

# 論文 炭素繊維シートで被覆した高強度 RC 杭体の正負交番載荷実験

阿部 遼太\*1・秋山 充良\*2・佐藤 啓\*3・鈴木 基行\*4

**要旨:** 基礎構造物は、損傷の発見・修復の困難さから、レベル2地震動作用時にも弾性応答することが望ましい。この背景のもと、杭基礎の地震時保有水平耐力の向上を目的に、構成材料を高強度化し、断面中心部へプレストレスを導入した RC 杭体（高強度 RC 杭体）を開発してきた。本研究では、高強度 RC 杭体の正負交番載荷実験を実施し、導入プレストレスの大きさや炭素繊維シートの貼付の有無などが、杭体の水平荷重-水平変位関係に及ぼす影響について基礎データを得た。また、杭体の部材軸方向の曲率分布と断面解析により得られる曲げモーメント-曲率関係から、実験で得られた水平荷重-水平変位関係の再現を試みた。  
**キーワード:** RC 杭, 高強度コンクリート, 高強度鉄筋, 炭素繊維シート, プレストレス, 曲げ耐力

## 1. はじめに

液状化の影響により地盤の水平反力が十分に期待できない場合などには、経済性への配慮から、基礎の降伏を許容せざるを得ない例が存在する。本来、地盤条件などに関わらず、基礎構造は弾性限界までの応答しか許容せず、修復が容易な橋脚基部に主たる塑性化を生じさせる耐震設計が望まれる。この背景のもと、杭基礎の地震時保有水平耐力の向上を目的に、高強度構成材料を使用し、断面中心部へプレストレスを導入した RC 杭体（高強度 RC 杭体）を開発した。そして、単調曲げ載荷実験を実施し、コンクリート圧縮強度や導入プレストレスの大きさが杭体の曲げ耐力に与える影響について実験的に検証してきた<sup>1), 2)</sup>。結果として、導入プレストレスが大きいほど高い曲げ耐力が得られること、かぶりコンクリートの剥落の防止は、最大荷重後の脆性破壊を避けることにつながり、炭素繊維シート（CFS）などで杭体を被覆する必要があること、などを確認した。また、遠心力成形後、杭体の中空部にコンクリートを充填することも曲げ耐力の改善に寄与していた。

本研究では、単調曲げ載荷実験に続き、繰り返し荷重下における高強度 RC 杭体の部材性能を確認することを目的として、正負交番載荷実験を実施した。そして、コンクリート圧縮強度や導入プレストレスの大きさ、あるいは CFS の貼付の有無が、最大荷重、変形性能および復元力特性に及ぼす影響を検討した。

## 2. 正負交番載荷実験の概要

### 2.1 供試体諸元

供試体の断面図の一例を図-1 に、供試体諸元の一覧を表-1 にそれぞれ示す。実験で用いた杭体の直径  $D$  は全て 400mm である。本実験では、過去の実験事実に基づ

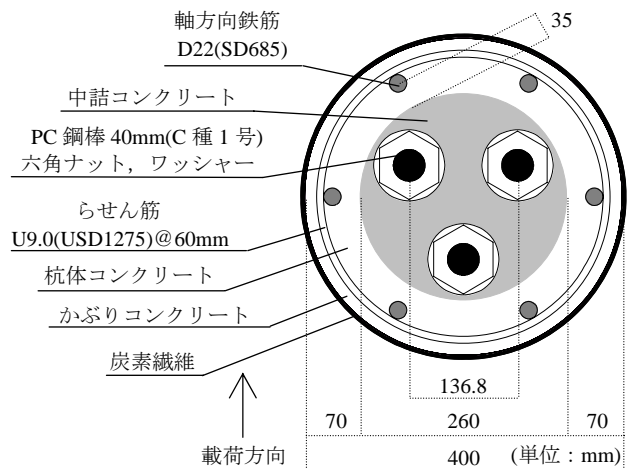


図-1 供試体断面の一例

き<sup>1), 2)</sup>, D4F10P22L2T1FC-A を基準供試体としている。以下に、各実験パラメータを説明する。

図-1 に示されるように、開発した高強度 RC 杭体内のコンクリートは、その横拘束状態とコンクリート圧縮強度の違いから、(i) かぶりコンクリート、(ii) 杭体コンクリート、(iii) 中詰めコンクリート、の3つに分類される。(i)と(ii)のかぶりおよび杭体コンクリートは、遠心力成形により製作され、蒸気養生を経て、(iii)の中詰めコンクリートが充填される。かぶりおよび杭体コンクリートの圧縮強度  $\sigma_c'$  は実験パラメータとし、66.6~99.6N/mm<sup>2</sup>の範囲とした。既に参考文献 1), 2) で確認したように、中詰めコンクリート自体は杭体に作用する曲げに抵抗しないが、この存在により、その外側にあるコンクリートに横拘束力が与えられ、杭体の曲げ耐力の向上に寄与する。中詰めコンクリートは、PC鋼棒を挿入後に打設するため、流動性の高いコンクリートとした。遠心力成形で製作するかぶりおよび杭体コンクリートの厚さは、図-1 に示

