

RC床版の下面増厚工法の補強効果に関する実験的研究

Experimental Study on Strengthening Effects of Bottom Thickness Increasing Method for RC Slabs

横山和昭*, 鹿野善則**, 紫桃孝一郎***

Kazuaki YOKOYAMA, Yoshinori KANO and Koichiro SHITO

*工修 日本道路公団試験研究所 橋梁研究室 (〒194-0085 東京都町田市忠生 1-4-1)

**日本道路公団試験研究所 橋梁研究室 主任 (〒194-0085 東京都町田市忠生 1-4-1)

***日本道路公団試験研究所 橋梁研究室 室長 (〒194-0085 東京都町田市忠生 1-4-1)

The bottom thickness increasing method is a rehabilitation work for bridge slab that places reinforcing bar under the existing slabs and sprayed mortar. Expressway bridges can be kept opening even during this rehabilitation work, so that this method has been applied for the bridge slab under heavy traffic condition. This rehabilitation method improves mainly the flexural strength and the shear strength of existing slabs. 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. As the results of the tests, it was clarified that the fatigue test of RC beam specimen was useful for the assessment of strengthening effects of the rehabilitation method as well as the wheel running fatigue test. As the result of these fatigue tests, it was found that the fatigue durability of RC slabs was improved by the bottom thickness increasing work.

Key words : strengthening slabs, bottom thickness increasing, wheel running test, fatigue durability

1. はじめに

道路橋床版の補強工法としては、上面増厚工法が一般的となっているが、交通規制が不可能である等の理由で上面からの施工が困難な場合には下面からの補強が必要となる。下面増厚工法は、既設床版コンクリートの下面に鉄筋やFRP等の補強材を設置し、接着性に優れたセメント系材料で増厚することにより、主に曲げに対して床版を補強する工法であり、本工法の曲げ補強効果に関しては多くの研究成果が報告されている。

一方、既往の研究により、下面増厚補強の対象となるような既設道路橋床版は輪荷重の繰返し载荷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。このため、押抜きせん断に対する下面増厚工法の補強効果については、実物大の床版試験体により輪荷重走行試験が実施されている。しかし、輪荷重走行試験は多大な費用と労力を必要とするため、多数のケースを比較検討する場合には簡易な試験方法が望ましい。このため、本研究では、セメント系の増厚材料の選定および補強鉄筋の径やかぶり厚等の増厚構造に関する検討として、梁状化した床版と同等の幅を有するRC梁に下面増厚補強を施し、定点载荷試験を実施した。さらに、実物大規模の

RC床版に下面増厚補強を施し、輪荷重走行試験を実施した。これらの実験結果より、下面増厚補強されたRC床版のせん断耐荷力やせん断疲労耐久性、破壊モードおよび無補強試験体と比較した疲労耐久性に関する補強効果について検討した。

2. RC梁の定点载荷試験

(1) 試験体の諸元

実験を行ったRC梁試験体は、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¹⁾、図-1に示すように支点部にハンチを設けた形状とした。

RC梁の断面は、図-2に示すように鉄筋(既設部: D16, 増厚部: D10もしくはD6)を配置し、表-1に示すセメント系材料で増厚して試験体を製作した。

下面増厚工法の施工実績では、増厚部の総厚を22mmとする構造が多い。この場合、直径6mmの補強鉄筋を格子状に配置する際に、既設床版下面との間には隙間を設けていない。その上で、純かぶりを10mm(表-1中のSG, FGの試験体)としている。しかし、今回の試験体では、補強鉄筋背面への下面増厚材料の充填性に配慮して、図-3に示すとおり補強鉄筋背面に10mmの隙間を設ける構造を主体とした。また、最適な増厚構造に関

表-1 RC梁試験体の概要

試験体の種別		下面増厚部のセメント系材料 (補修用モルタル)	増厚部 厚さ (mm)	補強鉄筋 径 (mm)	表面処理工法
静的	疲労				
SA	FA	なし (無補強)	—	—	—
SB	FB	ポリマーセメントモルタルA	50	10	WJ工法
SC	FC	ビニロン繊維混入セメントモルタル	50	10	WJ工法
SD	FD	鋼繊維混入超速硬セメントモルタル	50	10	WJ工法
SE	SE	ポリマーセメントモルタルB	50	10	ブラスト工法
SF	FF	ポリマーセメントモルタルA	50	10	ブラスト工法
SG	FG	ポリマーセメントモルタルA	22	6	ブラスト工法

