

上面を補強したRC床版の疲労耐久性に関する評価実験

Experimental Study on Fatigue Durability of RC Slab with Repaired Upper Surface

横山 和昭*, 本間 淳史**

Kazuaki YOKOYAMA, and Atsushi HOMMA

*工修 中日本高速道路(株) 中央研究所 橋梁研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

**博(工) 中日本高速道路(株) 中央研究所 橋梁研究室長 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

In this study, concrete reinforcement methods, which are installed to the upper surface of RC slabs, are focused. In order to assess the strengthening effects of this rehabilitation method for RC slabs, this study carried out the fatigue tests of RC beam specimens and the wheel running fatigue tests of real scale slab specimens with this rehabilitation work. The features and reinforcement effects such as load capacity, durability of reinforced RC beams and RC slabs with steel fibre reinforced concrete are obtained from static loading test and wheel running fatigue test with consideration of concrete removal depth and thickness of concrete reinforcement layer. As the result of these fatigue tests, it was found that the fatigue durability of RC slabs was improved by the repair method on the upper surface of RC slabs.

Key Words : upper surface reinforcement, wheel running test, fatigue durability

キーワード：上面補強，輪荷重走行試験，疲労耐久性

1. はじめに

昭和48年以前の基準で設計された道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版と記す)は、現行の道路橋示方書で設計されたものに比べて、主桁間隔の割に床版厚が薄く、配筋鉄筋が少ない構造となっているため、車両の繰返し荷重に伴う疲労損傷が顕著である。また、平成5年11月の車両制限令の改正による通行車両の大型化に伴い、特に、輪荷重を直接支持するRC床版の劣化は加速していくものと考えられる。このため、高速道路におけるRC床版の劣化対策としては、リフレッシュ工事等で交通規制が可能な場合には、既設床版コンクリートの上面に鋼繊維補強コンクリートを打設する上面増厚工法を一般的に採用している。

しかしながら、上面増厚工法を採用した場合は路面高が上がるため、床版増厚端部における伸縮装置の嵩上げや舗装との段差修正が必要となる。また、既設RC床版の損傷が著しい場合については、上部断面の修復が必要な場合も増えてきている。

そこで、疲労や塩害等による劣化損傷を受けたRC床版の補修補強工法として、従来までの上面増厚工法の技術を応用し、RC床版の上部断面を高強度コンクリートに打換える工法(以下、上部断面打換え工法と記す)を採用すれば、伸縮装置の嵩上げや舗装との段差修正のない合理的かつ効果的な補修補強が期待できる。

一方、既往の研究¹⁾により、上部断面補強の対象とな

るような既設の道路橋床版は輪荷重の繰返し荷重に伴って橋軸直角方向のひび割れが発生した後に梁状化し、最終的には押抜きせん断破壊することが明らかになっている。また、床版の疲労耐久性の性能評価試験方法としては、輪荷重走行試験機を用いた試験方法が提案されている²⁾。このため、押抜きせん断破壊に対する上面増厚工法および上部断面打換え工法の補修補強効果についても、実物大相当の床版試験体により輪荷重走行試験を実施して検証するのが望ましい。

本研究では、疲労や塩害等により上部断面に劣化損傷を受けたRC床版の上部断面打換え工法の確立を目的として、まず、梁状化した床版を模擬したRC梁に上面増厚工法および上部断面打換え工法を施工した供試体の定荷試験を実施し、RC床版上面の補修補強構造に関する検討を行った。次に、実物大相当のRC床版に上部断面打換え工法および上面増厚工法を施工し、輪荷重走行試験を実施し、上面を補強されたRC床版の疲労耐久性を確認した。これらの実験結果より、上部断面補強されたRC床版の押抜きせん断耐荷力や疲労耐久性に対する補強効果について検証した。

