

# 論文 マルチスプリングモデルを用いた PRC 杭の曲げ解析

成瀬 俊佑\*1・小原 拓\*2・河野 進\*3・宮原 清\*4

**要旨：**片持ち形式で曲げせん断载荷実験を行った PRC 杭 3 体に対してマルチスプリングモデルを用いた曲げ解析を行い、杭部材の限界状態が予測可能な解析モデルを構築する。その最初のステップとして、本論文では荷重-変形角関係および、残留変形角、等価粘性減衰定数、および各材料の経験ひずみについての再現性を検討した。解析は実験の履歴復元カーループをやや細めに評価したが、最大耐力や残留変形角を比較的高い精度で再現することができ、部材および材料レベルの損傷を精緻に評価するための課題が明確となった。

**キーワード：**PRC 杭, 曲げ解析, マルチスプリングモデル, 残留変形角, 等価粘性減衰定数

## 1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震および 2016 年熊本地震発生後に詳細な杭の調査が行われ、杭基礎の被害により建物の沈下・傾斜が生じ、継続的な使用が困難となった事例が多く報告された<sup>1)</sup>。杭基礎の損傷を見つけることは難しく、杭の補修・補強およびジャッキアップ等による傾斜の修正、および取壊しによるコストは極めて高く工期も長い。加えて、基礎構造は大地震に対する 2 次設計が法的に定められておらず<sup>2)</sup>、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」<sup>3)</sup>の改訂にあたり、既製コンクリート杭の耐力および変形性能におけるデータが不足していることも指摘されている<sup>4)</sup>。以上の理由から基礎構造の設計方法および性能評価法を早急に検討する必要がある。しかし、いまだに既製コンクリート杭については終局までの変形性能および耐震性能評価を行うための実験データは不十分であり、PRC 杭や PHC 杭は製造時からのコンクリート収縮や鉄筋による断面欠損が原因となり、耐力にばらつきが生じやすいなどの問題もある。これらの問題に対処すべく竹森ら<sup>5)</sup>は、軸力作用下で PRC 杭の曲げ耐力および曲げ変形性能を確認するため、曲げせん断実験を行った。さらに田中ら<sup>6)</sup>は複数のコンクリートモデルを用いたファイバーモデルによる断面解析も実施した。そこで本研究では、竹森らの PRC 杭体の終局時挙動を対象とした 3 体の片持ち形式の载荷実験を、同じ損傷領域長さや材料特性を用いたマルチスプリングモデル(以下 MS モデル)を用いて解析し、実験から得られた荷重-変形角関係、等価粘性減衰定数、および残留変形角の再現を試みた。杭体において、従来の M-φ 関係に加え損傷長さを考慮して杭体要素をモデル化することが重要であることを明らかにする。

## 2. 解析対象概要

図-1に、竹森ら<sup>5)</sup>が実施した PRC 杭の構造図を示す。対象試験体は杭径 D:400mm で、軸方向鋼材として PC 鋼棒(φ10-8 本)と異形棒鋼(SD295A D16-8 本)を、せん断耐力向上のためスパイラル筋(SD295A φ7)を配置し、プレテンション方式によりプレストレスを導入した。図-2 に試験体载荷装置を示す。PRC 杭は鋼製スタブ下端までありスタブと杭の間 20mm は高強度グラウトを充填した。表-1 に PRC 杭の試験体諸元を示す。3 体とも同一の試験体で軸力比を変数とした。载荷は片持ち梁形式で载荷点高さは 1200mm とした。写真-1<sup>5)</sup>に载荷終了後の損傷状況を示す。破壊形式は 3 体とも曲げ破壊であった。

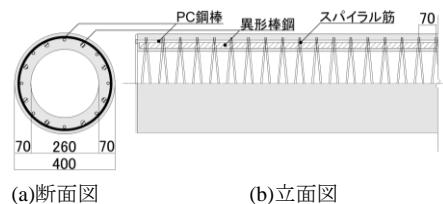


図-1 PRC 杭構造図<sup>5)</sup>

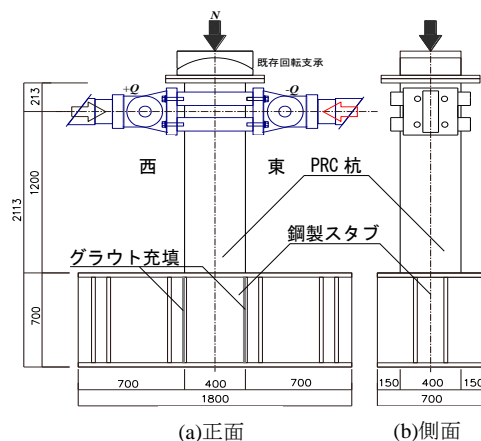


図-2 試験体载荷装置<sup>5)</sup>

\*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系 (学生会員)

