

# 論文 上面増厚床版における施工目地部の劣化再現実験

長谷 俊彦<sup>\*1</sup>・和田 圭仙<sup>\*2</sup>・緒方 辰男<sup>\*3</sup>

**要旨：**高速道路における鋼橋 RC 床版は、コンクリート床版の押抜きせん断耐力を向上させ、床版の長寿命化を図るため、SFRC（鋼繊維補強コンクリート）を用いた上面増厚工法が多数採用されている。近年、その上面増厚床版において、車線規制により規制単位で段階施工が行われるが、施工目地部を起点として、SFRC 増厚層が数年経過した時点で早期劣化が発生する事象が発生している。本論は、早期劣化の主な原因と損傷機構を明らかにするために、施工実態調査を行い、増厚床版施工時に起る早期劣化の要因を、床版供試体で可能な項目について再現し、輪荷重走行疲労試験で SFRC 層のはく離損傷を発生させ、その原因を検証した。

**キーワード：**鋼橋, RC 床版, 上面増厚, はく離, 付着, 原因究明, 疲労実験

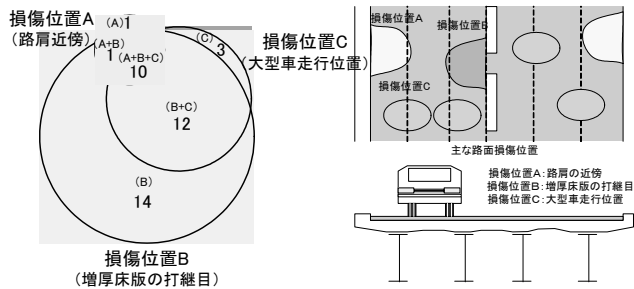
## 1. はじめに

本論は、鋼橋 RC 床版の上面増厚工法における早期劣化損傷の問題を解決するため、増厚床版施工時の早期劣化原因を調査し、施工目地部に着目し、床版供試体で増厚床版施工時の劣化要因を再現するとともに、輪荷重走行疲労実験により、実橋で発生する SFRC 層のはく離損傷を検証して早期劣化の原因究明を検討したものである。

## 2. 劣化損傷に関する現状調査

### 2.1 早期劣化損傷位置

原因究明に先立ち、高速道路の実橋において増厚床版補強を実施した 270 橋 35,000 床版パネルのうち、損傷が発生した 46 橋 505 床版パネルについて、その路面損傷の記録を調査して発生箇所を分析した。



その結果、図-1 に示すように、増厚床版の劣化によるポットホールは発生位置は、車線間の施工打継目の発生が最も多く、次に大型車走行位置、路肩近傍の順に多く発生している傾向が見られた。

そこで、本検討では、最も損傷頻度の多い施工打継目に着目し、まずは劣化要因の整理と劣化に及ぼす施工要因の分析を行なった。

### 2.2 撤去床版による劣化部目視観察

高速道路の床版架替え工事により撤去された増厚床版の施工目地部の断面観察を行った。これによれば、図-2 に示すとおり施工目地部から水が侵入して、その後、増厚 SFRC 層の付着切れが発生し、はく離が進展している痕跡が見られた。

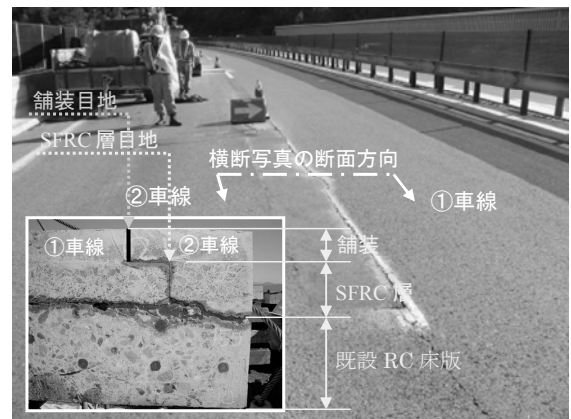


図-2 増厚床版 SFRC 施工継目部

## 3. 増厚 SFRC 層の付着界面における発生応力

上面増厚床版の界面はく離に影響を及ぼす要因として、図-3 に示すとおり①活荷重によって発生するせん断力、②SFRC 増厚層施工後に乾燥収縮や温度変化によって発生するせん断力および引張応力、③SFRC 増厚層施工時の水和熱によって発生する増厚端部の反り上がり（引張応力）の3つの要因が考えられる。

