

論文 上面増厚床版における施工目地部の劣化対策効果確認実験

和田 圭仙*1・長谷 俊彦*2・緒方 辰男*3

要旨： 高速道路における鋼橋 RC 床版は、疲労や塩害による劣化対策として鋼繊維補強コンクリート (SFRC) を用いた床版上面増厚が一般的に行われている。近年、施工目地部を起点として SFRC が施工後数年で早期劣化する事象が発生していることから、本研究では、実物大供試体を用いた輪荷重走行試験により、劣化対策効果を検証した。その結果、新旧コンクリート界面ははく離により劣化し、その対策としてコンクリート用接着剤が有効であることが確認できた。

キーワード： 上面増厚, RC 床版, 輪荷重走行試験, はく離, 劣化対策

1. はじめに

疲労や塩害等により劣化した鋼橋 RC 床版の対策工として、NEXCO 各社の管理する高速道路等では、一般的に上面増厚工法が適用されてきたが、平成 10 年頃から上面増厚後に短期間で再劣化が生じた事例が報告され始めた。平成 18 年度のアンケート調査結果によると、増厚床版の劣化は増厚コンクリートの施工目地 (図-1: 1 次施工と 2 次施工の打継目) を起点として生じていることが多いことがわかった。

そこで、本研究では、再劣化原因の起点となる増厚コンクリートの施工目地部に着目し、実施工と同様な方法で上面増厚した供試体の劣化対策効果を検証するため、輪荷重走行試験による疲労試験を行い、劣化対策効果を検討した。

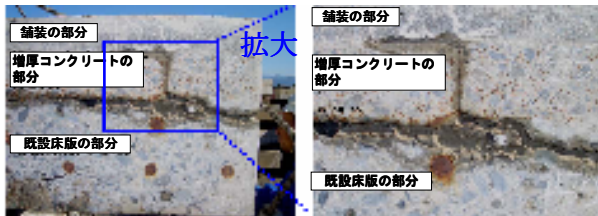


図-1 撤去床版の切断面 (施工目地部)

2. 既設 RC 床版の輪荷重走行試験 (予備載荷)

供試体は、上面増厚時に新旧コンクリート界面の劣化対策を行った 2 体 (C, D)、および比較のための基準供試体 A の計 3 体である。実験工程の都合により、2 機の移動載荷疲労試験機を使用したため、それぞれ異なる供試体寸法とした (図-2)。上面増厚に先立ち、いずれも既設 RC 床版に劣化を再現するため、輪荷重走行試験を実施し、床版下面にひび割れを導入した。

2.1 供試体諸元

表-1 に既設 RC 床版コンクリートの配合を示す。供

(単位: mm)

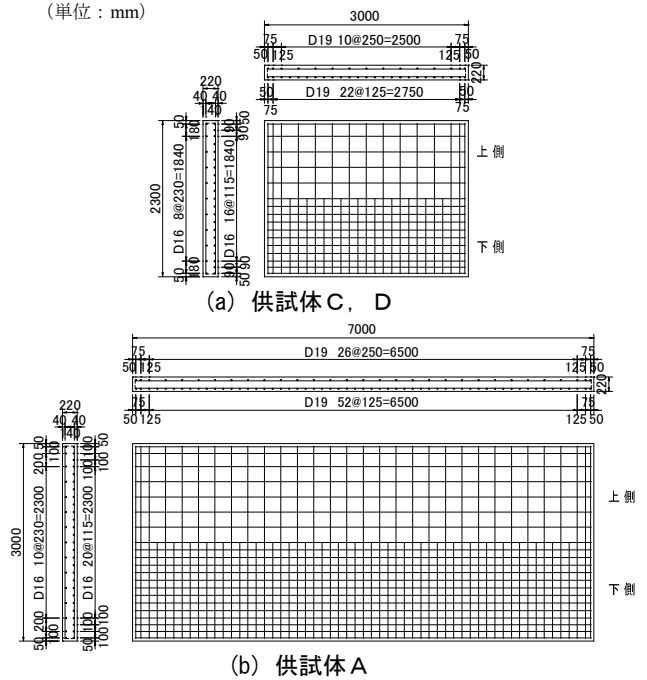


図-2 供試体寸法

試体は、上面増厚の劣化が多い年次 (S46~S54 年) に準じ、供試体寸法、配筋、使用材料ともに当時を再現し作成した。なお床版厚は、製作精度を確保するため、レーザ変位計を用い 0mm~+5mm となるよう管理した。