\*2 東京工業大学 科学技術創成研究院 助教 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京工業大学 科学技術創成研究院 教授 Ph.D. (正会員)

\*4 一般社団法人コンクリートパイル・ポール協会(COPITA) (非会員)

表-1 解析対象 PRC 杭試験体の諸元<sup>5)</sup>

試験体	壁厚 t (mm)	コンクリート		軸力 N(kN)	軸力比 N/N <sub>max</sub>
		圧縮強度 F <sub>c</sub> (MPa)	ヤング係数 E <sub>c</sub> (MPa)		
PRC1	75.3	117.0	47949	0	0.00
PRC2	75.6	113.6	47353	2000	0.27
PRC3	76.3	120.6	48578	3000	0.40

杭径 D:400mm, PC 鋼棒は φ10, 降伏強度  $f_{py}$ :1331MPa, 引張強さ  $f_{pu}$ :1404MPa, ヤング係数  $E_{pc}$ : $1.98 \times 10^5$  MPa, 異形棒鋼は D16, 降伏強度  $f_y$ :372MPa, ヤング係数  $E_s$ : $1.85 \times 10^5$  MPa である。軸耐力  $N_{max}$  は  $A_s f_y + A_{ps} f_{py} + A_c f_c$  として求めた。但し,  $A_s$  は異形棒鋼の断面積,  $A_{ps}$  は PC 鋼棒の断面積,  $A_c$  はコンクリートの断面積である。有効プレストレス量は, PRC1 および PRC2 では  $5.4\text{N/mm}^2$ , PRC3 では  $5.3\text{N/mm}^2$  である。



(a)PRC1 (b)PRC2 (c)PRC3

写真-1 載荷後の損傷状況<sup>5)</sup>

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析手法

図-3に PRC 杭試験体の解析モデルを示す。解析には弾塑性解析プログラム SNAP<sup>7)</sup>を使用した。杭は弾性柱要素を用いてモデル化を行った。杭下端部, コンクリートおよび異形棒鋼は MS モデルで置換した。PC 鋼棒は MS モデルとは別にトラス要素としてモデル化し, 初期張力を導入することで杭体にプレストレスを導入した。MS モデル対象領域は PRC2 の観測に基づいた損傷集中領域長さ 200mm(0.5D)とし, これをすべての杭に適用して得られる結果について議論する。本解析の MS モデルで損傷集中領域長さを用いると, 杭の抜け出し分を含めて荷

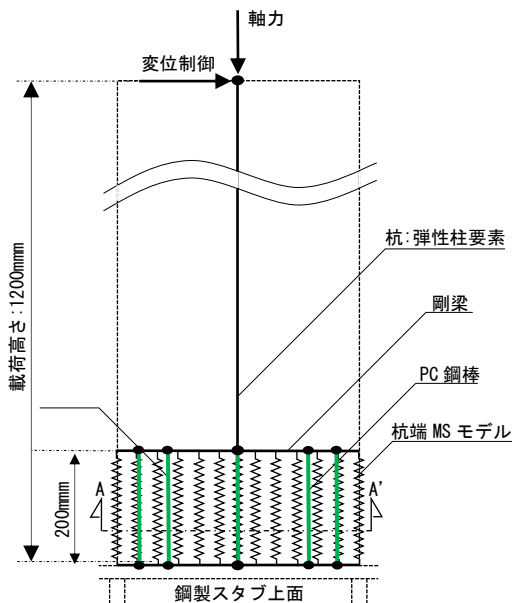


図-3 PRC 杭試験体の解析モデル

重変形角関係など実験結果を再現できる。

図-4に A-A'断面における MS モデルの要素分割図を示す。断面は円周方向に 72 分割, 半径方向にはコンクリートを 20 分割した。PC 鋼棒の断面欠損部分もコンクリートが充填されているものとしてモデル化した。解析上の載荷方法は実験と同様に片持ち梁形式とし, 最上部節点に一定の軸圧縮力を与え, さらに実験結果で得られた水平変位履歴を与えた。