する解析的研究²⁾を参考にして、補強鉄筋は比較的太径のD10鉄筋、純かぶりは20mm、増厚部の総厚は50mmを主体とした。なお、図-2においては、D10の補強鉄筋を4本配置した厚さ50mmの増厚構造を例示している。一方、厚さ22mmの増厚構造(SG, FG)においては、厚さ50mmの増厚構造の補強鉄筋量と等しくする目的でD6の補強鉄筋を9本配置した。

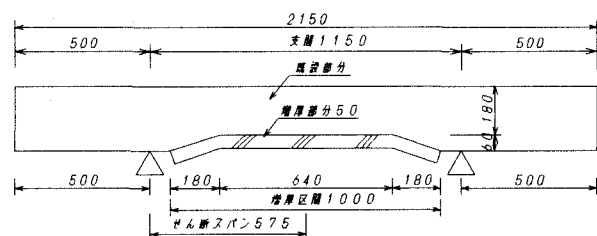


図-1 試験体形状 (単位: mm)

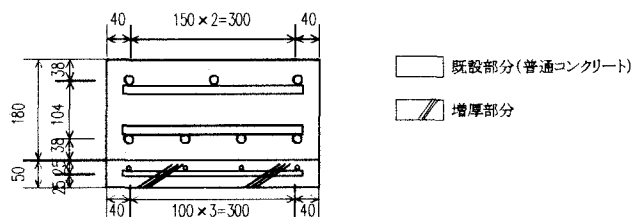


図-2 断面図 (単位: mm)

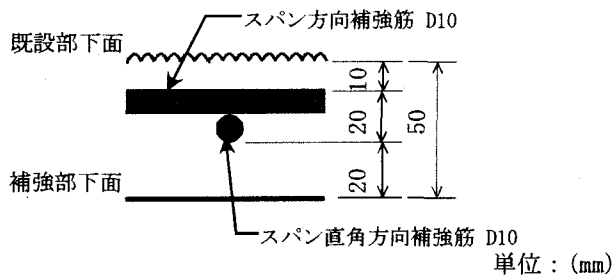


図-3 増厚部の構造

(2) 使用材料

a) 鉄筋

試験体を使用した鉄筋は、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とした。

表-2 鉄筋の引張試験結果

鉄筋種類	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
D10	790	984	21.1
D16	751	979	21.0

b) コンクリート

RC梁試験体のコンクリートは、設計基準強度が24N/mm²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。

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)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
SA, FA	33.6	2.81	2.77
SB, FB	35.8	2.95	2.76
SC, FC	37.7	2.53	2.75
SD, FD	38.1	2.53	2.75
SE, FE	36.9	3.09	2.55
SF, FF	37.7	3.26	2.52
SG, FG	38.7	3.23	2.59

c) 増厚部の使用材料

増厚部は、表-1に示すように事前に既設RC梁の下面をウォータージェット(WJ)工法もしくはバキュームブラスト工法で表面処理した。その後、D10またはD6の補強鉄筋を設置し、セメント系材料を用いて吹付け工法により増厚した。増厚部に使用したセメント系材料は、ポリマーセメントモルタルAおよびB、ビニロン繊維混入セメントモルタル、鋼繊維混入超速硬セメントモルタルの4種類のモルタルを選定した。これにより、材料の違いによる補強効果の相違の比較を試みた。増厚部モルタルの強度試験結果を表-4に示す。

表-4 増厚部モルタルの強度試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
SB, FB	45.7	3.51	2.23
SC, FC	38.3	6.36	1.91
SD, FD	63.9	4.86	2.42
SE, FE	31.1	3.09	1.72
SF, FF	35.4	3.38	1.67
SG, FG	40.6	2.77	1.82

(3) 載荷方法

a) 静的載荷試験

載荷試験は載荷幅を 100mm とし、定点載荷の方法で実施した。静的試験は、(4) で後述する破壊荷重の計算値の 40% から 80% まで 10% 間隔で荷重制御により漸増させる方法とした。なお、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。

b) 疲労載荷試験

疲労試験の荷重の設定は、無補強試験体 (SA) の静的破壊荷重 295kN の 40% である 118kN の荷重を 100 万回まで載荷した。その後、各試験体の静的破壊荷重の概ね 50% に荷重を上げて疲労破壊するまで繰返し載荷した。

