

# 既設コンクリート構造物の耐震補強工法

河村 圭亮<sup>1</sup>，新藤 竹文<sup>2</sup>，岡本 晋<sup>3</sup>，菅野 道昭<sup>4</sup>

<sup>1</sup>大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 主任

<sup>2</sup>大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 部長

<sup>3</sup>成和リニューアルワークス株式会社 技術・営業統轄部 品質・技術・積算室 担当部長

<sup>4</sup>成和リニューアルワークス株式会社 技術・営業統轄部 新規技術開発室 課長

現行の耐震設計法の基準を満足しないコンクリート構造物に対しては、各種の耐震補強工事が行われている。耐震補強工法として、既設構造物の表面から削孔した孔内に、後施工プレート定着型せん断補強鉄筋を挿入する地中構造物等のせん断補強工法（Post-Head-bar 工法）を開発した。また、連続炭素繊維シートをフレキシブルボードで挟み込んだ成形パネルによる鉄道高架橋等の柱部材を対象としたせん断補強・じん性補強工法（CFパネル工法）を開発した。本稿ではこれらの耐震補強工法の概要および補強効果について確認した結果について報告する。

キーワード：耐震補強，せん断補強，じん性補強，Post-Head-bar，CFパネル

## 1. はじめに

1980年以前の土木学会コンクリート標準示方書によって設計された構造物では、コンクリートの許容応力度を大きく見積もっていたため、せん断補強鉄筋量が少ない。そのため、当時の設計では曲げ破壊モードとなるはずが、実際にはせん断破壊モードとなるものが相当数存在する。さらに、1995年兵庫県南部地震以前の旧耐震設計法によって設計され現在供用されている鉄筋コンクリート構造物においても、レベル2地震動が作用した場合に部材のせん断耐力が不足することが懸念されている。このような背景のもと、既設の鉄筋コンクリート構造物に対して、早急に耐震補強を進めることが喫緊の課題となっていた。

その中で、下水道施設等で背面が地盤に接する供用中の地下または半地下構造物等では、構造物の内側からしか補強工事を実施できない。このような施工上の制約等を受けながらも、耐震補強、特にせん断補強を行うことができる工法として後施工プレート定着型せん断補強鉄筋<sup>1)</sup>を挿入する補強工法（Post-Head-bar 工法）を開発した。

また、鉄道高架橋の柱部材等の耐震補強において、作業スペースに制限を受ける狭隘な場所での施工や、短期間での施工が可能なせん断補強・じん性補強工法として、連続炭素繊維シート複合パネルを設置する補強工法（CFパネル工法）<sup>2)</sup>を開発した。

本稿では、Post-Head-bar 工法について、施工方法、補

強設計の考え方、補強効果確認結果および適用実績について述べる。また、CFパネル工法について、施工方法、補強効果確認結果および今後の展開について述べる。

## 2. Post-Head-bar工法

### (1) 工法概要

Post-Head-bar工法とは、既存構造物の表面からドリル等で削孔した孔内に専用のモルタルを充てんした後に、後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」を挿入して構造躯体と一体化を図り、部材のせん断耐力を向上させる工法である。本工法は、図-1に示すように背面に地盤などがある供用中の既設構造物に対して、構造物の片側（内空側）からの施工が可能なるものである。

Post-Head-barは、写真-1に示すように、手前側に矩形プレートを埋込側に小型の円形プレートをそれぞれ摩擦圧接したものである。Post-Head-barは、いわゆるトラス