2.2 使用材料

(1) コンクリート

使用するコンクリートは早強コンクリートとし、材令 28 日における圧縮強度を 24N/mm² とした。

(2) 鉄筋

使用する鉄筋は、当時の基準に準じて SD295 を使用した。実橋の配筋図を参考にし、主鉄筋に D19、配力鉄筋に D16 を使用した。

*1 (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)

*2 (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)

*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)

表-1 既設 RC 床版コンクリートの配合

SL (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	AE
8	4.5	59.5	46.9	156	263	884	1,011	1.052

AE : AE 減水剤, 粗骨材の最大寸法 : $G_{max}=25\text{mm}$

2.3 試験方法

輪荷重走行試験は、RC 床版供試体の上面に載荷版を 1 列に並べた上を鉄輪が往復して載荷するものとした。使用する輪荷重走行試験機が供試体 C, D と供試体 A で異なるため、既往の S-N 曲線、およびたわみとひび割れ密度により各供試体の劣化程度を管理した。載荷版は 300mm×120mm (C, D), 500mm×200mm (A), 走行範囲は 2m (C, D), 3m (A), 支持条件は、いずれも長辺が単純支持, 短辺が弾性支持 (C, D), 自由端 (A) とした。両試験機の載荷条件を合わせるため、弾性支持梁の剛性は、直交異方性版理論により算定した各供試体中央および走行端部のモーメントとたわみ量が同等になるように決定した。

表-2 に載荷荷重と載荷回数を示す。載荷回数は、貫通ひび割れを導入する供試体 C 以外は、ひび割れが密に入り劣化した状態 (概ね加速期~劣化期) を想定し、S-N 曲線から推定される破壊回数 (Nf) の 4 割とした。載荷荷重は、軸重データ等考慮し 216kN とした。

2.4 計測項目

計測項目は、表-3 に示すとおりである。

2.5 既設 RC 床版の輪荷重走行試験結果 (予備載荷)

(1) たわみ

図-3 に床版中央におけるたわみの経時変化を示す。ここでは、床版たわみを活荷重たわみ, 残留たわみ, 総たわみに分け、横軸を破壊回数(Nf)に対する割合で表している。

表-2 載荷荷重と載荷回数

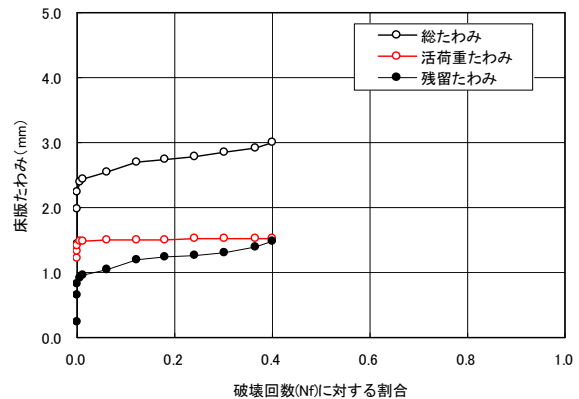
供試体	載荷荷重 (kN)	載荷回数 (回)	備考
A	216	331,000	0.4Nf
C		40,000	
D			

※Nfは、S-N曲線における破壊までの繰返し数

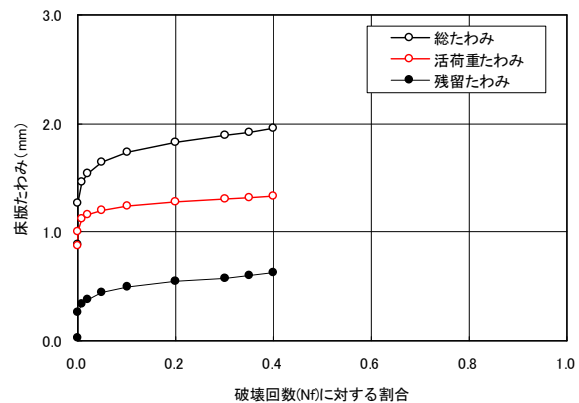
表-3 計測項目

計測項目	計測位置	計測機器
載荷荷重	載荷点	試験機ロードセル
床版たわみ	橋軸, 橋軸直角方向	高感度変位型
鉄筋ひずみ	上側鉄筋, 下側鉄筋	ひずみゲージ
ひび割れ	床版上下面	目視, ルーペ

