

スティフクリート®により上面増厚された床版の補強効果に関する実験的検討

佐々木 一成 山本 尚平 熊崎 達郎
 青木 峻二 富井 孝喜 大場 誠道
 (生産技術本部) (生産技術本部) (生産技術本部)

Experimental Study on Reinforcement Effect of RC Decks Overlaid with Stiff-Crete

Kazunari Sasaki Shohei Yamamoto Tatsuhiro Kumazaki
 Shunji Aoki Takayoshi Tomii Narimichi Oba

Abstract

An overlaying method using an ultra-high-performance fiber-reinforced cement composite (UHPFRC) was developed as a repair/reinforcement method for the deterioration of RC decks of steel bridges. In this study, to confirm the reinforcement effect and fatigue durability improvement effect of the ultra-rapid hardening UHPFRC “Stiff-Crete,” static tests of beams overlaid with various materials and wheel load running tests of deck overlaid Stiff-Crete were conducted. Consequently, the shear strength of the overlay deck may not depend on the material strength or the thickness of the thickened layer. It was confirmed that Stiff-Crete is more resistant to interfacial delamination, top surface cracks, and water leakage than steel fiber reinforced concrete (SFRC).

概 要

鋼橋のRC床版の劣化に対する補修・補強工法として超高性能繊維補強セメント系複合材料(UHPFRC)を用いた上面増厚工法が開発されている。本稿では床版の上面増厚用に開発した超速硬型のUHPFRC「スティフクリート®」による補強効果や疲労耐久性向上効果を確認するため、コンクリートとの打継面の性能確認実験、増厚された梁の静的せん断実験、増厚された床版の輪荷重走行試験を行い、従来工法である鋼繊維補強コンクリート(SFRC)による上面増厚工法と比較した。その結果、スティフクリートにより上面増厚した床版は、コンクリートとの打継面を湿潤状態にして打ち継ぐことにより必要な性能が確保されること、SFRCによる工法と比較してせん断補強効果は同等であること、界面剥離や上面ひび割れ、漏水に対する抵抗性は高いことが確認された。本工法を用いることにより床版のさらなる長寿命化を期待することができる。

1. はじめに

鋼橋のRC床版の劣化に対する補修・補強方法のひとつとして、鋼繊維補強コンクリート(Steel Fiber Reinforced Concrete: 以下、SFRC)による上面増厚工法が採用されている。SFRCは粗骨材を含んでおり、混入している鋼繊維の長さが30mm程度であることから50～60mm程度で増厚されている。そのため、床版重量増による桁の補強や路面の擦り付けが必要になる場合がある。また、施工目地からの水の浸入やSFRC層の剥離などの再劣化が散見されており、更新が必要となっている。

そこで、近年、SFRCと比べて高強度・高靱性かつ緻密で物質移動抵抗性に優れた超高性能繊維補強セメント系複合材料(Ultra High Performance Fiber Reinforced Cement composite: 以下、UHPFRC)により床版厚さを大きく増加させることなく補強する工法が開発されている¹⁾²⁾など。UHPFRCは一般的に粗骨材を含まず、混入している鋼繊維の長さは15mm程度以下であるため、30mm程度の厚さであっても増厚施工が可能である。また、緻密な材料であるとともに繊維の架橋によりひび割れ幅の拡大を抑制することができることから、床版コンクリートへの水や

塩化物の侵入を抑制し、コンクリートの土砂化防止などが期待されている。付着性能も高いことからSFRCで課題となっている界面剥離に対しても優位であると考えられる。

従来、道路床版の上面増厚に使用されるSFRCは短い交通規制期間における施工に対応するため、3時間で圧縮強度24N/mm²を発現する超速硬型の材料が用いられている。UHPFRCは従来、硬化に時間を要するが、上面増厚に用いられるUHPFRCには施工条件によっては超速硬性が求められる。そこで、当社では超速硬の初期硬化特性を付与した上面増厚用のUHPFRC「スティフクリート®」を開発した。

本検討は鋼橋のRC床版を対象とし、スティフクリートを用いて上面増厚した床版の補強効果および疲労耐久性を検証することを目的とした。そのため、コンクリートとの打継面の性能確認実験、増厚した梁の静的せん断実験、増厚した床版の輪荷重走行試験を実施した。

2. スティフクリートを使用した上面増厚構造

本検討の対象とした上面増厚工法の概要をFig. 1に、ま

た、SFRCによる上面増厚工法との比較をTable 1に示す。本工法は劣化した既設RC床版上面を切削した後、ショットブラストにより研掃し、コンクリート面を湿潤状態に保ったうえで、スティフクリートを30mm程度の厚さで打ち継ぐことにより補強する。

本工法に使用するスティフクリートは注水から3時間で圧縮強度24N/mm²、材齢28日で120N/mm²を発現する超速硬型のUHPFRCである。配合をTable 2に示す。ポルトランドセメント、ポゾラン材、無機粉体からなるプレミックス材、粒径5mm以下の骨材、急硬材、膨張材、高性能減水剤、遅延剤、水および鋼繊維から構成される。鋼繊維は直径0.16mm、長さ13mm、引張強度2700N/mm²で、2vol.%混入する。常温で圧縮強度180N/mm²以上を発現する超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート®」³⁾をベースとしており、早期の強度発現を実現するために急硬材を、可使時間と流動性を調整するために遅延剤と高性能減水剤をそれぞれ添加している。JIS R 5201による静置時のモルタルフローは150~280mmであり、床版上面への打込み時には流動性を保ちながら、打込み後は流動しにくくなるチキソトロピー性を付与することにより、増厚施工面の勾配が5~10%程度であっても、スティフクリートが勾配に沿って流動しないで仕上げることを可能としている。

全面通行止めとしないで車両の通行を確保しながら車線を規制して実施する上面増厚施工では、先に施工した増厚層と、規制車線を切り替えて後に施工した増厚層との間に増厚層同士の打継面（施工目地）が生じる。本工法における施工目地は、一体性を確保するため鋸歯形状としている。この形状は超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」をコンクリートに打ち重ねて一体化し、防水性能を付与したプレキャスト床版「スリムトップ®」⁴⁾に用いられているスリムクリート同士の打継方法を参考にしている。脱型時に高压水で水洗いして細骨材および鋼繊維が見える状態とし、接着剤などを用いず湿潤状態として打ち継ぐ。

3. スティフクリートとコンクリートの打継面

3.1 概要

上面増厚による床版コンクリートとスティフクリートの打継面の引張強度およびせん断強度を確認するため、打継面となるコンクリート表面の処理方法をパラメータとしてコンクリートにスティフクリートを打ち継いだ試験体により一軸引張試験および簡易一面せん断試験を行った。試験の一覧をTable 3に示す。

3.2 引張強度

3.2.1 実験方法 引張試験に用いる供試体を製作するため、設計基準強度24N/mm²のコンクリートにより450×450×100mmの基盤となる平板を製作した。打継面となる表面はウォータージェットにより粗骨材がみえる程