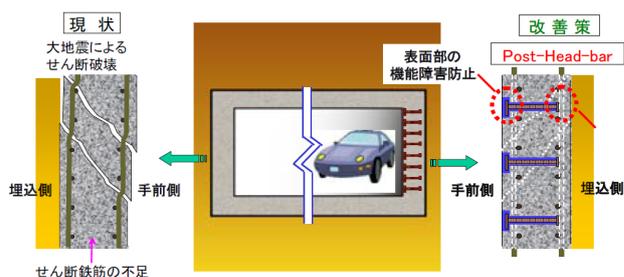


図-1 Post-Head-barによるせん断補強

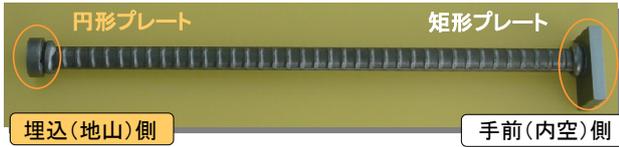


写真-1 Post-Head-bar

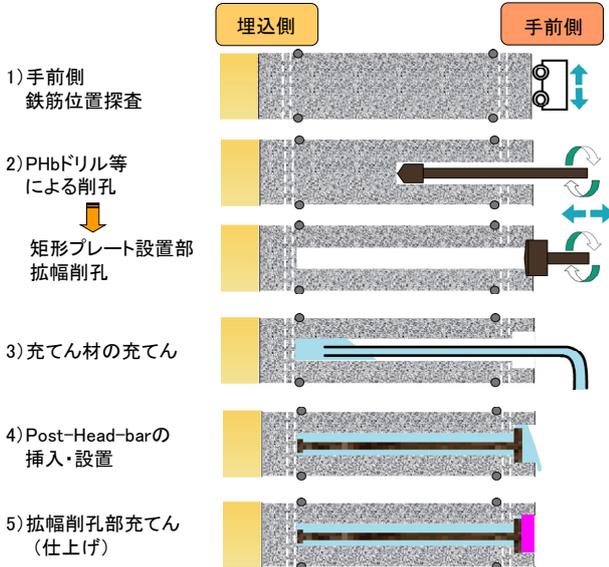


図-2 Post-Head-bar工法の施工手順

理論における引張材の役割を果たす補強鉄筋であり、部材に作用するせん断力に対して抵抗する。Post-Head-barの両端のプレートは、寸切り鉄筋に比べて孔内での定着性能を向上させる効果を持ち、これによりせん断補強効果が增大する。また、手前側の矩形プレートはPost-Head-barを削孔の中心かつ水平に配置するためのスペーサとなる役割も果たしている。

なお、Post-Head-bar自体はすべて構造物内に埋設され、所定のかぶりを確保することから、腐食等に対する耐久性も確保できる。

## (2) 施工方法

施工手順を図-2に示し、各工程の詳細を以下に示す。

### a) 鉄筋位置の探査

Post-Head-barを挿入するためには、対象構造物の手前側に配置されている主鉄筋および配力鉄筋を避けた場所に削孔位置を定める必要がある。電磁波レーダなどを使用して手前側の鉄筋位置を探査し、これらを避けて削孔位置を決定する。

### b) 削孔・拡幅削孔

Post-Head-barを埋込側主鉄筋位置まで挿入するための削孔を行い、続いて、手前側の矩形プレートが設置される部分の拡幅削孔を行う。

削孔はPHbドリル等を用いて行う。削孔にPHbドリルを使用した場合の主な利点として下記が挙げられる。

- ①切削ではないので鉄筋を切断しない。

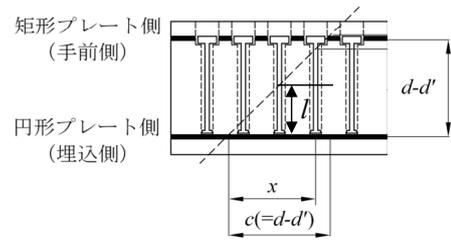


図-3 斜めひび割れ内のPost-Head-barの応力分布

- ②ロッドの向きと貫入深さが作業中に分かるため、削孔方向と削孔深さの精度が確保できる。
- ③制御部を含めてシステム全体が軽量小型であり、人力による取扱いが容易である。
- ④削孔速度が比較的速い。
- ⑤削孔に水を使用しない。
- ⑥集塵機使用により削孔屑を回収することができる。

なお、施工場所が比較的狭い場合、施工場所周囲で騒音が問題になる場合やハンチ部等で鉄筋が輻輳している場合などは、鉄筋との接触を検知し、削孔をインバータ制御により自動停止する機構がついている特殊コアドリルを用いて削孔する。

### c) 充てん材の充てんとPost-Head-barの挿入・設置

削孔後、孔内清掃を行うとともに孔内を湿潤状態にする。その後、手押しポンプのホース先端から充てん材を孔内に完全に充てんする。孔内に充てん材を充てんした後、Post-Head-barを挿入し余分に漏れたモルタルを除去することで、Post-Head-barの設置を完了する。充てん材はPHbモルタルを標準とする。