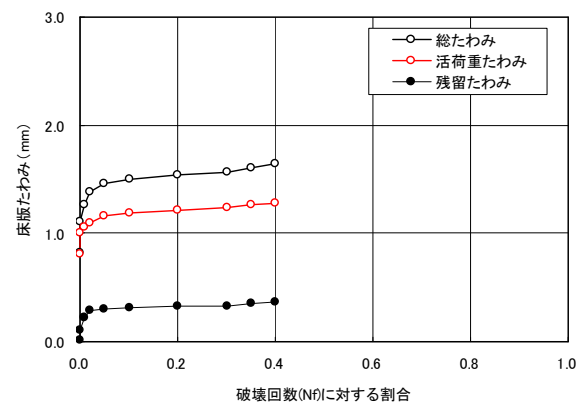
供試体 A は、繰返しの初期段階で床版たわみは急増するが、N=10,000 回 (Nf=0.03) 以降は漸増する傾向となった。また、供試体 C, D も繰返しの初期段階で床版たわみが急増し、N=2,000 回 (Nf=0.05) 以降は漸増する傾向を示した。なお、供試体 C, D の残留たわみに差がみられるのは、長辺支持部寄りの下面ひび割れの発生状況の違いが表れているものと推定される。



(a) 供試体 A



(b) 供試体 C



(c) 供試体 D

図-3 床版中央たわみの経時変化

表-4 に載荷終了時のたわみ劣化度を示す。たわみ劣化度は供試体の支持条件を再現し、直交異方性版理論により算定した引張無視、及び全断面有効とした場合の理論たわみと活荷重たわみの比率から算定される。供試体 A に対し C, D は劣化度が大きい、載荷版の大きさと

表-4 たわみ劣化度 (載荷終了時)

供試体	A	C	D
たわみ劣化度	0.21	0.52	0.49

支持間隔が異なることに起因するものと考えられる。

(2) ひび割れ密度

図-4 に供試体 A, C, D について、床版下面のひび割れ密度を示す。載荷版端部からの影響を確認するため、供試体 A は、橋軸方向 1m, 橋軸直角方向 0.94m の範囲でのひび割れ密度を表し、供試体 C, D は、橋軸方向 1m, 橋軸直角方向 0.74m の範囲でのひび割れ密度を表している (図-5)。ひび割れ密度の算出は、橋軸直角方向を載荷板エッジから 45° の範囲とし、目視可能な最小 0.02mm のひび割れ幅までを対象とした。

横軸を破壊回数(Nf)に対する割合で表した場合、いずれの供試体もひび割れ密度の増加傾向は概ね一致する傾向を示した。試験終了時のひび割れ密度は、0.4Nf の供試体 A, C, D で 11m/m² 程度となり概ね一致していた。これは、目視確認できるひび割れを対象としているため、一般に使用限界状態と言われている 10m/m² を超えている。また、ひび割れ密度は、床版たわみと同様に、繰り返しの初期段階に急増し、その後徐々に漸増する傾向を示した。

