

接着剤を用いた SFRC 上面増厚補強 RC 床版の耐疲労性および破壊メカニズム

日大生産工(院) ○根本 大 日本大学 阿部 忠 日本大学 木田哲量
鹿島道路(株) 児玉孝喜 鹿島道路(株) 伊藤清志

1. はじめに

1960 年代に建設された道路橋は、近々建設後 40～50 年が経過することになり、劣化損傷が多発する危険性が高まっている。とくに、道路橋 RC 床版は大型車両の繰返し走行により疲労劣化が進行し、ひび割れ損傷が多く生じている。また、積雪寒冷地域では凍害を受けて RC 床版の上面は砂利状化していることもある。このような道路橋 RC 床版の劣化損傷に対する補強法に、鋼繊維補強超速硬コンクリート(以下、SFRC と称す)を用いた上面増厚工法が採用されている¹⁾。SFRC 上面増厚工法は経済的で早期交通開放可能であり、耐荷力および耐久性の向上に優れている。しかし、上面増厚工法により補強された RC 床版は、増厚部と既設 RC 床版の付着面が早期にはく離するなどの問題が生じている。また、上面増厚工法は全面増厚する施工法と、1 車線を先に増厚し、その後 2 車線目を増厚する工法、すなわち車線間で打継目を設ける施工法が採用されているが、打継目を設ける施工法では打継目から雨水が浸透し、増厚部と既存床版部の界面での損傷が報告され、問題となっている。

そこで本研究では、既存 RC 床版に通常の上面増厚工法で作製した供試体と、増厚部と既存 RC 床版の界面に接着剤を塗布した供試体を作製し、さらに増厚面の軸方向の走行面付近に打継目を設けた供試体も作製して、輪荷重による走行疲労実験を行い、増厚界面に接着剤を用いた上面増厚工法、打継目を設けた上面増厚工法の耐疲労性と破壊メカニズムに関する検討を行なった。

2. 使用材料・供試体寸法および補強方法

2.1 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。その圧縮強度は 35N/mm^2 である。また、鉄筋は SD295A、D10 を使用した。その降伏強度、引張強度、ヤング係数はそれぞれ 370N/mm^2 、 511N/mm^2 、 200kN/mm^2 である。増厚部の SFRC には超速硬セメントと最大寸法 15mm の粗骨材を使用し、鋼繊維は長さ 30mm を混入量 100kg/m^3 (体積比で 1.27%) で配合した。増厚

3 時間後の SFRC 圧縮強度は 29.4N/mm^2 、7 日後の圧縮強度は 51.6N/mm^2 である。また、RC 床版部と増厚部の界面には、高耐久性エポキシ系接着剤を平均厚さ 1mm で塗布した。

2.2 供試体寸法および鉄筋の配置

RC 床版、SFRC 上面増厚 RC 床版供試体寸法および鉄筋配置を図-1 に示す。本実験の RC 床版供試体は道路橋示方書・同解説 II²⁾ (以下、道示 II と称す) の規定に基づき、設計支間 2400mm、1 日 1 方向当たりの大型自動車の交通量が 2000 台以上を想定して床版厚および鉄筋量を決定し、その 1/2 モデルとした。供試体の寸法は、全長 1400mm、支間 1200mm、厚さ 130mm の等方正版である。また、鉄筋の配置は複鉄筋配置とし、引張側の軸直角方向および軸方向ともに D10 を 100mm 間隔で配置し、有効高さは軸直角方向および軸方向でそれぞれ 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。

2.3 SFRC 上面増厚 RC 床版の施工法

SFRC 上面増厚 RC 床版供試体は、RC 床版部と増厚部の界面および打継目の合成を高めて耐疲労性の向上を図るために、RC 床版と増厚界面

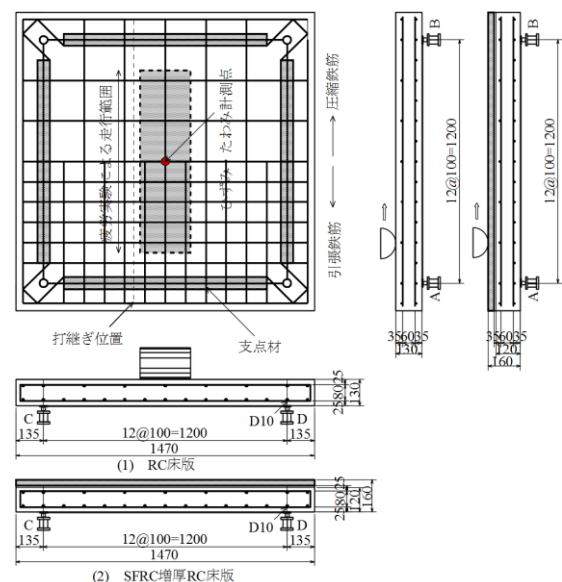


図-1 RC 床版・SFRC 上面増厚 RC 床版供試体寸法および鉄筋配置

Fatigue Resistance and Failure Mechanism of RC Slabs with SFRC Concrete Overlay by using Adhesive