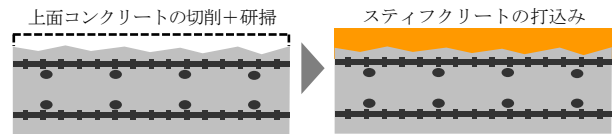


Fig. 1 スティフクリートによる床版の上面増厚
Procedure for Overlaying Deck with Stiff-Crete

Table 1 SFRCとスティフクリートの比較
Comparison of SFRC and Stiff-Crete

		SFRC (例)	スティフクリート
圧縮強度	材齢3時間	24N/mm ²	24N/mm ²
	材齢28日	50N/mm ²	120N/mm ²
補強繊維	形状	φ0.62×30mm	φ0.16×13mm
	混入量	1.27vol.%	2.0vol.%
増厚構造	厚さ	50mm~	30mm~
	施工目地	直線状+接着剤	鋸歯形状

Table 2 スティフクリートの配合
Mix Proportion of Stiff-Crete

単位量 (kg/m ³)						添加量(kg/m ³)	
水	プレミックス材	細骨材	急硬材	膨張材	高性能減水剤	遅延剤	鋼繊維
210	1327	837	140	20	8~30	4~10	157

Table 3 打継面の試験

Test to Confirm Adhesion Performance of Joint

検討項目	引張	せん断	
試験方法	一軸引張試験	簡易一面せん断試験	
試験規格	NEXCO試験法439 ⁵⁾	土木研究所資料 ⁶⁾	
試験体寸法 (mm)	平面寸法	450×450	900×900
	下層コン厚	100	100
	上層スティフ厚	100	100
	コア供試体	φ100×200	φ200×200
打継面処理方法	目荒し	ウォータージェット	ショットブラスト
	表面状態	湿潤	・乾燥 ・湿潤 ・プライマー ・接着剤



Photo 1 一軸引張試験状況および破断面
Uniaxial Tensile Test

度に凹凸処理した。スティフクリートを打ち継ぐ前に、コンクリート表面は水を散布することにより湿潤状態とし、スティフクリートを100mmの厚さで打ち継いだ。スティフクリートを打ち継いだ450×450×200mmの平板は封緘養生を行った後、コア抜きにより平板から供試体の高さ100mmの位置に打継面があるφ100×200mmの供試体5体を採取した。載荷は高速道路会社の試験法⁵⁾に準拠

した。載荷はスティフクリートの材齢28日で実施した。載荷状況をPhoto 1に示す。

3.2.2 実験結果 実験結果をTable 4に示す。引張強度の5体の平均値は3.2N/mm²であった。いずれの試験体もコンクリート部分で破断した(Photo 1)。

3.3 せん断強度

3.3.1 実験方法 設計基準強度24N/mm²のコンクリートにより900×900×100mmの基盤となる平板を4体製作した。打継面となる表面はせん断強度を安全側に評価するためウォータージェットや切削処理よりも凹凸の度合いが小さいショットブラストによる処理とした。スティフクリートを打ち継ぐ前のコンクリート表面の状態をパラメータとし、乾燥、湿潤、プライマーの塗布、プライマーと接着剤の塗布の4ケースとした。プライマーにはマイクロクラック補修用の浸透性エポキシ樹脂を使用し、接着剤にはエポキシ系接着剤(1.4kg/m²)を使用した。スティフクリートを厚さ100mmで打ち継ぎ、900×900×200mmの平板は封緘養生を行った後、コア抜きにより平板から供試体の高さ100mmの位置に打継面があるφ200×200mmの供試体9体を取った。載荷時の材料の諸元をTable 5に示す。載荷は簡易一面せん断試験⁶⁾による。試験機をFig. 2に示す。傾斜角は25, 30, 35°とし、各傾斜角につき3体の試験を実施した。

3.3.2 実験結果 実験結果をFig. 3に示す。コンクリート表面が乾燥した状態でスティフクリートを打ち継いだ場合、純せん断強度は0.539N/mm²と低くなった。スティフクリートにおいても一般的なセメント系材料と同様に乾燥状態で打ち継いだ場合はドライアウトにより付着強度が低下するものと考えられる。コンクリート表面を湿潤状態、プライマーの塗布、プライマーと接着剤を塗布した状態とした場合、いずれのケースにおいても3.0N/mm²以上の純せん断強度を有していた。

以上の結果から、コンクリート表面は最低限、湿潤状態としてスティフクリートを打ち継ぐ必要があることから、打継面は湿潤状態とすることを標準とし、次章以降の試験体を作製した。

4. 上面増厚梁のせん断実験

4.1 概要

上面増厚による床版のせん断補強効果を確認するため、SFRCおよびスティフクリートにより上面増厚したせん断破壊型の梁の載荷実験を行った。

4.2 実験方法

4.2.1 試験体 試験体の概要をFig. 4に示す。試験体の寸法は長さ2.5m、幅0.5mであり、コンクリート層の厚さは実際の床版を想定した0.21mである。コンクリート上面を増厚していない梁およびコンクリート上面に材料や厚さがそれぞれ異なる増厚層を設けた梁の計5体を作

Table 4 打継面の一軸引張試験結果

Uniaxial Tensile Test Results					
引張強度 (N/mm ²)					
1	2	3	4	5	平均
3.3	3.4	2.5	3.2	3.6	3.2

Table 5 使用材料の諸元 (簡易一面せん断試験体) Material Properties of Concretes Using Direct Shear Test

	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
コンクリート	70	28.0	24.8
スティフクリート	36	141	44.3

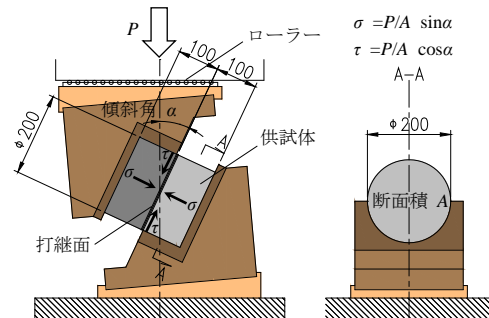


Fig. 2 簡易一面せん断試験機

Direct Shear Test

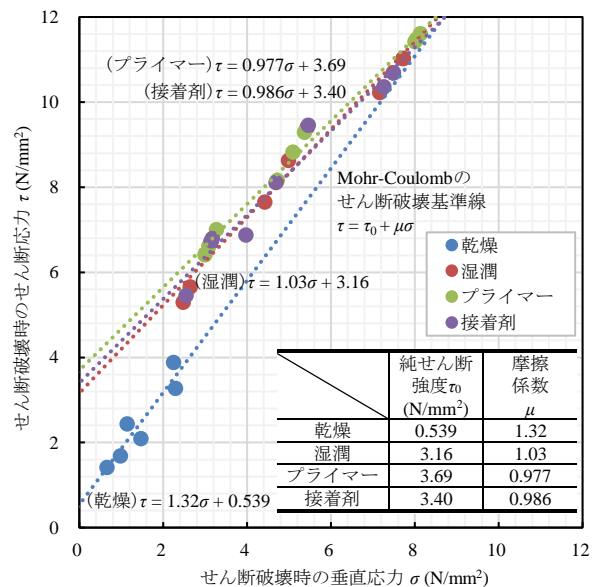


Fig. 3 簡易一面せん断試験結果 Results of Direct Shear Test

製した。試験体の諸元をTable 6、使用した材料の実験時の諸元をTable 7に示す。試験体No.1は、増厚していないRC梁であり、試験体No.2~5は硬化したコンクリート上面を切削せずにショットブラストによる研掃のみ実施し、水を噴霧して湿潤状態を保ったうえで、増厚材料を所定の厚さで打ち継いだ梁である。軸方向引張鉄筋には試験体の曲げ降伏が先行しないよう高強度のねじ筋PC鋼棒(SBPD1080/1230)を使用した。コンクリートは設計基準強度24N/mm²の普通コンクリートとした。SFRCは床版上面