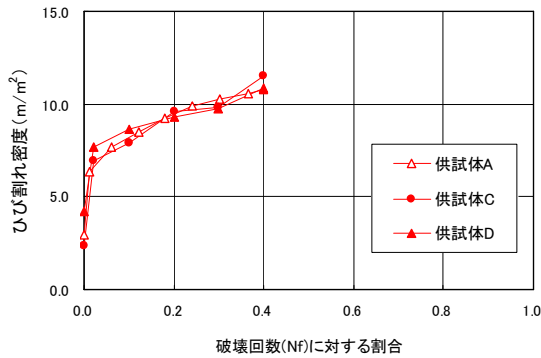


図-4 床版下面のひび割れ密度の変化

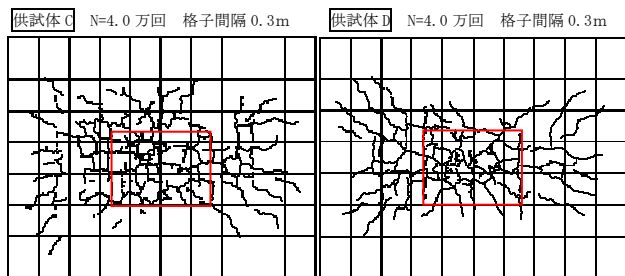


図-5 床版下面のひび割れ図 (供試体 C, D)

3. 上面増厚後の輪荷重走行試験

2. で製作・輪荷重試験を実施した供試体を用い、3 体同時施工により実施工と同様の作業機械 (切削機, 研掃

機械, コンクリートフィニッシャ) により、床版上面を 1cm 切削し研掃後、施工目地を設けるため、1 次施工と 2 次施工に分けて 6cm の上面増厚を実施した。その後、水張り条件にて再度輪荷重走行試験を行った。その際、筆者らの別途実施した検討¹⁾²⁾³⁾より、載荷位置近傍に施工目地を設け、研掃程度や締固め方法など、実施工を再現することにより新旧コンクリート界面のはく離に対する劣化対策効果を確認することとした。

3.1 供試体諸元

供試体 C, D の諸元を図-6 および図-7 に示す。上面増厚後の床版厚は 27cm である。各対策材料の数量 (幅, 間隔等) は、車輪の載荷幅や必要定着長、これまでの実績を考慮しそれぞれ選定した。載荷位置は支間中央とし、その近傍に施工目地を設けた。なお、供試体 C, D は、それぞれ輪の走行方向で供試体を 2 つの領域に分け、新旧コンクリート界面に劣化対策を実施後、供試体 A とともに同時施工で上面増厚を行った。

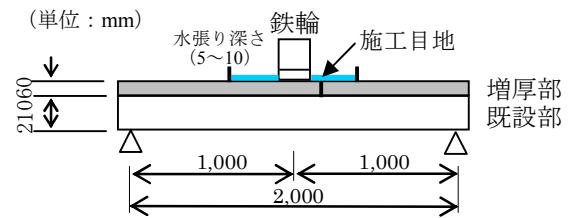
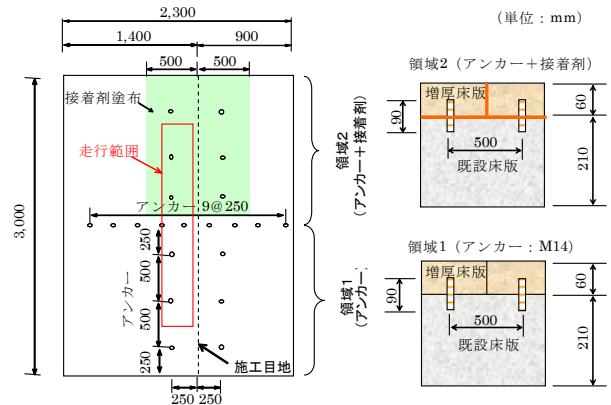
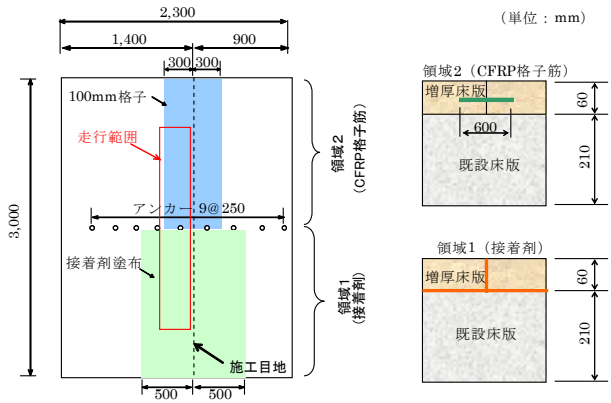


