報告 炭素繊維シートを用いた鉄道高架橋スラブの中性化抑止対策工法に関する検討

北田　宗一郎*1・吉田　幸司*2・他谷　周一*2

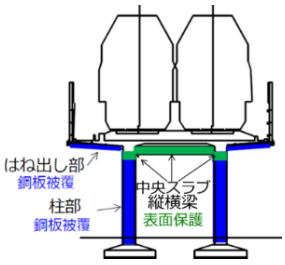
要旨：鉄道 RC 高架橋の中性化抑止対策である鋼板接着工の施工時に，高架下建物の外壁が支障する箇所を対象として，CF アンカーと炭素繊維シートを併用した対策工法を開発した。炭素繊維シート被覆構造の中性化抑止性，押し抜き抵抗性，耐候性そして耐荷性について検討を行い，各基準値に対する要求性能を満たす結果を得た。また外壁が支障しない箇所においては，CF アンカーを使用せず，炭素繊維シートで全面被覆する工法を検討し，設計計算及び試験施工により適用に問題がないことを確認した。

キーワード：中性化，炭素繊維シート，CFRP，CF アンカー

1.　はじめに

鉄筋腐食の劣化要因の一つにコンクリートの中性化があげられる。これに対し，東海道新幹線の RC 高架橋では中性化抑止対策として 2000 年より表面保護工（塗装系）[1)]を実施するとともに 2013 年からはね出しスラブの鋼板被覆 [2)]を行ってきた。東海道新幹線で適用されている表面保護工は，コンクリートとの接着性を向上するための下地処理材，二酸化炭素や酸素などのコンクリートの劣化要因を遮断する主材（中塗り材），紫外線などから主材を保護する上塗り材により構成される。表面保護工施工にあたり，東海道新幹線独自の標準である「東海道新幹線鉄筋コンクリート維持管理標準」[1)]を制定し，中性化抑止性，酸素遮断性など，劣化因子を遮断する基準を定めた。一方，はね出しスラブ箇所は，防音壁に風荷重が作用することで，表面保護にひび割れが発生することが懸案されたため，ひび割れが発生しない鋼板で被覆を行っている。**図－1** に中性化抑止対策の施工位置図を示す。

本稿では従来工法であるはね出しスラブの鋼板接着工を代替する炭素繊維シート(CFRP)と繊維アンカー(以下，CF アンカー)を使用した中性化対策工を検討した内容を報告する。

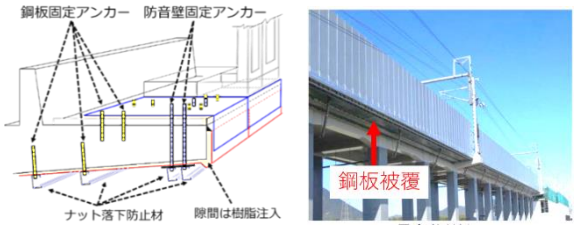


図－1　中性化抑止対策図

2.　従来工法の課題

図－2 に鋼板接着工の概要を示す。鋼板接着工ははね出しスラブの上下面に鋼板をアンカーで固定し，鋼板とはね出しスラブ表面の隙間を樹脂で充填する。鋼板は防食性が非常に高い，高耐腐食性メッキ鋼板(型番:NSDH400-K18,厚さ:t=2.3mm)を使用している。

図－3 に示すように高架下に建物があり，外壁が設置されている箇所で従来工法を適用する場合には，鋼板を設置するために外壁を取り壊す必要があり，協議を伴うため施工が難しい箇所である。したがって，支障移転が不要あるいは最小限とするはね出しスラブ下面の対策工法を検討した。



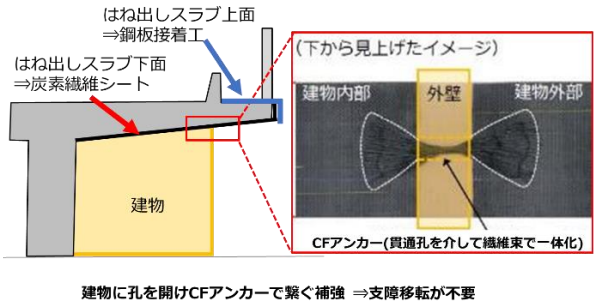
(a) 鋼板接着工断面図　　(b) 鋼板接着工写真

図－2　鋼板接着工

(a) 写真　　(b) 断面図

図－3　高架下建物箇所

*1 東海旅客鉄道株式会社　技術開発部　工修　(正会員)　〒485-0801　愛知県小牧市大山 1545 番 33
*2 東海旅客鉄道株式会社　技術開発部　工博　(正会員)　〒485-0801　愛知県小牧市大山 1545 番 33