(4) 静的載荷試験結果

a) 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³⁾により求めた各試験体の計算上のせん断耐力である。表-5 より、下面増厚補強試験体 (SB~SG) は無補強試験体 (SA) と比較して曲げひび割れ発生荷重が向上していることが確認できる。しかし、せん断ひび割れ発生荷重および破壊荷重に関しては、目立った向上は認められず、補強効果は確認されなかった。これらの原因については、表-4 に示すような増厚部モルタルの物性値から類推するしか方法がなく、実験データも限られていることから現時点で原因を特定することはできない。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、今回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。最終的な破壊は 7 種類の試験体のいずれも写真-1 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、打継ぎ面での剥離は認められなかった。また、増厚補強による破壊荷重の向上も確認できなかった。

表-5 静的載荷試験結果

試験体	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)
SA	35	150	295	141
SB	45	155	290	172
SC	75	215	310	175
SD	70	170	210	175
SE	75	135	280	173
SF	69	160	285	175
SG	55	155	205	173

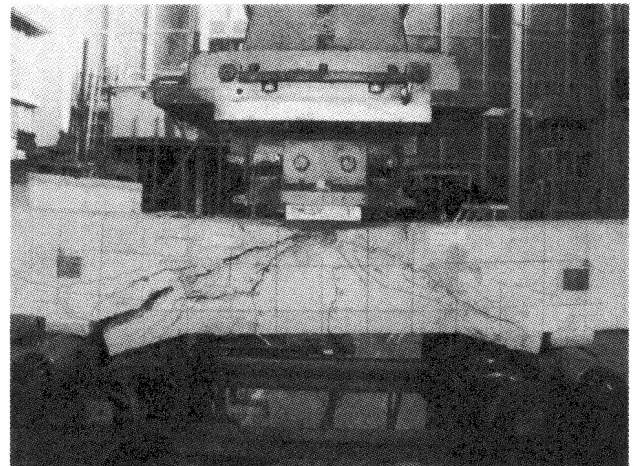
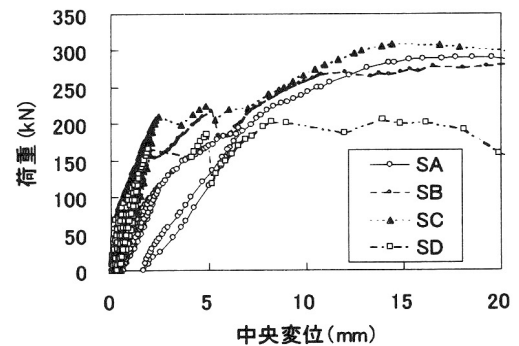


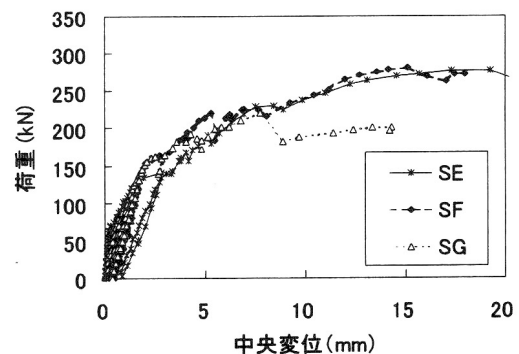
写真-1 静的試験体の破壊状況例 (SB)

b) 変位および鉄筋ひずみの性状

荷重-変位関係を図-4 に、主鉄筋および補強鉄筋のひずみを図-5 および図-6 に示す。図-4 より、せん断ひび割れが発生するまでは増厚によって剛性が向上していることが確認できる。また、図-5~図-6 より、主鉄筋に生じる応力を補強鉄筋が分担していることが確認できる。これらのことから、せん断ひび割れが発生する以前においては下面増厚による補強効果が確認された。



(a) SA~SD



(b) SE~SG

図-4 荷重-変位の関係

(5) 疲労荷重試験結果

a) 疲労荷重回数の比較

載荷荷重と載荷回数を表-6に示す。無補強試験体 (FA) は静的破壊荷重の40%である118kNの59万回載荷で疲労破壊したが、下面増厚補強試験体 (FB~FG) は118kNの100万回載荷時点で破壊しなかったため、荷重を上げて疲労破壊するまで載荷した。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⁴⁾ (以下、示方書式) を参考に荷重118kNに換算した回数と比を示している。表-6より、補強試験体 (FB~FG) は無補強試験体 (FA) に比べて118kNに換算した疲労載荷回数が概ね10倍以上に向上しており、下面増厚補強によって疲労耐久性が向上することが確認された。また、増厚材料および増厚構造の違いによって疲労耐久性の向上効果も異なることも示唆される。