図-6 上面増厚後の供試体諸元



(a) 供試体 C



(b) 供試体 D

図-7 上面増厚時の劣化対策 (供試体 C, D)

3.2 使用材料

表-5 に上面増厚コンクリートの配合を示す。使用するコンクリートは、鋼繊維補強超速硬コンクリートとし、材令3時間における圧縮強度を 24N/mm^2 とした。

図-8 に劣化対策材料及び施工状況を示す。材料はこれまでの実績等考慮し、アンカー、接着剤、CFRP 格子筋、アンカーと接着剤を併用したものとした。アンカーは、これまで実績の多い普通ボルト (M14)、接着剤は2液混合型のエポキシ樹脂、CFRP 格子筋は、1本あたり断面積 17.5mm^2 、格子間隔 100mm のものである。対策数量は、FEMにより輪荷重による応力振幅、水和熱、乾燥収縮に対するSFRC硬化後の施工端部の反り上がり力、収縮ひずみを試算し決定した。

表-5 SFRCの配合

SL (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					減水剤 (C×%)
			W	C	S	G	SF	
5±1.5	38.9	48.4	170	443	811	892	100	2.0

設計基準強度 24N/mm^2 (材令3時間)、セメント：超速硬セメント、粗骨材最大寸法： $G_{\max}=20\text{mm}$ 、 $\text{SF}=1.27\text{vol}\%$

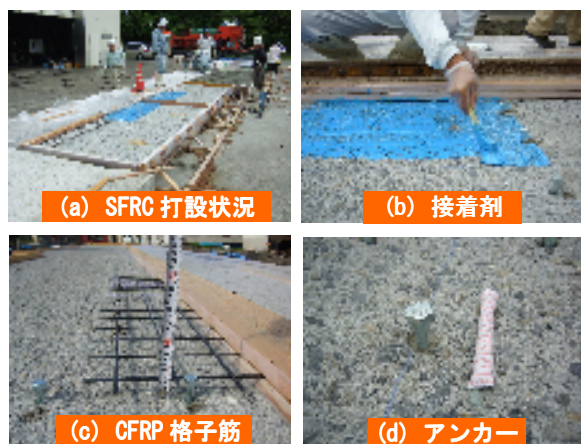


図-8 劣化対策材料及び施工状況

3.3 試験方法

試験方法は2と同様である。荷重ステップ図を図-9に示す。供試体の劣化程度を極力合せるため、P/Psx (松井らの梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力に対する荷重荷重の割合)を両試験機で同じ値とした。供試体Aは、荷重荷重 118kN から開始し、新旧コンクリート界面のはく離をモニターしながら 20kN ずつ階段状に荷重を上げた。上限荷重は、上面増厚部分の損傷に配慮し設計T荷重の3倍程度の 255kN とした。なお、供試体C、Dは、P/Psxの比率を供試体Aと合せたため 100kN から開始した。なお、供試体C、Dは対策領域の一部がはく離により実験継続不能となったため、図中の荷重回数(累計10万回)で実験終了している。

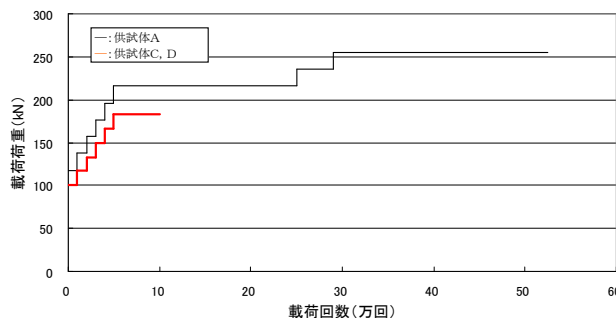


図-9 荷重ステップ図

表-6 計測項目

計測項目	計測位置	計測機器
荷重荷重	荷重点	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

3.4 計測項目

計測項目は、表-6に示すとおりである。

3.5 上面増厚後の輪荷重走行試験結果

接着剤を塗布した供試体C、Dの各領域では、試験終了時まではく離の兆候は見られず、劣化対策の効果を確認することができた。また、CFRP格子筋およびアンカーを設置した各領域では、初期状態から縦目地近傍で部分的にややはく離が見られたこともあり、階段状荷重に伴って徐々にはく離が進展し、試験終了時には広範囲にはく離が確認された。