図－4　対策工法図

高架下建物箇所の対策工法のイメージを**図－4** に示す。スラブ下面において，炭素繊維シートを支障する建物壁の前後に分割して貼り付け，壁に小径の孔を開け，CF アンカーを通して繊維シート双方を接続・定着し，一体化する被覆方法を適用した。CF アンカーは，支障物がある高架橋柱の耐震補強等で使用されており，炭素繊維シートと同じ材質の素線 24,000 本を一束(ストランド)とし，これを太さ 10～20mm の紐状で取りまとめたものである。なおスラブ上面においては従来通り鋼板を適用する。

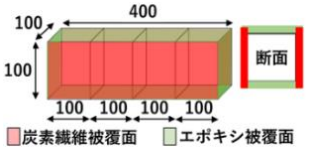
3.　適用性の検証

炭素繊維シートの適用性を検証するため，現行の表面保護工と同程度の性能基準 [1]を満たしているか検証を行った。

3.1　中性化抑止性について

まずは主要目的である中性化抑止性について検証を行った。検証は「JHS417-2004 コンクリート塗装材の品質規格試験方法」に準じて行う。試験体は JIS R 5201:1997 に準じて作成する。具体的には**図－5** に示すように，立方体のコンクリート試験体の 2 面に検証を行う炭素繊維シートを被覆し，他の面は CO_2 が侵入しないようエポキシ樹脂でコーティングした試験体を用いる。なお炭素繊維シートの物性値は**表－1** の通りである。炭素繊維シートの塗装仕様は**図－6** に示すように，中性化抑止性および耐候性を確保するために，フッ素系塗料をエポキシ系含浸接着樹脂の上に重ね塗りした塗装構造とした。

この試験体を温度 23±3℃，湿度 60%，CO_2 濃度 5%の試験室内に 70 日間静置後，中性化深さを測定する。測

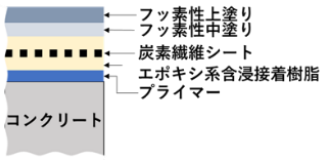


単位:mm

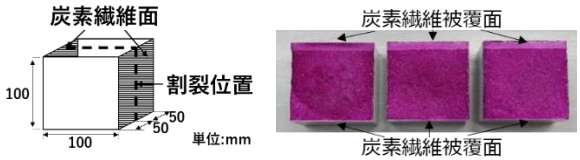
図－5 試験体作成図

表－1 炭素繊維シート物性値

炭素繊維規格	物性値
炭素繊維シート（主方向） 中弾性型FTS-C5S-30	引張強度800N/mm² 弾性係数4.4×105N/mm² 目付量300g/m²，厚さ0.163mm



図－6 被覆断面構造



(a) 割裂位置　　(b) 試験結果

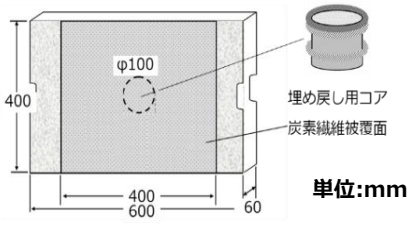
図－7　試験概要

定方法は**図－7 (a)** に示すように割裂させた試験体断面に反応境界までの長さを中性化深さとして計測する。試験フェノールフタレインを噴霧し，コンクリート表面から結果を**図－7 (b)** に示す。中性化深さの基準値が 3mm 以下 [1]であることに対し，試験結果は 0mm であり，十分な中性化抑止性を有していることを確認した。