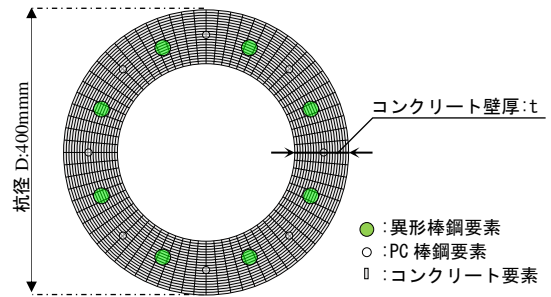
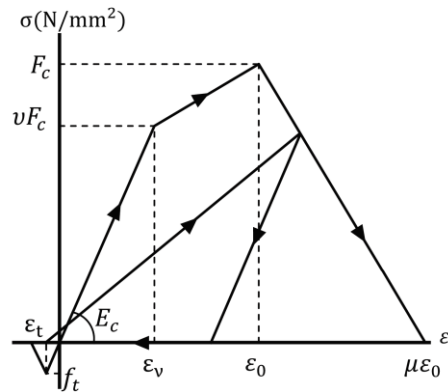
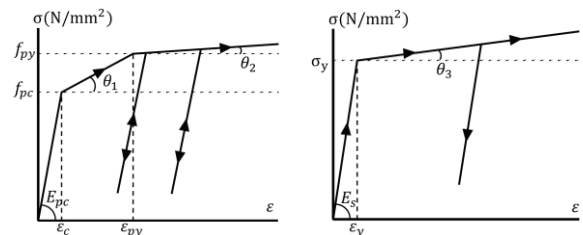


図-4 A-A'断面における MS モデルの要素分割図



(a)コンクリートモデル



(b)PC 鋼棒モデル

(c)異形棒鋼モデル

図-5 材料の応力-ひずみ関係

#### 3.2 材料構成則

図-5に材料の応力-ひずみ関係を示す。コンクリートの包絡線はトリリニアモデルとし, 繰り返しの内部履歴は, 除荷剛性を初期剛性と同値とし, 再載荷においては経験最大ひずみ点を指向する規則とした。コンクリートの圧縮強度  $F_c$  およびヤング係数  $E_c$  は材料試験結果<sup>4)</sup>を用いた。コンクリートの圧縮強度ひずみは, スパイラル筋による拘束効果はないものとして, 文献 8)による計算

方法を用いて導出した。終局限界ひずみ $\mu\epsilon_0=0.007$  および引張強度 $f_t=F_c/20$ とした。PC 鋼棒では包絡線をトリリニア型、異形棒鋼ではバイリニア型とし、内部履歴は PC 鋼棒、異形棒鋼ともに修正 Ramberg-Osgood モデル<sup>9)</sup>を用いた。異形棒鋼の降伏強度 $\sigma_y$ およびヤング係数 $E_s$ 、PC 鋼棒の第一折点の強度 $f_{pc}$ 、降伏強度 $f_{py}$ およびヤング係数 $E_{pc}$ は材料試験結果<sup>4)</sup>を用いた。また各鋼材のひずみ硬化を考慮し、降伏点後の剛性は $\theta_1 = 0.32E_{pc}$ 、 $\theta_2 = 0.01E_{pc}$ 、 $\theta_3 = 0.01E_s$ とした。

#### 4. 解析結果および実験結果との比較

##### 4.1 水平荷重 Q (kN) 一部材変形角 R (%) 関係

図-6に水平荷重Q(kN)一部材変形角R(%)関係を実験結果と併せて示す。部材変形角R(%)は荷重点の水平変位を荷重高さで除した値である。グラフ上には最大耐力、終局耐力時の点および各鋼材の降伏点をプロットした。終局耐力は最大耐力が80%低下した値とした。解析結果は実験結果の履歴曲線を概ね精度良く追跡した。実験では全試験体とも杭脚部でコンクリートが曲げ圧壊することで最大耐力が決定しており、解析でも同様の結果が確認できた。

PRC1 では、解析における最大耐力は実験値まで届かなかったが、正荷重および負荷重の実験における履歴曲線を概ね追跡できた。負荷側最大耐力発生時の部材角は実験値と解析値で1%程度の差が生じた。実験では、部材角 $R=3.0\%$ 時に耐力は正荷重側で20%、負荷側で21%低下したが、解析では正荷重側で5%、負荷側で0.6%低下した。解析では最大耐力後の耐力劣化はほぼなく、実験の比較的大きな耐力劣化を再現できなかった。

