

炭素繊維複合パネルを用いた コンクリート構造物の補修・補強工法

CF パネル工法[®]の開発とトンネル補修、柱耐震補強への適用

河村 圭亮・新藤 竹文・菅野 道昭

著者らは、狭隘部での人力施工および比較的短時間での施工が可能な工法として、炭素繊維シートを2枚のフレキシブルボードで挟み込んだ複合パネルを用いたRC部材の補修・補強工法「CFパネル工法」(以下「本工法」という)を開発した。本工法のトンネル覆工コンクリートの剥落防止工への適用について、押し抜き試験を実施して、NEXCO 規定値を満足する剥落防止性能を有することを確認した。さらに、本工法のRC柱の耐震補強への適用について、柱試験体の正負交番載荷実験を実施し、従来の連続繊維シート巻立て工法と同等以上の耐震補強効果が得られることを明らかとした。

キーワード：炭素繊維シート、補修、補強、プレキャスト、トンネル、剥落防止、柱、耐震補強

1. はじめに

我が国では、高度経済成長期以降に集中的に整備された社会資本の老朽化が問題となっている¹⁾。社会資本の戦略的な維持管理を進めていくことが重要であり、各種コンクリート構造物の補修・補強工事が積極的に進められている。特に、地震大国である我が国では、各種の耐震設計基準が見直されてきており、現行の基準を満足しない既存不適格構造物の耐力や変形性能(靱性)の向上を目的とした耐震補強の重要性が強く叫ばれている現状にある。

補修・補強を行う上で、作業空間に制約を受けるために狭隘部での人力施工を余儀なくされる場合も多くある。このような施工条件において、炭素繊維やアラミド繊維等の連続繊維シートをコンクリート表面に接着させる工法^{2)~4)}が有効であるが、この種の繊維シート接着工法は、現地で樹脂含浸による接着作業を1層ごとに行う必要があるため、要求される補強効果が高いほどシートの積層数が多くなるため、樹脂含浸作業や硬化養生に要する日数が増加することが課題である。また、コンクリート表面を平滑にするための入念な下地処理や施工後の劣化を防止するための表面保護が必要である。

これらの施工面での課題を解決し、施工の効率化と工程短縮を可能とする補修・補強工法として、著者らは、プレキャスト化した複合パネルを用いる本工法を開発した。

ここでは、本工法の概要を紹介するとともに、本工

法のトンネル覆工コンクリート剥落防止工への適用事例、および、RC柱耐震補強への適用性について以下に詳述する。

2. 本工法の概要

CFパネル(以下「本パネル」という)は図-1に示す通り、炭素繊維シートを厚さ3mmのフレキシブルボード(JIS A 5430 繊維強化セメント板)の上でエポキシ樹脂により含浸・接着し、その上に厚さ3mmのフレキシブルボードを重ねて一体成形した3層構造の複合パネルである。1方向あるいは2方向に接合部を有する「本体パネル」とフレキシブルボードの片面のみに炭素繊維シートを接着した「接合パネル」から構成される。本工法は、本パネルをコンクリート

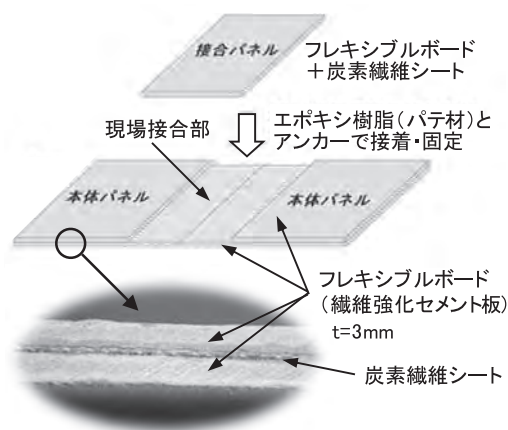


図-1 本パネル

構造物表面に設置し、パネルとコンクリートとの隙間に充填材として無収縮モルタルまたはエポキシ樹脂を注入して一体化させるものである。

本パネルは約 10 kg/m^2 と軽量であり、従来の繊維シート接着工法と同様に、重機を用いることなく人力での搬入・設置作業が可能である。そのため、本工法は作業空間に制約を受ける狭隘な場所での施工にも適する。また、樹脂含浸作業の大部分を予め工場で行うため、現地での含浸作業や硬化養生を必要とせず、繊維シート積層数が多いほど施工時間の短縮が可能である。夜間の短時間作業が求められる場合やできるだけ稼動休止時間を低減したい場合等、作業時間や工期に制約を受ける場合に特に有効な工法である。