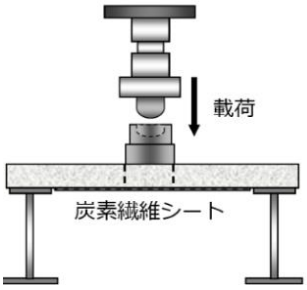
3.2　押し抜き抵抗性について

炭素繊維シートは公衆災害防止として，剥落抑止効果があるかを確認するため，押し抜き荷重の抵抗性を検証した。

検証は「JHS424-2004 はく落防止の押抜き試験方法」に準拠して行う。試験体は「JIS A 5371:2000」に準じて作成する。具体的には**図－8** に示すように，コンクリート板をコア抜きし，抜いたコアを戻してセメントモルタルで仮接着させたコンクリーに炭素繊維シート被覆して作成する。なお炭素繊維の物性値は**表－1** と，被覆構造は**図－6** と同様である。**図－9** に示すようにコア部分に載



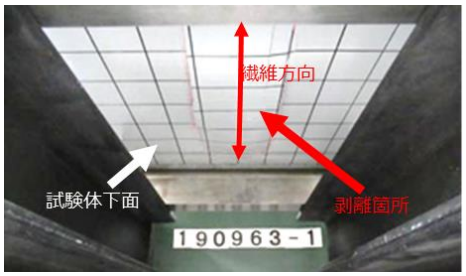
図－8　試験体作成図



図－9　試験概要図

表－2　試験結果

	試験体1	試験体2	試験体3	平均
押し抜き抵抗値(kN)	2.72	2.87	2.67	2.80



図－10　載荷後の試験体

荷し，最大荷重を押し抜き抵抗値とする。

表－2 に試験結果を示す。既存の表面保護工の押し抜き荷重の基準値は 1.5kN[1]だが，試験体 3 体の平均値は 2.80kN であり十分な押し抜き抵抗性を有していることが分かった。**図－10** に試験体下面からみた試験状況を示す。繊維に沿って変形したが繊維の破断は生じなかった。

3.3　耐候性について

炭素繊維シートによる工法が耐候性を有しているか検証を行った。劣化促進は耐候性試験機（スガ試験機製 SX75）を用いて，「JIS K 5600-7-7　促進耐候性及び促進耐光性(キセノンランプ法)」によって促進耐候性試験(方法 I，サイクル A）を実施した。なお試験基準は表面保護工と同基準の放射照度 75W/m^2，試験時間 3,000 時間 [1] である。試験体は JIS K 5600: 2004 に準じて 3 体製作試験を行った。なお炭素繊維の物性値は**表－1** と，被覆構造は**図－6** と同様である。**図－11** に試験時間 3,000 時間照射後の試験結果を示す。試験後は劣化の基準となる割れ,剥がれ,白亜化,変色などが 3 体の試験体全てで見られず，十分な耐候性を有していることを確認した。

(a) 試験前　　(b) 試験後

図－11　耐候性試験状況

3.4　耐荷性の検証

防音壁に単位面積当たりの設計風荷重 [3](3.0kN/m^2) が作用した際に，炭素繊維シート及び CF アンカーに剥離や破断が生じないか把握するため，実物台模型を用いた載荷試験を行った。**表－3** に試験体諸元，**図－12(a)** に試験概要図を示す。はね出しスラブ先端地覆部に鋼製の防音壁（高さ 3.35m）を取付け，**図－12(b)** に示す位置にジャッキ・ロードセルをセットし，水平方向に風荷重を模擬した載荷を行った。設計荷重は単位面積当たりの荷重であるため，ジャッキによる集中荷重 P を**図－13(a)** に示す防音壁の受圧面積 A で割り戻した値を使用する。なお**図－13(b)** に示すように集中荷重の作用位置は面積 A の重心位置より高いため，防音壁根本に発生するモーメントが大きくなる。従って集中荷重を受圧面積 A で割り戻し，アーム長の比を乗じた式(1)と設計荷重を比較した。

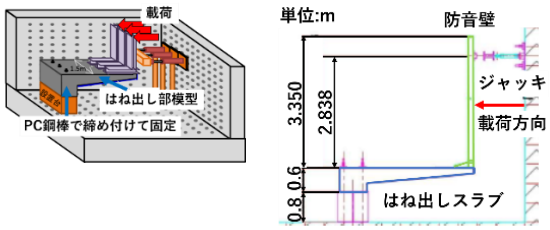
$$w = \frac{y_1}{y_2} \cdot \frac{P}{A} \qquad (1)$$

w：換算した分布荷重(kN/m^2)
y_1：本実験での集中荷重作用位置(m)
y_2：受圧面積の重心位置(m)
A：防音壁の受圧面積(m^2)
P：集中荷重(kN)