\*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (正会員)

\*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

\*3 前田製品販売 (株) 技術開発本部

\*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 供試体諸元一覧

供試体名	コンクリート強度 $\sigma_c^{(1)}$ (MPa)	PC鋼棒 <sup>2)</sup>		軸方向鉄筋 <sup>3)</sup>		プレストレス $f_{pe}$ (MPa)	軸圧縮力 <sup>4)</sup> (MPa)	らせん筋 <sup>5)</sup>			炭素繊維 <sup>6)</sup>
		径 3本	径 6本	$\rho_g$ (%)	径			間隔 (mm)	$\rho_w$ (%)		
D4F10P0L2T1FC-A	98.2 (36.4)	40mm	D22	1.8	0.0	7.0	U9.0	60	1.12	有	
D4F10P22L2T1FC	99.4 (35.6)	40mm	D22	1.8	22.2	0.0	U9.0	60	1.12	有	
D4F10P22L2T1FC-A	99.6 (38.4)	40mm	D22	1.8	22.5	7.0	U9.0	60	1.12	有	
D4F10P22L2T1F-A	99.6 (33.7)	40mm	D22	1.8	21.8	7.0	U9.0	60	1.12	無	
D4F7P22L2T1FC-A	66.6 (33.7)	40mm	D22	1.8	22.0	7.0	U9.0	60	1.12	有	

1) テストピース( $\phi 100 \times 200$ mm)の材料試験結果, 左側がかぶりおよび杭体コンクリートの圧縮強度, 右側括弧内が中詰めコンクリートの圧縮強度; 2) C種1号, 0.2%耐力 1147MPa, 引張強さ 1280MPa; 3) SD685, 降伏強度 778.0MPa, 引張強度 944.0MPa; 4) 鉛直ジャッキにより与えられる軸圧縮力; 5) USD1275, 0.2%耐力 1443MPa, 引張強さ 1479MPa; 6) 引張強度 4620MPa

されるように 70mmに設計したが, 脱型後に実測したところ, その平均肉厚は供試体ごとに異なり, 73.3~81.6mmの範囲にあった。後述の解析の際は, この実測値を用いている。

開発した高強度RC杭体では, PC鋼棒に与えた緊張(引張)力が供試体両端に設けた厚さ 60mmの鋼製アンカープレートを通じて, 軸圧縮力として杭体に作用する。これにより, 断面内は曲げによる引張を受けても, 軸圧縮力がない場合に比べ中立軸を図心軸位置に近い状態に保て, コンクリートの高強度化を部材の曲げ耐力の向上につなげることができる。断面の中心位置にプレストレスを与えることが理想であるが, 現状の入手可能なPC鋼棒の径および強度の制約から, 本実験では, 径 40mmのPC鋼棒を断面中心付近に3本配置している。プレストレス導入後, 正負交番載荷実験の直前に計測したPC鋼棒のひずみの平均値から計算される杭体断面の圧縮応力(PC鋼棒の全引張力を杭体断面積で除した値) $f_{pe}$ は約 21MPaである。コンクリート表面や軸方向鉄筋に貼付したひずみゲージの値から, 断面内は一樣な圧縮状態にあることが確認できた。実験では, プレストレスを導入しない供試体も用意し, それが水平荷重-水平変位関係に与える影響を考察した。

かぶりコンクリートの早期の剥落を防止するため, 供試体 D4F10P22L2T1F-A を除き, CFS を貼付した。CFS は1層巻きであり, 円周方向力のみ抵抗する。つまり, それ自体は曲げによる引張力を一切負担しない。本実験では, らせん筋の量や強度は実験因子とせず, 既往の単調曲げ載荷実験と同じく, せん断破壊を防ぐため, 高強度ならせん筋を密に配筋した。

実験に用いた鋼材は, 軸方向鉄筋(SD685, 径: D22), PC鋼棒(C種1号, 径: 40mm), およびらせん筋(USD1275, 径: U9.0)であり, 材料試験の結果は表-1の欄外にまとめて示している。

