

輪荷重走行疲労実験におけるRC床版上面増厚補強法の耐疲労性の評価法

Evaluation method of the fatigue resistance of RC slabs overlaid with the
determined by fatigue test under running wheel loads

阿部忠*, 木田哲量*, 高野真希子**, 小森篤也***, 児玉孝喜****

Tadashi Abe, Tetsukazu Kida, Makiko Takano Atsuya Komori and Takayuki Kodama

*博(工), 日本大学教授 生産工学部土木工学科(〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

**博(工), 日本大学生産工学部ポストドクター研究員 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

***日鉄コンポジット(株) (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町 3 番 8 号)

****博(工), 鹿島道路㈱生産技術本部技術部 (〒112-8566 東京都文京区後楽 1 丁目 7 番 27 号)

To evaluate the fatigue resistance of RC slabs has been determined by fatigue tests under running wheel loads, the equivalent running frequency, or inverse of the slope of the S-N curve, proposed by Matsui et al. was used. However, the application of this frequency to the reinforced RC slabs of actual bridges makes differences in fatigue life. The authors conducted a fatigue test on the RC slabs overlaid with the SFRC under running wheel loads to obtain the D-N curve as a function of the equivalent running frequency, and proposed an equation for the equivalent running frequency for the RC slabs overlaid with the SFRC that took into account the factor of deterioration due to deflection of the RC slabs, the factor of deterioration of materials under wet conditions, the factor of deterioration under environmental conditions, and the correction factor for design standards. As a result, the fatigue life determined from the equation agreed well with the time when the RC slabs overlaid with the SFRC of actual bridges need to be repaired again.

Key words: Overlay of SFRC, Fatigue experiment, Equivalent running frequency, D-N curve

キーワード: SFRC 上面増厚, 疲労実験, 等価走行回数, D-N 曲線

1. はじめに

1960 年代に建設された道路橋 RC 床版は, 交通量の増大により疲労劣化が生じている^{1), 2)}. また, 積雪寒冷地域では凍結防止剤の散布による塩害と冬期間の凍害を受け, RC 床版の劣化が急速に進んでいる^{3), 4)}. これらの RC 床版の劣化に対する補強法には, ひび割れの抑制や耐荷力および耐疲労性の向上を目的とした炭素繊維シート(以下, CFS とする)やアラミドシートを用いた底面接着工法がある^{5), 6)}. また, 疲労劣化や塩害および凍害を受けた RC 床版の上面劣化に対しては, 鋼繊維を混入したコンクリート(以下, 鋼繊維補強コンクリート: SFRC とする)を用いた SFRC 上面増厚補強法が採用されている⁷⁾⁻⁹⁾. CFS やアラミドシートを用いた補修・補強法は比較的新しい補強法であることから, 多くの研究機関や研究者によって力学特性や耐疲労性が評価されている. 一方, SFRC 上面増厚補強法は 1985 年頃に採用された工法であり, 耐荷力や耐疲労性についてはあまり評価されていない. また, 施工実績が多いにも関わらず, その

後の損傷状況の検証もあまり行われていないのが現状である. しかし, 最近は道路橋 RC 床版の劣化が急速に進んでいることから, 道路橋 RC 床版の長寿命化対策における SFRC 上面増厚補強法は重要な補強法の 1 つであると考えられる.

道路橋 RC 床版には, 種々の補強法が実施されているが, 補強後は, 補強することによって健全な状態を回復したとして, 健全な RC 床版と同等な耐疲労性を有するとして取り扱われている. よって, 補強された RC 床版の耐疲労性は, 輪荷重疲労実験を行い, 松井ら¹⁰⁾が提案する S-N 曲線の傾きの逆数 m を適用した等価走行回数より評価されている. これを SFRC 上面増厚補強した RC 床版に適用すると, 等価走行回数は RC 床版の 10 倍以上となり, 再補強は必要としないことになる. しかし, 実橋の SFRC 上面増厚補強した RC 床版の一部は 10 年前後で再補修が施され, RC 床版の等価走行回数から算出した耐用年数と大幅な差異が生じている.

そこで本研究は, SFRC 上面増厚補強した RC 床版の輪荷重走行疲労実験を行い, 松井らが提案する S-N 曲線

の傾きの逆数 $m = 12.7$ を適用した RC 床版の等価走行回数を基準として算出した劣化値と等価走行回数から D-N 曲線式を得て、RC 床版の等価走行回数に対する低減係数として適用する。また、本実験は乾燥状態で行ったことから湿潤期を想定したコンクリート材料の低減係数、塩害等の環境条件による低減係数、および設計基準に対する補正係数を適用して、SFRC 上面増厚補強した RC 床版の劣化予測や残存寿命を評価する。さらに、実橋 SFRC 上面増厚補強した RC 床版の再補修・補強時期の提案を行い、道路橋 RC 床版の長寿命化対策および維持・管理手法の一助とする。

2. 実橋RC床版の損傷状況

2.1 既往のRC床版劣化状況

道路橋 RC 床版は、大型車両の走行による疲労劣化が生じるとともに、積雪寒冷地域では、凍結防止剤の散布による塩害および夜間や冬期間に凍害を受け、RC 床版の劣化が年々増加している。ここで、塩害と凍害を受けた道路橋 RC 床版の劣化状況および SFRC 上面増厚補強した RC 床版の損傷状況の一例を写真 - 1, 2 に示す。写真 - 1 は、積雪寒冷地域の RC 床版で、塩害と凍害を受けたことにより、スケーリングや砂利化が生じ、鉄筋が露出している。この RC 床版は、昭和 31 年制定の「鋼道路橋設計示方書」の規定に基づいて設計されている。したがって、RC 床版とアスファルト舗装との界面には、雨水の浸入に対する予防保全がなされていない床版である。次に、写真 - 2 は、実橋 RC 床版を SFRC 上面増厚補強した床版の損傷状況である。写真 - 2, 1) は、橋軸直角方向の切断面である。また、写真 - 2, 2) は橋軸方向の切断面である。両切断面ともに増厚界面ではく離している。なお、使用鉄筋は $\phi 13\text{mm}$ である。この床版は



1) 凍害による鉄筋の露出³⁾ 2) 凍害による砂利化
写真 - 1 塩害・凍害劣化したRC床版の損傷状況

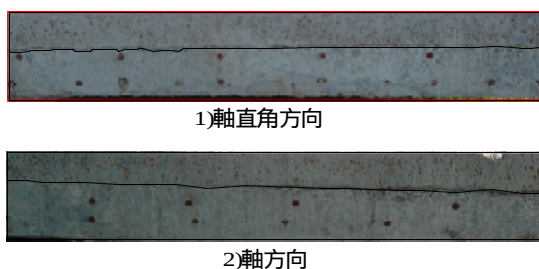


写真 - 2 SFRC上面増厚補強RC床版（銚子大橋）

写真 - 1 と同様に昭和 30 年代の示方書に基づいて設計された RC 床版であり、1962 年から 2009 年まで、約 47 年間供用されたトラス橋の RC 床版である。補強は 1985 年に SFRC 上面増厚が施され、その後、RC 床版と増厚部の界面にはく離が生じるなどの損傷がみられ、1995 年に部分補修が施され、健全であった期間は 10 年間であった。なお、再補修が施されない床版は約 23 年間供用されたが、増厚界面ではく離が生じていた。

以上のように、RC 床版の劣化は年々増加しており、早期に補修・補強を施す必要があると考えられる。また、既に補修・補強が施された RC 床版においても再補修を必要とする時期が押し迫っているものと考えられる。

2.2 RC床版上面劣化に対する補修・補強法

RC 床版の上面劣化による耐荷力および耐疲労性の向上を目的とした補強法には、短時間で施工可能な SFRC 上面増厚補強法が採用されてきた。しかし、SFRC 上面増厚補強法は、増厚層に発生したひび割れや打継面などから雨水が浸透するために、RC 床版部と SFRC 上面増厚との界面ではく離が生じ、さらには砂利化となり、10 年ほどで再補修が必要となっている。したがって、輪荷重走行疲労実験では、実橋 RC 床版の再補修時期を想定した耐疲労性を評価する必要がある。そこで本研究では、従来型の SFRC 上面増厚補強法、RC 床版部と増厚部との界面に接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強法、および、RC 床版部と増厚界面に接着剤の塗布と増厚層に CFRP 格子筋を配置して SFRC 上面増厚補強した RC 床版の輪荷重走行疲労実験を行って耐疲労性を評価する。