図－14 に試験体の断面の配筋図，**図－15** に試験体を見上げた配筋図を示す。試験体は東海道新幹線の標準高架橋と同じ寸法で製作した。

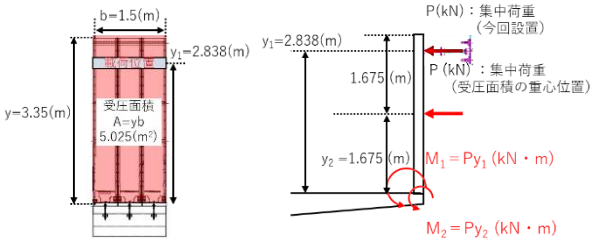
表－3　試験体諸元

コンクリート	24-12-20H
鉄筋	SD295-D13･D16，SR235-φ9･φ13
炭素繊維シート（主方向） 中弾性型FTS-C5S-30	引張強度800N/mm^2 弾性係数4.4×10^5 N/mm^2 目付量300g/m^2，厚さ0.163mm
CFアンカー　FTA-C1-72	炭素繊維ストランド本数130本



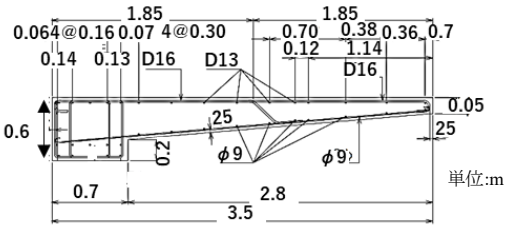
(a) 全体図　　(b) 断面図

図－12　試験概要図

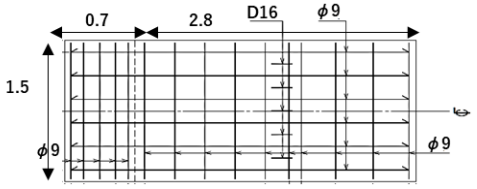


(a) 防音壁正面　　(b) 防音壁側面

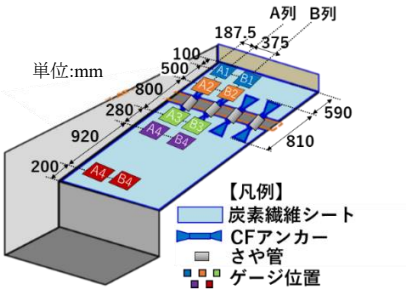
図－13　荷重位置図



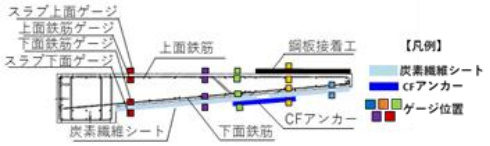
図－14　配筋図（試験体断面）



図－15　配筋図（試験体見上げ図）　単位:m



図－16　試験体概要図



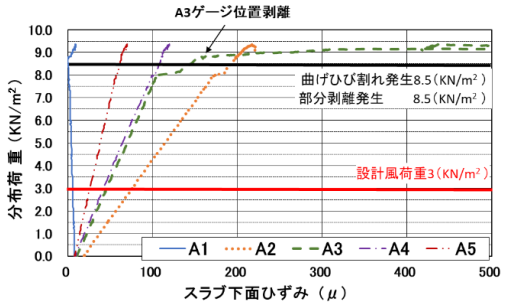
図－17　試験体概要図（試験体断面図）

図－16 に試験体の概要図を示す。建物壁を想定して壁孔を模擬したさや管（φ20mm）を設け，CF アンカーを通し，炭素繊維シート双方に貼り付けた。炭素繊維シート及び CF アンカーに剥離や破断が生じた際のひずみを把握するため，図－16 に示すように A 列と B 列にひずみゲージを設置し,また試験体断面の平面保持が成立するか確認するため，図－17 に示すように試験体上面位置，上面鉄筋位置，下面鉄筋位置，試験体下面位置にひずみゲージを設置した。