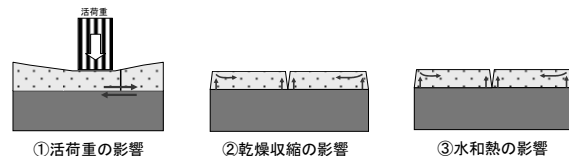


図-3 増厚層界面付着はく離の影響要因

\*1 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員 (正会員)  
 \*2 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 研究員 (正会員)  
 \*3 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 室長 (正会員)

#### 4. 増厚床版施工時の劣化影響要因

##### 4.1 施工目地部の既設 RC 床版上面処理

上面増厚工法では、既設床版上面を路面切削機により切削した後に、ショットブラスト機で研掃を行うことが標準となっている。

交通規制下の施工端部において、施工機械配置とショットブラスト機の施工可能範囲を調査した結果、ショットブラスト機は、規制範囲内での作業となるため、投射口の外側端から約 100mm 内側の範囲からショット可能となり、施工目地部から 150mm 程度の範囲は十分な研掃処理ができないことが想定された。(図-4)

また、実施工では、切削後にスィーパーで清掃を行うが、増厚端部は切削クズ等が残留しやすい。その状態で増厚コンクリートを打設すると、増厚端部では、付着不良が生じることが懸念された。

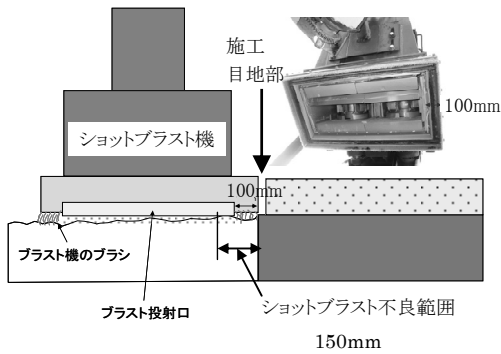


図-4 端部ショットブラスト機の配置

##### 4.2 増厚施工時の SFRC 層締固め程度への影響

施工目地近傍では、SFRC 舗設用のフィニッシャーが端部まで寄り切らないため、フィニッシャー本体のバイブレータによる締固めが不足しがちになるため、現場施工では、型枠バイブレータを用いた人力施工による締め固めを行っている。

図-5 に示すフィニッシャーの事例を想定して、そのバイブレータの締め固め機構から、SFRC 層施工時の施工目地部からの位置関係を図-6 に示す。

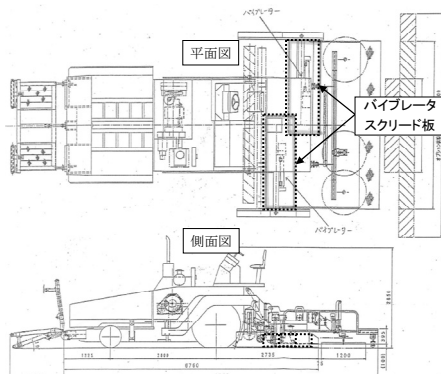


図-5 SFRC 舗設用フィニッシャーの事例

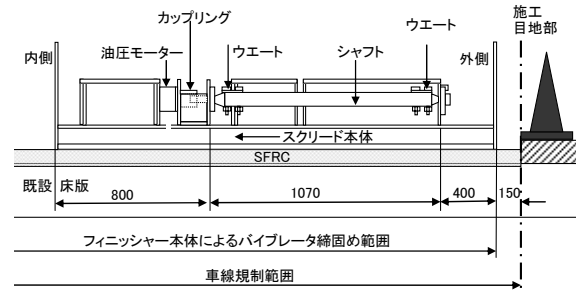


図-6 SFRC 締固め機構図

##### 4.3 実橋と床版供試体製作の増厚施工比較

本検討では、床版供試体において、再現可能な条件下で増厚床版供試体を製作することとし、床版供試体と実橋の増厚施工では、図-7 に示すような相違点があり、厳密にすべてを再現することは困難であるため、既設 RC 床版の付着界面の処理状況と締め固めの現場施工条件に着目することとした。