3. トンネル覆工コンクリートの剥落防止工への適用

(1) 概要

トンネル覆工コンクリートの剥落防止の目的でトンネル内側から本パネルを接着させる。これにより、物理的にコンクリート片が落下しないようにして、第三者被害を防止するものである。なお、剥落防止工に用いる本パネルの繊維目付量は 200 g/m^2 程度を標準としている。

(2) 施工方法

トンネル覆工コンクリートの剥落防止工へ適用する場合の施工手順を写真—1に示す。

既設コンクリート表面の洗浄等の下地処理を行い、プライマーを塗布した後、仮固定用アンカーにて本体

パネルを取り付ける。本体パネルどうしの接合目地部は接合パネルを接着し、固定させる。パネル設置後、目地部および端部のシールを行い、予め設けた注入孔から充填材を注入して施工完了となる。

(3) 剥落防止性能の評価

コンクリート片の剥落に対する本パネルの抵抗性について評価するため、NEXCO 試験法 734「トンネルはく落防止用繊維シート接着工の押し抜き試験方法」⁵⁾ に準じた試験を実施した。使用した炭素繊維シートは、目付量 200 g/m^2 、2方向（1方向 100 g/m^2 ）のものである。評価したケースは、一般部（無収縮モルタル充填またはエポキシ樹脂注入）、接合部（エポキシ樹脂注入）の3ケースとした。

試験体中央部の変位 50 mm 以内の最大荷重を表—1に示す。いずれのケースも、無筋区間の小片剥落に対する最も厳しい規定値⁶⁾の 1.1 kN 以上を十分に上回る良好な結果が得られた。試験結果より、本工法で補強を行うことでコンクリート片の剥落に対して十分な抵抗性を有していることが検証できた。

(4) 延焼性能の評価

本パネルの表層は、不燃材のフレキシブルボードで覆われているが、中央の繊維シート層は可燃性のエポキシ樹脂を用いている。そこで、本パネルの延焼性、自己消化性について評価するため、NEXCO 試験法 738「トンネル補修材料の延焼性試験方法」⁵⁾ に準じた試験を実施した。使用した炭素繊維シートは、目付量 200 g/m^2 である。試験は、一般部と接合部の2ケースについて実施し、いずれも無収縮モルタルを充填した。



①本体パネル設置



②接合パネル設置



③充填材注入



④施工完了

写真—1 トンネル覆工コンクリートの剥落防止工に適用する場合の施工手順

表—1 押し抜き試験結果

ケース	パネル種類	注入材種類	変位 50 mm 以内での最大荷重 $P_{\max}$ (kN)				判定	判定基準
			No.1	No.2	No.3	平均		
Case-1	一般部	無収縮モルタル	8.83	8.51	9.50	8.95	合	1.1 kN 以上
Case-2	一般部	エポキシ樹脂	10.14	9.36	8.49	9.33	合	
Case-3	接合部	無収縮モルタル	8.46	8.57	6.91	7.98	合	

* 試験体は各ケース3体で実施

表一 延焼性試験結果

ケース	パネル種類	試験体	消炎 時間 (秒)	上端方向 延焼範囲 (mm)	判定
Case-1	一般部	No.1	2	93	合
		No.2	0	104	
Case-2	接合部	No.1	24	171	合
		No.2	25	114	
	判定基準		30 秒 以下	600 mm 以下	

消炎時間および上端方向延焼範囲を表一に示す。一般部、接合部のいずれも規定値⁶⁾を満足する結果が得られている。接合部は、一般部と比べて繊維シートの層数が多く、接合パネルもエポキシ樹脂で接着するため、一般部よりもエポキシ樹脂の使用量が多い分、消炎時間が長くなる傾向が認められる。