## 2.2 荷重載荷方法

載荷状況を図-2に示す。標準的な都市内高架橋の設計結果を参考に, それらの上部工, 橋脚, およびフーチングの死荷重の合計から, 杭体には 7.0MPaの圧縮力が

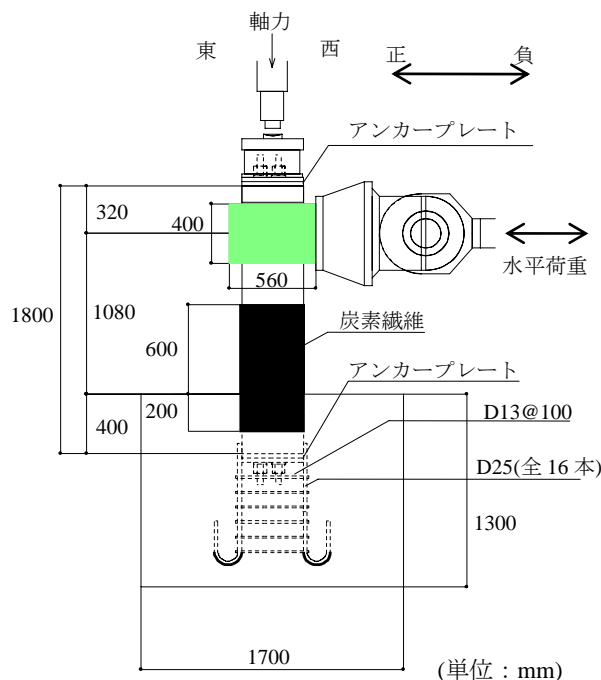


図-2 載荷方法

作用すると想定した。これは, 図-2に示す鉛直ジャッキにより与えられる。なお, この影響を考察するため, 供試体 D4F10P22L2T1FC には, 軸力を与えていない。

道路橋示方書<sup>3)</sup>のIII種地盤に分類される地盤を幾つか想定し, 杭体の曲げモーメント分布を得たところ, 曲げモーメントのゼロ点と最大点の距離を杭体の有効高さで除した値はおおよそ 2.5~3.5の範囲にあったことから, 本研究では, せん断スパンを 1080mmに設定した。CFSは, 図-2に示すように, 柱基部 600mmとフーチング上端から 200mmの深さまでの計 800mmの範囲で貼付した。

杭体の製作後, 開発した高強度 RC 杭体が持つ高い曲げ耐力を考慮し, 柱下端部にある厚さ 60mmの鋼製アンカープレートにSD490・D25鉄筋を16本溶接した。また, この鉄筋に直交するように, SD345・D13鉄筋を100mm間隔で配筋した。そして, フーチング内に杭径の1倍の長さを埋め込むことで, 荷重載荷時の杭体のフーチングからの引き抜けを防止した。本実験の目的は, 高強度 RC



写真-1 CFS 破断

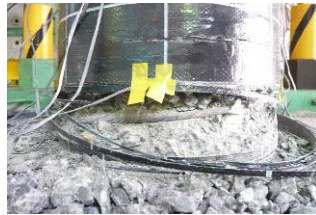


写真-2 かぶりコンクリートの剥落



写真-3 軸方向鉄筋の破断

杭体の繰返し荷重下における部材性能の評価にあるため、フーチング内でこのような一体化を図ったが、SD490・D25 鉄筋に貼付したひずみゲージの値を見ると、より簡単なフーチングと杭体の接合部の設計が可能と思われた。これらは今後の検討項目である。

荷重は、まず荷重制御にて正方向に荷重し、引張鉄筋に貼付したひずみゲージを用いて降伏を判定した。このときの水平変位を降伏変位 $\delta_y$ とした。そして、降伏変位 $\delta_y$ の整数倍を荷重ステップとし、荷重ステップ毎に3サイクルの交番荷重を変位制御にて与えた。

### 3 実験結果

#### 3.1 損傷状況

図-3 に基準供試体の水平荷重-水平変位関係を示す。以降も含め、水平荷重とは、図-2 に示す水平ジャッキにより与えられる荷重に、鉛直ジャッキからの軸圧縮力と水平変位の積である付加モーメントをせん断スパンで除した値を足したものである。最大荷重が正側と負側で異なるのは、PC 鋼棒の配置が荷重荷重方向に対して非対称であることが影響している。

