式[9]として与えられる。なお、CFS の貼り付け枚数を増加する場合は、軸直角方向および軸方向、それぞれの厚さの合計を t_1 、 t_2 とする。

$$V_{cp,CFS} = \{(b+2H)t_2 \cdot f_{y,cf,L} \cdot \beta_{cf,L1}\} \sin\theta + \{(a+2H)t_1 \cdot f_{y,cf,L} \cdot \beta_{cf,L2}\} \sin\theta \quad [9]$$

$$\beta_{cf,L1} = 0.0651t_1^{-0.663}$$

$$\beta_{cf,L2} = 0.0651t_2^{-0.663}$$

ここで、 $f_{y,cf}$: CFS の引張強度 (= 4420N/mm²)、 t_1 : 軸方向の CFS の厚さの合計(mm)、 t_2 : 軸直角方向の CFS の厚さの合計(mm)、 $\beta_{cf,L1}$ 、 $\beta_{cf,L2}$: 軸直角方向および軸方向の CFS 低減係数、 θ : 破壊傾斜角 (= 45°)

4.3 RC床版、CFS接着補強RC床版のS-N曲線の整合性

松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線および筆者らが提案する CFS 接着補強 RC 床版の S-N 曲線、A、B タイプの CFS 接着補強 RC 床版の S 値と N 値の関係を図-3に示す。

(1) RC 床版

A、B タイプの RC 床版の縦軸 S は基準荷重 P を RC 床版の押抜きせん断耐力(式[4])で除した値と実験等価走行回数 N の関係は、松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線を上回っている。これは、RC 床版鉄筋に丸鋼が使用されている S39 床版および一部に異形鉄筋を配置した RC 床版の S-N 曲線式であることから 2002 年改訂の道示に準拠して製作した供試体であるために耐疲労性が上回ったものである。

(2) CFS 接着補強 RC 床版

実橋 RC 床版寸法の 1/2 モデルとした A タイプの CFS 接着補強 RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験による S 値と D-N 曲線および各種劣化要因を適用した補強等価走行回数 $N_{Do,eq}$ の最小値を松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線をスライドさせた S-N 曲線を提案した。本研究では新たに実橋の 3/5 モデルとした B タイプの CFS 接着補強 RC 床版供試体を用いて乾燥状態における等価走行回数および各種劣化要因を適用して算定した補強等価走行回数と CFS 接着補強した RC 床版の押抜きせん断耐力 $V_{cp,RC}$ の関係から算定される S 値と N 値をプロットし、筆者らが提案する A タイプ供試体による S-N 曲線との近似性を確認することから精度を検証した。3/5 モデルとした B タイプ供試体は S39 床版および S43 床版ともに 1/2 モデルから提案された S-N 曲線の上にプロットされ、整合性が得られた。したがって、CFS 接着補強 RC 床版の余寿命が推定が可能となる。

5. まとめ

- (1) 乾燥状態における疲労寿命は過剰評価され、以後補強の必要がない結果となる。これに対して、本提案の D-N 曲線式および劣化係数を適用した補強等価走行回数は S39、S43 床版で、それぞれ 63、42% 走行回数が減少した。
- (2) 3/5 モデルとした供試体は S39 床版および S43 床版ともに 1/2 モデルから提案された S-N 曲線の上にプロットされ、整合性が得られ、余寿命が推定が可能となる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, III (2004)
- 2) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理、森北出版 (2007)
- 3) 阿部忠、木田哲量、元燦豪、小森篤也：CFS 補強 RC 床版の輪荷重走行疲労実験における耐疲労性の評価および維持管理：セメント・コンクリート論文集, No. 65, pp.493-500, 2012.2
- 4) RILEM Committee 36-RDL : Long term random dynamic loading of concrete structures, Materials and Structures, 17 (9), RILEM, 1-28 (1984)
- 5) 澤野利章、阿部忠、徐銘謙、木田哲量、西林聖武：CFS 補強 RC 床版の補強効果および押抜きせん断耐力評価式、材料、Vol.56 No.10, pp.42-49 (2007)