

せん断筋補強した RC 床版の耐疲労性の評価

中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) ○高野 真希子
 日本大学 阿部 忠 日本大学(院) 元 燦豪

1. はじめに

道路橋 RC 床版の損傷過程は、大型車両の繰り返し走行により貫通ひび割れや水平ひび割れが発生し、最終的には押抜きせん断破壊となる。一方、RC 床版の補強法には耐荷力性能の向上を図るために鋼繊維補強コンクリート (SFRC) を用いた上面増厚補強が施されている。しかし、早いもので十数年で増厚界面にはく離が発生し、再増厚補強が行なわれた事例もある。これらの損傷に対する補強対策として、鉄筋コア・アンカー型補強法¹⁾ (以下、せん断筋補強とする) が提案されている。そこで本研究は、未損傷の RC 床版供試体、実橋 RC 床版に接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強と CFSS 下面接着補強した床版および、それぞれにせん断筋補強補強した供試体を用いて輪荷重走行疲労実験を行ない、せん断補強筋を配置することによる補強効果および耐疲労性を検証し、せん断筋補強法の実用性を評価する。

2. RC床版の損傷状況およびせん断筋の配置

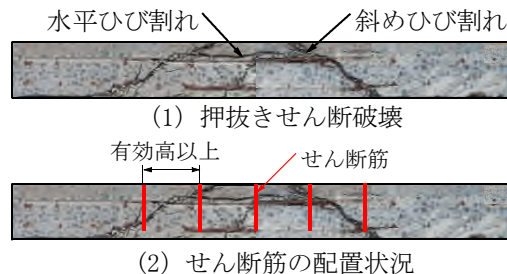
輪荷重走行疲労実験における RC 床版の押抜きせん断破壊の一例およびせん断筋の配置を図－1に示す。RC 床版の破壊状況は図－1(1)に示すように、破壊時には輪荷重走行位置から約 45 度の斜めひび割れとかぶり内には水平ひび割れが発生している。せん断筋補強法は、図－1(2)に示すように、損傷が予想される位置にせん断筋を挿入し、RC 床版内部損傷を抑制する補強法である。

3. 供試体概要

供試体は、未損傷の RC 床版供試体と 47 年間供用された旧銚子大橋の RC 床版供試体を用いる。

3.1 RC床版供試体

(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 5mm 以下の砕砂、5mm ～ 20mm の砕石を使用した。鉄筋には D13 を使用した。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。



図－1 押抜きせん断破壊とせん断筋の配置

表－1 供試体の材料特性

供試体	コンクリート圧縮強度 N/mm ²	鉄筋 (SD295A)			
		使用鉄筋	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²
RC-1	35.0	D13	368	513	200
RC-2	35.0	D13	368	513	200
RC-s1	35.0	D13	368	513	200
RC-s2	35.0	D13	368	513	200
RC-S1	38.2				
RC-S2	38.2				
RC-S.C1	38.2	主鉄筋: $\phi 16$	(主鉄筋: $\phi 16$) 298	(主鉄筋: $\phi 16$) 418	200
RC-S.C2	38.2	配力筋: $\phi 13$	(配力筋: $\phi 13$) 287	(配力筋: $\phi 13$) 402	
RC-S.C-s1	38.2	$\phi 13$			
RC-S.C-s2	38.2				

(2) 供試体寸法 2002 年改訂の道示²⁾に準拠し、実床版寸法の 3/5 モデルとする。よって、全長 1600mm、支間 1400mm、床版厚 150mm とする。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の軸直角方向および軸方向に D13 を 120mm 間隔で配置し、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置した。ここで、RC 床版供試体寸法および鉄筋配置を図－2(1)に示す。