3. 使用材料・寸法および補強方法

3.1 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最大寸法 20mm の粗骨材を使用した。また、鉄筋は SD295A, D10 を使用した。次に、上面増厚コンクリートには、SFRC を用いた。SFRC の設計基準強度は、材齢 3 時間で 24N/mm^2 とした。その配合条件は、超速硬セメントと最大寸法 15mm の粗骨材および長さ 30mm の鋼繊維を混入量 100kg/m^3 (1.27vol.%) で配合した。ここで、RC 床版コンクリートの配合を表 - 1, SFRC の配合を表 - 2 に示す。また、コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表 - 3 に示す。本供試体に用いた SFRC の圧縮強度は、上面増厚後の養生 3 時間で、 26.9N/mm^2 である。なお、SFRC の材料特性値を表 - 3 に併記した。次に、SFRC と RC 床版との界面には付着性を高めるために接着剤¹⁾を用いた。接着剤の強度特性値は圧縮強さが 50N/mm^2 以上、曲げ強さが 35N/mm^2 以上、付着強さは 1.6N/mm^2 である。次に、RC 床版と増厚の界面に付着性を高めるために、接着剤と連続繊維を樹脂で格子状に一体成型した CFRP 格子筋を用いた。CFRP 格子筋の材料

表 - 1 RC 床版コンクリートの配合

スラブ (cm)	W/C (%)	S/a	Unit weight (kg/m ³)				混和剤 Mity 150
			セメント	水	細骨材	粗骨材	
8	39.2	40	403	158	726	1094	4
±2.5							

表 - 2 SFRC の配合

スラブ (cm)	W/C (%)	S/a	単位量 (kg/m ³)				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	鋼繊維
6.5 ±1.5	39.5	51.2	430	170	851	858	100.0

表 - 3 材料特性値および供試体概要

供試体	コンクリート圧縮強度N/mm ²	鉄 筋 (SD295A)						床版厚 mm	有効高		1m ² 当たりの鉄筋量		
		RC床版	SFRC		使用鉄筋	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²		ヤング係数 kN/mm ²	主鉄筋 mm	配力筋 mm	引張鉄筋 A _s (mm ²)	圧縮鉄筋 A _s '(mm ²)
			材令	圧縮強度									
RC-1	32.0	—		D10	368	516	200	130	105	95	713	356	
RC-2	35.0	—		D10	370	511	200	130	105	95			
RC.S-1	35.0	3時間： 26.9 4日： 44.0 7日： 51.6 28日： 55.4 56日： 58.1	D10	370	511	200	160	135	125				
RC.S-2	35.0		D10	370	511	200	161	136	126				
RC.S-A1	35.0		D10	370	511	200	160	135	125				
RC.S-A2	35.0		D10	370	511	200	162	137	127				
RC.S-CA1	35.0		D10	370	511	200	157	132	122				
RC.S-CA2	35.0		D10	370	511	200	158	133	123				

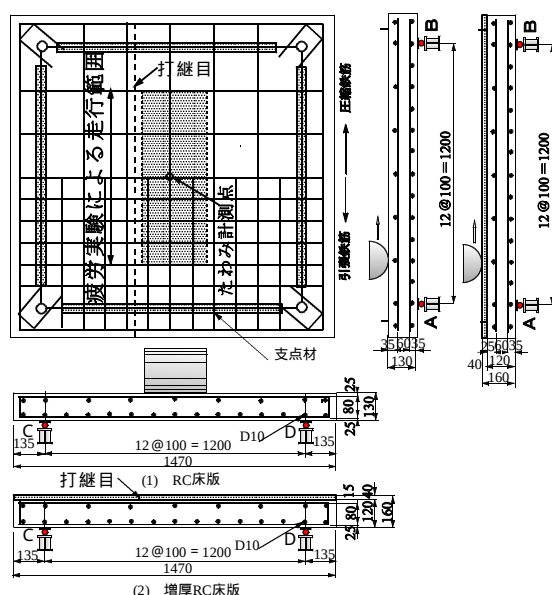


図 - 1 RC 床版および SFRC 上面増厚供試体寸法 (mm)

の材料特性値は、引張強度 1400N/mm²、引張弾性率 100kN/mm² である。

3.2 供試体寸法および鉄筋の配置

供試体の床版厚は、道路橋示方書・同解説（以下、道示とする。）¹²⁾の規定に基づいて、大型自動車の1日1方向あたりの計画交通量 2000 台以上を想定して決定した。供試体は、道示に規定する T 荷重分布幅 500mm に対して、本実験装置の輪荷重幅は 250mm であることから 1/2 モデルとした。また、RC 床版供試体は、輪荷重走行による変形量を拘束することが無い4辺単純支持とし、供試体は正方形版とした。耐疲労性を評価する場合の基準となる RC 床版の供試体の寸法は、支間長 1200mm、供試体の張出し部 135mm の全長 1470mm である。鉄筋は引張側の軸直角方向および軸方向に D10 を 100mm 間隔で配置し、有効高さをそれぞれ 105mm、95mm とする。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配

置した。

SFRC 上面増厚補強した RC 床版供試体は、RC 床版上面を 10mm 切削し、その上に SFRC を 40mm 増厚し、床版全厚は 160mm を目標とした。有効高は、それぞれ 135mm、125mm である。ここで、供試体概要を表 - 3に併記し、供試体の寸法・鉄筋の配置および上面増厚に関する寸法を図 - 1に示す。

3.3 増厚供試体の施工方法

SFRC 上面増厚補強法は、施工条件・交通規制の制約により、全面通行止めが可能な場合は床版上面を全面増厚する補強法が取られている。また、全面通行止めが不可能な場合は、車線ごとに増厚する補強法が取られており、一般的には車線ごとに上面増厚する補強法が採用されている。車線ごとに増厚補強する場合は、第 1 車線側（走行車線）の増厚を行った後に規制を切替えて、第 2 車線側（追越車線）の増厚補強を行う。この場合は、第 1 車線と第 2 車線の間の打継目が設けられることから、この打継目から雨水が浸透するために早期に RC 床版部と増厚部の界面ははく離が生じ、耐疲労性に影響を及ぼす懸念がある。そこで、本実験に用いる供試体は、RC 床版上面を全面増厚した供試体と、走行方向に 2 度に分けて上面増厚を行い、打継目を設けた供試体の 2 タイプを製作した。本供試体の打継目は輪荷重走行実験の車輪から 30mm 外側とした。すなわち、図 - 1に示す左支点 C から 445mm の位置の軸方向に打継目を設け、右支点 D から 755mm の位置に SFRC を打込み、その後に残りの 445mm を打込みした。また、従来から RC 床版上面に SFRC を直接増厚する補強法は、施工後 10 年前後で増厚界面がはく離した事例もある。そこで本研究では、従来型の SFRC 上面増厚補強と、RC 床版と SFRC 上面増厚界面の合成効果を高め耐疲労性を向上させるために、増厚界面に接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強および接着剤の塗布と SFRC 増厚層に CFRP 格子筋を用いた SFRC 上面増厚補強法についても検討した。ここで、本