一般部、接合部に因らず、加熱開始後に早い段階で、加熱部の100 mm程度の範囲でフレキシブルボードの剥離は認められるが、いずれも規定値⁶⁾を満足していることから、本パネルは火災を受けた場合でも延焼を抑制する性能を有していると言える。

4. RC 柱の耐震補強への適用

(1) 概要

耐震補強では、変形性能（靱性）を確保するために設計上必要となる炭素繊維シート目付量が $1,000 \text{ g/m}^2$ 以上となる場合も多くあり、その分、シート積層数も多くなる。

本工法を適用する場合、図一に示すように予め工場にて柱形状に合わせてコの字型や半円形型に加工した本パネルを柱周囲に設置する。プレキャスト化により現地作業は大幅に軽減されるが、本パネルどうしの接合は現地での作業となる。そこで、接合部においても一般部と同等以上の性能が確実に得られる接合方法で、かつ複数層の繊維シートの一体化が比較的容易に作業できる新たな接合構造を開発した。

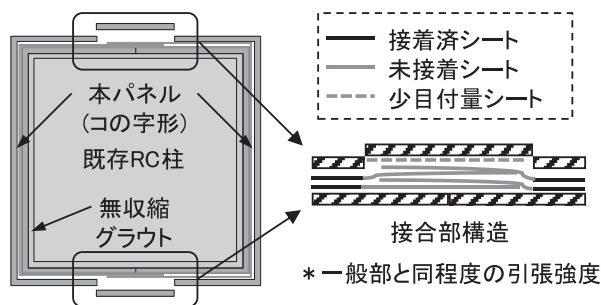
接合部引張試験結果の一例として、炭素繊維シート $600 \text{ g/m}^2 \times 2$ 層のものを図一に示す。接合部引張強度は $4,017 \text{ N/mm}^2$ （5体平均）で、使用した炭素繊維シートの規格引張強度（ $3,400 \text{ N/mm}^2$ ）を上回り、開発した接合部構造は一般部と同等以上の引張強度が得られることが分かる。

(2) 施工方法

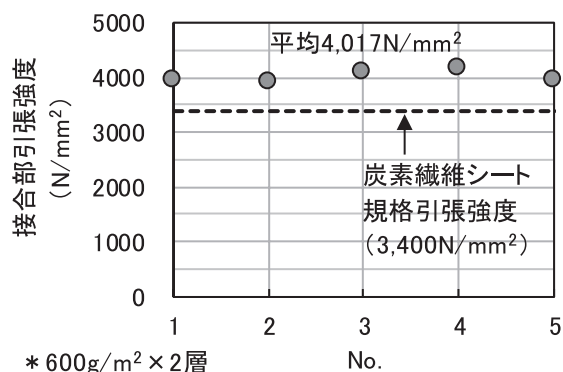
本工法をRC柱の耐震補強へ適用する場合の施工手順を写真一に示す。前述の接合部の施工方法以外は、トンネル覆工コンクリートの剥落防止工に適用する場合と同じである。