Table 6 実験ケースおよびせん断耐力の実験値・計算値
Test Cases and Experimental and Calculated Values of Shear Strength

No.	床版			せん断耐力										
	全厚 (mm)	増厚層		下層 厚さ (mm)	実験値		計算値(a)				計算値(b)			
		材料	厚さ (mm)		厚さ (mm)	(A) 下層 破壊時 ¹⁾ (kN)	(B) 最大 荷重時 (kN)	全厚 ²⁾		下層 破壊時 との比 (A)/(a)	下層コン コン示 ⁷⁾ (kN)	増厚層		計
						コン示 ⁷⁾	比					RSF柱 指針 ⁸⁾ (kN)	UFC 指針 ⁹⁾ (kN)	
1	210	—	0	210	105	105	99	1.06	1.06	99	—	—	99	1.06
2	270	SFRC	60	210	156	227	119	1.90	1.31	99	88	—	187	1.21
3	230	スティフ クリート	20	210	138	143	107	1.34	1.29	99	—	130	229	0.62
4	240		30	210	139	164	111	1.48	1.25	99	—	194	239	0.56
5	250		40	210	145	204	115	1.77	1.26	99	—	259	358	0.57

*1 コンクリート部に斜めひび割れが発生し荷重低下した時のせん断力
*2 全断面を繊維が混入されていないコンクリートとして計算した値

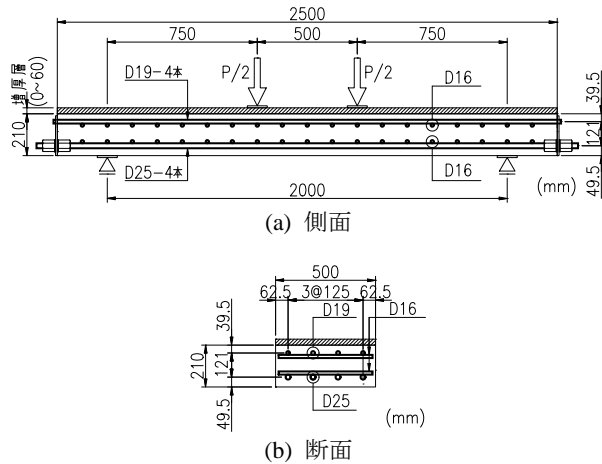


Fig. 4 上面増厚した梁のせん断試験体
Reinforcement of Bending Test (Shear Fracture Type)

Table 7 使用材料の諸元 (梁試験体)
Material Properties of Concretes

	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂ひび割れ 発生強度 (N/mm ²)	引張強度* (N/mm ²)	静弾性 係数 (kN/mm ²)
コンクリート	28.7	2.55	-	23.6
SFRC	65.5	4.71	2.27	36.7
スティフクリート	148	6.75	12.4	45.9

* 引張強度はJCI-S-002 切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験方法によって推定した引張軟化曲線より算出した。

増厚工法に使用されている超速硬性の材料とし、直径0.62mm、長さ30mmで両端にフックが付いた鋼繊維を1.27vol.%(100kg/m³)混入している。

4.2.2 荷重方法 荷重条件をFig. 4に示す。荷重スパンは輪荷重の幅にあわせて500mmとし、支点間にはせん断破壊が先行するよう2000mmとした。単調荷重とし、荷重が大きく低下した時点で荷重を終了した。

4.2.3 計測 試験機に取り付けたロードセルにより荷重を計測し、荷重荷重Pの1/2を作用せん断力とした。たわみは変位計により試験体中央で計測した。

4.3 実験結果

4.3.1 概要 実験における作用せん断力-たわみ関係をFig. 5に示す。なお、図中にはコンクリート部分にせん断ひび割れが発生して荷重が低下したせん断力および最大せん断力の値を示している。また、試験体の試験終

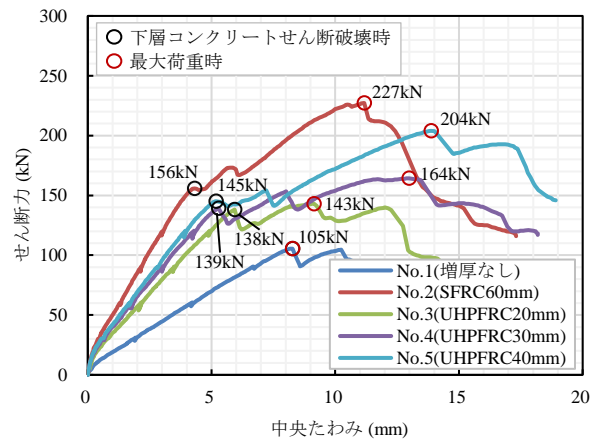


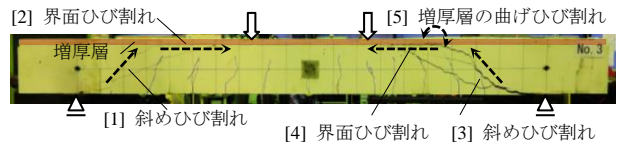
Fig. 5 作用せん断力-たわみ関係
Shear Force - Deflection Relationship



(a) 増厚なし試験体 (No.1)



(b) SFRC増厚試験体 (No.2)



※ 写真中の番号は事象が発生した順番を示す。

(c) スティフクリート増厚試験体 (No.3)



(d) スティフクリート増厚試験体 (No.4)



(e) スティフクリート増厚試験体 (No.5)