実験	現場
既設床版の劣化 ・貫通ひび割れ導入	既設床版の劣化 ・遊離石灰を伴う貫通ひび割れ ・上側鉄筋部の腐食、砂利化
切削	切削
ブラスト ・投射密度(100~150kg/m <sup>2</sup> )...一般部 ・投射不能...端部150mm程度	ブラスト ・投射密度(100~150kg/m <sup>2</sup> )...一般部 ・投射不能...端部150mm程度
清掃(デッキブラシ:端部のみ)	清掃(ハンドスィーパー)
施工端部型枠	施工端部型枠
コンクリート締固め ・アンクル材+手持ちバイブレータ ・端部15cm締固めなし	コンクリート締固め ・コンクリートフィニッシャー(オンロール・オフロール・簡易式) ・端部5cm手持ちバイブレータ
養生 ・被膜養生、シートで覆う	養生 ・被膜養生、シート養生
実験開始 ・増厚施工後、1ヶ月程度	交通開放 ・増厚施工後、2~3日程度
実験終了 ・実験期間、1ヶ月程度/体	乾燥収縮・環境作用 ・5~6年で再劣化

図-7 現地施工と床版実験の相違点

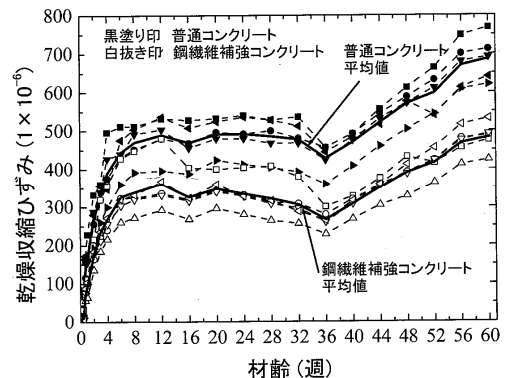


図-8 乾燥収縮量測定結果<sup>2)</sup>

また、実験条件と現場条件において SFRC 増厚層の材

令差による乾燥収縮の影響について、文献 2) の検討によれば、150mm×150mm×530mm のコンクリート供試体の乾燥収縮ひずみ計測結果(図-8)より、材令4週目のSFRCコンクリートの乾燥収縮ひずみは、材令2~3日の乾燥収縮ひずみより比べて大きくなるため、SFRCコンクリートを打設してから実験までの材令差による影響は、SFRC 付着界面の応力状態が厳しい状態に作用することから、安全側の評価が出来ると判断した。

## 5.SFRC 付着強度に着目した要素試験

### 5.1 界面処理及び締固め条件による影響

施工条件が付着強度に及ぼす影響度を把握するために、表-1 に示す①研掃の有無、②締固めの程度、③切削時で清掃有無の条件により、付着強度に及ぼす影響について比較を行った。SFRC の配合は、上面増厚工法の標準的な鋼繊維混入率 1.27vol.%(100kg/m<sup>3</sup>)最大骨材 20mm とした。付着試験の供試体は、実橋から床版取替工事で撤去された既設 RC 床版上面を用いて、幅 150mm×長さ 500mm の SFRC 増厚層を 1 次施工、2 次施工により 2 ブロックを製作し、2 次施工側で径 80mm のコア切削による引張付着強度試験を実施した。(表-1)

表-1 界面処理条件の比較表

供試体記号	A	E	H	B	F	I
付着界面研掃状況	切削のみ	切削のみ	切削のみ	切削+研掃	切削+研掃	切削+研掃
締固めの条件	パイプレータ	敷均しのみ	突き棒締固め	パイプレータ	パイプレータ	突き棒締固め
良好な打継面				○	○	○
研掃無し再現	●	●	●			
切削クズ清掃無し		●			●	
突き棒による締固め			●			●
敷均しのみ		●				