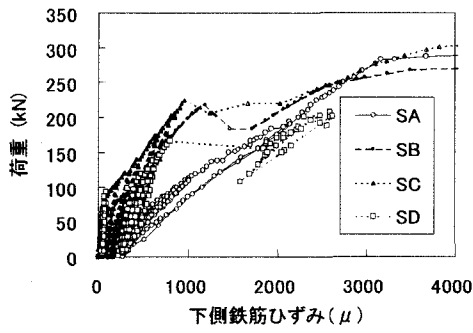
表-6 載荷荷重と載荷回数

試験体	荷重 (kN)	載荷回数	118kN換算 [*] 回数 (比)
FA	118	59万回 (破壊)	59万回 (1)
FB	118	100万回	1007万回 (17)
	145	94万回 (破壊)	
FC	118	100万回	1546万回 (26)
	155	72万回 (破壊)	
FD	118	100万回	727万回 (12)
	145	65万回 (破壊)	
FE	118	100万回	659万回 (11)
	145	58万回 (破壊)	
FF	118	100万回	573万回 (10)
	145	49万回 (破壊)	
FG	118	100万回	457万回 (8)
	145	37万回 (破壊)	

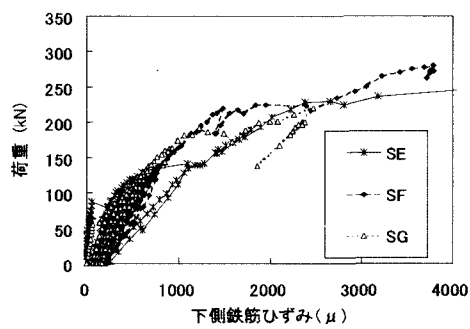
※示方書式⁴⁾に基づく換算回数

b) 中央変位および剛性の変化

図-7に、疲労載荷試験での載荷回数と中央変位との関係を示す。図-7より、無補強試験体 (FA) に比べて下面増厚試験体 (FB~FG) は中央変位の増加が抑制され剛性が向上しており補強効果が確認できる。

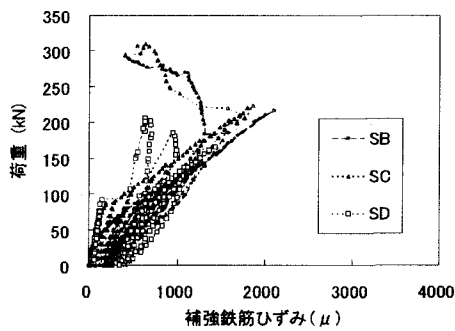


(a) SA~SD

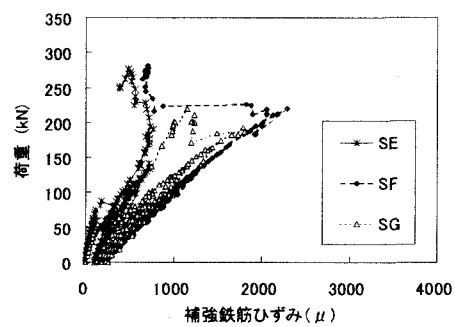


(b) SE~SG

図-5 荷重-主鉄筋ひずみの関係



(a) SB~SD



(b) SE~SG

図-6 荷重-補強鉄筋ひずみの関係

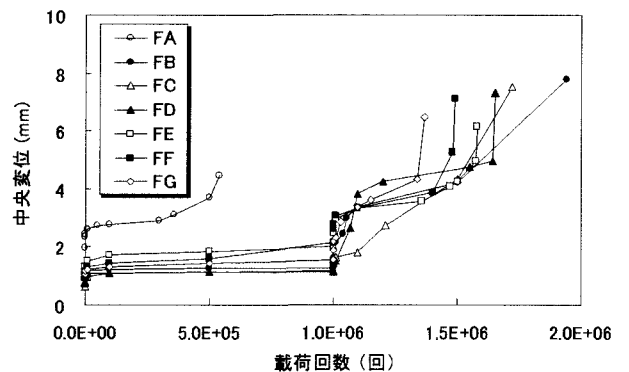


図-7 載荷回数と中央変位の関係

c) 疲労破壊性状

疲労荷重試験での最終的な破壊は、写真-2に示すようにハンチ部近傍からのひび割れによる破壊であり、静的荷重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若干異なっていた。この破壊モードの違いによって、疲労試験においては、下面増厚によるせん断補強効果が得られたものと推測される。