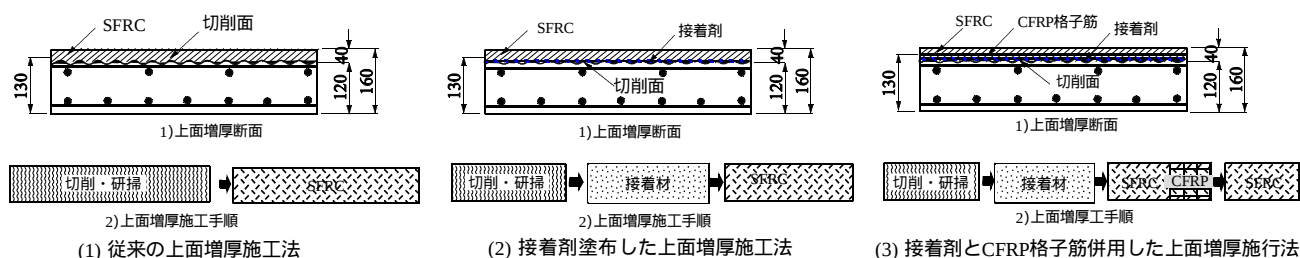


図 - 2 SFRC 上面増厚施工手順

実験における各上面増厚補強法の施工手順を図 - 2に示す．

(1) 従来型のSFRC上面増厚供試体の施工法

従来型の SFRC 上面増厚供試体の製作方法は図 - 2(1)に示すように，RC 床版供試体を平面状に設置し，切削機を用いて RC 床版上面を 10mm 切削した．切削面は付着性を高めるためにショットブラスト研掃機を用いて投射密度 150kg/m^2 で表面を仕上げた．コンクリートの製造はジェットモビル車により表 - 2に示した配合で SFRC を練り，40mm 打設し，締め固めは壁面パイプレータを用い，表面仕上げした．本研究では，全面増厚と打継目を設けた 2 タイプを製作した．従来型の SFRC 上面増厚補強法における全面増厚供試体の記号を RC.S-1，打継目を設けた供試体の記号を RC.S-2 とする．

(2) 接着剤を塗布したSFRC上面増厚供試体の施工法

増厚界面に接着剤の塗布し，SFRC 上面増厚補強した供試体は，基本的には従来型の SFRC 上面増厚補強法と同様であるが，図 - 2(2)に示すように，RC 床版と SFRC 上面増厚との界面に付着性を高めるためにエポキシ系の接着剤を厚さ 1mm 塗布し，SFRC を 40mm 増厚した．接着剤を塗布して全面増厚した供試体の記号を RC.S-A1，打継目を設けた供試体の記号を RC.S-A2 とする．

(3) 接着剤の塗布とCFRP格子筋を併用したSFRC上面増厚供試体の施工法

増厚界面に接着剤の塗布と SFRC 増厚層内に CFRP 格子筋を配置した供試体は図 - 2(3)に示すように，基本的には接着剤を塗布した SFRC 上面増厚供試体の製作方法と同様であるが，SFRC 上面増厚層 10mm の位置に CFRP 格子筋を配置し，その上に 30mm SFRC を上面増厚した．増厚界面に接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した全面増厚供試体の記号を RC.S-CA1，打継目を設けた供試体の記号を RC.S-CA2 とする．

4. 輪荷重走行疲労実験方法および等価走行回数

4.1 輪荷重走行疲労実験方法

輪荷重走行疲労実験は，RC 床版および SFRC 上面増厚 RC 床版ともに床版中央から両支点方向に 450mm（走行範囲：900mm）の範囲に輪荷重（幅 250mm）を繰返し走行させる実験である．

本供試体の寸法は，輪荷重の幅が道示 に規定する T

荷重の接地幅の 1/2 であることから，本供試体も 1/2 モデルとした．よって，設計活荷重は 50kN であり，これに安全率 1.2 を考慮した 60kN が設計荷重となる．そこで，RC 床版供試体 RC-1 の初期走行荷重 60kN，供試体 RC-2 は，供試体 RC-1 と比較して圧縮強度高いことから耐荷力が向上するために，初期荷重を 80kN として走行を開始した．実験方法は，RC 床版中央に輪荷重を停止し，静的に荷重を初期走行荷重まで 10kN ごとに増加し，初期走行荷重までのたわみを計測する．その後，2 万回走行ごとに荷重を 20kN ずつ増加させ，荷重 100kN 以降は 2 万回走行ごとに荷重を 10kN ずつ増加する．計測は輪荷重走行 1, 10, 100, 1000, 5000 回および 5000 回以降は 5000 回走行ごとにたわみを計測する．輪荷重の走行速度は，本実験は一定な荷重による疲労実験であることあら，1往復 1.8m を 4.0sec，平均速度 0.45m/sec を最大とする．

次に，SFRC 上面増厚補強した RC 床版供試体は，RC 床版を 10mm 切削し，SFRC を 40mm 増厚補強したことから床版全厚は 160mm となり，RC 床版に比して耐荷力が向上する．そこで，SFRC 上面増厚 RC 床版の初期荷重を 80kN とし，2 万回走行ごとに荷重を 20kN 増加する．荷重 120kN 以降は 2 万回走行ごとに荷重を 10kN ずつ増加し，供試体が破壊するまで荷重増加と走行を繰り返す．

4.2 走行疲労実験における等価走行回数

本実験における輪荷重走行疲労実験は，2 万回ごとに荷重を増加する段階荷重載荷としたことから等価走行回数を算出して耐疲労性を評価する．等価走行回数は，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 は設計活荷重の 1/2 に安全率 1.2 を考慮した 60kN の一定荷重載荷として等価走行回数を算出する．本研究は SFRC 上面増厚補強法の耐疲労性の検証であることから，RC 床版の S-N 曲線を基準とする．したがって，S-N 曲線の傾きの逆数 m は松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数 12.7 を適用する¹⁰⁾．

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

ここで， N_{ep} ：等価走行回数(回)， P_i ：載荷荷重(kN)， P ：基準荷重(= 60kN)， n_i ：実験走行回数(回)， m ：S-N 曲線の傾きの逆数(= 12.7)

表 - 4 RC床版を対象としたSFRC上面増厚補強床版の等価走行回数

供試体		荷 重					等価走行回数 合計	平均等価走行 回数 (回)	走行回 数比
		60 kN	80 kN	100 kN	120 kN	130 kN			
RC-1	実験走行回数	20,000	20,000	9,392				7,155,596	—
	等価走行回数	20,000	772,278	6,169,976			6,962,254		
RC-2	実験走行回数		20,000	10,010				7,348,160	
	等価走行回数		772,239	6,575,921			7,348,160		
RC.S-1	実験走行回数		20,000	20,000	9,026	73,975,689	10.3	73,975,689	
	等価走行回数		772,239	13,138,048	60,065,402		73,975,689		
RC.S-2	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	167,183,533	23.4	167,183,533	
	等価走行回数		772,239	13,138,048	99,816,228	53,457,018	167,183,533		
RC.S-A1	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	261,284,425	36.5	261,284,425	
	等価走行回数		772,239	13,138,048	133,086,087	114,288,051	261,284,425		
RC.S-A2	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	416,046,812	58.1	416,046,812	
	等価走行回数		772,239	13,138,048	133,086,087	269,050,439	416,046,812		
RC.S-CA1	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	333,112,120	46.6	333,112,120	
	等価走行回数		772,239	13,138,048	133,086,087	186,115,747	333,112,120		
RC.S-CA2	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	501,703,086	70.1	501,703,086	
	等価走行回数		772,239	13,138,048	133,086,087	354,706,713	501,703,086		

5. 実験結果および考察

5.1 実験走行回数および等価走行回数

本実験における RC 床版, SFRC 上面増厚 RC 床版の等価走行回数の算定結果を表 - 4に示す.

(1) RC床版

RC 床版供試体 RC-1 の実験走行回数は, 荷重 60kN および 80kN で 2 万回走行し, その後荷重 100kN で 9,392 回走行後に押抜きせん断破壊となり, 等価走行回数は 6.96×10^6 回である. また, 供試体 RC-2 は荷重 80kN で 2 万回走行し, 荷重 100kN で 10,010 回走行後に破壊となり, 等価走行回数は 7.34×10^6 回である. よって, RC 床版供試体の平均等価走行回数は 7.15×10^6 回である.

(2) 従来型のSFRC上面増厚供試体

SFRC を全面増厚補強した RC 床版供試体 RC.S-1 は, 荷重 80kN, 100kN で 2 万回走行し, 荷重 120kN で 9,026 回走行した. 等価走行回数は 73.97×10^6 回である. また, 輪荷重走行位置から 3cm 離れた位置に打継目を設けた供試体 RC.S-2 は, 荷重 80kN, 100kN, 120kN で 2 万回走行し, 荷重 130kN で 2,907 回走行した後に押抜きせん断破壊となった. 等価走行回数は 200.47×10^6 回である. RC 床版供試体の平均等価走行回数と従来型の SFRC 上面増厚供試体の等価走行回数を比較すると, 全面増厚した供試体 RC.S-1 が 10.3 倍, 打継目を設けた供試体 RC.S-2 が 23.4 倍となった. したがって, 従来型の SFRC 上面増厚補強法も耐疲労性が向上する結果となった.