Photo 2 荷重終了後の試験体のひび割れ状況
Cracks of the Bending Test

Table 8 各指針類におけるコンクリートおよび繊維補強コンクリートのせん断耐力算定式

Formulas for Shear Strength of Concrete and Fiber Reinforced Concrete

指針類	コンクリート標準示方書 ⁷⁾	RSF柱指針 ⁸⁾	UFC指針 ⁹⁾
V_y	$V_y = V_c + V_s$	$V_y = V_c + V_s$	$V_y = V_{rpc} + V_f$
V_c, V_{rpc} (コンクリート)	$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot f_{vc} \cdot b_w \cdot d$ $f_{vc} = 0.20(f'_c)^{1/3}$ $\beta_d = (1000/d)^{1/4}$ $\beta_p = (100 p_v)^{1/3}$ $p_v = A_s / (b_w \cdot d)$	$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot f_{vc} \cdot b_w \cdot d$ $f_{vc} = 0.20(1 + \kappa)(f'_c)^{1/3}$ $\beta_d \cdot \beta_p$: コン示の V_c と同じ	繊維の分担分を除いた耐力 $V_{rpc} = 0.18(f'_c)^{1/2} \cdot b_w \cdot d$
V_f (繊維分担分)	—	—	繊維により受け持たれる耐力 $V_f = (f_t / \tan \beta_u) \cdot b_w \cdot z$
V_s	$V_s = [A_w f_{wy} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s] z$	コン示と同じ	—
記号*	V_y : せん断耐力(N), V_c, V_{rpc} : せん断補強鋼材を用いない棒部材のせん断耐力(N) V_f : 繊維により受け持たれるせん断耐力(N), V_s : せん断補強鋼材により受け持たれるせん断耐力(N) β_d : せん断耐力の有効高さに関する係数, β_p : せん断耐力の軸方向鉄筋比に関する係数 f_{vc} : コンクリートのせん断強度(N/mm ²), p_v : せん断引張鋼材比 f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm ²), b_w : 腹部の幅(mm), d : 有効高さ(mm), A_s : 引張側鋼材の断面積(mm ²) z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で、一般に $d/1.15$ とする。 【RSF柱指針】 κ : 鋼繊維混入によるせん断強度の増加を考慮する係数で1.0としてよい。 【UFC指針】 f_t : 超高強度繊維補強コンクリートの斜めひび割れ直角方向の平均引張強度 β_u : 軸方向と斜めひび割れ面のなす角度		

* 本検討ではせん断補強鋼材を用いていないため、 V_s に関する記号の説明は省略する。

了後のひび割れ状況をPhoto 2に示す。増厚していない試験体No.1は一方のせん断スパン内のコンクリートのせん断破壊により荷重低下し、荷重を終了した。増厚した試験体No.2~5はいずれもPhoto 2(c)に示すように、はじめにコンクリート部に斜めひび割れが発生し、打ち継ぎ界面に沿ってひび割れが進展して荷重低下した(Photo 2(c)の[1]~[2])。次に、コンクリート部に発生した斜めひび割れは増厚層を貫通しないで、低下した荷重は再び上昇し、荷重点を挟んで反対側のせん断スパンのコンクリートもせん断破壊した(Photo 2(c)の[3])。最後に下層コンクリートのせん断破壊後、増厚層が曲げによりせん断ひび割れの拡大に抵抗し、最終的に増厚層の曲げひび割れが拡大して荷重低下した(Photo 2(c)の[5])。増厚層にせん断ひび割れは見られなかった。

4.3.2 最大荷重 増厚層の厚さが大きいほど最大荷重は大きくなった。いずれも下層コンクリートのせん断破壊後、増厚層が曲げ抵抗しているため、増厚層の厚さが影響したものと考えられる。

4.3.3 下層コンクリートせん断破壊時荷重 増厚層の厚さが大きいほど下層コンクリート部のせん断破壊時の荷重は大きくなる傾向はあるが、増厚層の材料や厚さによる顕著な差はなく、補強前(No.1)と比較して補強後(No.2~5)は3~4割程度の荷重増加であった。下層コンクリートがはじめにせん断破壊した時点で、増厚層はせん断破壊しておらず、下層コンクリート上面が増厚層によって拘束されることによる効果により下層コンクリート部のせん断破壊時の荷重が大きくなったと考えられる。

4.4 既往のせん断耐力式による評価

せん断耐力の計算値を既往の指針等に示されているコンクリートや鋼繊維補強コンクリートのせん断耐力式を用いて算出した。用いた計算式の一覧をTable 8に示す。コンクリートはコンクリート標準示方書[設計編]⁷⁾(以

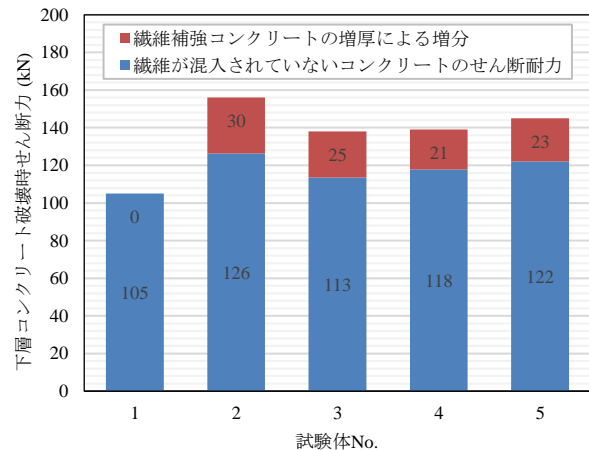


Fig. 6 下層コンクリートせん断破壊時せん断力 Shear Force of Concrete Layer

下、コン示), SFRCは鋼繊維補強コンクリート柱部材の設計施工指針(案)⁸⁾(以下, RSF柱指針), スティフクリートは超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)⁹⁾(以下, UFC指針)の式を用いた。計算結果はTable 6のとおりである。

増厚層の材料の繊維補強効果を見込まず、全断面をコンクリートとしてコン示により計算されるせん断耐力を算出した結果をTable 6の計算値(a)に示す。増厚していない試験体No.1のせん断耐力の実験値と計算値はほぼ同等であった。増厚した試験体では、実験による最大荷重は計算値の1.3~1.9倍であった。下層コンクリートがせん断破壊したときのせん断力と比較すると、実験値は計算値の1.2~1.3倍程度であり、下層コンクリートのせん断破壊を概ね安全側に評価できると考えられる。増厚していない試験体No.1のせん断耐力の実験値と計算値の比1.06を他の試験体の計算値に乘じ、実験値との差を増厚による増加分として整理したグラフをFig. 6に示す。増厚層の材料や厚さによらず、下層コンクリート破壊時のせん断力

の増分は20~30kN程度であった。

増厚層の材料の繊維補強効果を見込み、RSF柱指針およびUFC指針によりせん断耐力を算出した結果をTable 6の計算値(b)に示す。スティフクリートはUFC指針の適用範囲外であるが、構成材料はUFCに近く、他に適当な指針類がないことから、UFC指針を用いて試算した。コンシにより算出された下層コンクリートのせん断耐力とUFC指針により算出された上層材料のせん断耐力を単純に足し合わせると実験値は計算値の0.6~0.7倍程度となった。前述のとおり、実験では下層コンクリートと増厚層が同時にせん断破壊する形態ではないため、同時に破壊することを想定した計算値は実験値から乖離したものと考えられる。

以上より、せん断破壊型とした上面増厚コンクリート梁は下層コンクリートのせん断破壊が先行することがわかった。上面増厚により下層コンクリートのせん断耐力は増加する。ただし、Fig. 6のとおり、補強効果はあるものの繊維補強コンクリートの増厚による増分に差はなく、増厚層の材料強度や厚さが下層コンクリートのせん断補強には直接寄与していないと考えられる。補強効果の定量的な評価にはさらなる検討が必要である。