2. RC梁の定荷試験

2.1 試験体の諸元

RC梁試験体は、表-1に示すように基準となる無補強の試験体A、試験体Aの上部断面を10mm切削して

60mm 厚の鋼繊維補強早強コンクリートを打設した標準的な上面増厚の試験体B, 劣化した床版の補修を想定して試験体Aの上部断面を50mm切削し70mm厚の鋼繊維補強早強コンクリートを打設した試験体C, さらに, 劣化した床版の補修を想定し, 併せて既設床版と路面高を等しくするために試験体Aの上部断面を50mm切削し

50mm 厚の鋼繊維補強超速硬コンクリート (高強度コンクリート)を打設した試験体Dの4種類の試験体とした. RC梁試験体の形状は梁状化した道路橋床版を想定し, せん断破壊が先行するように設計した上で³⁾, 図-1に示すように支点部にハンチを設けた形状とした.

表-1 RC梁試験体の概要

試験体名称	試験体A		試験体B		試験体C		試験体D	
	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
試験区分	静的試験	疲労試験	静的試験	疲労試験	静的試験	疲労試験	静的試験	疲労試験
試験体概要	基準試験体 (無補強)		標準的な上面増厚 (10mm 修復+50mm 増厚)		上部断面打換え+上面増厚 (50mm 修復+20mm 増厚)		上部断面打換え 50mm (50mm 修復; 高強度コンクリート)	
補強材料	-		鋼繊維補強早強コンクリート (呼び強度: 30N/mm ²)		鋼繊維補強早強コンクリート (呼び強度: 30N/mm ²)		鋼繊維補強超速硬コンクリート (呼び強度: 50N/mm ²)	
梁高(mm)	180		230 (170+60)		200 (130+70)		180(130+50)	
断面図								

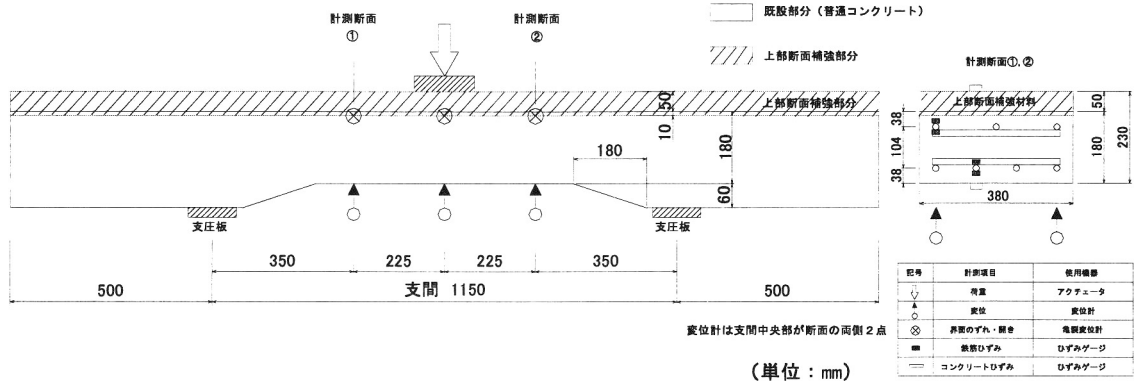


図-1 試験体形状と計測位置 (試験体B)

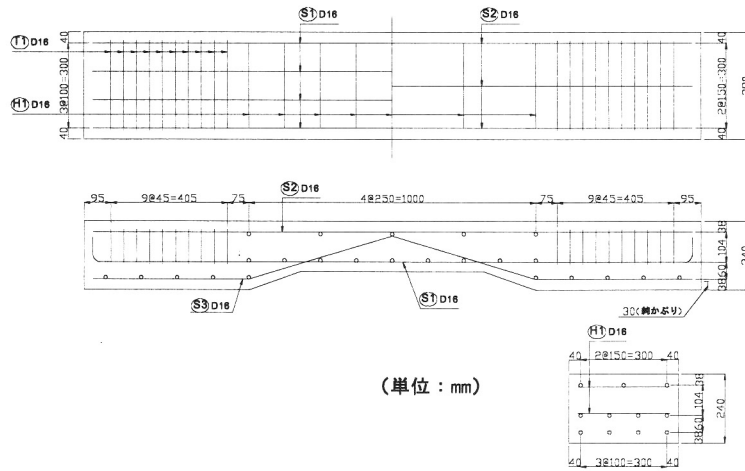


図-2 RC梁試験体の配筋図 (試験体A)