(3) 接着剤を塗布したSFRC上面増厚供試体

接着剤を塗布し全面増厚した供試体 RC.S-A1 は, 荷重 80kN から 120kN まで 2 万回走行し, 荷重 130kN で 6,214 回走行した後, 押抜きせん断破壊となった. 等価走行回数は 261.28×10^6 回である. また, 打継目を設けた供試体 RC.S-A2 は荷重 80kN, 100kN, 120kN で 2 万回走行し, 荷重 130kN で 14,630 回走行し, 等価走行回数は 416.04×10^6 回である. RC 床版供試体の平均等価走行

回数と増厚面に接着剤を塗布した供試体の等価走行回数と比較すると, 全面増厚した供試体 RC.S-A1 は 36.5 倍, 打継目を設けた供試体 RC.S-A2 は 58.1 倍となった. また, 従来型の SFRC 上面増厚 RC 床版供試体と比較すると全面増厚した供試体が 3.5 倍, 打継目を設けた供試体が 2.4 倍となった. したがって, 増厚界面に接着剤を塗布することで従来型の SFRC 上面増厚補強法に比して大幅に耐疲労性が向上する結果となった.

(4) 接着剤の塗布とCFRP格子筋を併用したSFRC上面増厚供試体

接着剤と CFRP 格子筋を併用して全面増厚した供試体 RC.S-CA1 は, 荷重 80kN, 100kN, 120kN で 2 万回走行し, 荷重 130kN で 10,120 回走行した. よって, 等価走行回数は 333.11×10^6 である. 打継目を設けた供試体 RC.S-CA2 は荷重 80kN から 120kN まで 2 万回走行し, 荷重 130kN で 19,288 回走行後, 押抜きせん断破壊となった. 等価走行回数は 501.70×10^6 回である.

RC 床版供試体の平均等価走行回数と比較すると, 全面増厚した供試体 RC.S-CA1 が 46.6 倍, 打継目を設けた供試体 RC.S-CA1 が 70.1 倍である. また, 従来型の上面増厚 RC 床版と比較すると, 全面増厚した供試体が 4.5 倍, 打継目を設けた供試体が 3.0 倍となった. 次に, 接着剤を塗布して全面増厚した供試体と比較すると 1.3 倍, 打継目を設けた供試体は 1.2 倍となった. したがって, 接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した増厚補強法は, 耐疲労性に優れた補強法であることが実証された. なお, 接着剤と CFRP 格子筋を併用した上面増厚補強法は, 本実験では CFRP 格子筋を圧縮域に配置して実験を行ったが, 本来は連続床版部の引張の領域, すなわち床版の支点上増厚部で CFRP の高引張力が有効に活用できることから, より耐久性を向上させることも可能である.

5.2 たわみと等価走行回数の関係

RC 床版供試体および上面増厚 RC 床版供試体中央に

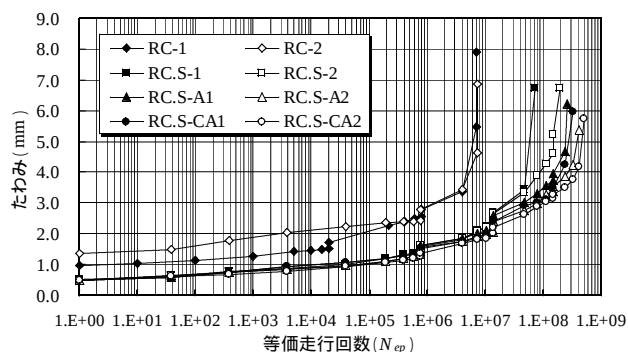


図 - 3 たわみと等価走行回数の関係

おけるたわみと等価走行回数の関係を図 - 3に示す。

(1) RC床版

供試体 RC-1, 2 はともに等価走行回数の増加に伴ってたわみが上昇し, 等価走行回数が 0.74×10^6 回付近のたわみは 2.8mm であり, その後の走行でたわみが急激に増加し, 等価走行回数 4.07×10^6 回付近のたわみは 3.36mm である。終局時は, 供試体 RC-1 が等価走行回数 6.96×10^6 回でたわみは 7.91mm である。また, 供試体 RC-2 は, 等価走行回数が 7.34×10^6 回でたわみは 6.86mm である。本実験の場合はたわみが 3.0mm, すなわち, たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した場合を補修時期と見なすことができる。なお, 土木研究所¹³⁾によると, 昭和 39 年示方書の基準に基づいて設計された RC 床版のたわみは, 走行回数を破壊時走行回数で除した値が 0.2 となる付近ではたわみが 8.0mm に達し, その時点でのたわみは, 床版支間 L の $1/400$ に達している。これは, 平成 8 年示方書による RC 床版に比して, たわみが 3 倍程度となっている。よって, 本供試体においても同程度のたわみ値が得られている。

(2) 従来型のSFRC上面増厚供試体

床版上面を SFRC で直接増厚した供試体 RC.S-1 は, 等価走行回数 13.91×10^6 回でたわみが 2.69mm であり, その後のたわみの増加が著しく, 等価走行回数 47.18×10^6 付近でのたわみは 3.3mm である。その後, 急激にたわみが増加し, 等価走行回数 73.97×10^6 回でたわみは 6.75mm である。また, 供試体 RC.SF-2 は輪荷重走行位置から 30mm 離れた位置に打継目を設けた供試体であるが, 等価走行回数が 13.91×10^6 回でたわみが 2.26mm となり, 打継目を設けたことによるたわみの増加は見られない。たわみが 3mm を超えた後も, 等価走行回数 147.09×10^6 回付近までわずかに増加し, その後の走行でたわみが急激に増加し, 破壊に至っている。終局時のたわみは等価走行回数 200.47×10^6 回で, 6.72mm である。たわみと等価走行回数の関係より, SFRC 上面増厚補強した場合は, RC 床版同様にたわみが 3mm, すなわち床版支間 L の $1/400$ に達した付近が再補修時期と見なすことができる。

(3) 接着剤を塗布したSFRC上面増厚供試体

接着剤を塗布し, 全面増厚した供試体 RC.S-A1 は, 等価走行回数 13.91×10^6 回でたわみが 2.58mm, 等価走行回数 47.18×10^6 回付近でのたわみは 3.0mm であり, この時点で供試体 RC.S-1 のたわみの 90 % となり, 接着剤の効果によりたわみが抑制されている。その後も等価走行回数 147.01×10^6 回付近までは急激なたわみの増加はみられないが, その後の走行からたわみの増加が著しくなり, 終局時のたわみは 6.22mm である。また, 打継目を設けた供試体 RC.S-A2 も同様な増加傾向を示し, 等価走行回数 330.1×10^6 回付近からたわみの増加が著しくなっている。したがって, 従来型の SFRC 上面増厚補強に比してたわみの増加が抑制され, 大幅に耐疲労性が向上している。たわみと等価走行回数の関係より, 接着剤を塗布した SFRC 床版上面補強法は, たわみが 3.5mm 付近, すなわち床版支間 L の $1/350$ まで急激なたわみの増加はみられない。

(4) 接着剤の塗布とCFRP格子筋を併用したSFRC上面増厚供試体

接着剤と CFRP 格子筋を併用して全面増厚した供試体 RC.S-CA1 は, 等価走行回数が 13.91×10^6 回でたわみが 2.2mm, 等価走行回数 47.18×10^6 回付近でのたわみは 3.0mm, 等価走行回数 147.01×10^6 回付近では 3.5mm である。接着剤を塗布した供試体 RC.S-A1 がたわみ 3.5mm に達した時点の等価走行回数を比較すると接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した場合が 3.1 倍となり, 耐疲労性の向上が図られた。また, 打継目を設けた供試体 RC.S-CA2 のたわみは, 供試体 RC.S-CA1 と同様な増加傾向を示しており, たわみが 3mm を超えた後も急激な増加はみられない。等価走行回数 422.85×10^6 回を超えた後からたわみの増加が著しくなり, 終局時のたわみは 5.72mm である。たわみと等価走行回数の関係より, 接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強法は, たわみが 3.5mm 付近, すなわち床版支間 L の $1/350$ まで急激なたわみの増加はみられない。