CFS の被覆を行った供試体は、外観的に曲げひび割れの発生を観察できないが、水平荷重-水平変位関係上には、引張鉄筋の降伏前に剛性の低下が確認された。その点は、プレストレスを導入しない D4F10POL2T1FC-A では、引張鉄筋の降伏時の荷重の約 1/3、プレストレスを導入した供試体では、その約 2/3 である。引張鉄筋の降伏後、さらに大きな水平変位を受けると、曲げ圧縮を受ける側の CFS が破断し(写真-1)、かぶりコンクリートの剥落(写真-2)を経て、最終的には、軸方向鉄筋のはらみ出し後にその破断が生じ、急速な荷重低下が生じた(写真-3)。

一方、CFS 無しの供試体 (D4F10P22L2T1F-A) は、まず圧縮側のかぶりコンクリートが剥落し、その後に引張鉄筋の降伏が確認された。交番荷重を受けるごとにかぶりコンクリートの損傷が大きくなり、軸方向鉄筋のはらみ出しと破断が生じた。高強度 RC 杭体では、高い軸圧縮力が作用しているため、CFS などがかぶりコンクリートを被覆しないと、その損傷の発生以降の水平荷重の増加を期待できない。

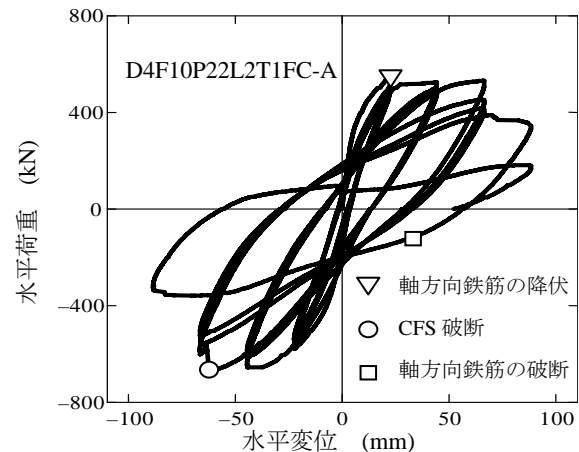


図-3 水平荷重-水平変位関係

#### 3.2 水平荷重-水平変位関係

コンクリート圧縮強度、CFS の貼付の有無、導入プレストレス、および鉛直ジャッキにより与える軸圧縮力の有無が水平荷重-水平変位関係に及ぼす影響を考察する。結果を図-4~図-7 に示す。各図は、比較を容易にするため、骨格曲線のみを示した。なお、軸方向鉄筋の破断は、図-3 に示すように、荷重の除荷・再荷重の過程で生じるため、図-4~図-7 では、軸方向鉄筋の破断が生じたループの最大変位点に「□」を記した。

コンクリート圧縮強度と導入プレストレスの大きさの差に着目した図-4 と図-6 から、PC 鋼棒を断面中心位置に配置し、それを用いてプレストレスを与えることで、断面内の圧縮領域が拡大し、最大水平荷重が大きくなること、および、その圧縮領域に使用するコンクリート強度を大きくすることが杭体の曲げ耐力の増加をもたらすことを確認できる。なお、プレストレスを導入していない供試体 D4F10POL2T1FC-A でも、PC 鋼棒は挿入されており、その両端は、引張ひずみが生じない程度にボルトにて鋼製アンカープレートに固定されている。そのため、荷重が進むにつれて、杭体の曲げに伴う引張ひずみが PC 鋼棒に発生し、杭体には圧縮力が作用する。プレストレスを予め導入した杭体では、そのような荷重に伴う圧縮力の増分が相対的に小さかったことを考えると、断面中心位置にプレストレスを導入することは杭体の曲げ耐力の増加に大きく寄与すると言える。