Dai NEMOTO, Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA, Takayoshi KODAMA and Kiyoshi ITOU

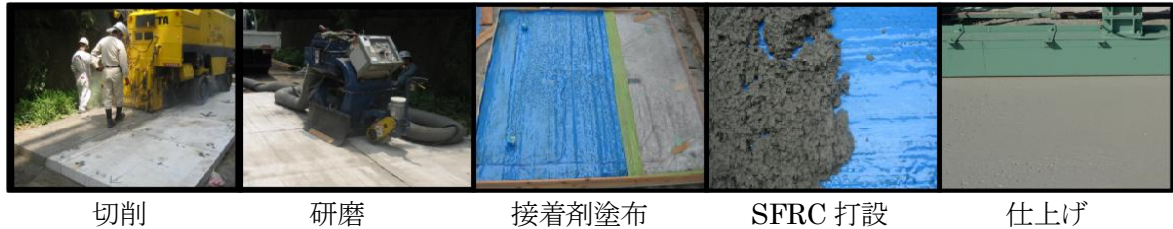


図-2 SFRC 上面増厚施工手順

および打継目に接着剤を塗布した。SFRC 上面増厚 RC 床版供試体の施工手順を図-2 に示す。まず、RC 床版上面を切削機を用いて 10mm 切削、ジェットブラストにより研磨する。その後、全面増厚する供試体の場合は直接に、接着剤を用いる供試体は接着剤を 1mm 厚で塗布した後、SFRC を 40mm 打設し、表面仕上げする。さらに、実施工を考慮して打継目を設けた供試体も作製し、打継位置は走行範囲から 30mm の位置とした。床版厚は 160mm を目標とする。ここで、通常 RC 床版を RC-1, 2、SFRC を直接全面に増厚した供試体を SFRC-1、打継目を設けた供試体を SFRC-2、接着剤を塗布して SFRC を全面に増厚した供試体を SFRC-S1、それに打継目を設けた供試体を SFRC-S2 と称する。

3. 実験方法および等価走行回数

3.1 輪荷重による走行疲労実験

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±45cm の範囲で輪荷重を走行させる実験である。走行速度は、距離 0.9m を 6.5sec で走行する 0.14m/s とする。荷重は 100kN までは 2 万回走行ごとに 20kN、それ以降は 10kN ずつ増加する段階状载荷とし、供試体が破壊するまで荷重増加と走行を繰り返す。計測は 1, 10, 100, 1000, 5000 回および 5000 回以降は 5000 回走行ごとに、鉄筋ひずみおよびたわみを計測する。

3.2 等価走行回数

本実験においては、段階状载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)として与えられる。なお、基準荷重は、RC 床版供試体が実橋床版の 1/2 モデルとしたことから設計荷重は 50kN であり、安全率 1.2 を考慮して 60kN とした。また、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³⁾の傾きの逆数 12.7 を適用する。

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

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)

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を式(1)により算出し、表-1 に示す。供試体 RC-1, 2 の平均等価走行回数は 7,155,596 回、RC 床版に直接上面増厚した供試体 SFRC-1 の等価走行回数は 73,976,114 回、打継目を設けた SFRC-2 は 200,472,205 回である。また、接着剤を塗布して上面増厚した供試体 SFRC-S1 の等価走行回数は 261,284,849 回、打継目を設けた SFRC-S2 の等価走行回数は 416,047,237 回である。ここで、RC 床版の等価走行回数と SFRC 上面増厚供試体の等価走行回数を比較すると SFRC-1 は 10.3 倍、SFRC-2 は 28.0 倍、SFRC-S1 は 36.5 倍、SFRC-S2 は 58.1 倍となり、上面増厚を施したことにより疲労耐久性が向上した。さらに、接着剤を塗布して上面増厚した供試体 SFRC-S1, 2 の等価走行回数は直接増厚した供試体 SFRC-1, 2 の等価走行回数に比してそれぞれ 2.1 倍、3.5 倍となり、RC 床版と増厚の界面に接着剤を塗布することにより疲労耐久性が大幅に向上した。