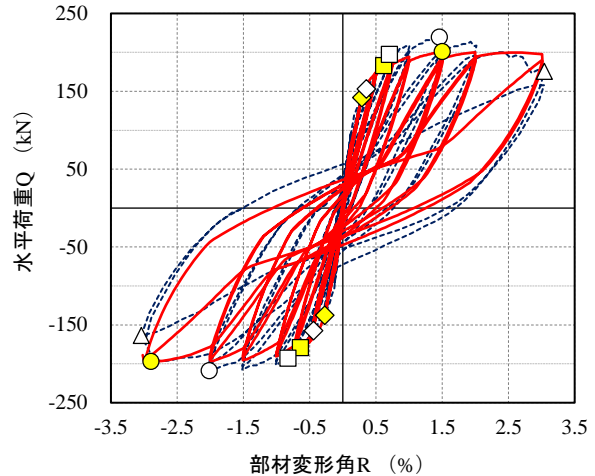
PRC2 の解析結果は  $R<0.25\%$  の範囲では非線形弾性の履歴元力特性を示した。0.25% $<R<0.75\%$  までの包絡線の耐力値は解析値が実験値を下回った。

PRC3 の解析は最大耐力後  $R=0.75\%$  で発散した。実験でも最大耐力後すぐに破壊に至ったことからコンクリートモデルが圧壊して解が発散したと考えられる。PRC2 の解析結果よりもさらに非線形弾性に近い挙動を示した。0.25% $<R<0.75\%$  までの包絡線の耐力値において、解析値は実験値を概ね精度良く追跡する事ができた。

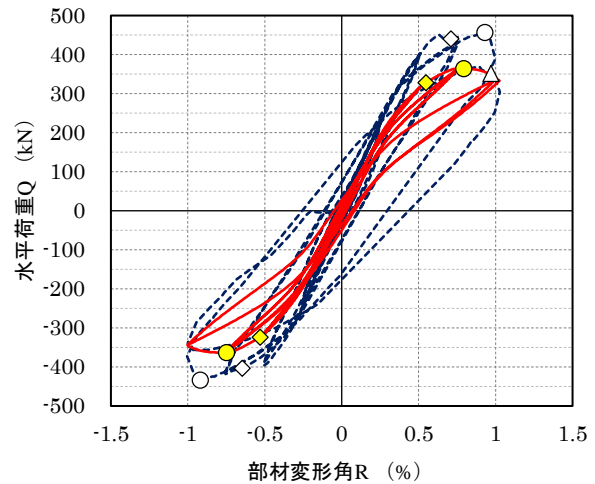
##### 4.2 予測精度の検証

表-2 に最大耐力の解析値と実験値の比較を示す。最大耐力においては、PRC3(軸力比 0.40)が最も予測精度の高い結果となった。

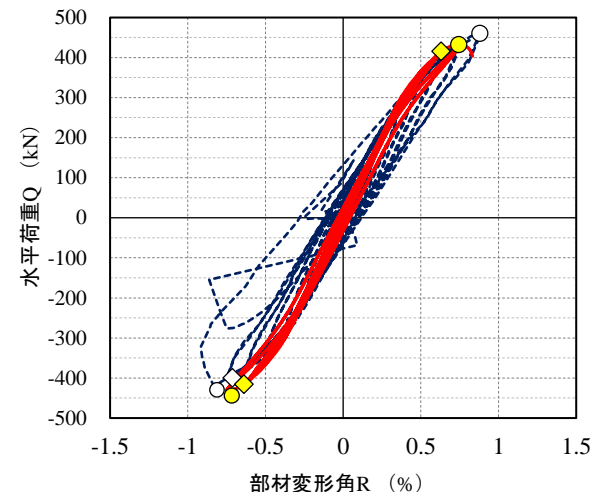
表-3 に最大耐力時部材角の解析値と実験値の比較を示す。最大耐力時部材角においては、PRC1(軸力比 0)が最も予測精度が高く、軸力比が上昇するとともに精度は低下する傾向にあった。