PHbモルタルはプレミックス材料であり、施工現場で所定量の水を混ぜてハンドミキサーで混合するだけで所定の性質のものが使用できる。

### d) 断面修復材による仕上げ

断面修復材によって、拡幅削孔部分の充てん復旧を行う。この断面修復材もプレミックス材料であり、施工現場において必要な量を即時に練り混ぜて作ることができる。また、施工も左官仕上げによるため容易である。

## (3) せん断補強効果の考え方

Post-Head-barによるせん断補強効果を定式化するために、Post-Head-barが通常の半円形フック型のせん断補強鉄筋と比較して分担可能なせん断耐力の有効係数  $\beta_{aw}$  を算定する。Post-Head-barが伝達できる応力分布は、ア

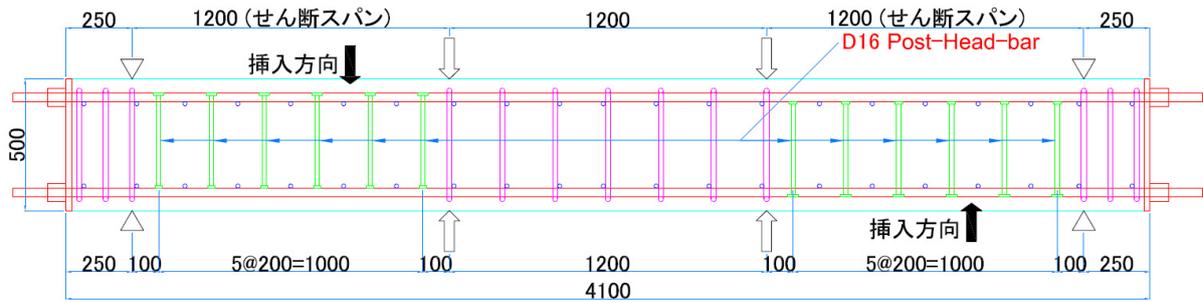


図-4 RC梁試験体概要 (Case-B)

ルカリ骨材反応を受けて破断したせん断補強鉄筋のせん断耐力評価方法<sup>3)</sup>の考え方に基づき図-3に示すような分布と考える。Post-Head-barの矩形プレート側においては、せん断補強鉄筋材端まで定着が十分確保されている。一方、Post-Head-barの円形プレート側では、定着長 $l_y$ と斜めひび割れからせん断補強鉄筋材端までの長さ $l$ との関係により伝達可能な応力が変化する。

これより、有効係数 $\beta_{aw}$ は図-3に示す伝達応力分布の面積として、式(1)により算出することができる。なお、円形プレート側の定着長 $l_y$ は、実験<sup>1)</sup>に基づき鉄筋径および鋼種に応じて $3.5D \sim 5.5D$  ( $D$ :鉄筋径)となる。

$$\beta_{aw} = 1 - \frac{l_y}{2(d - d')} \quad (1)$$

ここに、

$d - d'$ : 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔、  
ただし、 $d - d' \geq l_y$

Post-Head-barにより補強された壁部材の単位幅あたりのせん断耐力 $V_{pyd}$ は、式(2)により算出される。

$$V_{pyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{phb} \quad (2)$$

ここに、

$V_{cd}$ : コンクリートにより受け持たれるせん断耐力

$V_{sd}$ : 既存のせん断補強鋼材により受け持たれるせん断耐力

$V_{phb}$ : Post-Head-barにより受け持たれるせん断耐力

Post-Head-barにより受け持たれるせん断耐力 $V_{phb}$ は有効係数 $\beta_{aw}$ を用いて式(3)にて評価する。

$$V_{phb} = \beta_{aw} V_{awd} \quad (3)$$

ここに、

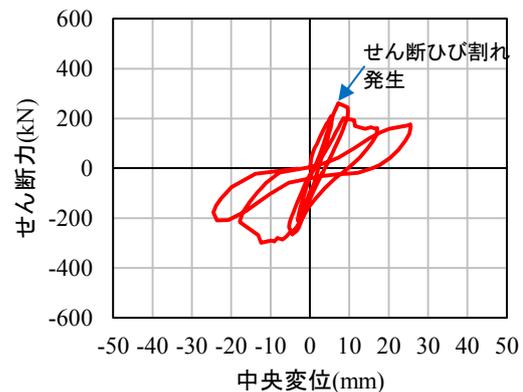
$V_{awd}$ : Post-Head-barを通常のせん断補強鋼材とみなして求められるせん断耐力