5. 上面増厚床版の輪荷重走行試験

5.1 概要

スティフクリートを用いて上面増厚された床版の輪荷重に対する疲労性能を確認するため、輪荷重走行試験を実施した。増厚する前の床版は劣化した床版を模擬するため、あらかじめ輪荷重走行により疲労負荷を与えた床版を用いた。

5.2 実験方法

5.2.1 試験体 試験体の概要をFig. 7に示す。試験体の平面寸法は長さ4.5m、幅2.8mである。SFRCにより補強された床版と比較するため、SFRCの増厚床版を対象に実施された既往の研究¹⁰を参考に鉄筋配置やコンクリート強度を設定した。コンクリート部は設計基準強度24N/mm²の普通コンクリートとし、鉄筋はSD345を用いた。

厚さ220mmのRC床版に輪荷重250kN走行回数10万回の予備荷重を実施した。予備荷重後の床版の状況をPhoto 3に示す。上面には橋軸直角方向のひび割れが数本発生した。下面には亀甲状にひび割れが発生し、ひび割れ密度は14.7m/m²であった。予備荷重後の増厚施工状況をPhoto 4に示す。床版上面を厚さ10mmで切削し、ショットブラストにより研掃した。研掃後、コンクリート表面は水を噴霧することにより湿潤状態を保ちながらスティフクリートを25mmの厚さで増厚した。実施工で管理可能な増厚最小厚さは30mmと想定しているが、安全側に増厚層を5mm薄くして検証することとした。増厚後の床版の厚さは235mmとなる。

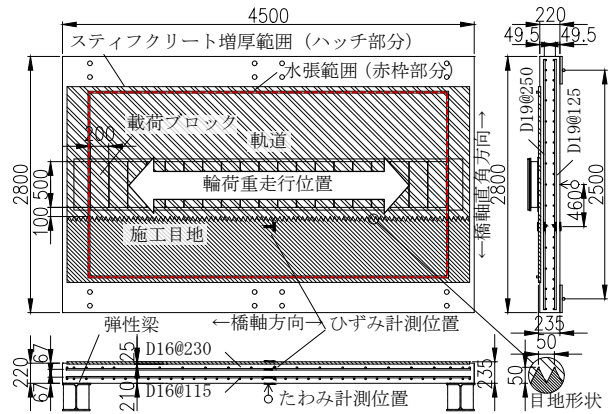
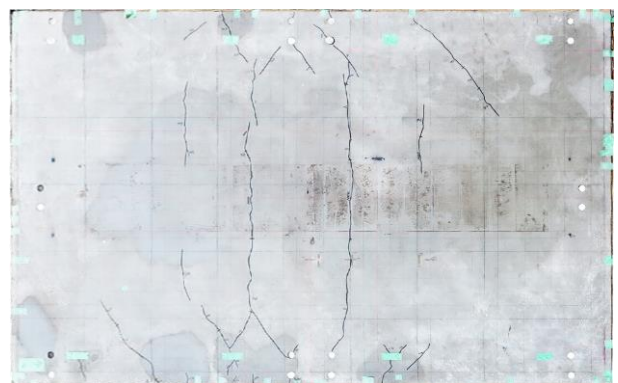
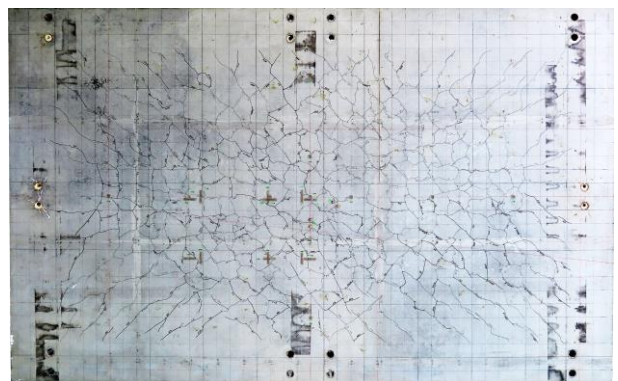


Fig. 7 輪荷重走行試験体 (増厚後)
Shape and Reinforcement of Wheel Load Running Test



(a) 上面



(b) 下面

Photo 3 予備荷重終了後の床版試験体状況
Specimen after Preloading

スティフクリート増厚層には、既往の研究¹⁰を参考に幅500mmの軌道から100mm離れた位置に軌道平行方向の施工目地を設けた。スティフクリートは軌道側を先に施工し、翌日に残りの部分を施工して打ち継いだ。施工目地は三角形の高さ50mm、間隔50mmの鋸歯形状とした。先打ちしたスティフクリートの打継面は打込み後2時間で脱型し、高圧水による洗い出しにより細骨材および鋼繊維が表面に出る状態とした。

スティフクリートの表面は金ゴテを用いて平滑に仕上げ、水分の逸散を防ぐため、シートにて養生した。

試験開始時における材料の諸元をTable 9に示す。交通

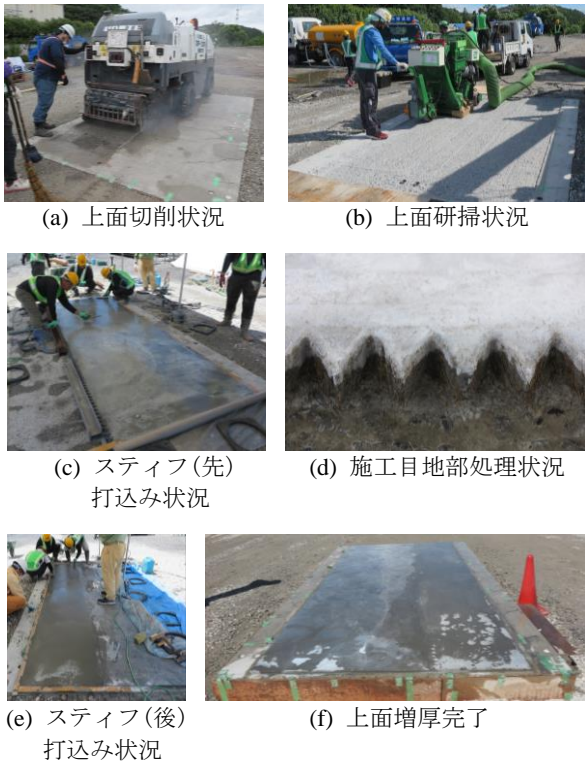


Photo 4 上面増厚床版試験体作製状況
Preparation of Specimen

開放直後の影響ではなく、長期疲労耐久性を確認することを目的としていることから、材齢28日以上を確保し、十分強度が発現した状態で試験を開始した。

5.2.2 載荷方法 増厚前の予備載荷および増厚後の本載荷は同一の試験機、支持条件とした。使用した輪荷重走行試験機はクランク式であり、幅500mmの鉄輪を試験体の中心から前後1.5m(全長3.0m)の区間で往復させた。試験体長辺は支間2.5mで単純支持し、短辺はH形鋼材(H300×300)の弾性梁により支持している(Fig. 7)。軌道には大型車後輪の接地面積と同一の200×500mmの載荷ブロックを配置し、上面に鋼板を敷いた。載荷荷重と走行回数(万回)の関係を図8に示す。本試験では高速道路においてPC床版の供用期間100年に相当する負荷として提案されている250kN×10万回¹⁾をひとつの目安とし、予備載荷および本載荷の載荷ステップを設定した。予備載荷では乾燥状態で250kN×10万回を載荷した。本載荷では乾燥状態で250kN×10万回を載荷した後、水性ペンキで着色した水を表面に張った状態でさらに250kN×10万回の載荷を実施した。その後、載荷荷重を300kNとし、床版から漏水が観察された時点で水張を終了し、たわみが試験できる限界の大きさになるまで載荷荷重300kNで走行を続けた。