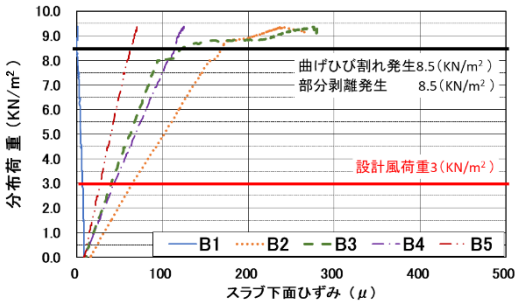
図－18, 19 に炭素繊維シートに発生するひずみと分布荷重の関係を示す。分布荷重が 8.5 kN/m^2 時点で，はね出しスラブ下面に曲げひび割れが生じ，同時に CF アンカーと炭素繊維シートに部分剥離が生じた。発生位置については図－20 に示す。その後も載荷を続けた結果，ひび割れの進展とともに下面鉄筋のひずみも増加し(図－21)，9.37kN/m^2 時点でジャッキのストロークエンドとなり試験を終了した。設計上の異常時風圧を想定した設計荷重[3)]が 3kN/m^2 であるのに対し，曲げひび割れ及び部分剥離が生じた水平荷重は 8.5 kN/m^2 であった。したがって設計値の 2 倍以上の風荷重が作用しても炭素繊維シートの剥離や破断が生じないことが分かった。

図-21 に A3 位置における試験体断面のひずみ分布を示す。炭素繊維シートが剥離するまでは平面保持が成立することが把握できる。

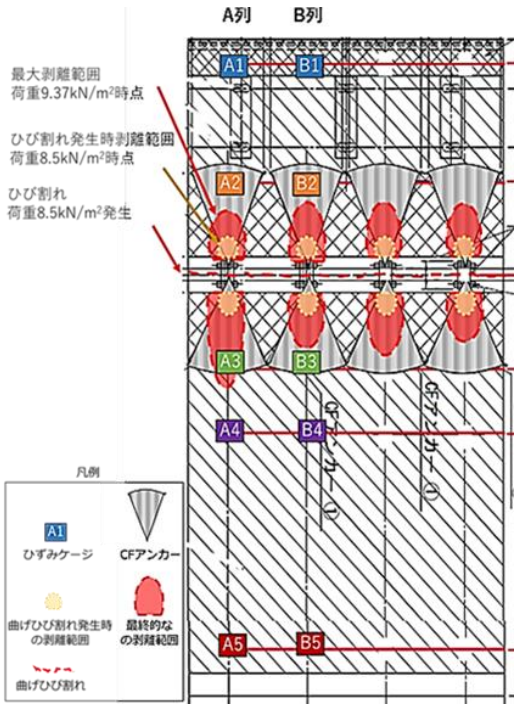
結果として設計風荷重に対して十分な余裕があることから，本構造の適用に問題がないことを確認した。



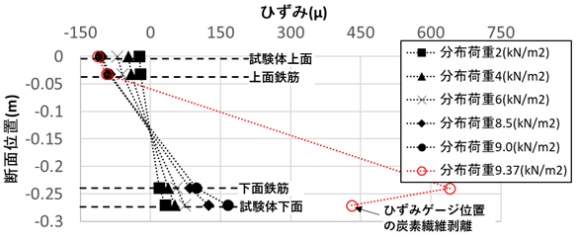
図－18　A 列のひずみ荷重関係



図－19　B 列のひずみ荷重関係



図－20　試験体見上げ図



図－21　A3 位置の断面に対するひずみ分布

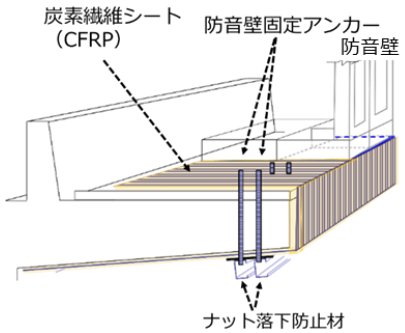
4.　はね出しスラブ上下面の炭素繊維シート被覆

適用性の検証により，はね出しスラブ下面の炭素シート被覆について，CF アンカー含め，被覆性能が表面保護工の基準を満足した。そこで，**図－22** に示すようにはね出しスラブの上面側も炭素繊維シートで被覆する方法が施工時間とコスト面において有用であると考え，詳細ディテールの検討と合わせて，適用の可否を検証した。