#### (4) せん断補強効果の確認実験

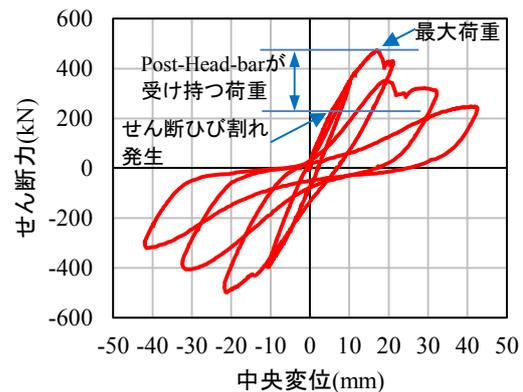
##### a) 実験概要

図-4に示すRC梁試験体の2点載荷による静的正負交番載荷実験によって、RC壁にPost-Head-barを適用した場合の地震時の面外せん断力に対する補強効果を検証した。

試験体は全長4.1m、スパン3.6mで、せん断補強を行わ



(a) Case-A (無補強)



(b) Case-B (Post-Head-bar補強)

図-5 せん断力-中央変位関係

ないケース (Case-A) およびせん断スパン内にD16のPost-Head-barを横断面内に2本ずつ長手方向に200mm間隔で設置するケース (Case-B) の2体で実施した。

##### b) 実験結果

図-5に両ケースのせん断力-中央変位関係を、表-1にコンクリートとせん断補強鉄筋の実験耐力と設計耐力を比較して示す。このうち、設計耐力はコンクリートと鉄筋の実強度を用いて2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]によって算出した。

検証実験の結果、Post-Head-bar工法にて補強した場合のせん断耐力は補強なしの場合よりも十分に大きく、Post-Head-barによる補強効果を確認した。

実験条件での有効係数 $\beta_{aw}$ の算定値は0.89となり、実験結果に基づく有効係数は、算定値を上回っている。

表-1 実験結果と有効係数

実験ケース		Case-A	Case-B	
せん断耐力	実験せん断耐力 $V_{exp}(kN)$	261	486	
	算定耐力 $V_{cal}(kN)$	コンクリート負担分 $V_{cd}(kN)$	241	230
		せん断補強鉄筋負担分 $V_{awd}(kN)$	-	286
		$V_{cal}=V_{cd}+V_{awd}(kN)$	241	516
Post-Head-barの受持せん断耐力 $V_{awd,exp}(kN)=V_{exp}-V_{cd}$		-	256	
有効係数 $\beta_{aw}$	実験に基づく算出値 $V_{awd,exp}/V_{awd}$	-	0.90	
	式(1)による計算値	-	0.89	

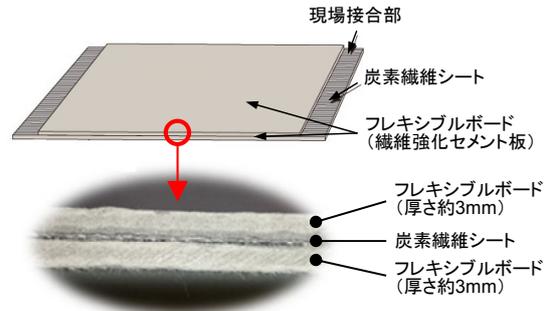


図-6 CFパネル

表-2 Post-Head-bar工法の適用実績

2016年4月1日現在

対象施設		施工件数
道路・地下街	空港アクセス地下道・道路橋他	19件
浄化センター(ポンプ場含)	最終沈殿池、ポンプ室他	302件
鉄道	地下駅舎・トンネル部	7件
浄水場	配水池他	86件
水門	津波対策用防潮水門他	101件
排水機場	排水機場他	17件
排水路	地下排水路	8件
発電所・プラント	貯水池・水路他	5件

施工中案件を含む 合計: 545件 935,000本以上

これより、式(1)に基づく有効係数の算定方法は妥当であるといえる。

### (5) 適用実績

Post-Head-bar 工法は、2007年に浄化センターの地下構造物の壁・床版に適用したのを皮切りに、2016年3月までに表-2に示す545件の工事に適用されている。施工本数は、施工中のものを含めて合計935,000本以上であり、せん断補強の要求の高まりに呼応して、その実績も増大している。