5.2.3 計測 床版のたわみ(鉛直変位)、鉄筋ひずみ、スティフクリート表面ひずみをFig. 7に示す位置で計測した。計測時は輪荷重を床版中央で停止させ、静的に計測した。計測した時期はFig. 8のとおりで、試験体に発生したひび割れをあわせて観察した。走行回数10万回ごとの静的載荷では0~250kNまで50kNおきに床版のたわみおよびひずみを計測した。

Table 9 使用材料の諸元
Material Properties of Concretes

	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
(予)コン	33	31.1	2.89	-	26.6
(本)コン	102	34.7	2.69	-	26.9
スティフ(先)	48	160	9.37	10.9	47.2
スティフ(後)	47	165	9.08	10.6	46.3

* コン: コンクリート, スティフ: スティフクリート
(予): 予備載荷時, (本): 本載荷時, (先): 先打ち, (後): 後打ちを示す。

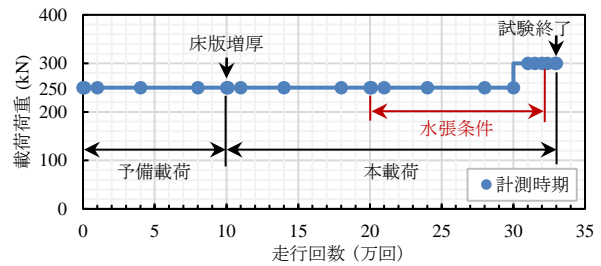


Fig. 8 載荷ステップおよび計測時期
Loading Program of Wheel Loading Test

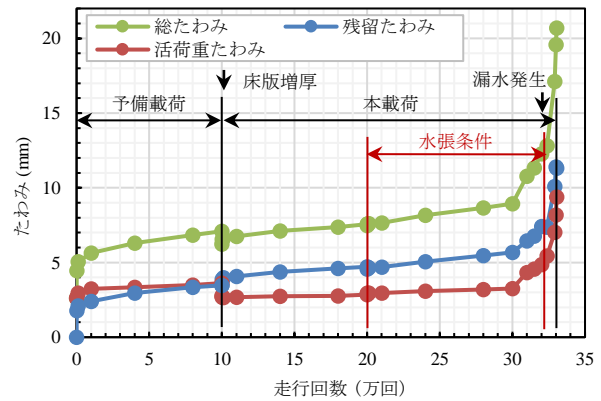


Fig. 9 たわみ-走行回数関係
Deflection - Cycle Relationship

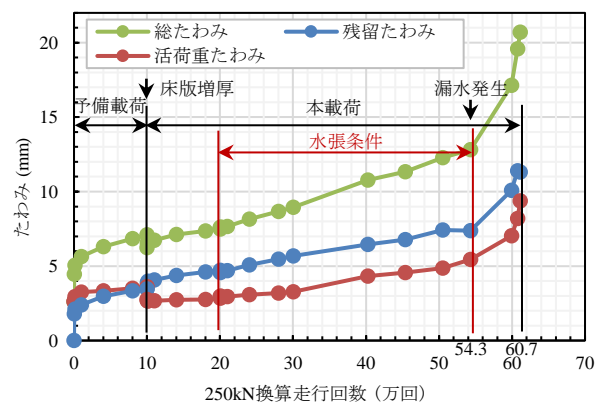


Fig. 10 たわみ-換算走行回数関係
Deflection - Cycle Relationship

5.3 実験結果

5.3.1 概要 実験結果を図9~12に、実験終了後の床版上面および断面のひび割れの状況をFig. 13およびPhoto 5~7に示す。総たわみは各ステップにおける荷重載荷時の値、残留たわみは荷重を載荷していない時の値、

活荷重たわみは総たわみから残留たわみを減じた値で各載荷荷重における弾性変化分を示している。本載荷開始時の残留たわみは予備載荷終了時の残留たわみとしている。換算走行回数は式(1)¹²⁾により求めた。基準輪荷重を250kNとしS-N曲線の傾きの逆数の絶対値は松井¹²⁾が提案する12.7を用いた。

$$N_{eq} = \sum (P_i / P_0)^m \times N_i \quad (1)$$

ここに、 N_{eq} ：基本輪荷重による荷重載荷回数

P_i ：輪荷重

P_0 ：基本輪荷重(=250kN)

m ：S-N曲線の傾きの逆数の絶対値(=12.7)

N_i ：輪荷重 P_i における載荷回数

最終的に下層コンクリートが押抜きせん断破壊することによりスティフクリート層にひび割れが発生して漏水し、たわみが急増し、実験を終了している。

5.3.2 たわみの経時変化 たわみと換算走行回数の関係をFig. 10に示す。増厚後、活荷重たわみは小さくなり、増加量も小さくなった。増厚直後の残留たわみの増加は、増厚試験体の再セットにともなう支点と試験体のなじみなどの影響が考えられる。水張をした20万回以降においても増加量に大きな変化は見られなかった。換算走行回数54.3万回の漏水発生時点で押抜きせん断によるひび割れが発生し、たわみは急増した。換算走行回数60.7万回で総たわみが20mmを超え、試験を終了している。各走行回数における載荷荷重と活荷重たわみの関係をFig. 11に示す。増厚により剛性が回復し、その後の載荷でも補強前に比べて剛性の低下が抑制できていることが確認できる。

5.3.3 床版断面のひずみ分布 増厚前後の橋軸直角方向断面のひずみ分布をFig. 12に示す。ここに示すひずみは各走行回数において、荷重を載荷した際に発生したひずみ（総ひずみ）である。予備載荷終了時点で床版中央付近では平面保持が保たれていないと考えられる。後述するように上筋に沿ったひび割れが観察されており、この時点で進展していた可能性が考えられる。上筋付近までコンクリートを切削していないため増厚後も平面は保持されておらず、表面のスティフクリートには引張ひずみが発生している。走行回数30万回(増厚後20万回)載荷後にスティフクリートのひずみはひび割れ発生ひずみである 200×10^{-6} 程度となっている。少なくとも増厚後250kN \times 20万回まではスティフクリート表面にひび割れは発生していなかったと考えられる。

5.3.4 ひび割れ状況 試験終了後の試験体上面のひび割れをFig. 13に、Fig. 13に示した施工目地付近の写真をPhoto 5に示す。スティフクリートの上面ひび割れは軌道近傍に押抜きせん断破壊した範囲を囲むように発生している。Photo 5のように施工目地付近にひび割れが多数発生しているが、鋸歯形状に沿った目開きではないことから、施工目地は弱点になっていないと考えられる。