前記した通り、本研究で用いた CFS は、杭体に作用する曲げに抵抗せず、杭体の円周方向引張力のみを負担す

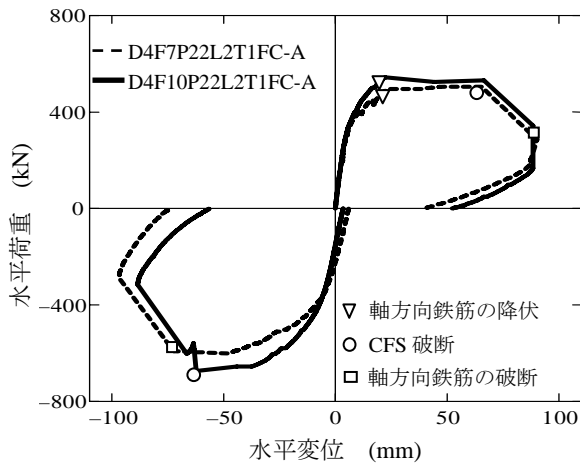


図-4 圧縮強度に着目した骨格曲線の比較

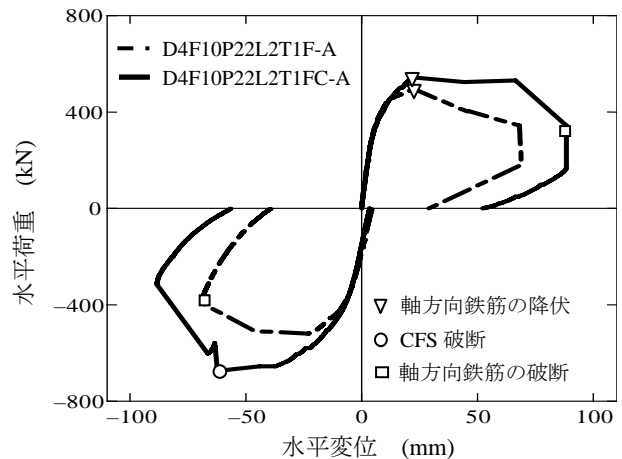


図-5 CFSの有無に着目した骨格曲線の比較

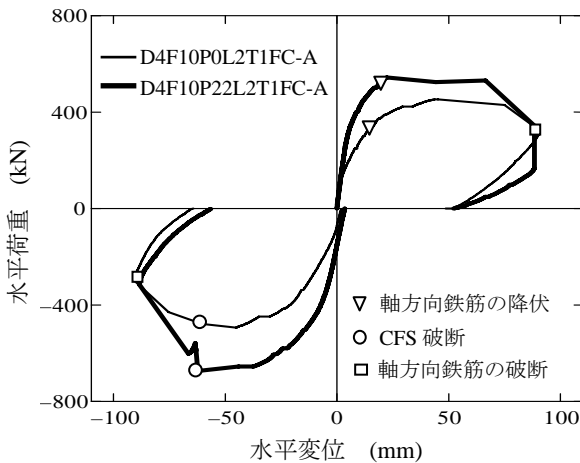


図-6 プレストレスに着目した骨格曲線の比較

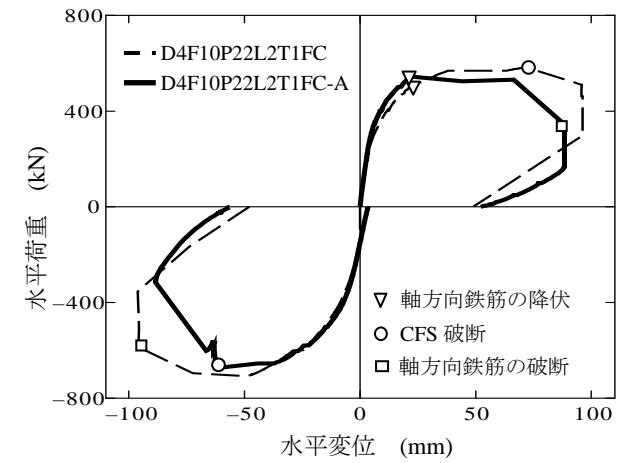


図-7 鉛直軸力に着目した骨格曲線の比較

る。このCFSの破断が生じると、何れの供試体もかぶりコンクリートの剥落が発生し、急速に水平荷重が低下する。CFSの貼付の有無が骨格曲線に及ぼす影響に着目した図-5からも、開発した高強度RC杭体におけるCFS貼付の重要性が確認される。

上部工、橋脚、フーチングからの死荷重の作用を考慮して鉛直ジャッキから軸圧縮力を与えた場合、これによるPC鋼棒の圧縮のため、予め導入してあったプレストレスがその分だけ消失する。図-7に示されるように、交番荷重による水平変位が小さい場合には、結果として杭体に作用する軸力の大きさはほぼ同じため、両者の挙動に大差はない。しかし、水平変位が大きくなると、鉛直ジャッキから軸圧縮力を与えている供試体では、付加モーメントの影響が大きくなり、一方で、断面中心位置にあるPC鋼棒からのプレストレスのみが作用する供試体は、その影響がないため、骨格曲線に差が生じる結果となる。

#### 4. 解析的検討

ここでは、現行の鉄筋コンクリート柱の耐震設計基準で採用されている耐震解析法を参考に、高強度RC杭体の正負交番荷重実験で得られた水平荷重-水平変位関係の骨格曲線の再現を試みた。高強度RC杭体は、液状化が発