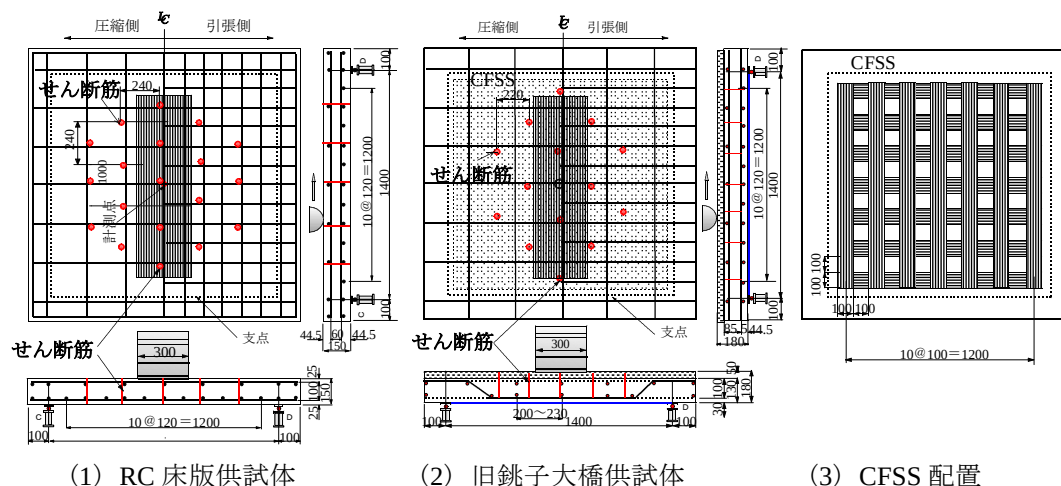
3.2 旧銚子大橋のRC床版供試体

(1) 使用材料 コンクリート材料には、普通ポルトランドセメントと 5mm 以下の細骨材、最大 20mm の粗骨材が使用されている。鉄筋には SR235 が使用され、主鉄筋は $\phi 16$ mm、配力筋は $\phi 13$ mm である。材料特性値を表－1に併記する。

(2) 供試体寸法 RC 床版供試体対と同様に全長 1600×1600mm に切断加工し、支間を 1400mm とする。主鉄筋には $\phi 16$ mm が 120mm 間隔で配置され、圧縮鉄筋は引張主鉄筋の 1/2 の鉄筋量が配置されている。また、配力筋は $\phi 13$ mm を引張側および圧縮側ともに 220mm ～ 240mm 間隔で配置さ

Evaluations of fatigue resistance inserted re-bars shear strengthened RC slabs

Makiko TAKANO, Tadashi ABE and Chanhon WON



図－2 供試体寸法および鉄筋配置

れている。ここで、供試体の寸法および鉄筋の配置を図－2(2)に示す。

4. RC床版および旧銚子大橋RC床版の補強方法

旧銚子大橋の RC 床版は、上面増厚補強されていたが撤去時には全てはく離していたため、旧増厚部を完全に撤去した。補強方法としては、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強、接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強と下面 CFSS 格子接着補強の併用補強を施した。また、2002 年改訂の道示に準拠した RC 床版および接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強と下面 CFSS 格子接着補強の併用補強 RC 床版に対してせん断筋による補強を施した。

4.1 補強材料

(1) 鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 材齢 3 時間で道示に規定するコンクリートの設計基準強度 24N/mm^2 を満足する配合とした。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 $100\text{kg/m}^3 (1.27\text{vol.}\%)$ で配合した。圧縮強度は、上面増厚後の材齢 3 時間で 24.5N/mm^2 である。また、SFRC と RC 床版との界面には付着性を高めるために高耐久型エポキシ系接着剤（以下、接着剤とする）を用いる。

(2) 炭素繊維ストランドシート (CFSS) 下面接着には、新材料である炭素繊維ストランドシート (CFSS) を用いる。目付量 600g/m^2 、設計厚 0.333mm を用い、接着には CFSS 専用の接着剤を用いる。

(3) せん断筋補強材 せん断筋には D13 を用い、その特性値は表－1 に示した RC 床版供試体と同様である。また、接着に用いるエポキシ系樹脂の強度は、硬化後 RC 床版コンクリート以上の強度

を有するとともに、付着強度が 1.2N/mm^2 以上を有し、硬化時間は 3 時間程度のものを使用する。

4.2 補強方法

(1) 接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強 旧銚子大橋 RC 床版に対して新たに接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強を施す。施工は、上面増厚工法設計施工マニュアル³⁾に準拠して行った。供試体記号を RC-S とする。

(2) 上面・下面併用補強 旧銚子大橋 RC 床版に対して新たに接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強と下面 CFSS 格子接着補強を併用する。CFSS の補強は、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)⁴⁾に準拠して行った。下面格子張り接着状況を図－2(3)に併記する。供試体記号を RC-S.C とする。

(3) せん断筋による補強 未損傷の RC 床版と上面・下面併用補強を施した供試体に対してせん断筋による補強を行う。RC 床版へのせん断筋の配置は、床版中央から軸方向に D13 を 240mm 間隔で配置する。軸直角方向は同一間隔で千鳥配置とした。配置間隔および配置を図－2(1)に併記した。また、埋め込み深さは引張鉄筋付近⁵⁾までとし、長さ 130mm の鉄筋を挿入する。供試体記号を RC-s とする。一方、上面・下面併用補強供試体のせん断筋の配置寸法は、圧縮鉄筋に接触しないように配置することから間隔は軸方向および軸直角方向に D13mm を 420mm で千鳥配置とした。供試体記号を RC-S.C-s とする。