表-1 等価走行回数

供試体	等価走行回数	平均等価走行回数	走行回数比	
			SFRC-S/RC	SFRC-S/SFRC
RC-1	6,963,265	7,155,596	—	—
RC-2	7,347,928			
SFRC-1	73,976,114	73,976,114	10.3	—
SFRC-2	200,472,205	200,472,205	28.0	—
SFRC-S1	261,284,849	261,284,849	36.5	3.5
SFRC-S2	416,047,237	416,047,237	58.1	2.1

4.2 破壊状況

RC 床版および SFRC 上面増厚 RC 床版の走行疲労実験における破壊状況を図-3 に示す。また、SFRC 上面増厚 RC 床版の切断面の破壊状況を図-4 に示す。RC 床版供試体の場合、図-3(1)に示すように、上面は輪荷重走行位置から軸直角方向にひび割れが発生している。下面においては軸直角方向および軸方向に 100～130mm 間隔でひび割れが発生し、格子状を形成している。これは、軸直角方向および軸方向に配置した鉄筋間隔とほぼ同じ寸法である。また、輪荷重設置位

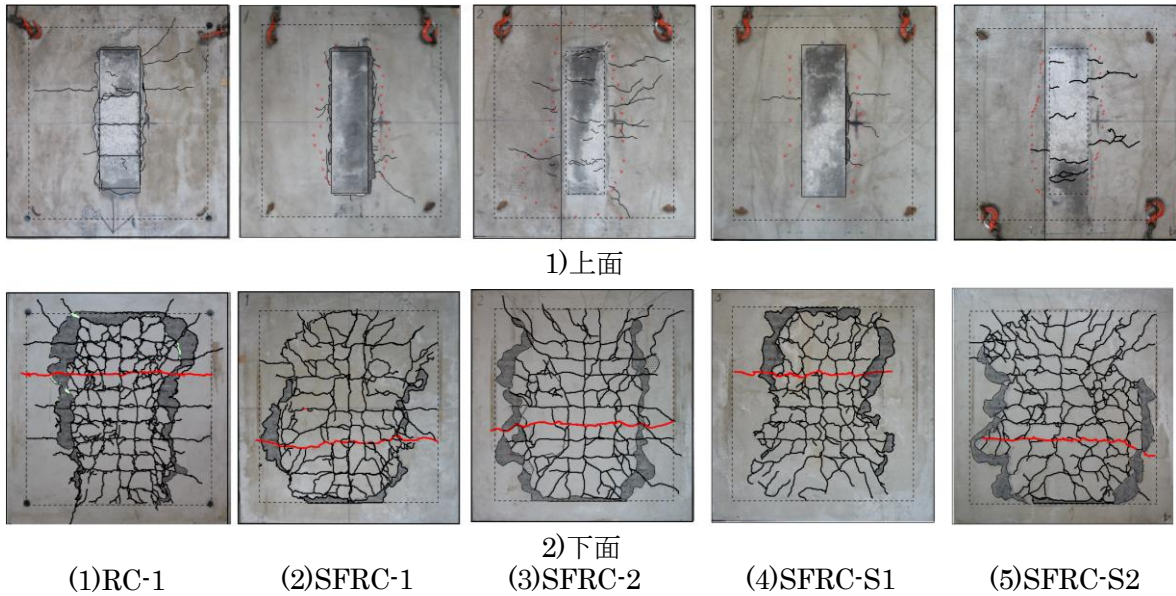


図-3 RC床版およびSFRC上面増厚RC床版破壊状況

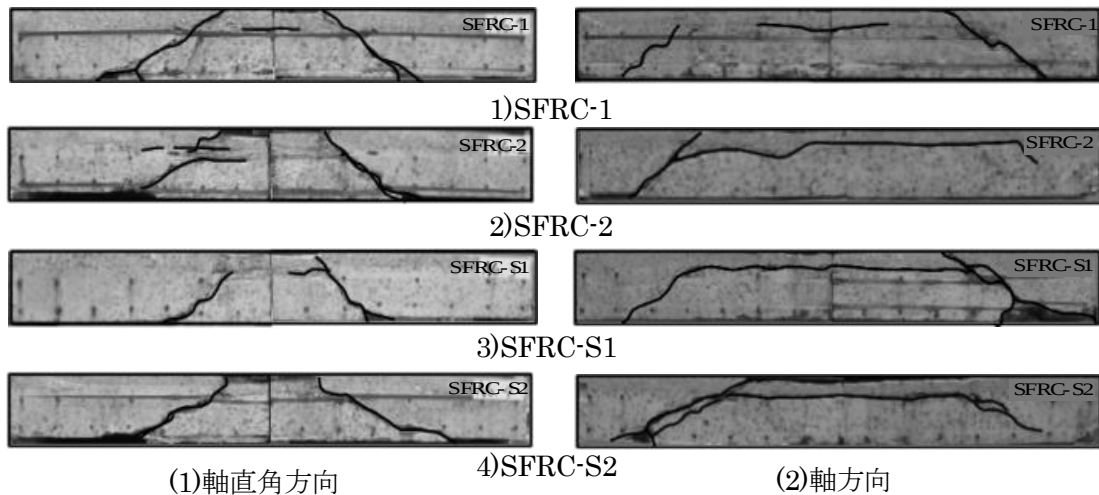


図-4 上面増厚RC床版破壊状況

置から約 45° のせん断破壊面を形成し、ダウエル効果が及ぼす範囲でコンクリートの剥離が見られる。SFRC 上面増厚 RC 床版供試体の場合、図-3(1), (2)に示すように、供試体 SFRC の上面は RC 床版供試体と同様に軸直角方向にひび割れが生じている。