※○付着条件が向上する再現項目、●付着条件が低下する再現項目

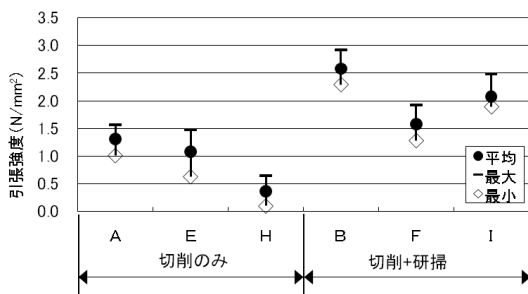


図-9 界面処理状況による引張強度の比較

図-9 の引張試験の結果を整理すると、各施工要因の引張強度に関する寄与度は、基準となる良好な打継面の値 2.6N/mm<sup>2</sup> に対して、下記に示す値であった。

- 1) 基本ケース(B) : 2.6N/mm<sup>2</sup> (良好な打継面 100%)
- 2) ブラストをかけない(A) : 1.3N/mm<sup>2</sup> (50%に低下)

3) 締固め程度を低下する(I) : 2.1N/mm<sup>2</sup> (80%に低下)

4) (A)と(I)の組合せ(H) : 0.4N/mm<sup>2</sup>(15%に低下)

### 5.2 パイプレータからの位置による影響

施工現場におけるフィニッシャー本体のパイプレータによる締固め条件を床版供試体で再現するため、図-6 で示したパイプレータ機構の位置関係を模擬的に再現して 5.1 の検討と同じ配合の SFRC を施工し、締固めのパイプレータからの距離に対応させ付着強度を比較した(図-10)。

既設 RC 床版側の切削後の表面処理条件は、ショットブラストの有無で比較した。また、実際の施工においては、平面線形の関係でスクリード端部の位置が、100mm 程度の範囲で移動するため、端部の位置を変えて付着強度分布のバラツキについても確認した。

ブラスト処理面の引張強度は、A 点から C 点に示すとおりパイプレータ直下から 250mm 離れた位置まで約 2.5 N/mm<sup>2</sup> 以上であり、それ以上離れると低下傾向が見られた。界面の清掃状態の弱い条件で、ショットブラスト無しの条件では、パイプレータ直下の引張強度は 0.4~0.5N/mm<sup>2</sup> 程度であり、パイプレータから 250~450mm 離れた箇所の引張強度は 0 N/mm<sup>2</sup> となった。

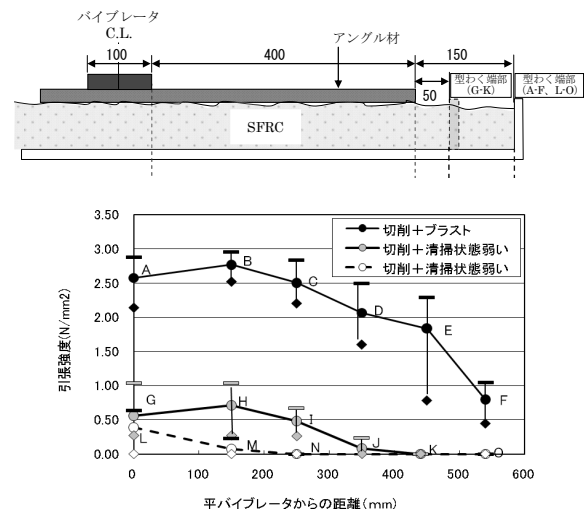


図-10 施工端部付近の付着強度分布

## 6.上面増厚床版のはく離損傷の再現実験

### 6.1 試験供試体

増厚部の再劣化が多い年次(S46~S54年)の設計要領に準じた設計強度 24N/mm<sup>2</sup> の RC 床版供試体を製作し、輪荷重走行により所定の劣化損傷を与える予備荷重を行った後に、SFRC (鋼繊維補強超硬コンクリート) を用いて増厚施工を行い、増厚後の輪荷重走行試験で、はく離損傷の進展状況を観察することとした。