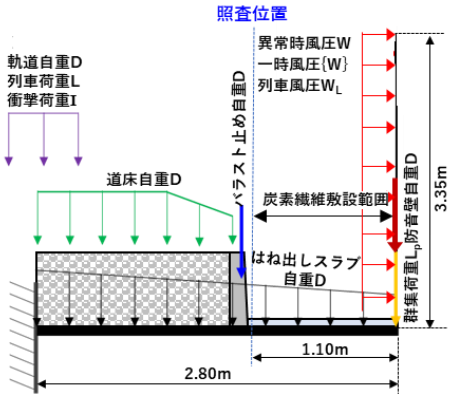
4.1　はね出しスラブ上面の適用性の検証

3.4 節での耐荷力の検証では，スラブ上面側が引張りとなる条件での検証が出来ていないため，上面の引張耐力を検証することとした。スラブ上面に発生する引張り応力を算定し，引張り応力に対して炭素繊維シートの引張強度と付着強度が上回っているか照査した。引張応力ははね出しスラブに作用する荷重から曲げモーメントを算定し，平面保持の仮定から力のつり合い式により算定した。曲げモーメントの算定に使用する荷重は**図－23** に示す種別を使用し，荷重の組合せは**表－4** に示す 3 パターンで実施した。なお荷重の値，荷重の組合せ，作用係数に関しては鉄道構造設計標準 [3]を準用して決定した。発生引張応力を算定した結果，運転中止中を想定した荷重組合せで，**図－23** に示す照査位置の発生引張応力が最大となり 13(N/mm^2)であった。炭素繊維シートの引張強度と発生引張応力との比較を式(2)に示す。炭素繊維シートの引張強度は 695(N/mm^2)であり，発生引張応力 13(N/mm^2)を大きく上回る結果となった。次に「FRP 接着による構造部の補修・補強指針(案)[4]」の剥離破壊の検証式式(3)を使用し，付着強度が発生引張応力を上回っているか検証した。炭素繊維シートの付着強度 1643(N/mm^2)は発生引張応力 13(N/mm^2)を大きく上回る結果となった。

双方の照査で発生応力以上の強度があることを確認



図－22　上下面炭素繊維シート被覆の概略図



図－23　スラブ上面の荷重条件

表－4　荷重組合せ

ケース	風荷重	荷重組合せ	備考
列車通過直前	W$_L$ 列車風圧 {W}一時風圧	D+W$_L$+{W}	
列車通過中	{W}一時風圧	D+L$_p$+L+I+{W}	
運転中止	W異常時風圧	D+1.2W	作用係数：1.2

したため，スラブ上面においても炭素繊維シートによる被覆が可能と判断した。

$$\sigma_f < \frac{f}{\gamma_b} \tag{2}$$

$$\sigma_f < \sqrt{\frac{2G_f E_f}{n_f t_f}} \tag{3}$$

σ_f：発生引張応力(N/mm^2)(=13N/mm^2)

f：炭素繊維シートの引張強度(N/mm^2) (=800N/mm^2)

γ_b：炭素繊維シートの部材係数(=1.15)

n_f：炭素繊維シートの積層枚数(=1 枚)

t_f：炭素繊維シートの 1 枚当たりに厚さ(mm) (=0.163mm)

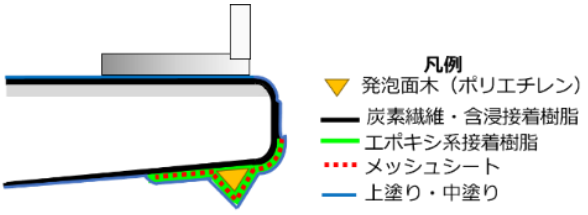
G_f：炭素繊維シートとコンクリートの界面はく離破壊エネルギー(N/mm) (=0.5N/mm^2)

E_f：炭素繊維シートのヤング係数(N/mm^2) (=4.4×10^{5}N/mm^2)

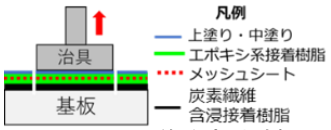
設計計算で算出した同断面位置における引張り鉄筋の発生応力は，5N/mm^2 であり，鉄筋（SD295A）の降伏強度 295 N/mm^2 を大きく下回りはね出しスラブの構造としても問題がないことを把握した。