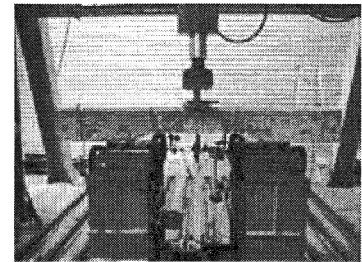


写真-1 RC梁の載荷試験状況

2.2 使用材料

(1) 鉄筋

RC梁試験体の配筋図を図-2に示す。鉄筋は、せん断破壊に先行して曲げ破壊が生じないように、表-2に示す引張強度を有する高強度鉄筋を引張鉄筋に使用した。

(2) コンクリート

補強前のRC梁試験体のコンクリートは、設計基準強度が 24N/mm^2 の早強ポルトランドセメントを使用した。載荷試験実施時におけるコンクリートの強度試験結果を表-3に示す。

(3) 鋼繊維補強コンクリート

上部断面補強に用いた鋼繊維補強コンクリートは、表-1に示すように試験体BおよびCは設計基準強度が 30N/mm^2 の鋼繊維補強早強コンクリート、試験体Dは設計基準強度が 51N/mm^2 の鋼繊維補強超速硬コンクリート（高強度コンクリート）を使用した。試験実施時における補強材料の強度試験結果を表-4に示す。

2.3 載荷方法

(1) 静的載荷試験

静的載荷試験は載荷幅を100mmとし、5kN単位で荷重を漸増させる方法で実施した。載荷により非線形性が確認された後は、荷重制御から変位制御に変更して載荷した。RC梁の静的載荷試験の状況を写真-1に示す。

(2) 定点疲労載荷試験

荷重の設定は、A2, B2 に関しては静的載荷試験で得られた破壊荷重の40%の荷重を100万回まで載荷し、破壊しなかった場合は静的破壊荷重の45%および50%に荷重を上げて疲労破壊するまで繰返し載荷することを標準とした。C2, D2 に関してはB2と比較する目的で173kNの荷重を載荷した。

2.4 静的載荷試験結果

(1) 静的破壊性状

静的載荷試験の結果を表-5に示す。表-5に示す計算値は、棒部材のせん断耐力評価式⁴⁾により求めた各試験体の計算上のせん断耐力である。最終的な破壊は4種類の試験体のいずれも写真-2に示すような支点部からのせん断ひび割れによる破壊であり、増厚部打継ぎ面での剥離は認められなかった。表-5より、基準試験体A1（梁高180mm）と比較して、50mm増厚の試験体B1（梁

表-2 鉄筋の引張試験結果

鉄筋径	降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
D16	751	979	21.0

表-3 コンクリートの強度試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	材齢
A~D	35.6	3.3	2.42	42日

高230mm)および20mm増厚の試験体C1（梁高200mm）の破壊荷重は向上しており、上部増厚工法による静的せん断耐力の向上が確認できた。また、上部断面50mmを高強度コンクリートに打換えた試験体D1（梁高180mm）についても破壊荷重が向上しており、上部断面打換え工法による静的せん断耐力の向上が確認できた。なお、表-5における計算値は、せん断ひび割れ発生荷重の前後の値を示しており、破壊荷重を評価していない。これは、本実験の試験体が支点部にハンチを有するRC梁であり、ハンチ部分が耐力の増加に寄与している影響と考えられる。

(2) 変位性状

支間中央部の荷重-変位関係を図-3に示す。基準試験体A1と比較して上部断面を補強した試験体B1, C1, D1の剛性が向上していることが確認できる。

表-4 鋼繊維補強コンクリートの強度試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	材齢	
B	B1	38.4	3.8	2.71	26日
	B2	41.1	4.7	3.22	88日
C	C1	38.4	3.8	2.71	26日
	C2	43.0	4.8	3.12	120日
D	D1	72.8	7.1	3.72	32日
	D2	78.5	5.2	3.50	88日