下面においても RC 床版供試体と同様のひび割れが発生し、配置した鉄筋とほぼ同間隔であり、格子状を形成している。また、図-4(1), 1), 2)が示すように、軸直角方向の断面は、輪荷重設置位置から約 45° のせん断破壊面を形成し、ダウエル効果が及ぼす範囲でコンクリートのはく離が見られる。また、走行範囲およびその周辺で増厚界面と既存 RC 床版とはく離が生じている。供試体 SFRC-S は図-3(4), (5)、図-4(1), 3), 4)が示すように、上面、下面、断面とも供試体 SFRC より等価走行回数が 2.1 倍、3.5 倍と多くなっているにもかかわらず、供試体

SFRC とほぼ同様の破壊形状を示している。これは、接着剤を塗布したことにより疲労耐久性が向上したためと考えられる。

4.3 等価走行回数とひずみ

等価走行回数と軸直角方向のひずみの関係を図-5 に示す。RC 床版供試体 RC-1 は、等価走行回数 77.2 万回後の荷重増加時でのひずみは 1240×10^{-6} であり、降伏に至っていない。その後、等価走行回数 700 万回付近ではひずみが 2240×10^{-6} となり急激に増加し、終局時のひずみは 3583×10^{-6} となった。供試体 RC-2 も同程度であり、等価走行回数 730 万回付近でひずみが 2190×10^{-6} となり急激に増加し、終局時のひずみは 2750×10^{-6} である。次に、SFRC を直接全面に増厚した供試体 SFRC-1 のひずみは等価走行回数 77 万回付近では 1000×10^{-6} であり、等価走行回数 1391 万回付近でも 1500×10^{-6} 程度である。その後の荷重増加と走行回数の増加では鉄筋が降伏した