(3) 耐震補強効果検証試験結果

本工法による耐震補強効果について検証するため、鉄道高架橋の橋脚を実物大で模擬したRC柱試験体を用いて正負交番載荷実験を実施した⁷⁾。試験体は、無



図一 本工法の柱耐震補強への適用



図三 接合部引張試験結果



① 本体パネル設置



② 接合

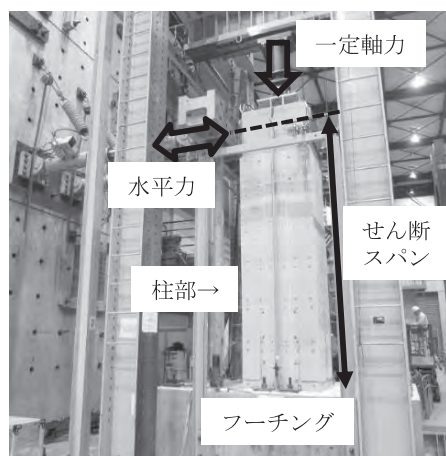


③ 充填材注入



④ 施工完了

写真一 柱部材の耐震補強に適用する場合の施工手順



写真—3 正負交番荷重実験状況

補強のものが1体、本パネルで補強したものが6体の計7体である。

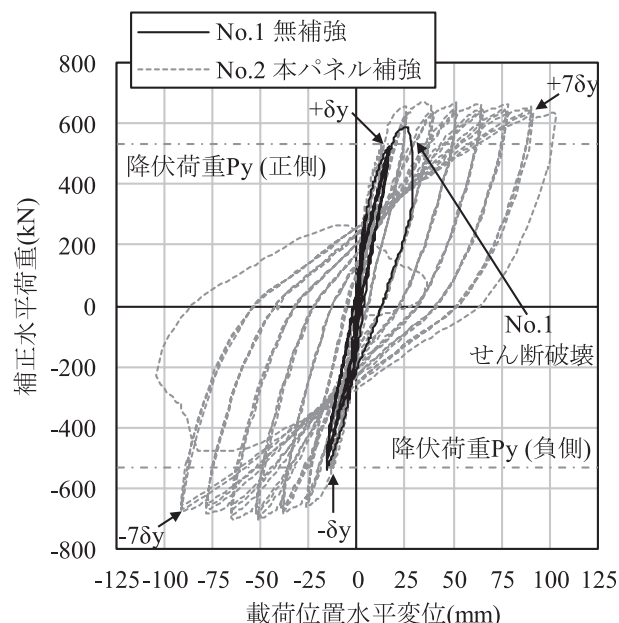
実験状況を写真—3に示す。水平力は引張縁軸方向鉄筋の基部のひずみが材料試験で得られた降伏ひずみに達するまで荷重制御により载荷した。降伏ひずみに達した時点の水平変位量を降伏変位 δ_y 、水平力を降伏荷重 P_y として、これ以降は正側・負側ともに δ_y の整数倍の変位量($\pm 2\delta_y$, $\pm 3\delta_y$, ...)で、各3サイクルの荷重を変位制御で行った。

柱断面寸法 600×600 mm, せん断スパン $a=2,050$ mm, せん断スパン比 $a/d=3.8$, 柱基部の軸応力度 $\sigma'_n=4.0$ N/mm², 帯鉄筋比 $p_w=0.079\%$ の条件で、補強の有無による比較を行った実験について以下に示す。No.1は無補強の試験体, No.2は目付量 300 g/m²の炭素繊維シートを2層内蔵した本パネルを基部から $1,800$ mmの区間に設置して補強した試験体である。

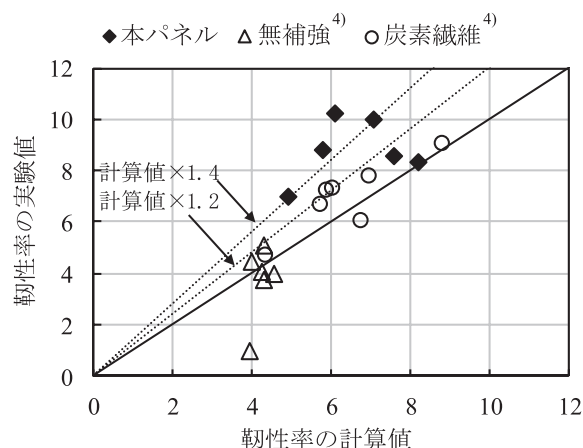
水平荷重に軸力による偏心モーメントを水平荷重に換算した分を加えた補正水平荷重と载荷位置における水平変位の関係を図—4に示す。

無補強のNo.1試験体は、 $\pm 1\delta_y$ のサイクルで柱部に複数の斜めひび割れが発生し、 $\pm 2\delta_y$ の1サイクル目で正負のいずれの载荷でも斜めひび割れが大きく開口するとともに荷重が急激に低下した。この時、帯鉄筋は降伏しており、これより大きい水平荷重に対する抵抗力が期待できず、破壊モードは曲げ降伏直後のせん断破壊と考えられる。