表-5 静的載荷試験結果

試験体	梁高 (mm)	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	せん断ひび割れ発生荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	計算値 (kN)
A1	180	50	145~180	290	144
B1	230	80	190~330	430	189
C1	200	80	160~300	385	161
D1	180	80	160~200	345	157

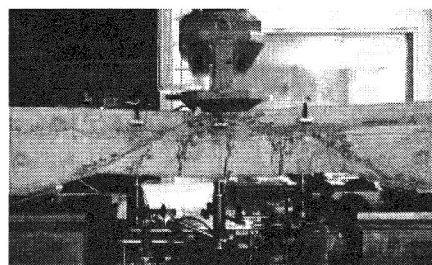


写真-2 破壊状況 (D1)

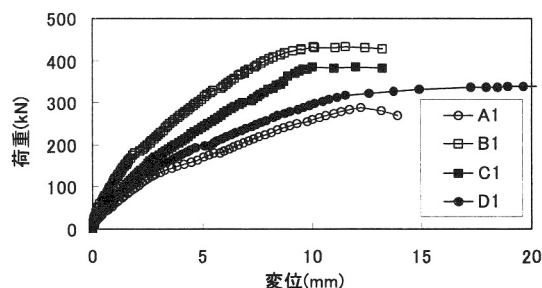


図-3 荷重-変位の関係

2.5 定点疲労載荷試験結果

(1) 疲労載荷回数の比較

載荷荷重と載荷回数を表-6に示す。表-6には土木学会コンクリート示方書のせん断補強鉄筋を用いない棒部材の設計せん断疲労耐力の評価式⁵⁾(以下、示方書式)を参考に173kN(試験体C2, D2の載荷荷重)に換算した回数と比を示している。表-6より、上部断面を補強した試験体(B2, C2, D2)は無補強試験体(A2)に比べて173kNに換算した疲労載荷回数が4~32倍以上に向上しており、上部断面補強によってRC梁の疲労耐久性が向上することが確認された。

(2) 疲労破壊性状

疲労試験での試験体B2を除く試験体A2, C2, D2の最終的な破壊は、写真-3に示すように支間中央付近における曲げによるひび割れ箇所の鉄筋の疲労破断によるものであり、静的載荷試験における支点部からのせん断ひび割れによる破壊と異なっていた。

表-6 載荷荷重と載荷回数

試験体	荷重 (kN)	載荷回数	173kN 換算 [*] 回数 (比)
A2	118	100 万回	14 万回 (1)
	133	35 万回	
	145	73 万回 (破壊)	
B2	173	100 万回	453 万回 (32 以上)
	194	100 万回(破壊せず)	
C2	173	88 万回 (破壊)	88 万回 (6)
D2	173	53 万回 (破壊)	53 万回 (4)

※示方書式⁵⁾に基づく換算回数

3. RC床版の輪荷重走行試験

3.1 試験体の諸元

輪荷重走行試験で用いたRC床版試験体は、昭和39年の道路橋示方書に基づいた表-7に示す諸元のものとした。図-4に床版試験体の形状を示す。既往の輪荷重走行試験¹⁾と異なる点は、前述したRC梁試験体と同様に補強前の床版厚を180mmとし、支点部にハンチを設けている点である。表-7に示すように、試験体Eは50mm厚で上面増厚した床版であり、試験体Fは50mm厚の上部断面を打換えた床版である。すなわち床版Eは前章で示した梁試験体B(B1,B2)に、床版Fは梁試験体D(D1,D2)にそれぞれ相当するものである。試験時の鉄筋、コンクリートおよび鋼繊維補強コンクリートの強度試験結果を表-8~表-10に示す。