増厚施工は、図-11 に示すとおり、通常の実施工と

同様に 220mm の既設 RC 床版上面を 10mm 切削し、増厚コンクリートを 60mm 打設して一体化したもので、増厚後の床版厚は 270mm とした。

## 6.2 試験方法

疲労試験は、縦目地近傍で輪荷重を繰り返して走行する方法とした。供試体の支持条件は、橋軸方向を単純支持、橋軸直角方向を自由端としている。供試体の支点部は、輪荷重走行試験時における浮き上がりの防止および回転拘束を与えないように支持桁に固定した。また、疲労試験機の載荷板の大きさは、道路橋示方書に示される輪荷重の接地面積(200×500mm)と同一とした。上面増厚後の疲労試験は、水張り条件で行い、載荷荷重 118kN～255kN で縦目地や増厚界面のはく離の進展状況を確認しながら、徐々に載荷荷重を上げて行き、載荷回数は累計 52.5 万回まで実施した。

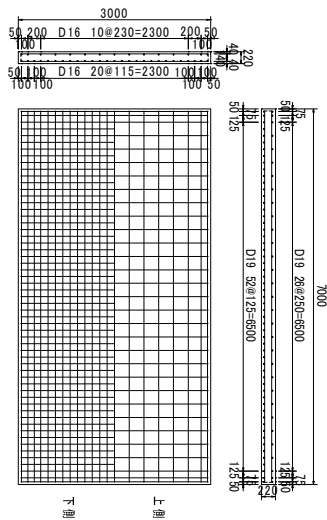


図-11 試験供試体 (既設 RC 床版)

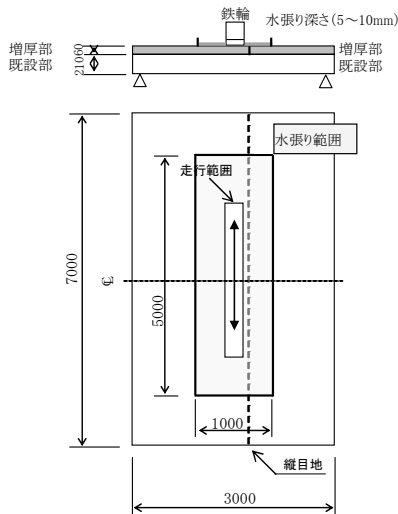


図-12 輪荷重走行試験の概要図

## 6.3 計測項目

輪荷重走行試験における計測項目は、表-2 に示すとおりで実施した。

表-2 計測項目

計測項目	計測位置	計測機器
載荷荷重	図-12のとおり	試験機ロードセル
床版たわみ	橋軸、橋軸直角方向	高感度変位計
鉄筋ひずみ	上側鉄筋、下側鉄筋	ひずみゲージ
界面ひずみ	増厚界面(縦目地近傍)	モールドゲージ
増厚界面のはく離	縦目地近傍	超音波法
目地部の動き	供試体上面の縦目地	3軸変位計
ひび割れ	床版下面	目視、クラックゲージ

## 7. 試験結果

### 7.1 予備載荷試験

#### (1) 貫通ひび割れ供試体(E 供試体)

今回の検討では、特に既設 RC 床版の貫通ひび割れ有無の影響について着目することとした。

表-3 載荷状態と床版劣化度

載荷荷重	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	P <sub>sx</sub> (tf)	P (tf)	P/P <sub>sx</sub>	Nf (万回)	0.4Nf (万回)	0.7Nf (万回)
予備(反転)	28.9	38.6	22.0	0.570	27.3	10.9	19.1
予備(正規)	28.9	47.5	24.8	0.522	82.8	33.1	58.0

※松井式<sup>1)</sup>:  $\log(P/P_{sx}) = -0.007835 \times \log N + \log 1.51965$  (乾燥条件)

※Nf=1.0: 松井式から算出した押抜きせん断疲労破壊する状態

床版供試体に貫通ひび割れを導入する方法は、最初に床版供試体を裏返し、荷重を段階的に増加させながら輪荷重走行により床版上面にひび割れを発生させ、床版の上下を元に戻して、正規の状態で行った。供試体に予備載荷を与えるときの目安として、松井式<sup>1)</sup>により載荷状態と床版劣化度を試算し、表-3 に示す 0.7Nf を上限とすることで、供試体の実劣化度をモニターしながら予備載荷を実施した。