(1) たわみ

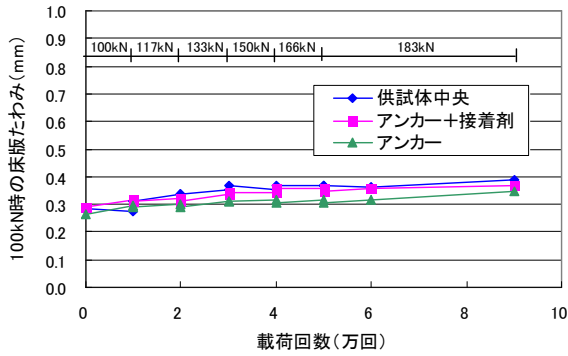
供試体C、Dについて、荷重荷重の増加に伴う床版たわみの変化を捉えるため、各荷重ステップの開始時と終了時に、領域1、2と供試体中央を荷重する静的荷重を実施した。

図-10に供試体C、Dの各荷重領域の中央と、供試体中央の活荷重たわみ(項目の荷重荷重 100kN 時)の変化を示す。供試体DのCFRP格子筋側では、初期状態から部分的なはく離が見られたため、荷重の増加とともに活荷重たわみが漸増する傾向にあった。なお、供試体Dの接着剤領域、および供試体Cは供試体中央の値に対して、対策領域ごとの明確な活荷重たわみ差は見られなかったことから、劣化対策が有効に働いていると考えられる。

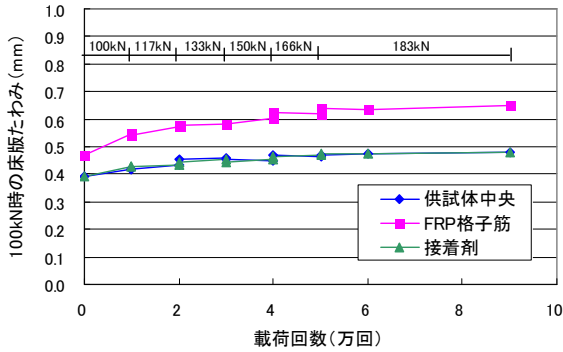
(2) 新旧コンクリート界面のはく離

図-11に超音波法により検出した界面はく離の進展状況を示す。

目地部対策なしの供試体Aの場合、荷重荷重 176kN のN=1万回で非破壊計測により、ややはく離している状況が確認されている。これに対して、供試体CあるいはD



(a) 供試体 C



(b) 供試体 D

図-10 床版中央たわみの変化

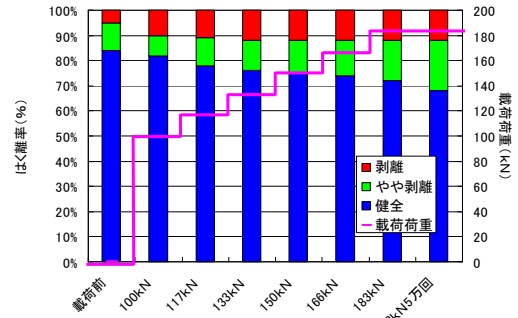
の接着剤を塗布した領域では、試験が終了するまで（載荷荷重 183kN の N=5 万回）はく離の兆候は見られず、補修効果が確認できた。一方、アンカーを設置した供試体 C および CFRP 格子筋を配置した供試体 D では、載荷前からややはく離およびはく離領域が 5~17% 存在し、これらははく離は載荷とともに漸増し、最終的に 30~50% 程度がはく離の疑われる領域となった。

以上より、接着剤を塗布すればはく離が生じないことがわかった。一方、アンカー単独、CFRP 格子筋は十分な補修効果がないことがわかった。その理由として、今回、目地部から 15cm の範囲は締固めの弱い状態を再現したため、これらが締固め時の支障となったことが考えられる。特に脱型後の側面を目視観察したところ、CFRP 格子筋の供試体はジャンカが発生していることが確認でき、格子筋が締固めの支障となったと推測される。