施工実績の内訳を見ると、下水処理場関連施設（浄化センター・ポンプ場）が施工件数の半数以上を占めている。その他、浄水場、水門、道路トンネル、鉄道地下駅舎部などに適用されている。

## 3. CFパネル工法

### (1) 工法概要

CFパネル工法は、図-6に示す連続炭素繊維シートを2枚のフレキシブルボード（厚さ3mmの繊維強化セメント板）でサンドイッチした複合パネル（以下、CFパネル）による柱部材の耐震補強工法である。本工法の特徴を以下に示す。

①施工性向上：CFパネルは1m<sup>2</sup>当たり10kg程度と軽量

であり、揚重用機材等が不要で搬入・設置を手作業で行うことができる。そのため、狭隘な場所での施工に適する。

- ②施工時間短縮：CFパネルは工場製品であるため、現地組立て工程の省力化により、従来工法に比べて施工時間が短縮できる。
- ③品質確保：CFパネルを工場で作成することで品質は確保される。また、炭素繊維シートをパネルで挟んでいるため、輸送時や施工時に傷つけない。
- ④表面保護不要：炭素繊維シート巻き立て工法に必要なとされることの多い表面保護塗装等が不要である。
- ⑤曲面断面に適用可能：曲面形状のCFパネルにより、円形柱（φ300mm以上）等にも適用可能である。
- ⑥継手構造の補強性能を確保：柱部材を耐震補強する際に必要となる継手部において所定の引張強度を確保した継手構造を開発した<sup>2)</sup>。

### (2) 施工方法

施工手順を図-7に示し、各工程の詳細を以下に示す。

#### a) 下地処理・清掃

ディスクサンダー等を用いて柱表面をケレンする。パネルを設置するコンクリート面が湿潤な場合は乾燥機を用いて乾かし、その後、全面にプライマーを塗布する。

#### b) 本体パネル設置

本体パネルに設ける固定用アンカー孔は、予め工場で削孔しておく。設置面にアンカーを打ち込み、本体パネルを所定の位置に設置してパネルを固定する。この時、柱表面とパネルの間には無収縮モルタルを注入するため10mmの隙間を設けておく。