表-4 貫通ひび割れ導入荷重(E 予備載荷)

①輪荷重(反転)載荷ステップ		②輪荷重(正規)載荷ステップ	
輪荷重(kN)	繰返し回数(回)	輪荷重(kN)	繰返し回数(回)
157	200	157	1,000
177	200	177	200
197	↓ 13,000	197	200
		216	10,000
		235	10,000
		255	↓ 87,000

反転した状態の予備載荷について、表-4 の①に示す 197kN の 13,000 回の載荷を実施した時点で、鉄筋ひずみが降伏強度に近い値に達したため、そこで中止し、供試体を反転させて正規状態の載荷を行った。

正規な位置に戻した状態で、予備載荷を実施した。たわみ・ひずみは約 1000 回まで急増、その後は漸増した。予備載荷を継続したところ表-4 の②に示す 255kN の 87,000 回まで載荷した時点で、貫通ひび割れの発生と輪荷重走行時に下面がうねりを伴うたわみ状態が確認され、

この状態で、下記に示す算定式で算出した「たわみの劣化度：D」は、図-13 に示すとおり 0.90 程度となった。

$$「たわみ劣化度：D」 = (③ - ①) / (② - ①)$$

- ① 輪荷重によるコンクリート全断面有効とした剛性理論で算出した計算たわみ量
- ② 輪荷重によるコンクリート引張領域断面無視の剛性理論たわみ
- ③ 実測した輪荷重によるたわみ量

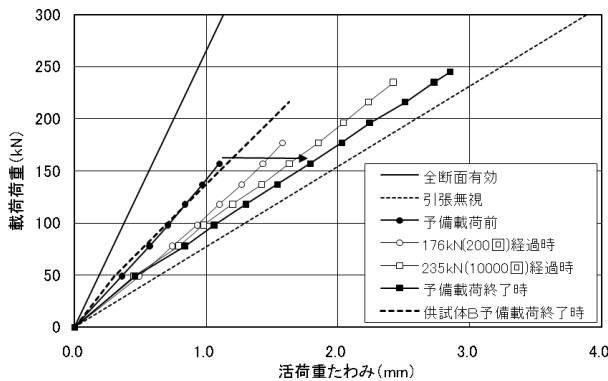


図-13 予備載荷後の床版たわみ劣化度

また、最終的なひび割れ密度は 11.9 m<sup>2</sup>/m、最大ひび割れ幅 0.3mm 程度であった。図-14 に予備載荷後の既設床版のひび割れ状況を示す。なお、この図に示す漏水箇所とは、予備載荷終了後に床版上面から散水を行い、床版下面から漏水が認められた範囲を示している。

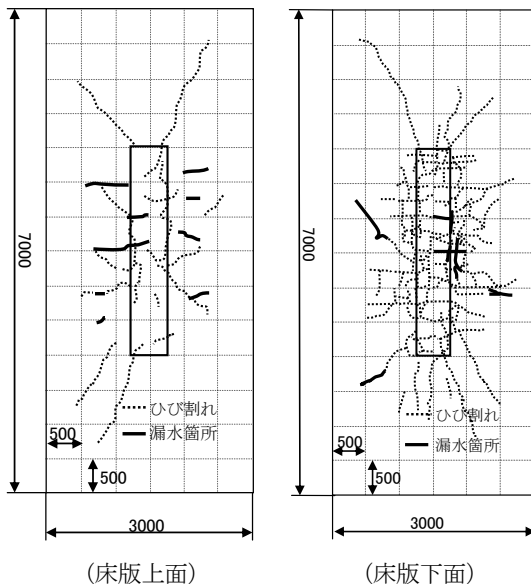


図-14 床版ひび割れ状態(E 予備載荷後)