(a) PRC1



(b) PRC2



(c) PRC3

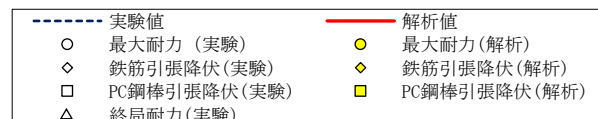


図-6 水平荷重 Q (kN) - 部材変形角 R (%) 関係

表-2 最大耐力の比較

試験体	最大耐力 $Q_{max}$ (kN)		$Q_{max}$ 比率 実験値/解析値
	解析値	実験値	
PRC1	200.9	219.7	1.09
PRC2	364.1	457.0	1.26
PRC3	432.6	460.9	1.07

表-3 最大耐力時部材角の比較

試験体	$Q_{max}$ 部材角 $R_{max}$ (%)		$R_{max}$ 比率 実験値/解析値
	解析値	実験値	
PRC1	0.150	0.146	0.97
PRC2	0.793	0.930	1.17
PRC3	0.750	0.881	1.18

4.3 残留変形角  $R_s$  (%) - 部材変形角  $R$  (%) 関係

図-7 に残留変形角  $R_s$  (%) - 部材変形角  $R$  (%) 関係を示す。全試験体において概ね解析値は実験値を下回った。PRC1 は  $R=2.0\%$  まで、PRC2 および PRC3 は  $R=0.75\%$  まで、実験結果の傾向を再現できた。解析結果は軸力が大きくなるに従って残留変形角が減少する傾向を凡そ再現できた。

4.4 等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  (%) - 部材変形角  $R$  (%) 関係

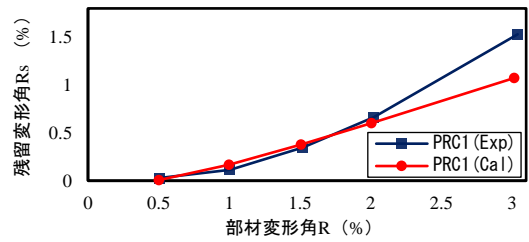
図-8 に等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  (%) - 部材変形角  $R$  (%) 関係を示す。等価粘性減衰定数は杭体水平荷重  $Q$  および部材変形角  $R$  における 2 回目サイクルで評価した<sup>10)</sup>。

PRC1 は、 $R=2\%$  程度まで実験結果をやや下回るものの概ね再現できた。軸力が作用した PRC2 および PRC3 は実験値を大きく下回る結果となった。実験では、杭、グラウトおよび鋼製スタブ間の抜け出しによる界面摩擦の影響でエネルギーが消費されるが、解析ではこのような要因によるエネルギー消費機構が存在せず、水平荷重-部材変形角履歴は軸力が高くなるに従い非線形弾性に近い細ったループ形状を示し、エネルギー消費量が小さくなったことが原因と考えられる。

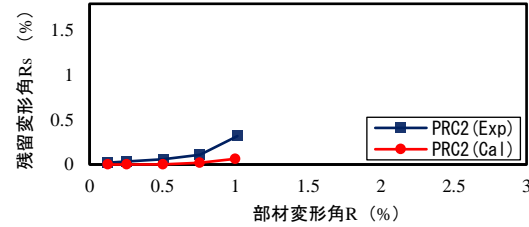
4.5 鋼製スタブ上面から 200mm 位置 (固定端 200mm) の軸伸び量  $\delta_N$  (mm) - 部材変形角  $R$  (%) 関係

図-9 に鋼製スタブ上面から 200mm 位置 (固定端 200mm) の軸伸び量  $\delta_N$  (mm) - 部材変形角  $R$  (%) 関係を示す。実験における軸伸び<sup>11)</sup>は、杭頭 200mm 区間における平均伸び (東西伸びの平均値) である。また軸力载荷直後の初期伸び量は解析値と実験値で等しくしそこからの変化量を示した。解析における伸びは長さ 200 mm のマルチスプリングの伸びを用いた。

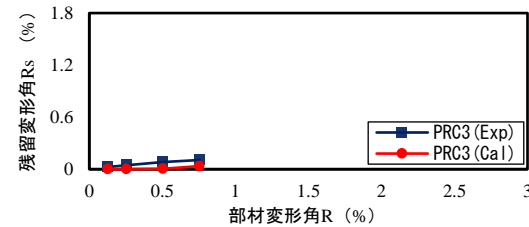
PRC1 では、解析結果のほうが実験結果よりも軸伸びが大きくなったが、実験結果の傾向を追跡することがで