6. 上面増厚補強法したRC床版の健全度評価法の提案

6.1 疲労による劣化予測概念¹⁴⁾

RC 床版の疲労による劣化予測および性能低下の概念は図 - 4のように示されている。

道路橋 RC 床版の健全度判定の多くは, 「ひび割れによる健全度判定」を採用している。これによると, 道路を維持管理している公的機関では, ひび割れの幅が 0.1mm ~ 0.2mm としている場合が多い¹⁴⁾。また, ひび割れ幅以外の指標としては, ひび割れの間隔, 方向, 密度 (= 1.0m^2 あたりのひび割れ長さ: m/m²) が採用されている。「ひび割れによる健全度判定」や「ひび割れの間隔, 方向, 密度による健全度判定」は, 床版の劣化予測や残存寿命の評価, 補修・補強対策・時期の判断など維

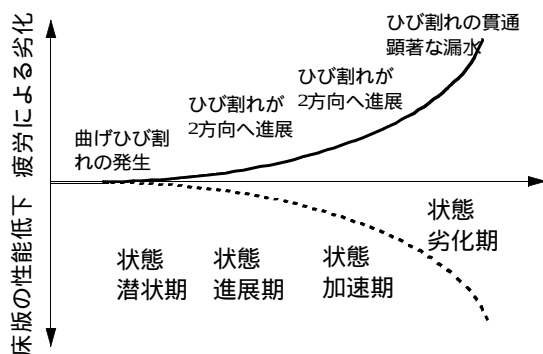


図 - 4 RC床版の疲労による劣化予測および性能低下

持管理計画を合理的に立案する定量的指標として用いるには課題も多い。これらのことから、床版の健全度評価においては、車両が床版上を通過する時のたわみによる変形を一般的に絶対量で評価することができないことから、床版の劣化状況を表す指標として松井ら¹⁴⁾は劣化度を式(2)として提案している。

$$D = (\delta - \delta_0) / (\delta_c - \delta_0) \quad (2)$$

ここで、 D ：劣化度($0 \leq D \leq 1$)、 δ ：床版中央におけるたわみ(実測値)、 δ_0 ：全断面のコンクリートを有効とみなした時の床版中央におけるたわみ(計算値)、 δ_c ：引張側コンクリートを無視した時の床版中央におけるたわみ(計算値)

劣化度 D は、健全である場合には 0 に近づき、劣化が進み、使用限界に近い状態に至ると 1 に近い値をとるとした指標である。この劣化度 D が 1 を超過した場合には、床版の劣化が急激に進み、押抜きせん断破壊となる。活荷重たわみが引張側コンクリート無視の理論たわみに達した場合が劣化度 $D = 1.0$ に達したとし、使用限界状態に達するまでの残存寿命の予測が可能となり、維持管理計画を合理的に立案する定量的指標として用いられている。

以上のように、式(2)を用いると RC 床版の 1 次補修・補強に対する維持管理計画を合理的に立案することが可能であるが、1 次補強対策後の床版の劣化予測や残存寿命の評価、再補修・補強対策・時期の予測についての定量的指標が示されていない。そこで、輪荷重走行疲労実験による SFRC 上面増厚補強法の寿命予測法として、実橋の SFRC 上面増厚補強した RC 床版の劣化状態を考慮した「たわみによる健全度評価法」を提案する。

6.2 たわみによる健全度評価法

SFRC 上面増厚補強した RC 床版におけるたわみと等価走行回数の関係は図 - 3 に示すように、従来型の SFRC 上面増厚補強した RC 床版供試体 RC.S-1, 2 は、たわみが 3.0mm、すなわち RC 床版の設計支間 L の $1/400$ を超えた付近からたわみの増加が著しくなり、その後の走行と荷重増加により破壊に至っている。一方、接着剤を塗

布した SFRC 上面増厚補強および接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強は、従来型の SFRC 上面増厚補強法に比して合成効果が向上し、たわみ 3.5mm 付近、すなわちたわみが床版設計支間 L の $1/350$ 付近までは急激なたわみ増加はみられない。本実験による SFRC 上面増厚補強した RC 床版は 3.0mm ~ 3.5mm、すなわち床版支間 L の $1/400 \sim 1/350$ 付近で再補修が必要となる。そこで、RC 床版の SFRC 上面増厚補強法におけるたわみによる健全度評価は、床版設計支間 L の $1/400$ を基準とし、このたわみに達した時期を再補修・補強時期として提案する。

SFRC 上面増厚補強した RC 床版を用いた輪荷重走行疲労実験から得られたたわみと等価走行回数の関係より、たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した時の等価走行回数は、 $L/400$ に達する前後のたわみと等価走行回数の内分点より算出すると供試体 RC.S-1, 2 で、それぞれ 26.80×10^6 、 31.4×10^6 回である。本供試体は、1 日 1 方向当たりの大型車両の計画交通量を 2000 台以上としての設計したことから、再補修・補強時期の年数を算出すると供試体 RC.S-1 が 36.7 年 ($= 26.80 \times 10^6 / 2000 / 365$)、供試体 RC.S-2 が 43.0 年となる。また、接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強法の場合は、供試体 RC.S-A1, A2 で、それぞれ 53.2×10^6 、 100.7×10^6 回であり、再補修・補強時期は 72.9 年と 114.4 年となる。次に、接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強は、供試体 RC.S-CA1, CA2 で、それぞれ 87.9×10^6 、 96.0×10^6 回走行であり、再補修・補強時期は 120.4 年と 131.5 年となる。しかし、SFRC 上面増厚補強した銚子大橋の補修・補強事例をみると、1985 年に SFRC を用いた上面増厚補強が施され、その後、1995 年に RC 床版部と増厚界面ではなく離が生じ、部分補修が施された。したがって、健全であった期間は約 10 年である。そこで、未損傷 RC 床版に SFRC 上面増厚補強した供試体を用いた輪荷重走行疲労実験から耐疲労性を評価する場合は、実橋に即した等価走行回数の検討が必要である。

6.3 劣化たわみによる性能低下曲線 (D-N曲線) の定義

SFRC 上面増厚補強した RC 床版の耐疲労性は、松井らが提案する RC 床版の S-N 曲線の傾きの逆数 $m = 12.7$ を適用した等価走行回数 (式(1)) より評価されている。これは、RC 床版における S-N 曲線の傾きの逆数 (m) であることから、劣化した RC 床版上面に SFRC を増厚補強した RC 床版に適用すると実橋の補強 RC 床版の疲労寿命と大きな差が生じる。そこで、SFRC 上面増厚補強した RC 床版の等価走行回数の算定には、松井が提案した逆数 $m = 12.7$ を適用した RC 床版の等価走行回数 (式(1)) に、SFRC 上面増厚 RC 床版の輪荷重走行疲労実験から得られたたわみによる劣化係数、さらに種々の劣化係数を適用して補正する。そこで、RC 床版の疲労による劣化予測および性能低下の概念は図 - 4

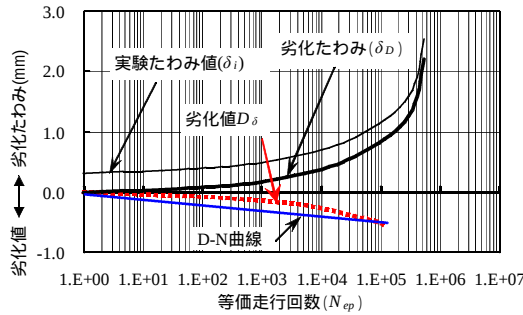


図 - 5 劣化たわみおよび性能低下の概念

に示すように基準軸（縦軸の 0mm の位置）に対して上方は疲労によるたわみの劣化を示し，下方は性能低下を示している．そこで，「たわみによる健全度評価法」は，等価走行回数増加に伴うたわみの増加値が性能低下を示す指標となる．よって，等価走行回数ごとのたわみの増加値を劣化値とし，劣化値と等価走行回数の関係から対数近似による性能低下曲線，すなわち劣化（Damage）- 等価走行回数 (N_{ep})（以下，D-N 曲線）式を得て，各走行回数ごとに算出した等価走行回数 N_{epi} に乗じるものとする．よって，本実験におけるたわみと等価走行回数の関係より，本提案する劣化たわみおよび性能低下の概念を図 - 5 に示す．図 - 5 に示す縦軸は，たわみと等価走行回数の関係より，たわみが 0.0mm の位置を基準軸とし，基準軸上方に劣化たわみ (δ_D) をとり，基準軸の下方は，たわみから得られた性能低下を示すたわみ値を無次元化した劣化値 ($D_{\delta i}$) とする．また，横軸には等価走行回数 (N_{ep}) とする．