## (2) 貫通ひび割れ無し床版供試体(A,B 供試体)

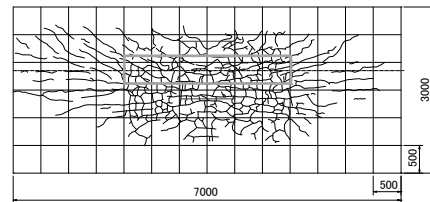
貫通ひび割れを入れた E 供試体の比較対象として、同一設計条件で製作され、表-5 に示す荷重履歴を受け、予備載荷後に表-6 に示す劣化状態となっている A, B 供試体を用いることとした。いずれの供試体も貫通ひび割れの無い劣化状態である。(図-15)

表-5 貫通ひび割れ無し床版供試体の載荷履歴

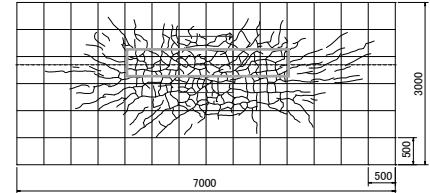
供試体	載荷履歴			備考	
	増厚前 (予備載荷)	増厚後			
		目地近傍 載荷	目地直上 載荷		反転載荷 (目地直上)
A	0.4Nf	50万回	50万回	2,883回	貫通ひび割れ無し
B	0.7Nf	50万回	50万回	—	

表-6 予備載荷後の既設 RC 床版の劣化度

測定項目	供試体 A (0.4Nf)	供試体 B (0.7Nf)	E (貫通ひび割れ導入)
活荷重たわみ	1.5mm	1.7mm	上面載荷 2.8mm 下面載荷 2.1mm
ひび割れ密度	11m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	12m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	上面載荷 11.9m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> 下面載荷 2.1m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
貫通ひび割れの有無	なし	なし	あり
たわみの劣化度	0.21	0.35	上面 0.42 下面 0.90



A 供試体 (下面)



B 供試体 (下面)

図-15 ひび割れ状況 (目地直上 (50 万回) 終了時)

## 7.2 増厚施工後の輪荷重走行試験

A, B, E 供試体とも、施工目地部近傍からはく離の進展を確認するため、載荷荷重の繰返しにより、超音波探傷試験により、はく離損傷の進展を確認した。図-16 から図-17 までにその結果を示す。

供試体 A の測定結果は、載荷回数 33~36 万回で、界面はく離の発生、活荷重たわみの増加、界面に埋設したモールドゲージのひずみ出力の急増し、進展した貫通ひび割れからの漏水の増加が認められた。B 供試体では、活荷重たわみ、モールドゲージ、漏水の有無については、A 供試体に比べて明確な変化が見られなかった。供試体 E は、貫通ひび割れを有しているため、比較的早期段階から漏水が見られ、各測定項目については、載荷回数 20~25 万回で著しい傾向が見られた。

貫通ひび割れを有する E 供試体は、貫通ひび割れの無

い A, B 供試体に比べて、増厚施工後の床版疲労損傷の進展速度が早いことが確認された。

上面増厚施工後の疲労実験の予想では、松井式<sup>1)</sup>から算定した疲労強度 1.0Nf に対して、表-5, 6 に示す B 供試体は A 供試体より、早期にはく離損傷が発生すると想定したが、実際の結果は、B 供試体ではく離が生じない結果であった。要因は、貫通ひび割れのない状態では、増厚施工端部では界面付着性状にバラツキが生じやすいため、引張付着強度の値が安定しない結果と思われる。

図-18 に A 供試体と E 供試体で疲労実験に伴う増厚のはく離進展の比較結果を示す。E 供試体が A 供試体よりも、完全なはく離 (図の記号; ×印: 完全なはく離, △: はく離兆候, ○: 健全) の範囲が目地部近傍で多く確認された。図-19 は、E 供試体試験終了時の結果を示す。