3.2 試験方法

輪荷重走行試験は、RC床版試験体の上面に500mm×200mmの載荷ブロックを1列に並べた軌道上を幅500mmの鉄輪が3mの範囲(±1.5m)を往復して載荷す

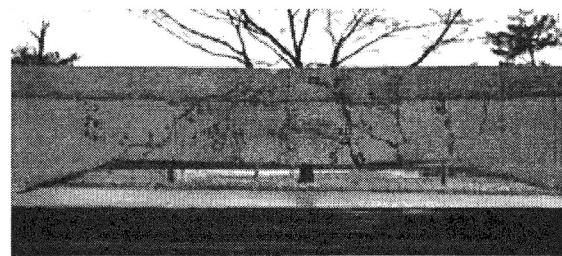


写真-3 破壊状況 (D2)

表-7 RC床版試験体の諸元

試験体	寸法 (mm)	支間 (mm)	主鉄筋 (mm)	配力鉄筋 (mm)	補強方法	補強材料
E	3000 × 7000	2500	上側 (圧縮側) D16@300	上側 (圧縮側) D10@300	標準的な上面増厚 (10mm 修復+50mm 増厚)	鋼繊維補強早強コンクリート (呼び強度: 30N/mm ²)
F	180(+50)		下側 (引張側) D16@150	下側 (引張側) D13@300	上部断面打換え 50mm (高強度コンクリート)	鋼繊維補強超速硬コンクリート (呼び強度: 50N/mm ²)

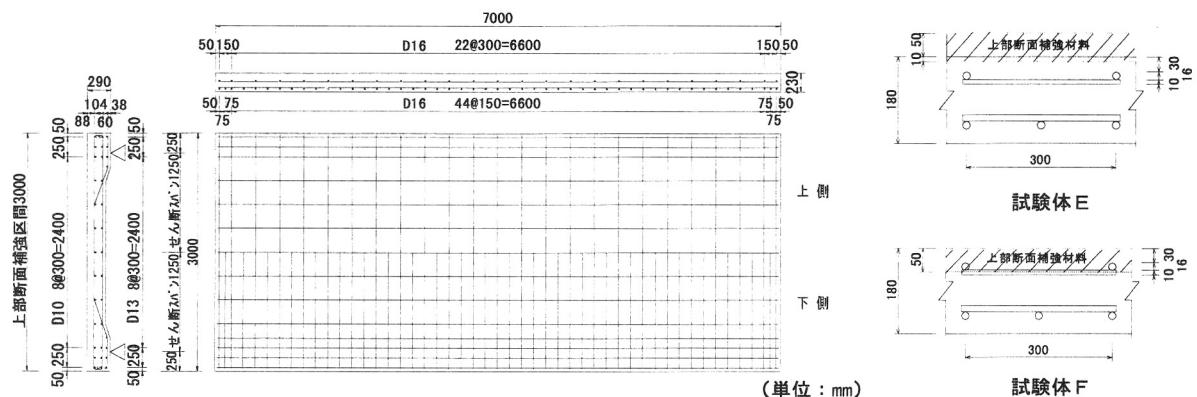


図-4 RC床版試験体の形状

るものとした。載荷荷重の設定は、既往の階段状荷重漸増載荷による方法²⁾と同様に157kNから開始し、表-10に示すように、1ステップあたり4万回の輪荷重走行毎に載荷荷重を20kN程度増加させる方法とした。RC床版の輪荷重走行試験の状況を写真-4に示す。

3.3 輪荷重走行試験結果

(1) 破壊時走行回数の比較

図-5に階段載荷における載荷荷重と破壊時走行回数との関係を示す。図-5には、(独)土木研究所(以下、土研と記す)で行われた輪荷重階段載荷試験結果²⁾および筆者らが過去に実施した本実験と同じ諸元の無補強床版等の試験結果⁶⁾も併せて記載した。

表-8 鉄筋の引張試験結果

鉄筋径	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
D10	380	532	18.9
D13	358	516	19.2
D16	352	520	19.0

表-9 コンクリートの強度試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	材齢
E, F	41.0	3.9	2.87	41日

表-10 載荷荷重の設定

載荷ステップ	載荷荷重 (kN)	総走行回数 (万回)
1N	157	4
2N	177	8
3N	196	12
4N	216	16
5N	235	20
6N	255	24
7N	275	28
8N	294	32
9N	314	36
10N	333	40
11N	353	44
12N	373	48
13N	392	52
14N	412	56
15N	431	60