(1) 性能低下を示す劣化たわみ

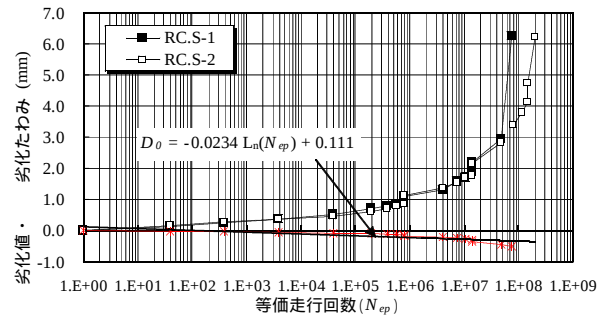
性能低下を示す劣化たわみ (δ_D) は，各走行回数ごとに計測した実験たわみ (δ_i) から，本実験における初期荷重のたわみ (δ_0) を除いたたわみ ($= \delta_i - \delta_0$) とする．したがって，初期劣化たわみを 0mm とする．劣化値は，SFRC 全面増厚した場合と打継目を設けた場合の各等価走行回数ごとのたわみの平均値を最大たわみ (δ_{max}) で除して無次元化した値を劣化値 ($D_{\delta i}$) とし，この劣化値と等価走行回数の関係から対数近似による D-N 曲線式を評価する．なお，たわみによる健全度評価は，各 SFRC 上面増厚補強法における再補修・補強時期を想定したたわみを床版支間 L の 1/400 まで評価できるものとする．よって，各走行回数ごとのたわみによる劣化値 ($D_{\delta i}$) は，式(3)として与えられる．

$$D_{\delta i} = (\delta_i - \delta_0) / \delta_{max} \quad (3)$$

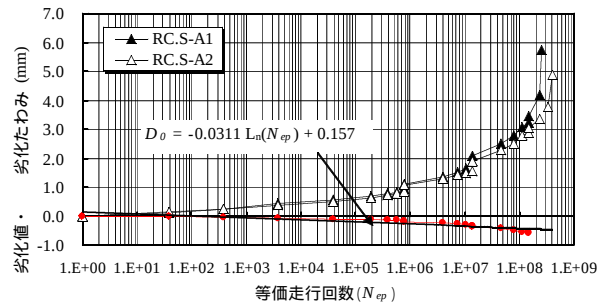
ここで $D_{\delta i}$ ：等価走行回数ごとのたわみによる劣化値， δ_{Di} ：劣化たわみ (mm)， δ_0 ：基準たわみ ($= 0.0\text{mm}$)， δ_{max} ：最大たわみ(mm)

(2) D-N曲線

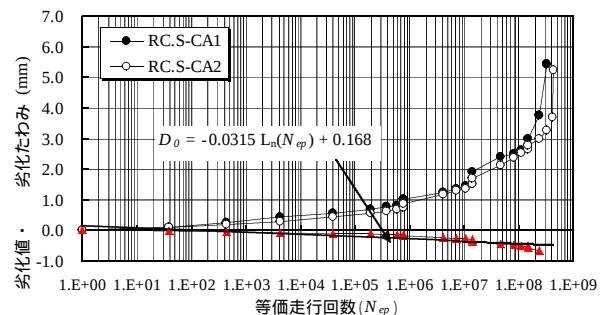
本実験におけるたわみによる劣化値 ($D_{\delta i}$) と等価走行回数の関係を図 - 6 に示す．



(1)従来型の SFRC 上面増厚供試体



(2)接着剤を用いた SFRC 上面増厚供試体



(3)接着剤と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚供試体

図 - 6 劣化たわみ・劣化値と等価走行回数の関係

SFRC 上面増厚補強法における劣化たわみ (δ_{Di}) および性能低下の概念に基づいて，再補修時期を想定した補強後の RC 床版のたわみが支間 L の 1/400 までの各走行回数ごとの劣化値 ($D_{\delta i}$) と RC 床版の等価走行回数 (式 (1)) の関係から等価走行回数を関数とする対数近似式として D-N 曲線式を得た．よって，各 SFRC 上面増厚補強法における D-N 曲線は式(4)として与える．

1) SFRC 上面増厚補強

$$D_{\delta i} = -0.0234 \ln N_{epi} + 0.111 \quad (4.1)$$

相関係数：R=0.840

2) 接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強

$$D_{\delta i} = -0.0311 \ln N_{epi} + 0.157 \quad (4.2)$$

相関係数：R=0.866

3) 接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強

$$D_{\delta i} = -0.0315 \ln N_{epi} + 0.168 \quad (4.3)$$

相関係数：R=0.864

ここに， $D_{\delta i}$ ：たわみによる等価走行回数ごとの劣化係

数, N_{epi} : 等価走行回数 (式(1))

D-N 曲線における対数近似式の相関係数 R 値は 0.80 以上となり, 良く近似している。

6.4 性能低下曲線を適用した等価走行回数

本実験は, 未損傷の RC 床版に SFRC を上面増厚補強し, 乾燥状態で輪荷重走行疲労実験を行ったことから, 実橋の SFRC 上面増厚補強を必要とする RC 床版と劣化条件が異なる。そこで, 湿潤時の影響によるコンクリート材料の劣化係数 (D_c) や塩害等の環境条件による低減係数 (D_E) を考慮する必要がある。さらに, 本実験に用いた RC 床版の設計は, 平成 8 年に改訂された道示に基づいて設計したことから, 補修・補強を検討している昭和 30 年代の設計基準に対する補正係数を考慮する必要がある。

(1) たわみによる劣化係数: D_{Di}

松井らが提案する劣化度 (式(2)) は, 使用限界に達した場合に 1.0 を指標としている。そこで, 等価走行回数の増加に伴う, 性能低下を示す指標として D-N 曲線式(4.1)~式(4.3)を提案した。一般的に劣化した RC 床版を種々の補強法により補強した場合は, 健全な RC 床版の耐力力と同等以上の効果が得られるとして耐疲労性が評価されている。しかし, RC 床版を補強した場合の耐力力は, 一般的に 1.1 ~ 1.3 倍向上している。よって, D-N 曲線式より得られた各等価走行回数ごとの劣化係数は式(5)として与えられる。なお, D-N 曲線式(4.1)~式(4.3)における, それぞれの初期値 (0.111, 0.157, 0.168) は, SFRC 上面増厚工法において, 耐力力の向上を期待する補強法の場合の初期値を $D_i = 1.1$, 耐力力の向上を期待しない補修法の場合を $D_i = 1.0$ として与える。

$$D_{Di} = D_{Di} + D_i \quad (5)$$

ここに, D_{Di} : SFRC 上面増厚補強法における D-N 劣化係数, D_{Di} : D-N 曲線式(4)の傾き, D_i : SFRC 上面増厚補修・補強法における初期値 (補強の場合: $D_i = 1.1$, 補修の場合: $D_i = 1.0$)

よって, 式(4.1)~式(4.3)の D-N 曲線の傾きに補修・補強法における初期値 D_i を適用すると D-N 曲線は式(6.1)~式(6.3)となる。

1) 従来型の SFRC 上面増厚補強

$$D_{Di} = -0.0234 L_n N_{epi} + D_i \quad (6.1)$$

2) 接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強

$$D_{Di} = -0.0311 L_n N_{epi} + D_i \quad (6.2)$$

3) 接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強

$$D_{Di} = -0.0315 L_n N_{epi} + D_i \quad (6.3)$$

(2) コンクリート材料の低減係数: D_c

本実験は, 乾燥状態でやっているが, 実橋は常に雨水の

影響を受けていることから湿潤時を想定したコンクリートの劣化状態を考慮する必要がある。Raithby, K.D.¹⁵⁾ らや RILEM Committee¹⁶⁾ によると, 雨水の影響によるコンクリートの圧縮強度の低下は 30 %程度とされている。よって, 湿潤時におけるコンクリート材料の低減係数を $D_c = 0.70$ とする。