5. 実験方法

5.1 実験装置および実験方法

輪荷重走行疲労実験は、床版中央から± 500mm の範囲に輪荷重(幅 300mm)を連続走行させる。また、初期荷重は 100kN とし、2 万回ごとに荷重を増加する段階荷重載荷とする。

5.2 走行疲労実験における等価走行回数

段階荷重載荷による走行疲労実験としたことから、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⁵⁾。

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

ここで、 N_{eq} ：等価走行回数(回)、 P_i ：載荷荷重(kN)、 P ：基準荷重(RC 床版：72kN、旧銚子大橋床版：90kN)、 n_i ：実験走行回数(回)、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数(=12.7)

6. 輪荷重走行実験における等価走行回数

本実験における実験走行回数および式(1)より算出した等価走行回数を表－2 に示す。

(1) RC 床版供試体 未損傷 RC 床版供試体の平均等価走行回数は 12.814×10^6 回である。この平均等価走行回数を基準に補強床版の補強効果および耐疲労性を評価する。

(2) せん断筋補強 RC 床版 未損傷 RC 床版供試体にせん断筋補強した供試体の平均等価走行回数は 468.911×10^6 回である。RC 床版供試体と比較してせん断筋補強することで押抜きせん断破壊に起因する斜めひび割れや水平ひび割れが抑制され、36.6 倍の補強効果が得られた。

(3) 上面増厚再補強床版 新たに接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強を行った供試体の平均等価走行回数は 20.985×10^6 回である。RC 床版に比して 1.6 倍の補強効果が得られた。

(4) 上面・下面補強床版 新たに接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強と下面 CFSS 格子接着補強を併用した RC 床版供試体の平均等価走行回数は 57.00×10^6 回である。RC 床版供試体に比して 4.4 倍の補強効果が得られた。したがって、増厚界面に接着剤を塗布して再補強する工法と、曲げ変形の抑制に CFSS を下面に格子状に接着補強することで、大幅に耐疲労性が向上した。

(5) 上面・下面併用とせん断筋補強床版 接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強と下面 CFSS 格子接着補強を併用し、さらに走行位置付近にせん断筋を配

表－2 等価走行回数

供試体	等価走行回数	平均等価走行回数	等価走行回数比
RC-1	11,237,967	12,814,453	—
RC-2	14,390,940		
RC-s1	437,207,273	468,911,056	36.6
RC-s2	500,614,839		
RC-S1	22,364,440	20,985,372	1.6
RC-S2	19,606,304		
RC-S.C1	61,509,929	57,002,287	4.4
RC-S.C2	52,494,644		
RC-S.C-s1	182,450,481	195,634,172	15.3
RC-S.C-s2	208,817,864		

置した供試体では、荷重 180kN の走行においても大幅なたわみの増加も見られない。平均等価走行回数は 195.634×10^6 回であり、RC 床版供試体の 15.3 倍となり、大幅に耐疲労性が向上している。なお、未損傷 RC 床版供試体にせん断筋補強した供試体と比較すると 41 % となった。しかし、供試体 RC-S の 9.3 倍、供試体 RC-S.C の 3.4 倍の補強効果が得られており、せん断筋を配置することで耐疲労性が大幅に向上し、B 活荷重対応においても十分な補強効果が見られた。

7. たわみと等価走行回数の関係

床版中央における引張主鉄筋の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 床版供試体 RC-1 は、床版支間 L の 1/400、すなわち 3.5mm を超えた付近からたわみの増加が著しくなっている。筆者らは、RC 床版たわみが床版支間 L の 1/400 (活荷重たわみの場合 1/800) に達した後を補強時期として提案している⁹⁾。よって、本論文においても床版たわみが床版支間 L の 1/400 に達した時点の等価走行回数から補強効果を検証する。よって、たわみが 3.5mm の時点の等価走行回数の平均は 4.690×10^6 回であり、破壊時の等価走行回数との比、すなわち累積損傷度⁷⁾は供試体 RC-1, 2 で、それぞれ 0.32, 0.40 である。

(2) せん断筋補強 RC 床版 せん断筋補強 RC 床版供試体は RC 床版たわみが 3.5mm の時点のたわみが 1.6mm であり、たわみの増加が抑制されている。たわみが 3.5mm を越えた時点の等価走行回数の平均は 89.590×10^6 回であり、累積損傷度は供試体 RC-s1, 2 で、それぞれ 0.22, 0.24 であり、劣化過程は潜伏期に相当する損傷である。たわみが床版支間 L の 1/400 に達した後も、急激なたわみの増加は見られない。これは、走行面に発生する水平ひび割れの発生が抑制された結果であると考え