(a) PRC1

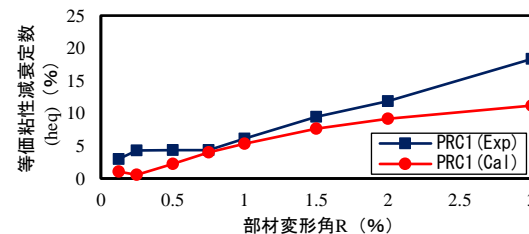


(b) PRC2

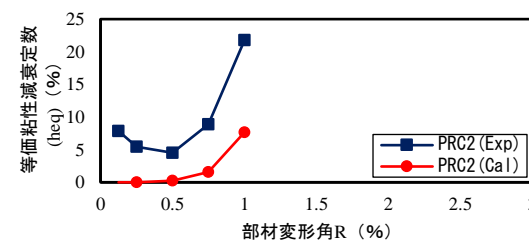


(c) PRC3

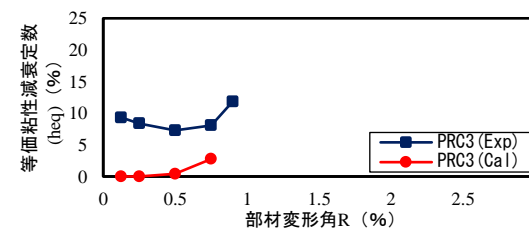
図-7 残留変形角 (%) - 部材変形角 (R) 関係



(a) PRC1



(b) PRC2

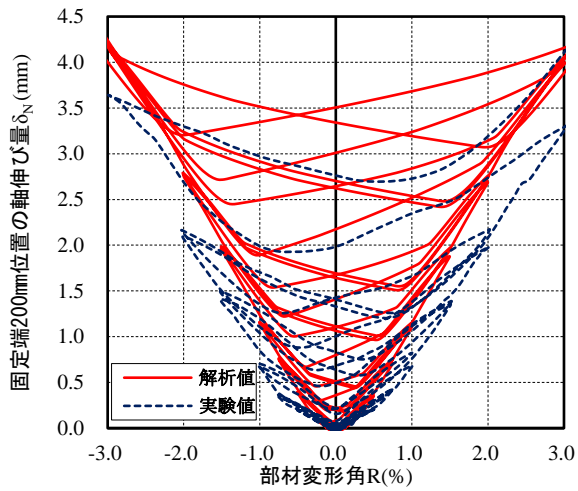


(c) PRC3

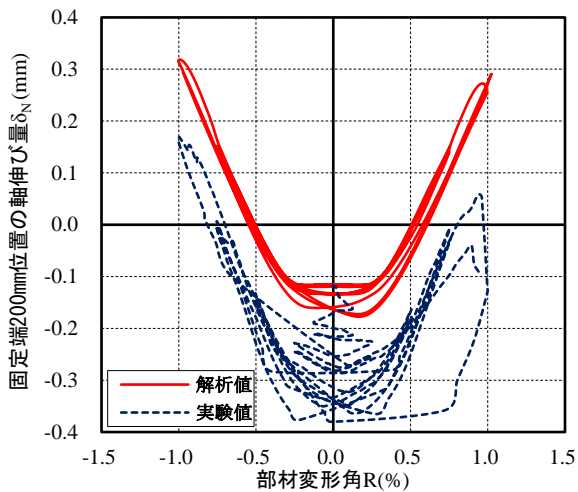
図-8 等価粘性減衰定数  $h_{eq}$  (%) - 部材変形角  $R$  (%) 関係



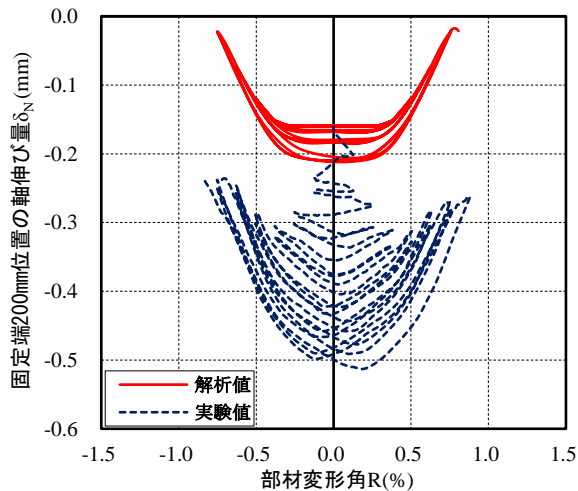
きた。PRC2 では、 $R=1.25\%$ から実験値の伸びは負側に進んだのに対し、解析ではその挙動を再現できなかった。PRC3 では、解析初期から解析値の縮み量増分は実験値の縮み量増分を過小評価した。