本パネルで補強したNo.2試験体は、軸方向鉄筋の降伏後、 $\pm 7\delta_y$ のサイクルまでは最大荷重程度の水平力を保持した。その後、 $+8\delta_y$ の1サイクル目でパネル接合部端部において炭素繊維シートが一部破断し、 $-8\delta_y$ の1サイクル目で同じ位置で炭素繊維シートが基部から高さ 600 mmまでの範囲で破断するとともに荷重が低下した。なお、本パネルで補強した他の



図—4 補正水平荷重—载荷位置水平変位関係



図—5 靱性率の計算値と実験値の比較

5体の試験体はいずれも最終的に基部の角部で炭素繊維シートが破断している。

No.1とNo.2の比較より、曲げ降伏直後にせん断破壊する諸元の試験体に対して、本パネルで補強することで曲げ破壊型モードに移行したことから、本工法による高いせん断補強効果が示された。

No.2試験体を対象に、各材料の実強度を用いて「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」(以下、補修補強指針)に示される式⁴⁾にて部材係数を1.0として算定した靱性率の計算値は $\mu=4.9$ である。荷重—変位関係の各3サイクル目の包絡線において降伏荷重を下回らない最大変位を終局変位 δ_u とし、 δ_u/δ_y より算出した靱性率の実験値は $\mu=7.0$ である。No.2試験体を含む本工法で補強した6体の実験、および補修補強指針に示される無補強と炭素繊維シート巻立ての実験⁴⁾について、靱性率の計算値

と実験値の関係を図-5に示す。ここで、実施した6体の主な実験条件の範囲は、柱断面寸法□600～900 mm, $\sigma'_n = 1.5 \sim 5.0 \text{ N/mm}^2$, $a/d = 3.0 \sim 5.0$ である。実験では、いずれも計算値と同等以上の靱性率が得られている。このことから、本工法における靱性補強効果は、既存の連続繊維シート巻立て補強を対象とした算定式を準用して評価できるものと言える。

5. おわりに

本パネルCFパネルは約 10 kg/m^2 と軽量であり、従来の繊維シート接着工法と同様に、重機を用いることなく人力での搬入・設置作業が可能である。そのため、本工法CFパネル工法は作業空間に制約を受ける狭隘な場所での施工にも適する。また、樹脂含浸作業の大部分を予め工場で行うため、現地での含浸作業や硬化養生を必要とせず、繊維シート積層数が多いほど施工時間の短縮が可能である。夜間の短時間作業が求められる場合やできるだけ稼働休止時間を低減したい場合等、作業時間や工期に制約を受ける場合に特に有効な工法である。

社会資本の老朽化が進む現在、維持管理のための補修・補強工事や、首都直下地震や南海トラフ地震の発生が懸念される中での耐震補強工事の需要は今後も益々多くなっていくと思われる。本工法が安全安心な国土形成に貢献できれば幸いである。

J C M A

《参考文献》

- 1) 国土交通省：平成28年度国土交通白書, pp.6-9, 2017.
- 2) 河村圭亮：連続繊維シートによる補修・補強工法, 建設機械, Vol.54, No.5, pp.57-64, 2018.5.
- 3) 河村圭亮：連続繊維シートを用いた鉄筋コンクリート部材の補修・補強に関する海外の研究事例, コンクリート工学, Vol.55, No.11, pp.1000-1007, 2017.
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー 101 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, pp.23-32, 2000.
- 5) 東・中・西日本高速道路(株)：NEXCO 試験方法 第7編 トンネル関係試験方法, pp.50-51, 60-61, 2017.
- 6) 東・中・西日本高速道路(株)：トンネル施工管理要領, pp.14-16, 2015.
- 7) 河村圭亮ほか：炭素繊維複合パネルによる柱部材の耐震補強効果の検討, コンクリート構造物の補修・補強, アップグレード論文報告集, 第17巻, pp.401-406, 2017.

【筆者紹介】



河村 圭亮 (かわむら けいすけ)
大成建設(株)
技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室
副主任研究員



新藤 竹文 (しんどう たけふみ)
大成建設(株)
技術センター 社会基盤技術研究部
荣誉研究員



菅野 道昭 (かんの みちあき)
成和リニューアルワークス(株)
工事統轄部 営業部 新規技術開発室
室長