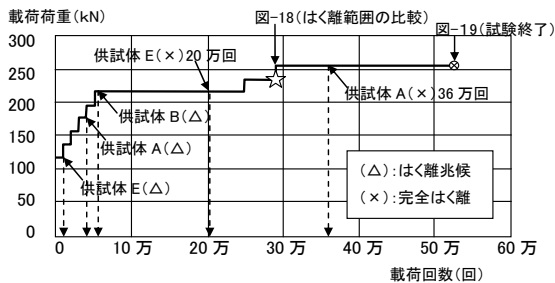


図-16 荷回数とはく離の進展状況

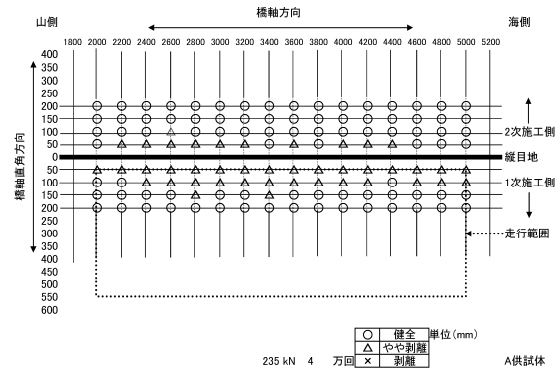
測定項目	供試体	変状の進行状況
界面はく離	A	→
	B	→
	E	→
活荷重たわみ	A	→ 変化点
	B	→ 変化なし
	E	→ 変化点
モールドゲージ	A	→ 変化点
	B	→ 変化なし
	E	→ 変化点
鉄筋ひずみ	A	→ 変化なし
	B	→ 変化なし
	E	→ 変化なし
漏水の発生	A	→ 変化点
	B	→ 変化なし
	E	→ 変化点
上面ひび割れの発生	A	→ 変化点
	B	→ 変化点
	E	→ 変化点

図-17 疲労実験のイベント比較図

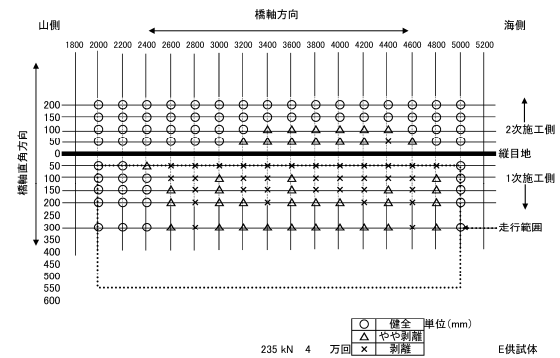
## 8. まとめ

- ①施工目地部付近では、既設床版切削後の表面処理としてショットブラストが投射出来ない部分は、施工要因で付着強度の低下やバラツキが大きくなり、施工精度によって早期劣化が生じやすい。
- ②既設 RC 床版に貫通ひび割れが存在する場合、貫通ひび割れの無い場合に比べて、早い段階から上面増厚後に付着はく離損傷を起こす可能性がある。
- ③上面増厚工法は、貫通ひび割れが生じていない床版に適用することを基本とし、貫通ひび割れや上面の劣化が見られる場合は、適切な補修が必要である。

- ④施工目地近傍は、施工制約により付着強度が低下するため、付着強度を向上させる対策が必要である。



①A 供試体 (貫通ひび割れ無し)



②E 供試体 (貫通ひび割れ有り)

図-18 上面増厚のはく離比較 (235kN 4 万回)

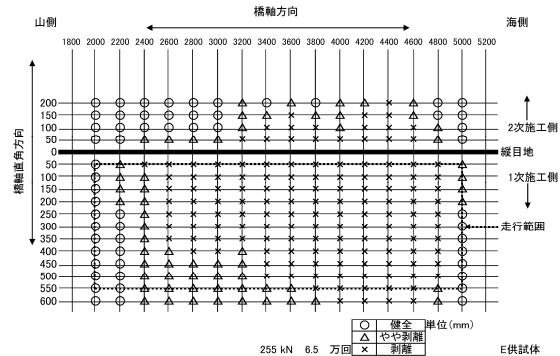


図-19 はく離損傷範囲 (E 供試体 試験終了後)

## 9. おわりに

本検討の実施に当たり、大阪工業大学松井繁之教授を委員長とする「増厚床版の補修対策に関する技術検討委員会」委員や関係者の方に、多大なるご指導、ご支援をいただきました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 松井：移動輪荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労寿命と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.No.2, pp.627-632, 1987
- 2) 空港舗装の薄層付着オーバーレイ報告書：平成 18 年 3 月 国総研他, P.85