生するような軟弱地盤であっても、杭基礎の降伏を防ぐことを目的に開発している。高強度RC杭体を用いた杭基礎の降伏の定義は別途検討が必要になるが、現行の道路橋示方書<sup>3)</sup>のように、仮に全ての杭体が塑性化したときを杭基礎としての降伏とした場合、地震荷重により最初に降伏する杭体は、杭基礎としての降伏に達するまでに、ある程度の大きさの塑性変形を受けることになる。そこで、ここでは、杭体の降伏（軸方向鉄筋の降伏）以降も対象に解析する。

##### 4.1 限界状態の設定

単調曲げ荷重実験で観察された損傷状態<sup>1),2)</sup>および本研究で示した実験結果から、高強度RC杭体の限界状態として次の3つを定義した。

限界状態1：圧縮縁コンクリートがその圧縮強度点に達した点

限界状態2：引張側の軸方向鉄筋が降伏する点

限界状態3：CFSが破断する点

限界状態1は、特に参考文献1)で報告した、CFSを貼付しない供試体において重要な限界状態である。CFSの貼付がない場合には、かぶりの剥落とともに、荷重低下が生じる。その点を限界状態1として表現した。CFSを貼付した供試体では、図-4～図-7に示されるように、

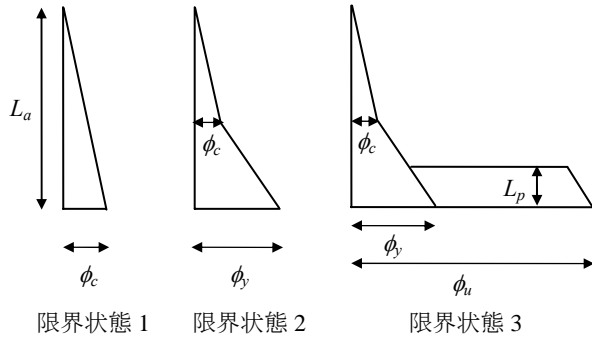


図-8 曲率の高さ方向分布

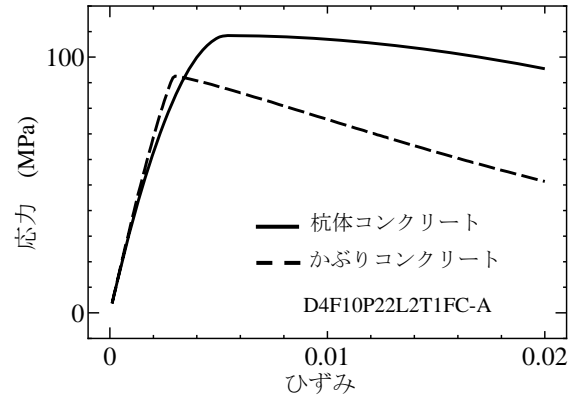


図-9 応力-ひずみ関係

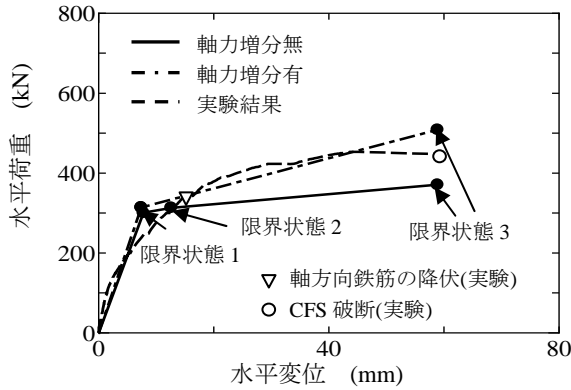


図-10 実験結果と解析結果の比較 (D4F10P0L2T1FC-A)

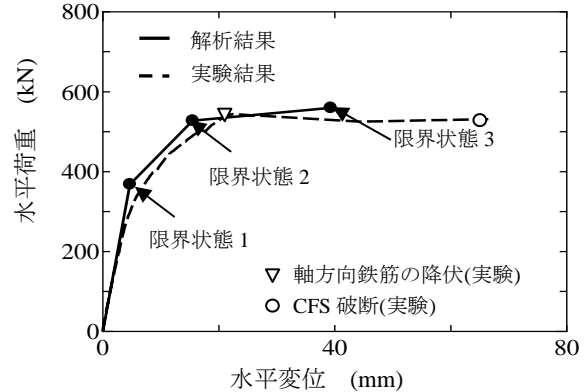


図-11 実験結果と解析結果の比較 (D4F10P22L2T1FC-A)