Fig. 13に示す矢視の位置で切断した断面の写真をPhoto 6に示す。押抜きせん断による斜めひび割れが観察

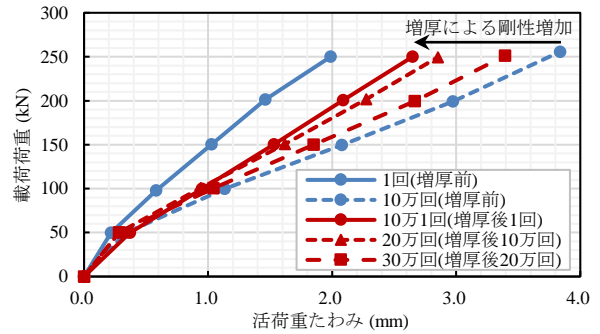
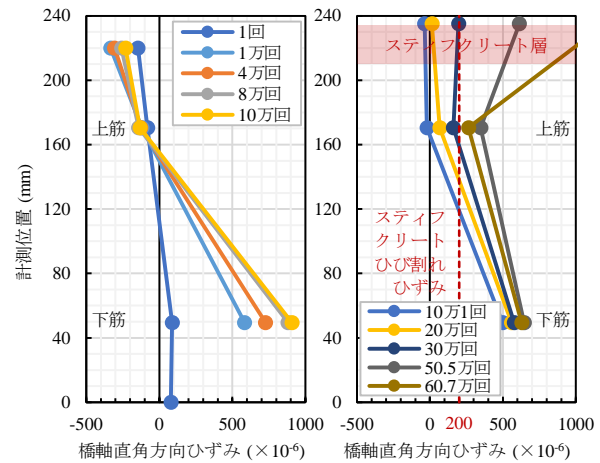


Fig. 11 載荷荷重－活荷重たわみ関係
Load - Deflection Relationship



(a) 増厚前 (b) 増厚後
Fig. 12 断面ひずみ分布
Strain Distribution

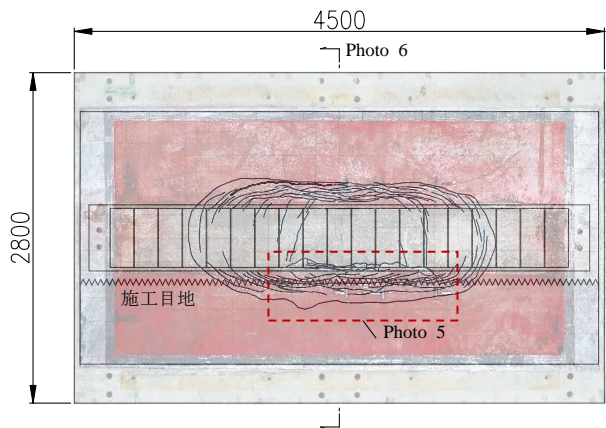


Fig. 13 床版上面スティフクリートのひび割れ
Cracks on the Upper Surface of the Specimen

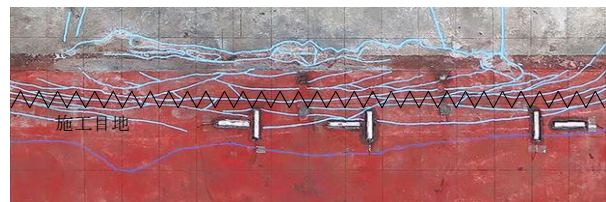


Photo 5 施工目地部のひび割れ状況
Cracks Near the Construction Joint

された。押抜きせん断破壊した範囲においてスティフクリート層とコンクリートの界面剥離が見られ、上筋に沿った水平ひび割れも観察された。一方、押抜きせん断破壊した範囲外では健全な状態で界面は付着していた。

Photo 6に示す施工目地付近の拡大写真をPhoto 7に示す。斜めひび割れがスティフクリート層を貫通している。スティフクリート界面に水張水による赤い着色やコンクリートが水で擦り磨かれたときに発生する泥濁物が見られない。試験において、床版下面に漏水が確認された時点で水張を終了していることから、スティフクリートのひび割れが貫通した時点でコンクリート部分には既にせん断ひび割れが入っており、水がコンクリート内に留まることなく下面に抜けたと考えられる。一般的にRC床版の劣化の要因のひとつとして、ひび割れに浸入した水の影響によりコンクリートが土砂化する事象が挙げられる。しかし、本実験ではコンクリート部分の水による土砂化はなく、コンクリートの押抜きせん断ひび割れが到達したことにより、スティフクリート層がひび割れ、たわみが急増したものと考えられる。

5.3.5 押抜きせん断耐力の評価 増厚された床版の押抜きせん断耐力を評価するため、松井¹²⁾が提案するRC床版の押抜きせん断耐力算定式(式(2))により増厚前の厚さ220mmの床版のせん断耐力を計算した。

$$P_{sx} = 2B(f_v x_m + f_i C_m) \quad (2)$$

ここに、

P_{sx} : 梁状化したRC床版の押抜きせん断耐力

$B = b + 2d_d$

b : 載荷板の橋軸方向の辺長(=200mm)

d_d : 配力鉄筋の有効高さ(=153mm)

f_v : コンクリートのせん断強度(=0.656 f'_c ^{0.606}N/mm²)

f_i : コンクリートの引張強度(=0.269 f'_c ^{0.667}N/mm²)

f'_c : コンクリートの圧縮強度(=31.1N/mm²)

x_m : 主鉄筋断面の中立軸深さ(=75.3mm)

C_m : 引張側主鉄筋のかぶり深さ(=40mm)

式(2)より、増厚前の床版の押抜きせん断耐荷力 P_{sx} =489kNと計算される。

載荷荷重 P =250kNとして載荷荷重せん断強度比と換算走行回数(万回)の関係を図14に示す。コンクリート部分に水の浸入がない乾燥状態を前提とした場合、松井¹²⁾が提案するRC床版のS-N曲線(式(3))と実験値はほぼ同等であり、増厚による押抜きせん断に対する補強効果は認められなかった。ただし、水張状態が考慮された式(4)では破壊までの走行回数が乾燥状態と比較して約1/15に低下すると計算される。

・乾燥状態において提案されているS-N曲線

$$\log(P / P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (3)$$

・水張状態において提案されているS-N曲線

$$\log(P / P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.23 \quad (4)$$

そこで水張を開始した換算走行回数20万回から漏水が発生し水張を終了した54.3万回までの34.3万回分の走行回数を14.9倍して換算すると、押抜きせん断破壊するま

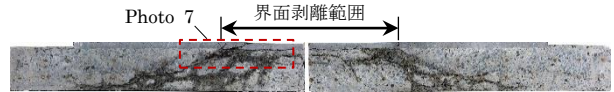


Photo 6 床版断面のひび割れ状況
Cracks of Cross Section

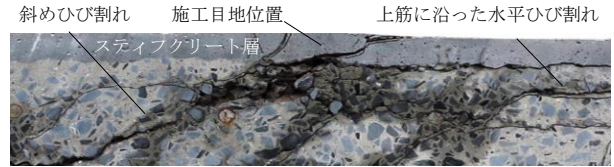


Photo 7 床版断面のひび割れ状況(拡大)
Cracks of Cross Section (Enlarged View)