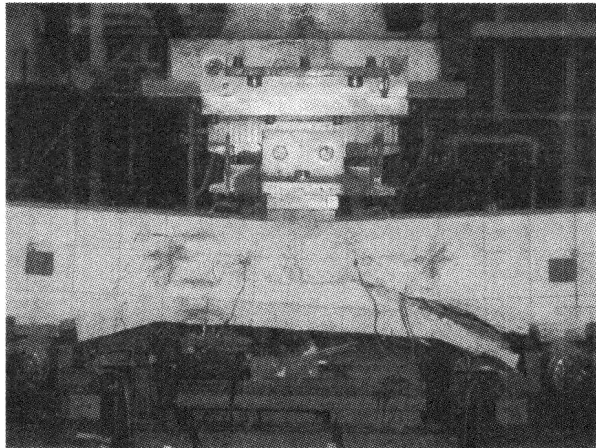


写真-2 破壊状況 (FB)

3. RC床版の輪荷重走行試験

(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。既往の輪荷重走行試験⁷⁾と異なる点は、前述したRC梁試験体と同様に床版厚を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、床版Aは無補強床版であり、床版Bおよび床版Cは50mmおよび22mmの厚さで下面増厚した床版である。なお、補強鉄筋量は床版Bと床版Cで等しくなるように補強鉄筋間隔を調整した。コンクリート強度は34N/mm²であった。

(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の荷重ブロックを1列に並べた軌道上を幅500mmの鉄輪が3mの範囲(±1.5m)を往復して荷重するものとした。荷重荷重の設定は、既往の階段状荷重漸増荷重による方法⁷⁾と同様に157kNから開始し、1ステップあたり4万回の輪荷重走行毎に荷重荷重を20kN増加させる方法とした。

表-7 RC床版試験体の諸元

試験体種別	寸法 (mm)	支間 (mm)	主鉄筋 (mm)	配力鉄筋 (mm)	補強方法 (増厚部の使用材料)	補強鉄筋 (mm)	表面処理工法
床版A	3000 ×	2500	上側 (圧縮側) D16@300 下側 (引張側) D16@150	上側 (圧縮側) D10@300 下側 (引張側) D13@300	無補強	—	—
床版B	7000 ×				厚さ50mmの下面増厚 (ポリマーセメントモルタルA)	D10@100	プラスト工法
床版C	180				厚さ22mmの下面増厚 (ポリマーセメントモルタルA)	D6@45	プラスト工法

(3) 輪荷重走行試験結果

a) 破壊時走行回数の比較

図-8に階段荷重における荷重荷重と破壊時走行回数(以下、土研)で行われた同様の輪荷重階段荷重試験結果⁷⁾も併せて記載した。床版Aと諸元が類似している土研の供試体は「RC39土研」として表記しているが、床版Aが255kNの21.54万回で破壊しているの対して、RC39土研は157kNの2.7万回で破壊しており、試験結果が異なっている要因は、輪荷重走行試験機の構造上の違いとハンチ構造の有無による影響であると考えられる。また、平成8年の道路橋示方書に基づいて設計された土研の供試体は「H8土研」と表記しているが、「H8土研」は275kNの25.6万回で破壊しており、床版Aは「H8土研」に近い結果となっている。一方、下面増厚した床版Bおよび床版Cは、それぞれ、373kNの45.1万回と412kNの53.4万回で破壊しており、無補強の床版Aと比較して、疲労耐久性が向上していることが確認できる。

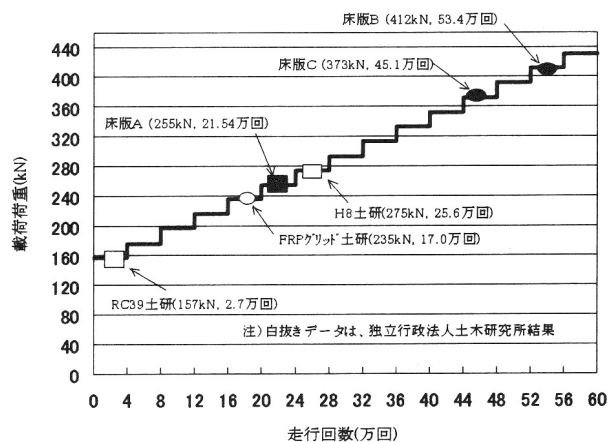


図-8 破壊時走行回数と破壊荷重の関係

b) 走行回数と活荷重たわみの関係

図-9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-9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、無補強床版である床版Aに比べて下面増厚床版は、たわみ量が3~4割に低減しており、補強効果が確認できる。