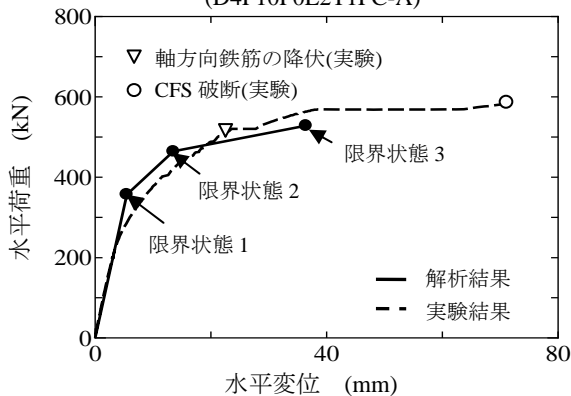


図-12 実験結果と解析結果の比較 (D4F10P22L2T1FC)

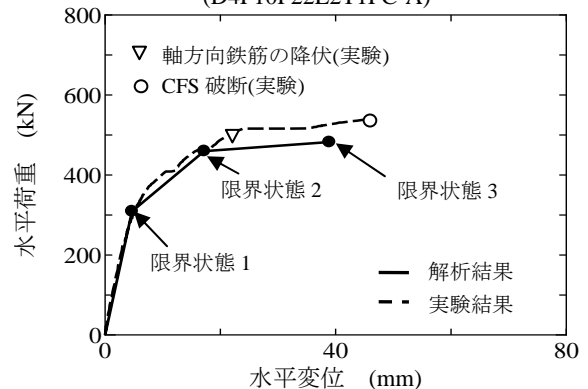


図-13 実験結果と解析結果の比較 (D4F7P22L2T1FC-A)

限界状態2が部材降伏点を表しており、この点を超えると、荷重の増加が緩やかなものとなる。また、CFSの破断が生じると、部材としての終局とみなせることから、ここではその点を限界状態3とした。

#### 4.2 各限界状態の評価方法

片持ち柱の曲げモーメント分布から、各限界状態に達したときの曲率分布を図-8に示すように定め、各点の水平変位を求めた。図-8にある $\phi_c$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_u$ は、それぞれ限界状態1~3に達したときの断面曲率である。杭体の曲げモーメント-曲率関係は、限界状態1~3に対応する各点を直線で結んだトリリニア型の骨格曲線を仮定している。限界状態3に達したときの水平変位 $\delta$ を算定する際は、塑性ヒンジの形成を考慮し、式(1)を用いた。

$$\delta = \delta_y + \delta_p \quad (1)$$

$$\delta_p = \theta_p \cdot (L_a - L_p/2) \quad (2)$$

$$L_p = 0.5d + 0.05L_a \quad (3)$$

$$\theta_p = (\phi_u - \phi_y) \cdot L_p \quad (4)$$

ここに、 $\delta_y$ : 限界状態2に達したときの水平変位、 $L_p$ : 塑性ヒンジ長<sup>4)</sup>、 $d$ : 断面の有効高さ、 $L_a$ : せん断スパン。

曲率 $\phi_c$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_u$ は、断面解析より求める。断面解析では、図-1に示す、かぶりコンクリート、杭体コンクリート、および中詰コンクリートについて、CFSとらせん筋による横拘束力、およびその圧縮強度を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係を用いている。図-9に、計算に用いた杭体コンクリートとかぶりコンクリートの応力-ひずみ関係の一例を示した。これらの詳細は、参考文献

2)に示されている。鉄筋はバイリニアモデルである。

限界状態 1 と 2 の  $\phi_c$  と  $\phi_s$  は、かぶりコンクリートの最圧縮縁が最大応力に達した点、最外縁引張鉄筋が降伏に達した点、としてそれぞれ断面解析を行い求めている。限界状態 3 の  $\phi_u$  は、かぶりコンクリートの圧縮縁が式(5)のひずみに達した点として断面解析を行い定めた。

$$\varepsilon_{cu} = \alpha \left\{ 0.00383 + 0.1014 \left( \frac{\rho_{CF} f_{CF} + \rho_s f_{yh}}{f_{c0}} \right)^{\frac{3}{4}} \left( \frac{f_{CF}}{E_{CF}} \right)^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (5)$$