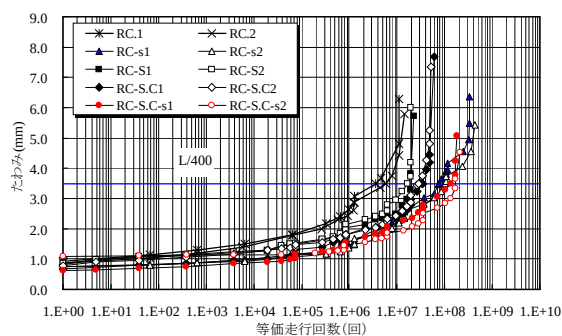


図-3 たわみと等価走行回数の関係

られる。したがって、せん断筋を配置することでたわみの増加も抑制され耐疲労性が向上したものと考えられる。

(3) 上面増厚再補強床版 供試体 RC-S のたわみは 4.0mm を超えた付近から急激に増加している。床版支間 L の $1/400$ 付近の累積損傷度は、供試体 RC-S.1, 2 で、それぞれ 0.87, 0.84 となり、加速期(後期)付近である。この床版は再々劣化を受けた床版であることから、床版支間 L の $1/400$ に達した後の寿命は望めないものと考えられる。破壊時のたわみは、それぞれの平均は 5.7mm, 6.0mm である。

(4) 上面・下面補強床版 供試体 RC-S.C は、たわみが床版支間 L の $1/400$ に達した後も急激な増加が見られず、たわみの増加は大幅に抑制されている。たわみが床版支間 L の $1/400$ 付近の累積損傷度は RC-S.C.1, 2 で、それぞれ 0.55, 0.53 となり加速期(前期)に相当する。その後、4.5mm を超えた付近からたわみの増加が急激となり、破壊に至っている。

(5) 上面・下面併用とせん断筋補強床版 供試体 RC-S.C-s のたわみが 3.5mm に達した時点の等価走行回数の平均は 135.907×10^6 回であり、供試体 RC-S に比して 7.55 倍の補強効果が得られている。たわみが床版支間 L の $1/400$ 付近の累積損傷度は RC-S.C-s.1, 2 で、それぞれ 0.75, 0.81 となり加速期(後期)に相当する。よって、せん断筋補強することで、水平ひび割れや押抜きせん断破壊に起因する斜めひび割れの発生が抑制され、耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。

8. まとめ

本研究は RC 床版の押抜きせん断破壊に起因する斜めひび割れおよび輪荷重走行により発生する水平ひび割れの抑制を図るために、せん断筋を挿

入し、補強効果および耐疲労性を評価するために輪荷重走行疲労実験を実施した。その結果以下の知見が得られた。

(1) 輪荷重疲労試験の結果、未損傷 RC 床版の等価走行回数に比して、未損傷 RC 床版にせん断筋補強した供試体は 36.9 倍の補強効果が得られた。よって、せん断筋を車両走行付近に配置することで耐疲労性が大幅に向上する結果が得られた。

(2) 接着剤塗布型 SFRC 上面増厚補強と CFSS 下面接着補強の併用とせん断筋補強した供試体は RC 床版供試体の 15.3 倍となり、耐疲労性が大幅に向上した結果となった。したがって、再劣化した RC 床版の補強法としてせん断筋補強法は耐疲労性の向上に大きく寄与する結果となった。

(3) RC 床版および補強床版のたわみと等価走行回数の関係より、せん断筋補強した供試体はともにたわみの増加が抑制され、耐疲労性が向上している。

(4) せん断筋補強法は輪荷重走行による水平ひび割れや押抜きせん断破壊に起因する斜めひび割れが抑制され、耐疲労性が大幅に向上する結果が得られたことから、新設 RC 床版においてもせん断筋を配置することで、RC 床版の損傷に対する抑制効果が期待される。

参考文献

- 1) 阿部忠, 木田哲量, 高野真希子, 加藤清志, 澤野利章: 炭素繊維シート補強と鉄筋コア・アンカー型補強を併用した鉄筋コンクリートはりの補強効果, 日本大学生産工学部研究報告, 第 37 巻, 第 2 号, pp.1-9, 2004.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I, II, 2002.
- 3) 財団法人 高速道路調査会: 上面増厚工法設計施工マニュアル, 1995.
- 4) 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(III), 1999.
- 5) 松井繁之: 道路橋床版, 森北出版, 2007.
- 6) 阿部 忠, 木田哲量, 高野真希子, 小森篤也, 児玉孝喜: 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, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1270-1281, 2010.
- 7) 玉越隆史ほか: 道路橋の計画的管理に関する調査研究ー橋梁マネジメントシステム(BMS), 国土交通省国土技術政策総合研究所, 2009.