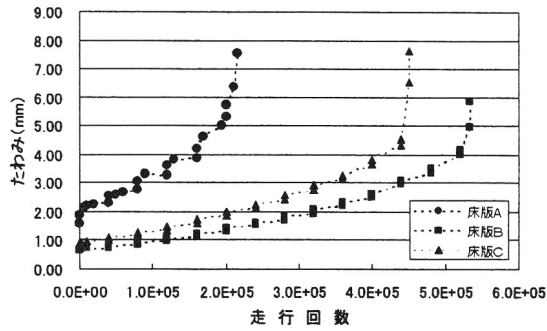


図-9 走行回数と活荷重たわみの関係

c) RC床版供試体の破壊性状

図-10 に破壊時の床版下面のひび割れ発生状況を示す。また、写真-3 に切断面の一例を示す。写真-3 に示すように、最終的な破壊は3種類の試験体のいずれも輪荷重載荷位置端部から45度方向のひび割れによる押抜きせん断破壊であり、下面増厚部との打継ぎ面での剥離は生じなかった。

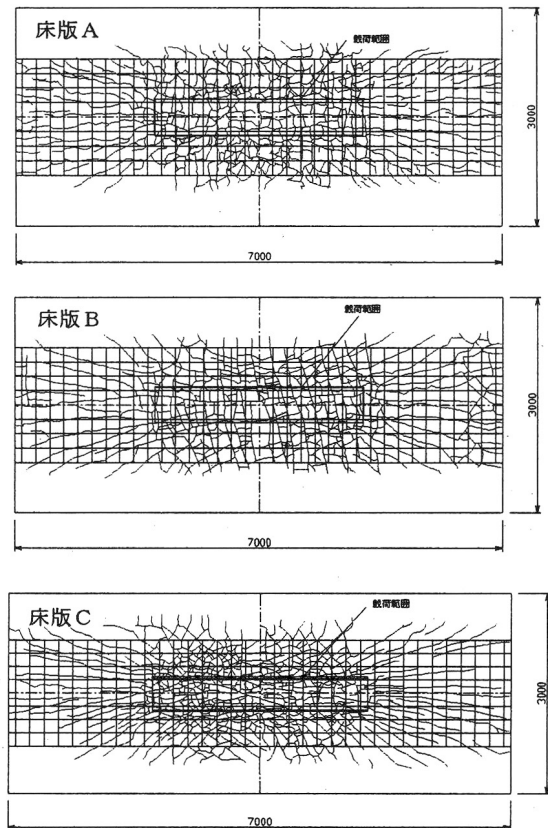


図-10 破壊時の床版下面のひび割れ発生状況

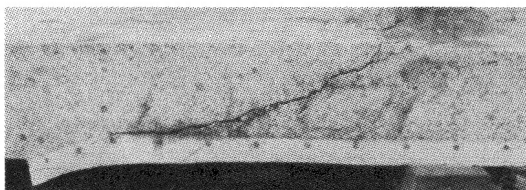


写真-3 破壊状況 (床版B)

4. まとめ

本研究は、RC 梁試験体を用いた定点載荷試験および RC 床版試験体を用いた輪荷重走行試験を実施し、下面増厚工法の補強効果について実験的に検討したものである。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) RC 梁試験体を用いた載荷試験は、ひび割れの発生状況、破壊性状が概ね類似しているため、下面増厚工法の補強効果を評価する試験方法として適用可能である。
- (2) RC 梁の静的載荷試験の結果、下面増厚補強効果として曲げ剛性が向上する。
- (3) RC 梁の疲労載荷試験の結果、下面増厚補強によってせん断破壊に関する疲労寿命が概ね 10 倍以上に向上する。
- (4) RC 床版の輪荷重走行試験の結果、下面増厚補強によって、疲労耐久性が向上する。

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松本政徳氏と庄中憲氏に協力頂いたことを記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 横山和昭, 菅野匡, 佐藤貢一, Meera Mohan: 下面増厚した道路橋床版の増厚構造の最適解, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1111-1116, 2001.7
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 横山和昭, 鹿野善則, 紫桃孝一郎: 下面増厚補強した RC 梁の定点載荷疲労試験による補強効果の評価, 日本材料学会コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集第2巻, pp.57-60, 2002.10
- 7) 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