4.2　遮水対策の検討

水は鉄筋腐食の要因となるため，水がかりの影響を配慮し，水切り工を設置することを検討した。当初は発泡面木をはね出しスラブ下面に貼り付け，その上から炭素



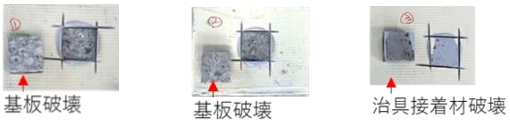
図－24　水切り工



図－25　付着強度試験概要図

表－5　付着力試験結果

試験体名	試験体 1	試験体 2	試験体 3	平均
付着力(kN/m²)	5.01	7.74	5.76	6.17



(a) 試験体 1　(b) 試験体 2　(c) 試験体 3

図－26　付着力試験結果

繊維シート被覆することを考えたが，折り曲げ箇所に応力集中する可能性がある。したがって**図－24** に示すように含浸接着剤の上に発泡面木を貼り付け，その上からさらにメッシュシート(ガラスクロス)で被覆する構造を検討した。本構造において十分な付着性能があるか把握するため，試験体を作成し，付着強度試験を実施した。

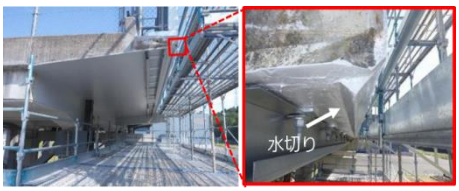
付着強度試験は JSCE K531-1999 を準用した。具体的には**図－25** に示すように基板の上にメッシュシートを挟んだ層構造を再現し，接着させた治具を付着力試験機にて引張ることで付着強度を測定するものである。

表－5 に付着強度試験結果を記載する。付着試験は試験体 3 体で行ったが，全結果で東海道新幹線コンクリート維持管理標準の表面保護工の付着力の基準値[1)]1.0(N/mm²)を大きく超えており十分な付着性能を有していることを確認した。

図－26 に付着力試験の試験結果を示す。全ての試験体で検討対象層ではない箇所の破断であったため，メッシュシートの付着力は**表－5** の結果以上の値と考えられる。

4.3 試験施工の実施

前述した水切り工が隙間なくはね出しスラブと一体化できるか，また，はね出しスラブ上面の炭素繊維シートの施工で不具合がないか確認するため，本線の高架橋と同寸法，同材料，同配合である試験施工専用の高架橋で試験施工を行った。**図－27** に施工状況を示す。水切り工は問題なく施工でき，施工途中や仕上がり状態に不具合は生じなかった。



図－27　試験施工結果

図－28　本線試験施工結果

4.4 本線での対策工法の施行

CF アンカーを用いた炭素繊維シートによる対策工法について，高架下建物の利用がある RC ラーメン高架橋を対象に本線施工を実施した。施工完了後の状況を**図－28** に示す。当該箇所は倉庫として利用されており，建物の上部の一部を切欠き，CF アンカーを通して，壁の内外を炭素繊維シートで被覆した。本施工箇所と同条件の場所で今後施工を進めていく。

5. まとめ

- 高架下に建物がある RC 高架橋を対象とした炭素繊維シートと CF アンカーを併用した工法を含め，作業性向上を目的にはね出しスラブの上下面を炭素繊維シートで被覆する工法を開発した。
- 本工法を適用するにあたり，炭素繊維シート被覆時の中性化抑止性を検証し，表面保護工の基準以上の抑止効果があることを確認した。
- 押し抜き抵抗性，耐候性，耐荷性は全て基準値を満たすことから適用に問題がないこと判断した。
- 炭素繊維シートの引張強度と付着強度に対して照査を行い，はね出しスラブ上面の引張応力に対して十分な強度を有していることを確認した。
- 高架橋本体に水が掛らないよう水切り工の構造を検討した。付着力試験により水切り工の接着構造に問題がないことを確認した。
- 上下面の炭素繊維シート接着工の試験施工を行い，施工上問題がないことも確認した。
- 本線の施工を実施し問題がないことを確認した。

6. 参考文献

1) 日本鉄道施設協会：東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準，1999.7

2) 吉田幸司，関雅樹，加藤千博，六郷恵哲：東海道新幹線大規模改修工事コンクリート橋はね出し部対策の開発概要と保護モルタルの仕様，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.1423-1428，2014.7

3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），2007.1

4) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)，pp.76-77，2018.7