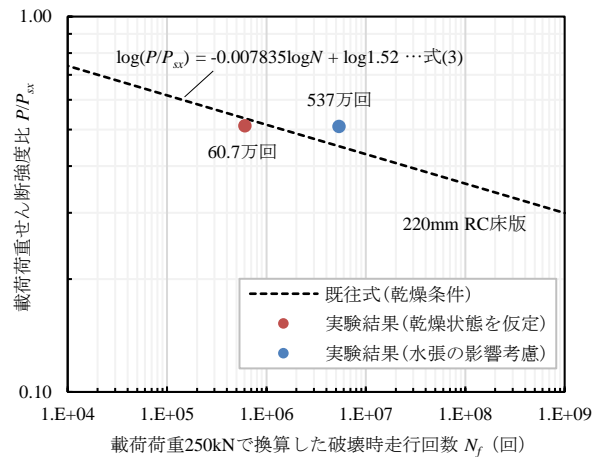


Fig. 14 S-N関係における実験結果
Test Result of Wheel Load Running Test

項目	材料	発生状況
界面剥離 ^{*1}	SFRC(A) ^{*2}	終了
	SFRC(B)	終了
	SFRC(E)	終了
	UHPFRC	終了
活荷重たわみ	SFRC(A)	急増
	SFRC(B)	増分変化なし(終了)
	SFRC(E)	急増
	UHPFRC	急増
漏水の発生	SFRC(A)	漏水発生
	SFRC(B)	漏水なし(終了)
	SFRC(E)	漏水発生
	UHPFRC	漏水発生
上面ひび割れの発生	SFRC(A)	ひび割れ発生
	SFRC(B)	ひび割れ発生
	SFRC(E)	ひび割れ発生
	UHPFRC	ひび割れ発生

*1 △: 剥離の兆候が見られた時点, ×: 完全に剥離した時点を示す。
*2 各試験体は増厚前の床版下面ひび割れ密度が以下のとおりである。
SFRC(A):11m/m², SFRC(B):12m/m², SFRC(E):11.9m/m²
UHPFRC(=スティフクリート):14.7m/m²

Fig. 15 輪荷重走行試験におけるイベント発生比較
Event Occurrence in Wheel Load Running Test

での走行回数は約511万回となる。乾燥状態で走行した水張開始前の20万回と水張終了後の6.4万回を511万回に加えることにより、破壊までの走行回数は約537万回と計算される。水の影響を考慮すればRC床版と比べて破壊まで

の走行回数は大幅に改善することになり、スティフクリートの防水性能が大きく寄与しているといえる。

5.3.6 SFRCによる増厚床版との比較 SFRCの増厚床版を対象に実施された既往の研究¹⁰⁾の結果を基本荷重250kNに換算し、各イベントが発生したタイミングを今回の実験結果とともにFig. 15に示す。増厚補強後の開始時点を走行回数0としている。既往の研究¹⁰⁾では押抜きせん断破壊に至るまで載荷されていないため、界面剥離、漏水や上面ひび割れの発生のみを比較している。SFRC(A, B, E)は既往の研究¹⁰⁾で実施されたSFRC増厚による結果である。増厚前の床版の損傷度合いがパラメータとなっており、Fig. 15の注釈に増厚前の床版下面のひび割れ密度を示す。スティフクリートは今回実施した実験で計測または観察された結果である。本検討では、増厚層表面をハンマーで叩いた打音により界面剥離を判断し、水張開始前には界面剥離の兆候がないこと、漏水発生後には界面剥離と判断される変化があったことを確認している。水張試験中は確認できなかったため、増厚層に発生しているひずみが大きく変化した時点を界面剥離の兆候と判断した。界面剥離、活荷重たわみ、漏水の発生、上面ひび割れの発生いずれにおいてもスティフクリートの方が優れていることが確認された。既往の研究¹⁰⁾では施工目地から剥離が進展しているが、今回の鋸歯形状で打ち継いだスティフクリートでは250kN×20万回の載荷でも界面剥離や漏水は生じておらず、鋸歯形状の施工目地が有効であったと考えられる。

6. まとめ

スティフクリートにより上面増厚した床版の補強効果および疲労耐久性を検討するため、コンクリートとの打継面の性能確認実験、上面増厚した梁の静的せん断実験と、上面増厚した床版の輪荷重走行試験を実施した。その結果、以下のことを確認した。

- 1) 下層コンクリートが先行してせん断破壊を生じる。
- 2) 下層コンクリートのせん断ひび割れ進展に伴い、スティフクリート層と下層コンクリートの界面にひび割れが生じる。
- 3) 下層コンクリートへのせん断補強効果に与える上面増厚層の材料強度や厚さの影響は小さい可能性がある。
- 4) スティフクリートにより上面増厚した床版はSFRCと比較して界面剥離や上面ひび割れ、漏水に対する抵抗性が高い。

以上より、スティフクリートによる上面増厚工法は床版劣化の抑制に対して有効であることが確認された。

今回の検討ではスティフクリートの厚さ30mm程度の補強により脆性的な押抜きせん断破壊を防止し、コンクリートへの水の浸入をSFRCと比べて抑制できることが確認できた。SFRCに代えてスティフクリートにより従来よりも薄く上面増厚することは有効であるといえる。

なお、床版の押抜きせん断に対する抵抗性は下層コンクリートのせん断強度に依存することから、下層コンクリートの健全度が重要となる。スティフクリートによる上面増厚工法を適用する既設床版の健全性を適切に評価することは今後の課題である。

参考文献

- 1) 牧田通ほか：道路橋床版の打替え・補強に対する超高強度繊維補強コンクリートの適用性の評価，土木学会第72回年次学術講演会講演概要集，pp.1097-1098，2017
- 2) 長山清一郎ほか：現場施工型の超高強度繊維補強コンクリートを用いた床版上面増厚工法に関する研究，土木学会論文集E1(舗装工学)，Vol.76，No.2，pp.I_61-I_67，2020
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価，技術推進ライブラリー，No.10，2022
- 4) 佐々木一成，川西貴士，大場誠道：防水性能を付与したプレキャスト床版「スリムトップ*」，大林組技術研究所報，No.85，2021
- 5) 東・中・西日本高速道路株式会社：NEXCO試験方法第4編 構造関係試験方法，2020.7
- 6) 永山功，渡辺和夫，小林正登：コンクリートのせん断強度についての実験的考察（その1），土木研究所資料，第2829号，1990.3
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2022
- 8) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案)，コンクリートライブラリー，No.97，1999
- 9) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，No.113，2004
- 10) 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集，Vol.32，No.2，pp.1345-1350，2010
- 11) 後藤俊吾，長谷俊彦，本間淳史，平野勝彦：PC床版の疲労耐久性評価方法の提案，構造工学論文集，Vol.66A，pp.762-773，2020.3
- 12) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007