#### c) 接合

接合部のみ未含浸となっている炭素繊維シートに、エポキシ樹脂を含浸させて重ね合わせていく。その後、接合パネルをエポキシ樹脂で貼り付ける。

#### d) 目地・端部シール

基部およびパネルの鉛直方向接合部をエポキシパテでシールする。

#### e) 無収縮モルタル注入

パネルに注入用の孔を設け、ホースを取付ける。専用

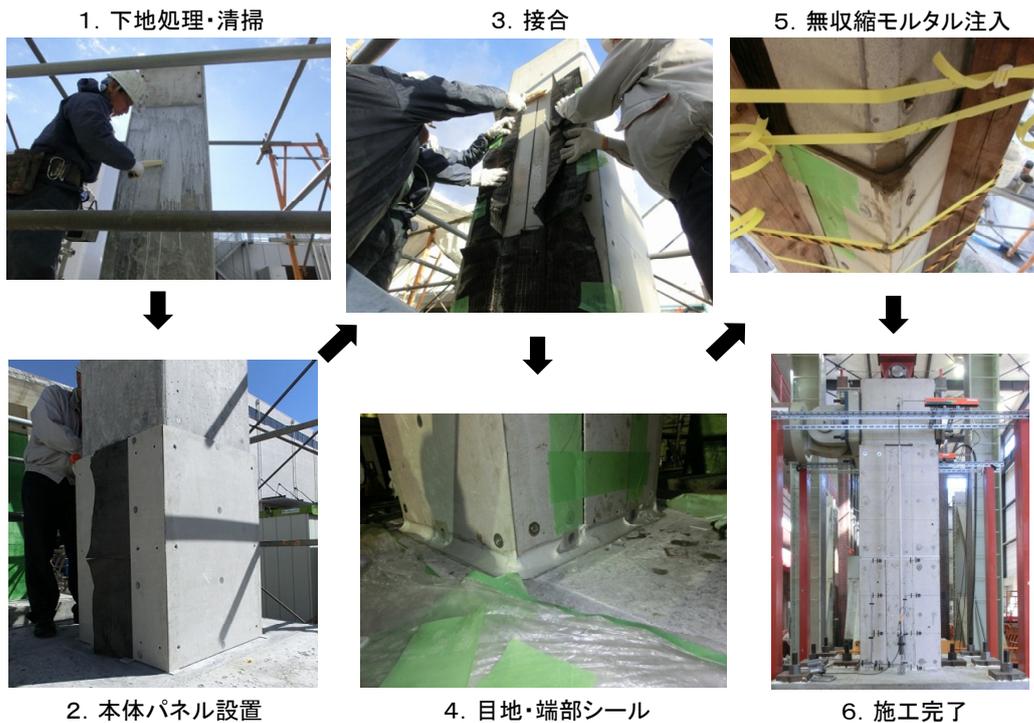


図-7 CFパネル工法の施工手順

の無収縮モルタルを練混ぜ、手押しポンプを用いて柱表面とパネルの間の隙間に注入する。

### (3) CFパネルにより補強した柱部材の正負交番载荷実験

#### a) 実験概要

鉄道高架橋の橋脚を想定した断面寸法600mm×600mmのRC柱試験体で正負交番载荷実験を実施した。RC柱試験体の概要を図-8に、諸元を表-3に示す。実験は無補強の試験体 (No.1) とCFパネルによる補強を行った試験体 (No.2) の2体で行った。CFパネルに内蔵される炭素繊維シートは引張強度の特性値が3,400N/mm<sup>2</sup>以上で、目付量300g/m<sup>2</sup>のシートを2層 (総目付量600g/m<sup>2</sup>) とした。補強区間は基部から1,800mmの区間であり、高さ900mmのCFパネルを上下2段で取り付けた。载荷直角方向の2面には長さ220mmの接合部を設けた。

試験体の载荷は、最初に柱基部の軸応力度が4.0N/mm<sup>2</sup>となるように軸力を载荷した後、基部から2,050mmの载荷位置に水平力を与え、正負交番载荷を行った。水平力については、初めに予備载荷として100kN、300kNの荷重を正負に1回ずつ载荷した後、本载荷を行った。最外縁の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した時の载荷位置における水平変位を降伏変位  $\delta y$  とし、 $\delta y$  の整数倍の変位量 ( $\pm 1 \delta y$ ,  $\pm 2 \delta y$ ,  $\pm 3 \delta y$  ...) で、各3サイクルの载荷を変位制御で行った。

#### b) 実験結果

各試験体の、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-10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

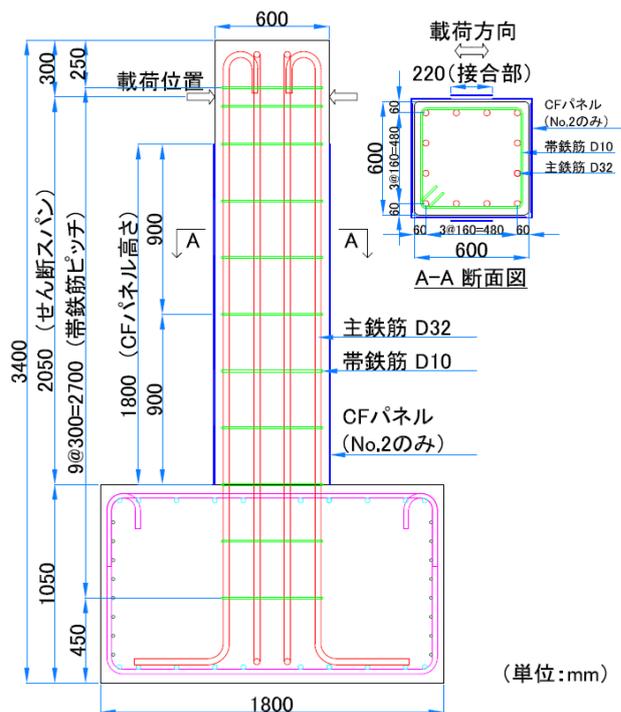


図-8 RC柱試験体概要

表-3 試験体諸元

断面寸法	600mm×600mm
せん断スパン <sup>a</sup>	2,050mm
せん断スパン比 <sup>a</sup> /d	3.8
軸応力度 $\sigma_n$	4.0N/mm <sup>2</sup>
帯鉄筋比 <sup>p<sub>w</sub></sup>	0.079% (D10@300mm)
炭素繊維シートの日付量 (No. 2)	300g/m <sup>2</sup> ×2層 (総目付量: 600g/m <sup>2</sup> )