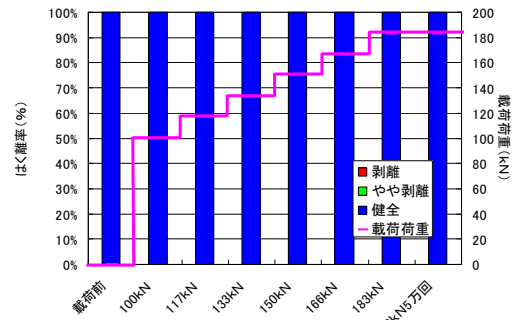
4. 対策工法の評価

図-12 に供試体 C, D について、それぞれの補修効果を供試体 A と比較した結果を示す。ここでは、各供試体の増厚界面で、ややはく離(△)およびはく離(×)の発生した載荷回数と、各測定項目で変化が見られた載荷回数を比較して示している。

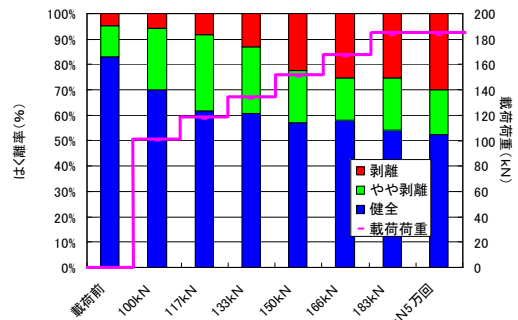
アンカー及び CFRP 格子筋の領域は施工当初からややはく離が生じていたため、付着強度は 0~0.2N/mm² 程度であった。本検討では、接着剤（単独もしくはアンカーと併用）した領域は、施工性、付着性、たわみ剛性が改



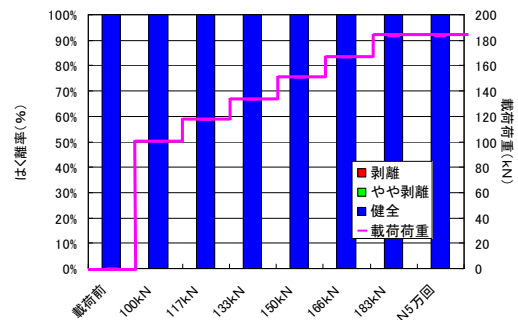
(a) 供試体 C (アンカー)



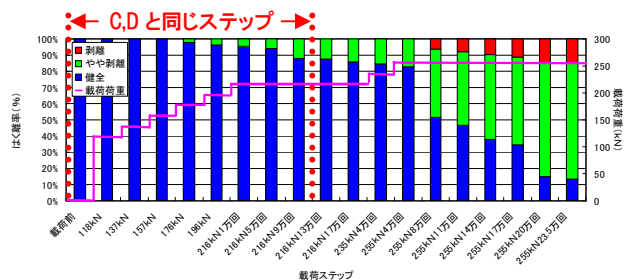
(b) 供試体 C (アンカー+接着剤)



(c) 供試体 D (CFRP 格子筋)



(d) 供試体 D (接着剤)



(e) 供試体 A

図-11 はく離範囲の変化（供試体 A, C, D）

善され、効果が確認できた。これらを新旧コンクリートの一体化に必要な各種性能の観点から整理すると表-7のように示される。

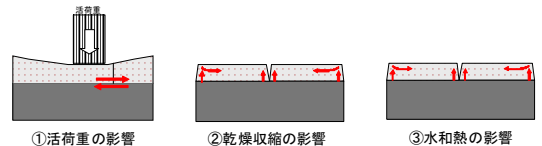


図-13 増厚層界面付着はく離の影響要因

表-8 接着剤の要求性能(案)

要求性能	内容
付着性	所定の負荷後、新旧コンクリートの一体化に必要な付着強度を確保
高温負荷抵抗性	床版面に作用する夏季の高温に対し、十分な付着性能を有する
水浸疲労耐久性	水浸状態で繰返し輪荷重の作用に伴う疲労に対し、はく離しない