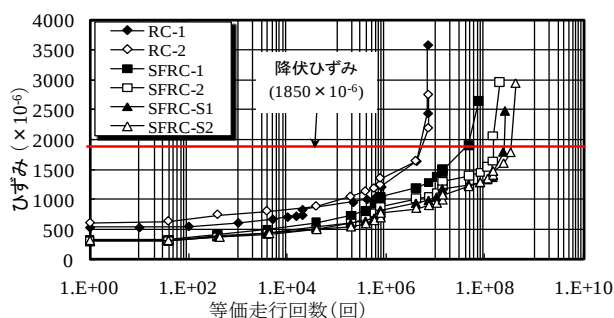


図-5 ひずみと等価走行回数

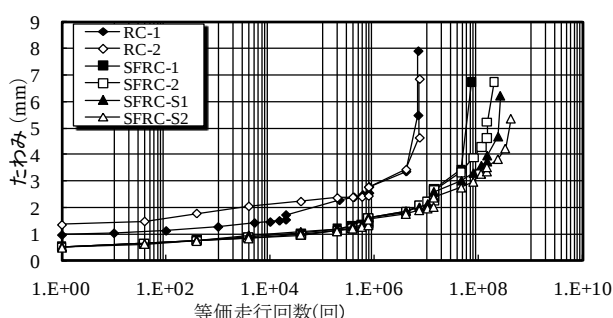


図-6 たわみと等価走行回数

後、急激にひずみが増加し、終局時は 2650×10^{-6} 程度である。打継目を設けた供試体 SFRC-2 のひずみは、供試体 SFRC-1 と同様な増加傾向を示しているが、供試体 SFRC-1 に比して 90% 程度であり、打継目を設けたことによる急激なひずみの上昇はみられない。終局時のひずみは 2970×10^{-6} 程度である。増厚界面に接着剤を塗布した供試体 SFRC-S1 のひずみは、荷重 100kN で 2 万回走行時 (等価走行回数 13.1×10^6) では 1060×10^{-6} であり、SFRC を直接全面に増厚した供試体 SFRC-1 の 80kN で 2 万回走行時付近のひずみ程度である。その後、荷重 130kN で走行開始後、著しくひずみが増加した。ひずみ 1500×10^{-6} 付近の等価走行回数を比較すると、供試体 SFRC-1 の 13.9×10^6 回に対し、SFRC-S1 は 147×10^6 回であり、約 10 倍となる。また、打継目を設けた供試体 SFRC-S2 のひずみも、全面増厚した供試体 SFRC-S1 とほぼ同様な増加傾向を示している。終局時のひずみは 2940×10^{-6} 程度であり、SFRC-2 と同程度ではあるが、等価走行回数は 2.1 倍も多い。したがって、接着剤を塗布することで走行回数の増加に関わらずひずみの上昇が抑制されている。これは、RC 床版と上面増厚した界面に接着剤を塗布したことにより疲労耐久性が向上した結果である。

4.4 等価走行回数とたわみ

等価走行回数とたわみの関係を図-6 に示す。供試体 RC-1, 2 は等価走行回数の増加に伴いたわみもわずかに増加し、等価走行回数 400 万回付近で、たわみが 3mm (支間の 1/400) 後から急激に上昇した。終局時のたわみはそれぞれ 7.91mm、6.86mm である。直接増厚した供試体 SFRC-1, 2 および接着剤を塗布した供試体 SFRC-S1, 2 ともに、等価走行回数 13.9×10^6 回付近までは等価走行回数の増加に伴いたわみも線形的に増加しているが、直接増厚した供試体 SFRC-1, 2 はたわみが 3mm 以降急激に上昇している。終局時のたわみは、それぞれ 6.75mm、6.72mm であった。接着剤を塗布した供試体 SFRC-S1, 2 は、たわみが 3mm を超えた後も線形的に増加

し、たわみが 3.5mm を超えた付近から急激にたわみが増加した。終局時のたわみはそれぞれ 6.22mm、5.37mm である。したがって、SFRC 上面増厚および接着剤を塗布して SFRC 上面増厚することでたわみの増加が抑制され、等価走行回数も増加した。さらに、接着剤を塗布して SFRC 上面増厚することで終局時付近でのたわみの増加の抑制が著しく、耐疲労性も向上した。

5. まとめ

①RC 床版の等価走行回数に比して、通常の上面増厚供試体 SFRC-1, 2 はそれぞれ 10.3 倍、28.0 倍、接着剤を塗布した上面増厚供試体 SFRC-S1, 2 はそれぞれ 36.5 倍、58.1 倍となり、上面増厚することにより耐疲労性が向上した。また、SFRC-1, 2 に比して SFRC-S1, 2 の等価走行回数はそれぞれ 3.5 倍、2.1 倍となり、増厚界面に接着剤を塗布することで、さらに耐疲労性が向上する結果となった。

②破壊状況は RC 床版および従来型の上面増厚供試体、接着剤を用いた上面増厚供試体は等価走行回数が異なるものの底面の破壊状況はほぼ同程度となった。したがって、通常の上面増厚、接着剤を塗布して SFRC 上面増厚することにより耐疲労性が向上した。

③等価走行回数と鉄筋ひずみおよびたわみの関係から、SFRC 上面増厚することにより、鉄筋ひずみおよびたわみの抑制効果があり、耐疲労性が向上した。また、接着剤を塗布しての SFRC 上面増厚することにより、通常の上面増厚よりも大幅に耐疲労性が向上した。

④本実験では、打継目を設けた供試体も作製したが、通常の上面増厚、接着剤を塗布した上面増厚のいずれの供試体も打継目を設けたことによる耐疲労性の低下は見られなかった。

参考文献

- 1) (社)高速道路調査会, 上面増厚工法設計施工マニュアル (1995).
- 2) 日本道路協会: 道路橋司法書・同解説 I、II、III、(2002).
- 3) 松井繁之, 道路橋床版設計・施工と維持管理, 森北出版 (2007).