(a) PRC1



(b) PRC2



(c) PRC3

図-9 固定端 200 mm位置の軸伸び  $\delta_N$  - 部材変形角 R 関係

#### 4.6 PC 鋼棒・異形棒鋼・コンクリートのひずみ推移

図-10 に西側 PC 鋼棒のひずみ( $\mu$ )、図-11 に東側異形棒鋼のひずみ( $\mu$ )、図-12 に北側および西側のコンクリートひずみ( $\mu$ )の推移を示した。全て、軸力が高い PRC3 の値である。実験におけるひずみは、杭頭部から 125mm 位置のひずみゲージの値を用いた。解析におけるひずみは MS モデルにおける、それぞれの材料を表すバネのひずみを用いた。

PC 鋼棒では、実験において载荷および除荷での経路がほぼ同じであることを再現してはいるものの、実験結果より解析の歪変動が大きくなった。実験では、PC 鋼棒の付着が、解析の PC 鋼棒バネ長さ 200mm よりも長い範囲で劣化しているのではないかと推測できる。

異形棒鋼は、PC 鋼棒と比較するとかなり高い精度で実験結果を再現することができた。最大引張ひずみは解析値のほうが 1000 $\mu$  程高い結果となった。

コンクリートでは、解析値は部材角を北側で $\pm 0.5\%$ まで、西側で $\pm 0.25\%$ まで精度良く再現することが出来た。しかし、それ以降の実験結果のひずみ変動は追跡できなかった。

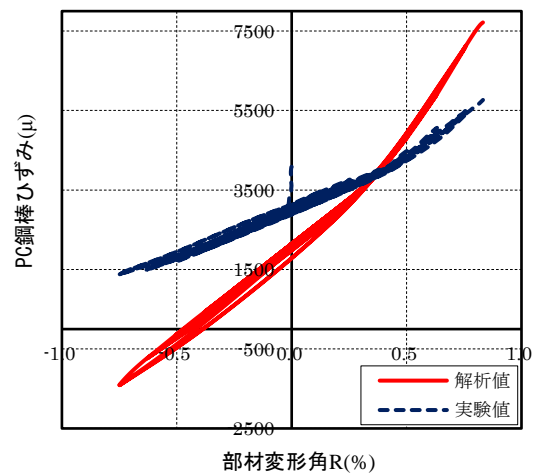


図-10 PRC3 の PC 鋼棒ひずみ-部材変形角 R 関係

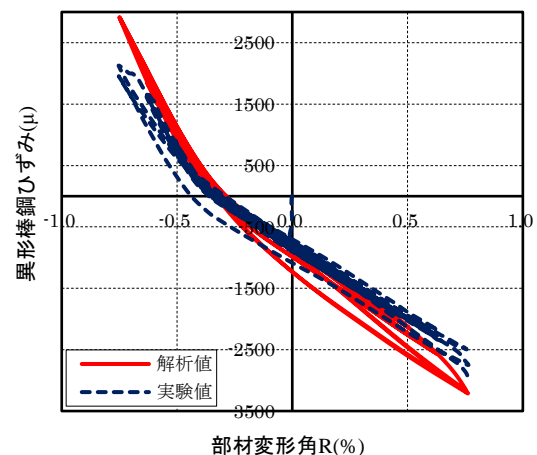
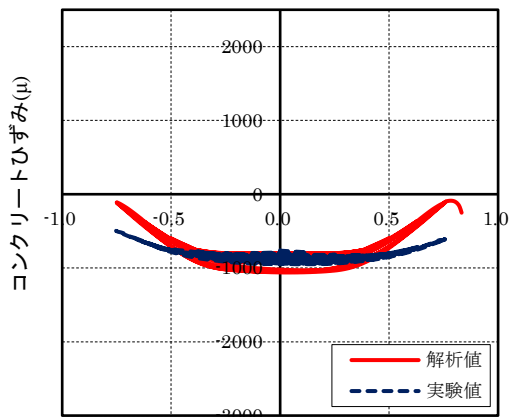
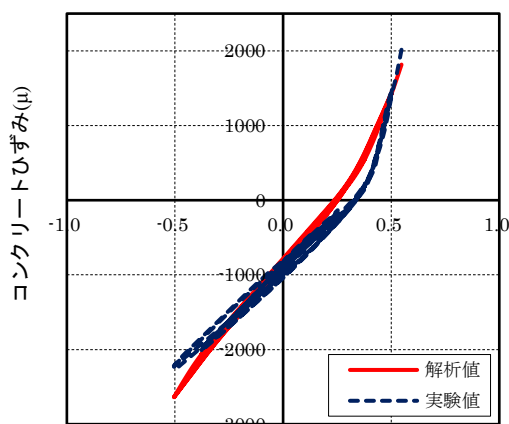