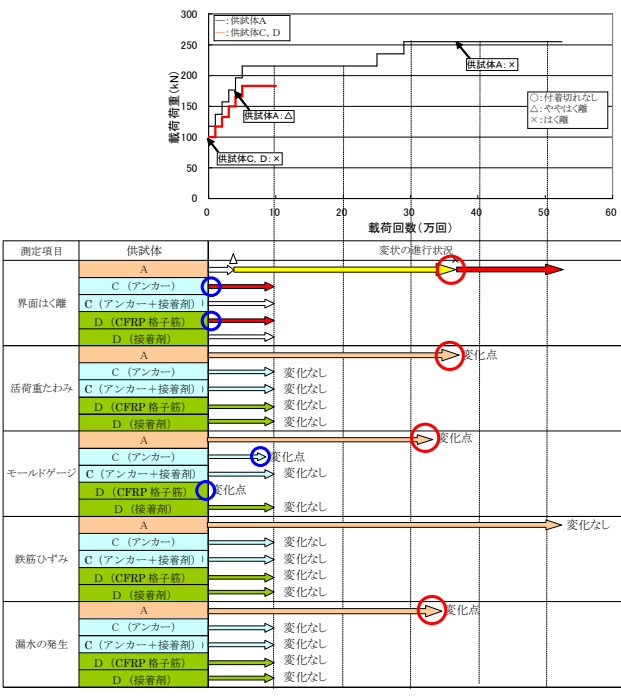


図-12 疲労実験のイベント比較図

表-7 補修対策評価比較表

評価項目	供試体C		供試体D		備考
	アンカー	アンカー+接着剤	CFRP格子筋	接着剤	
施工性能	△	△	×	○	補修対策の相対評価
付着性能	△	○	×	○	はく離の発生状況
たわみ剛性	△	○	×	○	
総合評価	△	○	×	◎	

5. 接着剤の要求性能

上面増厚の施工目地や地覆端部など、施工端部はSFRCの乾燥収縮や輪荷重の影響等により、新旧コンクリート界面のずれ力や引張力が大きく作用する箇所である(図-13)。このため、施工端部の付着力が低下すると、新旧コンクリート界面で徐々に付着切れを起し、施工端部が開口しやすい。また、この開口は路面から浸透する水みちとなることから、上記作用に対し、十分な付着耐久性を確保することが必要となる。

床版は、温度変化や水、振動等の各劣化要因が作用する部位であることから、接着剤を用いる場合、十分な耐久性を有するものでなければならない。これらを鑑み、表-8に接着剤の要求性能(案)を示す。なお、一般的に床版は舗装下にあることから、紫外線劣化に対する性能は求めないこととした。現在、表-8に基づき性能評価試験法(案)を作成し、材料評価試験中である。

6. まとめ

- 本検討の結果、得られた知見を以下に示す。
- 増厚界面の端部に接着剤を塗布した領域では、供試体C、Dともにはく離が生じなかったため、接着剤塗布が最も付着性能が高くなることがわかった。
 - 施工目地部にアンカーのみの場合やCFRP格子筋を設置した場合、脱型後に施工目地部にジャンカ状の変状が確認されたことから、施工性能が低下し締固めが不十分となることがわかった。その結果、供試体C、Dともに試験の初期からはく離が生じた。さらに、活荷重たわみは荷重ステップの増加とともに漸増し、これらの対策では補修効果があまり期待できないことが明らかとなった。
 - アンカー設置後に施工端部に接着剤を塗布した場合、はく離は生じなかった。アンカーのみでははく離が生じたことから、接着剤の補修効果が確認された。

謝辞

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

- 和田圭仙ほか：RC床版の補修工法施工時に与える影響に関する検討，第6回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.139-144，平成20年6月
- 和田圭仙ほか：鋼繊維補強超硬コンクリートの付着特性実験，土木学会第64回年次学術講演会，V-503，pp.1003-1004，平成21年9月
- 長谷俊彦，和田圭仙，緒方辰男：上面増厚床版における施工目地部の劣化再現実験，コンクリート工学年次論文報告集，2010(投稿中)