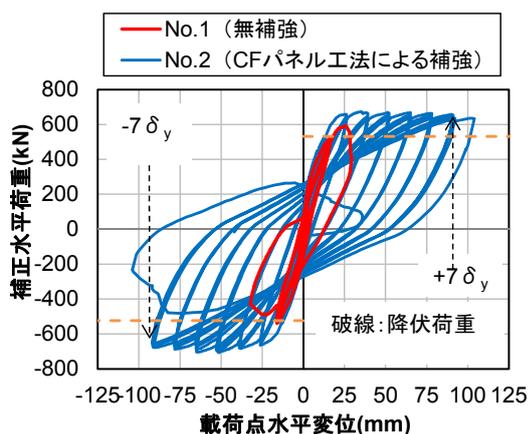


図-10 補正水平荷重 - 載荷点水平変位関係

数の斜めひび割れが発生し、 $+2\delta_y$ の1サイクル目で斜めひび割れが大きく開口するとともに荷重が大きく低下して降伏荷重を下回った。

CFパネルにより補強したNo.2試験体は、 $\pm 7\delta_y$ のサイクルまでほぼ最大荷重を保持しており、安定した挙動を示した。 $+8\delta_y$ の1サイクル目でパネル接合部端部の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約600mmまでの範囲で破断するとともに荷重が大きく低下して降伏荷重を下回った。実験終了後、CFパネルおよび剥離したコンクリートを除去した後の柱基部の状況を観察すると、軸方向鉄筋のはらみ出しは比較的小さく、破断も生じていない。

実強度を用いて計算した曲げせん断耐力比は、No.1試験体が1.05、No.2試験体が2.37である。ここで、せん断力のコンクリート負担分は二羽式<sup>4)</sup>により、帯鉄筋負担分はトラス理論により、炭素繊維シート負担分は直接接着させる場合と同様に考え、「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」<sup>5)</sup>（以下、連続繊維シート補修補強指針）に示される式にて部材係数を1.0として算定した。実験では、No.1試験体はせん断破壊したが、No.2試験体は曲げ破壊のモードになっていることから、CFパネルを用いた場合にも確実なせん断補強効果が得られることが示された。

コンクリートと鉄筋の実強度および炭素繊維シートの引張強度の規格値を用いて連続繊維シート補修補強指針に示される式より部材係数を1.0として算定したじん性率は5.0である。実験では、 $\pm 7\delta_y$ のサイクルまでほぼ最大荷重を保持しており、CFパネルを用いることで、

炭素繊維シートを直接接着させる場合と同等以上のじん性補強効果が得られることが明らかとなった。また、柱基部の状況から、CFパネルを取り付けることによって十分な拘束効果が得られるものと考えられる。

#### (4) 今後の展開

地下鉄等の実質的な作業時間が数時間程度の夜間工事を想定した場合、CFパネル工法は炭素繊維シート巻き立て工法と比較して、30%程度の工期短縮が図れ、施工費も約10%コストダウンが期待できる試算結果を得ている。また、地下街等では狭隘な作業空間となる場合も多く、CFパネル工法により大型重機や火気を用いずに施工できることも利点となる。これらの利点を活かし、今後、土木分野のみならず建築分野への積極的な適用も合わせて、その用途拡大を図っていく。

#### 4. おわりに

本稿では既設コンクリート構造物の耐震補強工法である Post-Head-bar 工法および CF パネル工法に関して、概要および補強効果確認結果等について述べた。

首都直下地震や南海トラフ地震の発生も懸念される中で、今後も耐震補強工事の需要は続くものと考えられる。その中で、構造物の内側からしか補強工事を実施できない施工条件でのせん断補強には Post-Head-bar 工法が、狭隘な作業空間での施工や短期間での施工が求められる柱のせん断補強、じん性補強には CF パネル工法が効果的な耐震補強工法になるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 土木研究センター：後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」、建設技術審査証明報告書、2015.12
- 2) 鈴木三馨、岡本修一、新藤竹文、竹井勝美：CF複合パネルによる柱部材の耐震補強工法の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.37、No.2、pp.925-930、2015.
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー124 アルカリ骨材反応対策小委員会報告書、pp.II-90-II-94、2005.
- 4) 二羽淳一郎、山田一宇、横沢和夫、岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、No.372/V-5、pp.167-176、1986.
- 5) 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、2000.