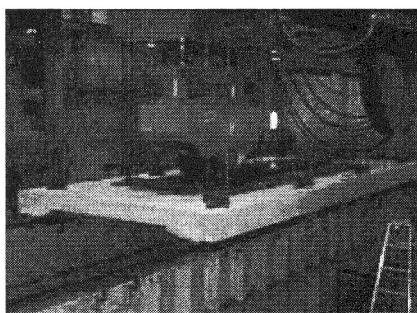


写真-4 RC床版の輪荷重走行試験状況

図-5に示すように上面増厚(50mm)した試験体Eは431kNの58.4万回で破壊しており、無補強(255kNの21.5万回)に比べて9段階上で破壊しているため、上面増厚による疲労耐久性の向上が確認できた。一方、上部断面(50mm)を高強度コンクリートに打換えた試験体Fは無補強と同等の255kNの21.6万回で破壊しており、高強度コンクリートに打換えることによる疲労耐久性の向上は認められなかった。試験体Fは図-4に示すように、新旧コンクリートの打継ぎ界面を既設RC床版の上側主鉄筋位置に設けているにも拘わらず、打継ぎ界面の付着切れが弱点とならずに無補強と同等の疲労耐久性を有していることは、補修効果としては評価できるものと考えられる。

表-10 鋼繊維補強コンクリートの強度試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	材齢
E	38.4	3.8	2.71	26日
F	78.5	5.2	3.50	88日