図-11 PRC3 の異形棒鋼ひずみ-部材変形角 R 関係



(a) 北側



(b) 西側

図-12 PRC3のコンクリートひずみ-部材変形角 R 関係

## 5. まとめ

片持ち形式で荷重実験を行った PRC 杭 3 体の曲げ解析を行い、荷重-変形角関係、残留変形角、等価粘性減衰定数、および各材料のひずみの推移について検討を行った。解析で得られた知見を以下にまとめる。

- 解析モデルは、実験結果の履歴曲線を概ね追跡することができた。また、軸力によって変化する残留変形角や、異形棒鋼やコンクリートのひずみの推移も概ね追跡することができた。
- ある程度のエネルギーを消費する実験の履歴ループ形状を正確に再現できなかった。この影響で等価粘性減衰定数に関しても予測精度は良くなかった。

MS モデルを用いたモデル化の簡便さ、計算速度、良好な解の収束状況を考えると、本報のモデル化手法は高く評価できる面はある。一方で、実験結果の再現性が高くない項目も多くあり、解析結果の使い方には十分な注意が必要であり、今後の研究課題と考えている。また、塑性化がある程度の広がりを持つ PRC 杭では、梁や柱など

の鉄筋コンクリート部材と同じように、MS モデルを軸方向に直列に配置した杭部材モデル、または要素長さと  $M-\phi$  関係を同時に規定した杭部材モデルを提案し、上部構造と基礎部材を含めた一体解析モデルの開発を行う予定である。

## 謝辞

本研究は、平成 27 年度住宅・建築物技術高度化事業「大地震後の継続使用性に資する杭および杭頭接合部の技術開発」（代表者 小林勝巳）における実験データなどを参考にさせていただきました。事業に参加された皆様、また「AIJ コンクリート杭の耐震性能 WG」および「COPITA 杭の変形性能評価 WG」の委員各位には大変貴重なご意見を頂きました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 金子治:地震被害および既往の実験から見た杭の限界状態, PD 資料「杭基礎に性能評価型耐震設計法を適用する場合の問題点と展望」, 日本建築学会構造委員会基礎構造運営委員会, pp25-27, 2018.9
- 2) 建築物の構造関係技術基準解説書, pp.396-399, 2007.8
- 3) 建築基礎構造設計指針, 日本建築学会, 2009.11
- 4) 金子治ほか:大地震時に対する耐震性能評価のための既製コンクリート杭の曲げ強度と変形特性, 日本建築学会技術報告集 第 21 巻 第 47 号 2015.2
- 5) 竹森敬介, 本間祐介, 長谷川秀:既製コンクリート杭の曲げ変形性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概, pp.761-764, 2016.8
- 6) 田中広夢ほか:既製コンクリート杭の曲げ変形性能に関する研究(その 5 ファイバーモデルの概要), 日本建築学会大会学術講演梗概, pp.765-766, 2016.8
- 7) 株式会社構造システム:任意形状立体フレームの弾塑性解析プログラム, SNAP Ver.7, pp.116, 121, 303, 311-317, 2019
- 8) 六車熙, 光枝良, 井上弘行:横補強による高強度コンクリートの靱性改善に関する研究(その 2 応力-歪曲線のモデル化), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1915-1916, 1983.9
- 9) 田中清, 佐々木康人, 米山真一郎:鋼種が異なるせん断型パネルダンパーの静的履歴特性に関する実験研究, 構造系論文集, 1999.6
- 10) 柴田明德, 最新耐震構造解析, 森北出版, pp.49, 2003
- 11) 既製 SC 杭および既製 PRC 杭の杭頭部曲げせん断実験, 一般社団法人コンクリートパイル建設技術協会, 20018.3