(3) 環境条件による低減係数 (塩害): D_E

道路橋 RC 床版は, 海岸線では飛来塩分, 寒冷地では凍結防止剤散布による塩害が生じ, 鉄筋に錆が発生し, 耐力力が低下している。筆者ら¹⁷⁾ は, 応力履歴した RC 床版に凍結防止剤散布と暴露試験を実施し, 土木学会¹⁸⁾ が基準としている鉄筋の損傷のグレードが - の状態で輪荷重走行実験を行った。その結果, 残存耐力力は塩害作用を受けない RC 床版に比して 25 %耐力力が低下する結果となった。そこで, 塩害作用を受けた RC 床版の鉄筋損傷グレードが - の状態における低減係数 (塩害) として $D_E = 0.75$ とする。なお, 塩害作用を受けない床版については考慮する必要がない。また, 凍害の影響を受けた場合の低減係数は, 今後の課題とする。

(4) 道路橋示方書の改訂による補正係数: D_s

本供試体は新示方書に基づいて設計した RC 床版であることから, 旧示方書 (昭和 39 年) の設計基準と新示方書 (平成 8 年以降) の設計基準に対する補正係数が必要となる。現行示方書では, 鉄筋に異形棒鋼 (SD) を使用し, 旧示方書では丸鋼 (SR) が使用されている。そこで, 旧示方書と現行示方書で鉄筋の降伏強度が異なることから降伏強度比を鉄筋の補正係数 D_s とする。よって, 鉄筋の補正係数は式(7)となる。

$$D_s = f_{yd-SR} / f_{yd-SD} \quad (7)$$

ここに, f_{yd-SR} : 丸鋼の降伏強度 (= 235N/mm²), f_{yd-SD} : 異形棒鋼の降伏強度 (= 295N/mm²)

(5) D-N曲線を適用した等価走行回数

疲労劣化を受けた RC 床版上面を SFRC により上面増厚した場合の D-N 曲線および種々の劣化係数を適用した SFRC 上面増厚補強した RC 床版の等価走行回数は, 式(8)として与えられる。

$$N_{D0-ep} = \sum_{i=1}^n (N_{epi} \cdot D_{Di} \cdot D_c \cdot D_E \cdot D_s) \quad (8)$$

ここで, N_{D0-ep} : SFRC 上面増厚補強法 RC 床版の等価走行回数, N_{epi} : 等価走行回数 (式(1)), D_{Di} : SFRC 上面増厚補強法における劣化係数, D_c : 湿潤時におけるコンクリート材料の低減係数 (= 0.70), D_E : 環境条件による低減係数 (塩害作用を受けた場合: = 0.75, なお, 本実験では環境条件による低減係数を 1.0 とする), D_s : 使用鉄筋係数 (= f_{yd-SR} / f_{yd-SD}),

本実験における SFRC 上面増厚補強した供試体 RC.S-1 の荷重 80kN で 2 万回走行時の D-N 曲線式から得た劣化係数および種々の低減係数を適用した場合の等価走行回数式(8)による計算例を示す。なお, RC 床版の

表 - 5 SFRC上面増厚補強したRC床版の等価走行回数（昭和39年設計基準）

供試体		荷 重					等価走行回数 合計	平均等価走行 回数（回）	走行回 数比
		60 kN	80 kN	100 kN	120 kN	130 kN			
RC-1	実験走行回数	20,000	20,000	9,392			6,962,254	7,155,596	—
	等価走行回数	20,000	772,278	6,169,976					
RC-2	実験走行回数		20,000	10,010			7,348,160		
	等価走行回数		772,239	6,575,921					
RC.S-1	実験走行回数		20,000	20,000	9,026		27,213,281	27,213,281	3.8
	等価走行回数		331,821	5,100,312	21,781,147				
RC.S-2	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	2,907	52,713,843	52,713,843	7.4
	等価走行回数		331,821	5,100,312	35,741,463	11,540,247			
RC.S-A1	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	6,214	72,448,554	72,448,554	10.1
	等価走行回数		292,123	4,272,438	37,660,701	30,223,292			
RC.S-A2	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	14,630	112,004,426	112,004,426	15.7
	等価走行回数		292,123	4,272,438	37,660,701	69,779,164			
RC.S-CA1	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	10,120	88,950,512	88,950,512	12.4
	等価走行回数		289,940	4,223,718	37,099,997	47,336,857			
RC.S-CA2	実験走行回数		20,000	20,000	20,000	19,288	113,151,093	113,151,093	15.8
	等価走行回数		289,940	4,223,718	37,095,115	71,542,321			

等価走行回数 N_{epi} は、表 - 5 に示す供試体 RC.S-1 の実験走行回数 2 万回の等価走行回数である。

$$\begin{aligned}
 N_{D0 \cdot ep(20000)} &= N_{epi} \cdot D_{Di} \cdot D_C \cdot D_E \cdot D_S \\
 &= N_{epi} \cdot (-0.0234 \ln N_{epi} + 0.111) D_{Di} \cdot D_C \cdot D_E \cdot D_S \\
 &= 772,239 \times (-0.0234 \ln 772,664 + 1.10) \\
 &\quad \times 0.70 \times 1.0 \times 235/295 \\
 &= 331,821 \text{ 回}
 \end{aligned}$$

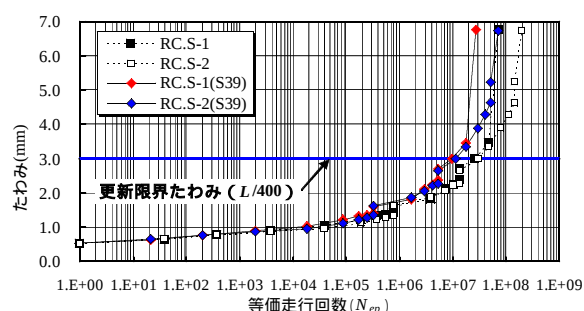
本提案する式(8)より算出した SFRC 上面増厚補強法における等価走行回数と、松井らが提案した逆数 $m = 12.7$ を適用した RC 床版の等価走行回数(式(1))を比較すると、SFRC 上面増厚補強床版は RC 床版の等価走行回数の約 43 % となった。本提案による上面増厚補強後の RC 床版の等価走行回数式(8)は、松井らが提案する荷重 P とはり状化した床版の押抜きせん断耐力 P_{sx} の比を用いた S-N 曲線から算出された RC 床版の等価走行破壊回数 N_f にも適用が可能である。

6.5 D-N曲線および劣化条件を適用した等価走行回数

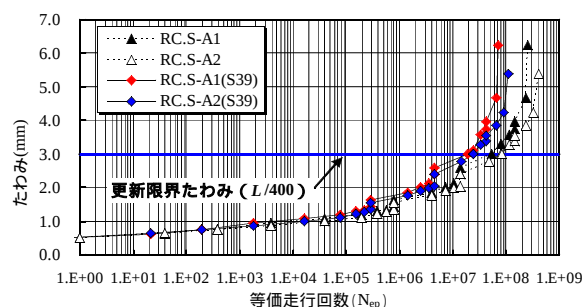
昭和 39 年代の設計基準により設計された RC 床版に SFRC 上面増厚補強した場合の D-N 曲線式による劣化係数、湿潤時の影響によるコンクリート材料の低減係数および設計基準で設計された鉄筋に対する補正係数を適用した等価走行回数を式(8)より算出した結果を表 - 5 に示す。また、たわみと式(8)より算出した等価走行回数との関係を図 - 7 に示す。

(1) 従来型の SFRC 上面増厚供試体

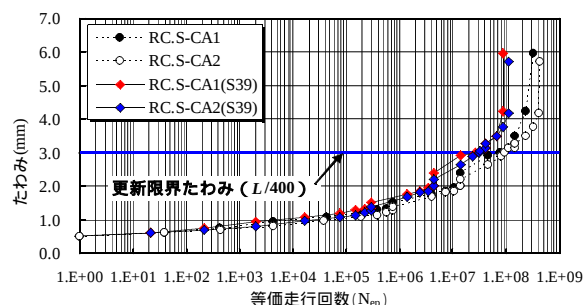
本実験は未損傷 RC 床版に SFRC 上面増厚補強した供試体を用いて、輪荷重走行疲労実験を行い、松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数 12.7 を適用した等価走行回数(式(1))を用いて、補強後の RC 床版の等価走行回数を評価した。その結果、本提案の再補修・補強時期の床版たわみが床版支間 L の $1/400$ とした場合、現行示方書に規定する大型車両の 1 日 1 方向あたりの計画交通量を 2000 台とすると、従来型の SFRC 上面増厚補強法は、全面増厚した供試体が 36.7 年、打継目を設けた供試体