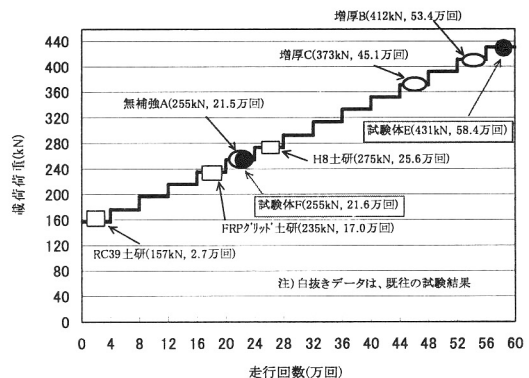


図-5 破壊時走行回数と破壊荷重の関係

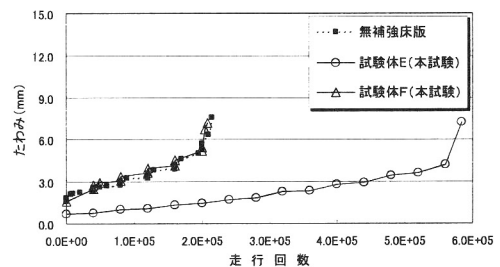


図-6 走行回数と活荷重たわみの関係

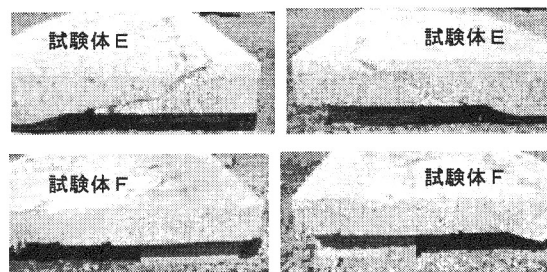


写真-5 切断面のひび割れ発生状況

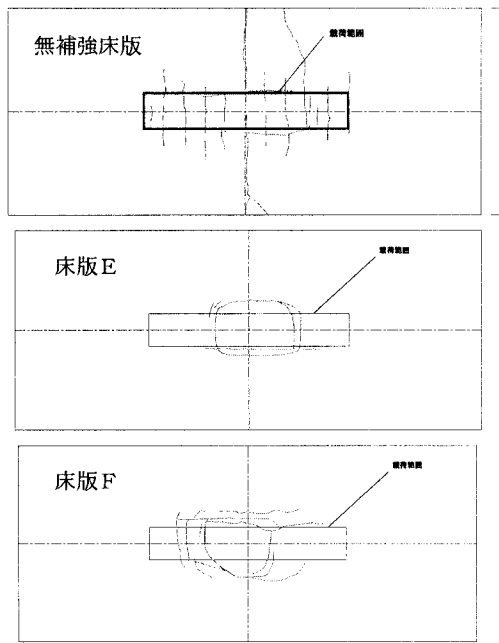


図-7 床版上面のひび割れ発生状況

(2) 走行回数と活荷重たわみの関係

図-6に、走行回数と各床版中央の活荷重たわみとの関係を示す。図-6より、活荷重たわみが4mmを超えると急増して破壊に至るという傾向を示している。また、載荷ステップ3N（総走行回数12万回）以下で、無補強床版に比べて上面増厚した試験体Eは、たわみ量が3~4割に低減しており、上面増厚による補強効果が確認できる。一方、上部断面(50mm)を高強度コンクリートに打換えた試験体Fは無補強と同様の活荷重たわみを呈しており、高強度コンクリートに打換えることによる補強効果は確認できなかった。

(3) RC床版供試体の破壊性状

床版試験体は、試験終了後に橋軸方向および橋軸直角方向に切断した。橋軸直角方向の切断面のひび割れ状況を写真-5に示す。上面増厚した試験体Eが載荷幅(500mm)の端部から30~40°程度の角度でせん断ひび割れが発生しているのに対し、上部断面打換えた試験体Fは打継ぎ界面(上側主鉄筋位置)の剥離が床版中央から支点側に向かって進展した後、せん断破壊したものと推測される。

図-7に破壊時の床版上面のひび割れ発生状況を示す。筆者らが過去に実施した無補強床版では上側主鉄筋間隔(300mm)に橋軸直角方向のひび割れが発生し梁状化した後に押抜きせん断破壊しているが、上面増厚した床版Eおよび上部断面打換えた床版Fは梁状化せずに押抜きせん断破壊しており、上部断面を鋼繊維補強コンクリートで補強することによる上部断面のひび割れ抑止効果が

確認できた。

4. まとめと今後の課題

本研究では上面を補修補強したRC梁の定点載荷試験およびRC床版の輪荷重走行試験を実施し、上面増厚工法の補強効果と上部断面打換え工法の補修効果を実験的に比較評価した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 上面増厚法については、定点載荷試験および輪荷重走行試験のいずれにおいても疲労耐久性の向上が確認できた。
- (2) 上部断面打換え工法については、RC梁の定点載荷試験では補強効果が確認できたが、RC床版の輪荷重走行試験では補強効果が認められなかった。これは、打継ぎ界面での剥離による影響が大きいものと考えられる。しかしながら、打換え前の床版と同等の疲労耐久性を有しており、塩害等で劣化した床版の補修工法としては適用可能と思われる。

今後は、打継ぎ界面の影響を考慮した上部断面打換え範囲に関する構造的な検討に加え、施工性を考慮した適切な補修補強材料の選定や施工管理方法に関して、実橋を模擬した施工試験を実施して検証する予定である。

謝辞

本研究における載荷試験の実施にあたり、(社)建設機械化協会・施工技術総合研究所の関係各位に協力頂いたことを記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、松井繁之：橋梁の寿命予測—道路橋 RC 床版の疲労寿命予測—, 安全工学, Vol.30, No.6, pp.432-440, 1991.
- 2) 例えば、川間重一, 内田賢一, 西川和廣：既設 RC 床版の階段状荷重漸増載荷における疲労耐久性評価手法に関する検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会, CS-257, pp.514-515, 2000.9
- 3) 横山和昭, 鹿野善則, 福田一郎, 須田久美子：下面増厚補強した RC 梁の定点載荷疲労試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1567-1572, 2002.6
- 4) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, No.372, V-5, pp.167-176, 1986.8
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編], pp.117-118, 2002.
- 6) 横山和昭, 鹿野善則, 紫桃孝一郎：下面増厚した RC 床版の輪荷重走行試験による疲労耐久性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1717-1722, 2004.6