ここに、 $\varepsilon_{cu}$  : CFS破断時のひずみ、 $\rho_{CF}$  : CFS比、 $f_{CF}$  : CFSの引張強度、 $\rho_s$  : 帯鉄筋比(体積比)、 $f_{yh}$  : 帯鉄筋の降伏強度(MPa)、 $f_{c0}$  : 無補強供試体のコンクリート強度(MPa)、 $\alpha$  : 一軸圧縮試験から得られたCFS破断点を正負交番載荷試験を受けるCFS柱に適用するための補正係数。

式(5)は、CFSで被覆したコンクリート柱の一軸圧縮実験に基づき得られた、CFS破断時の軸ひずみを与える実験式である<sup>5)</sup>。全断面が圧縮状態にある一軸圧縮実験と、引張域が断面内に存在する正負交番載荷実験では、当然、CFSの破断の条件は異なる。また、式(5)を作成する際に参照された供試体のコンクリート強度は普通強度である。本来は、断面内に存在するひずみ勾配や材料強度の違いなどを詳細に検討し、式(5)の適用を図るべきであるが、ここでは、実験結果との比較から、補正係数 $\alpha$ を1.8とすることでその影響を考慮することにした。

### 4.3 実験結果との比較

CFSで被覆した4本の供試体について、解析結果と実験結果の比較を図-10～図-13に示す。実験結果としては、図-2の正方向の載荷で得られる骨格曲線を用い、CFSの破断などが負側載荷で生じた場合には、そのときの水平変位の絶対値を各図に示している。断面解析を行う際は、実験中に生じるPC鋼棒の引張ひずみの増分を考慮せず、載荷前にPC鋼棒に与えた緊張力の総和と同じ圧縮力を外的に与え、仮定した曲率から計算される断面上の軸力がこの圧縮力と釣り合うようにした。

水平荷重は、基準供試体のように、プレストレスを導入した供試体では、概ね実験結果を再現できている。これは、前記したように、これらの供試体では、載荷中のPC鋼棒ひずみの増分が小さいためである。一方、図-10に示されるように、プレストレスを与えない供試体D4F10P0L2T1FC-Aでは、載荷中のPC鋼棒ひずみの増分が大きいため、実験時の水平荷重を過小評価した。図-10には、実験時に得られたPC鋼棒ひずみの値から計算される圧縮力の増分を断面解析に反映した結果も示しているが、この場合には、概ね実験結果と整合した計算値が得られている。

水平変位に関しては、限界状態3の変位が過小評価されている。これは、式(5)の補正係数を同定する際に、今回

実験した全ての杭体について安全側の評価となるように $\alpha$ を求めたためである。供試体によっては、相当に安全マージンが大きくなっており、今後、限界状態3の評価法はさらに検討する必要がある。

## 5. まとめ

1. 高強度RC杭体の正負交番載荷実験を実施し、コンクリート圧縮強度や導入プレストレスの大きさ、さらには炭素繊維シートの貼付の有無が水平荷重-水平変位関係に及ぼす影響について検討した。その結果、プレストレスの導入により最大荷重が増加すること、炭素繊維シートの貼付により、軸方向鉄筋降伏後にも急速に水平荷重を失うことなく、適当な変形性能を有すること、などを確認した。
2. 正負交番載荷実験により得られた水平荷重-水平変位関係の骨格曲線の再現を試みた。水平荷重の評価は妥当なものの、部材の終局点とした炭素繊維シートの破断点に相当する水平変位の算定法は、今後の見直しが必要である。

## 謝辞

実験供試体の製作には、前田製管(株)水沢工場の方々にご協力いただきました。正負交番載荷実験の実施に際しては、大林組(株)技術研究所のご協力をいただきました。また、高周波熱錬(株)からは、PC鋼棒と横拘束筋のご提供、およびPC鋼棒の緊張方法をご指導いただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 浅沼大寿, 秋山充良, 佐藤啓, 鈴木基行: 高強度RC杭体へのプレストレス導入による曲げ耐力の改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1003-1008, 2008.
- 2) 青木直, 秋山充良, 佐藤啓, 鈴木基行: 炭素繊維シートで被覆した高強度RC杭体の単調曲げ載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.553-558, 2009.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 2002.
- 4) Mattock, A.H.: Discussion of "Rotation Capacity of Reinforced Concrete Beams" by W.G.Corley, Journal of Structural Division ASCE, Vol.93, ST2, pp. 519-522 April.1967.
- 5) 細谷学, 川島一彦: 炭素繊維シートで横拘束したコンクリート柱の応力度-ひずみ関係に及ぼす既存鉄筋の影響とその定式化, 土木学会論文集, No.620/V-43, pp.25-42, 1999.5