(1)従来型の SFRC 上面増厚供試体



(2)接着剤を用いた SFRC 上面増厚供試体



(3)接着剤と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚供試体
図 - 7 性能低下曲線を適用した等価走行回数

が 43 年となった。これに対して、本提案する式(8)より算出した SFRC 上面増厚補強した RC 床版の等価走行回数 $N_{D0 \cdot ep}$ から疲労寿命を推定すると、従来型の SFRC 上面増厚補強法の場合は、全面増厚した供試体が 13.5 年、

打継目を設けた供試体が 15.8 年となった。事例とした銚子大橋の SFRC 上面増厚 RC 床版の再補修は約 10 年であるが、この RC 床版は塩害作用を受けている。よって、塩害による低減係数 $D_E = 0.75$ を適用すると 10.2 年となり、さらに近似した。

(2) 接着剤を塗布した SFRC 上面増厚供試体

次に、接着剤を塗布した SFRC 上面増厚補強法の場合は、本提案する補強後のたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した場合の等価走行回数 N_{D0} から算出した耐用年数は、供試体 RC.S-A1, -A2 で、それぞれ 72.9 年、114.4 年となり、その後の補強は必要としない結果となる。これに対して、等価走行回数 N_{D0+ep} (式(8)) から算出すると全面増厚した供試体 RC.S-A1, -A2 で、それぞれ 26.7 年、34.0 年となった。

(3) 接着剤の塗布と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚供試体

接着剤と CFRP 格子筋を併用した SFRC 上面増厚補強法の場合は、補強後のたわみが床版支間 L の $1/400$ に達した場合の等価走行回数から算出した耐用年数は、供試体 RC.S-CA1, CA2 で、それぞれ 108.9 年、131.5 年となり、その後の補修・補強の検討は全く必要としないこととなる。これを、本提案の性能低下曲線を適用した等価走行回数から算出すると供試体 RC.S-CA1, CA2 は、それぞれ 35.9 年、41.9 年となり、従来型の SFRC 上面増厚補強法に対して耐疲労性は大幅に向上している。

以上より、再補強時期について予測を行うためには、床版補強後に各橋梁の床版底面に変位計を取り付け、常時モニタリングをすることを提案する。

7. まとめ

本研究は、劣化した RC 床版の上面増厚補強法による 3 パターンの SFRC 上面増厚補強供試体を用いて、輪荷重走行疲労実験を行い、耐疲労性を評価した。その結果、次のことを明らかにした。

S-N 曲線の傾きの逆数 $m = 12.7$ を適用した RC 床版の等価走行回数から SFRC 上面増厚補強した RC 床版の耐疲労性を評価すると従来型の SFRC 上面増厚補強、接着剤の塗布 および接着剤と CFRP 格子筋を用いた SFRC 上面増厚補強法を施した RC 床版は再補修・補強が必要ない結果となった。しかし、従来型の SFRC 上面増厚補強した RC 床版は、約 10 年前後で再補修を施している。これらのことから、現行設計基準に基づいて設計された RC 床版を用いて輪荷重走行疲労実験を行った場合は、RC 床版の等価走行回数を補正する必要がある。

輪荷重走行疲労実験におけるたわみと等価走行回数の関係より、SFRC 上面増厚補強法における床版たわみが床版支間 L の $1/400$ 付近からたわみの増加が著しくなっている。したがって、SFRC 上面増厚補強法におけるたわみによる健全度評価における定量的指標は、床版たわみが床版支間 L の $1/400$ とし、これを目安に再補修・補

強を検討する。

輪荷重走行疲労実験におけるたわみと等価走行回数の関係より、等価走行回数の増加に伴うたわみの増加を再補修・補強時期の予測とする床版支間 L の $1/400$ 付近までのたわみによる劣化値と RC 床版の等価走行回数の関係から D-N 曲線式を提案した。この D-N 曲線式および種々の低減係数を、松井らが提案する S-N 曲線から算出された RC 床版の等価走行破壊回数 N_f に適用することが橋梁 RC 床版の長寿命化対策における疲労寿命算定法の 1 つとなるものと考えられる。

本提案の D-N 曲線による劣化係数および湿潤時のコンクリート材料の低減係数および示方書の違いによる補正係数を適用した等価走行回数は、昭和 39 年代の設計基準を適用した場合、RC 床版の等価走行回数に比して、従来型の SFRC 上面増厚補強の等価走行回数は 2.9 倍から 5.2 倍となり、実橋の補強 RC 床版の寿命年数とほぼ同等となった。また、増厚界面に接着剤を塗布した場合は 8.7 倍から 12.7 倍、接着剤と CFRP 格子筋を併用した場合は 12.2 倍から 15.2 倍となり、接着剤および CFRP 格子筋を用いることで耐疲労性が大幅に向上している。

SFRC 上面増厚補強した RC 床版を用いて乾燥状態で輪荷重走行疲労実験を行い、補強後の耐疲労性を評価する場合は、松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数を適用した等価走行回数に D-N 曲線から得た劣化係数、湿潤期を想定したコンクリート材料の低減係数、環境条件による低減係数、設計基準に対する鉄筋の補正係数を適用した等価走行回数を用いることで上面増厚補強に対する耐疲労性の評価法とする。

参考文献

- 1) 内田賢一、西川和廣：既存道路橋床版の疲労耐久性に関する検討、第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集（土木学会）、pp.37-42、(1998)
- 2) 前田幸雄、松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式、土木学会論文集、第 348 号、-1、pp.133-141、1984.
- 3) 三田村浩、佐藤京、本田幸一、松井繁之：道路橋 RC 床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響、構造工学論文集 Vol.55A、(2009)。
- 4) 新銀武、鈴木大輔、出戸秀明、岩崎正二：積雪寒冷地の塩化物供給を考慮した RC 床版の寿命診断、土木学会第 62 回年次学術講演会、2007.
- 5) 土木研究所：炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する設計・施工指針(案)、コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告() (1999)。
- 6) 三上浩、岸徳光、藤田学、澤田純之：鉄筋比の異なる AFRP シート下面接着 RC 版の押抜きせん断性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.28、No.2、pp. 1459-1464(2006)。

- 7) (社)高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル，(1995)。
- 8) 西川和廣：SFRC による鋼床版舗装 - 鋼とコンクリートの新しい関係 - ，橋梁と基礎 2005-8 ，pp.84-87，(2005)
- 9) 山田健太郎：重交通下における鋼床版の疲労損傷，土木学会第 10 回鋼構造と橋梁に関するシンポジウム，(2007)
- 10) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，(2007)。
- 11) 児玉孝喜，後藤和満，加形護，近藤充志：併用下における SFRC による鋼床版の疲労対策：橋梁と基礎，pp.30-38，(2006)
- 12) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説 ， ， ，(2004)。
- 13) 玉越隆史，土田隆司，中州啓太，石尾真理：道路橋コンクリート系床版の疲労耐久性評価法に関する研究，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集（土木学会），pp.119-124，(2006)。
- 14) 土木学会：道路橋床版の要求性能と維持管理技術（社）土木学会/鋼構造委員会，pp.237-240，(2009)。
- 15) Raithby, K.D. and Galloway, J.W.：Effects of moisture condition, age, and rate of loading on fatigue of plain concrete." ACI publication SP 41-2, 15-34.(1974)。
- 16) RILEM Committee 36-RDL.：Long term random dynamic loading of concrete structures.，Materials and Structures, 17(9), RILEM, 1-28.(1984)
- 17) 水口和彦，阿部忠，木田哲量，大竹淳一郎：走行振動荷重による応力履歴と塩害作用を受けた RC 床版の耐荷力の低下に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No. 62，pp.357-364，(2009)
- 18) 土木学会：コンクリート標準示方書（維持管理編），(2002)。

（2009 年 9 月 24 日受付）