論文　軸力を受けるＲＣ杭の復元力特性に及ぼす幾何非線形性の影響

牧　　剛史*1・沖津　充紀*2・中村　光寿*2・睦好　宏史*3

要旨：地盤中における RC 杭の挙動を，大変形領域まで把握しようとする動きが急速に高まっている。本研究は，軸力作用下における RC 杭の水平正負交番載荷実験を行い，杭体降伏以後の復元力特性を明らかにした。軸力レベルの増大と共に P-δ モーメントに伴う水平復元力の急激な低下が生じる。併せて，3 次元有限要素解析を行い，この復元力低下現象を解析的に明らかにすると共に，幾何非線形性の考慮／非考慮が解析結果に及ぼす影響について検討した。その結果，軸力作用が復元力特性に及ぼす影響は，軸力レベルのみならず，杭体や地盤の剛性にも依存し，幾何非線形非考慮の解析結果は危険側となることが明らかとなった。

キーワード：RC 杭，軸応力レベル，復元力低下，幾何非線形性，P-δ モーメント

1.　はじめに

兵庫県南部地震の被災調査や，鉄筋コンクリート構造物全体系の耐震設計に関するその後の検討に基づき，近年になって地上構造物を支持する基礎構造物，特に杭基礎の耐震性状に関する検討事例が増加傾向にある[1)]。著者らも過去数年間に渡り，地盤中における鉄筋コンクリート杭の耐震性状に関する検討を進めてきた[2), 6)]。しかしながら，地盤中で杭体が大きく塑性化する大変形領域における性状はまだ明らかになっていない。地震に対する設計荷重が増大する一方で，公共構造物建設において厳しくコストダウンを迫られる今後の展望に鑑み，従来のように基礎を頑丈に設計して地上構造物に損傷を集中させるという考えに囚われず，基礎の塑性域を生かした設計体系の可能性を追求することも重要である。これを実現するためには，杭基礎の大変形挙動を明らかにすると共に，これを高精度に追跡可能な性能評価手法の確立が不可欠である。

以上を背景として，本研究は軸力が鉄筋コンクリート杭の大変形挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実験的検討を行った。さらに，高精度な性能評価手法の確立を将来に見据え，特に軸力作用と密接に関係する幾何学的非線形性が杭の挙動に及ぼす影響を解析的に明らかにすることを目的とするものである。

2.　地盤中におけるＲＣ杭の載荷実験

2.1　実験概要

(1)　載荷システム

本実験で用いた載荷システムを**図-1** に示す。壁面を完全剛とした鋼製土槽中に RC 杭試験体を固定し，比較的粒径が均一な気乾状態の岐阜

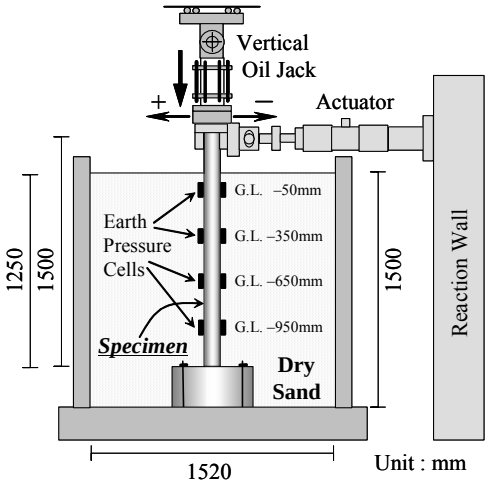

図-1　載荷システム

*1 埼玉大学　助手　工学部建設工学科　工博　　(正会員)
*2 埼玉大学大学院　理工学研究科建設工学専攻　(正会員)
*3 埼玉大学　教授　工学部建設工学科　工博　　(正会員)

砂で周囲を満たして模擬地盤を作製した。地表面から突出した試験体頂部に，鉛直油圧ジャッキで軸力を載荷した状態で，アクチュエータによる水平正負交番載荷を行った。試験体にはひずみゲージと土圧計を貼付して，杭体変形および杭体に作用する地盤反力を測定した。

(2)　実験要因

本実験における全実験ケースを**表-1** に示す。実験パラメータは軸応力レベル（2MPa 一定，4MPa 一定，0~4MPa 変動），地盤状態（緩詰め，密詰め），杭頭回転条件（自由，拘束）とした。

設定した軸応力レベルはそれぞれ，常時（2MPa）および地震時（4MPa）を想定したものである。また，軸応力を変動させたケースについては，上部構造物の応答に伴う変動軸力を想定したものであり，一定軸応力のケースにおける実験結果を踏まえ，杭頭水平変位に応じて**図-2** のように応力レベルを変動させた。

杭頭拘束のケースは，実杭において杭頭部がフーチングに剛結されている状態を想定して，杭頭部に小さめのフーチングを設け，このフーチングが回転しないように水平載荷を行ったものである。地震時にはフーチングには並進応答のみならず，回転応答も生じることから，実際の杭においては，杭頭回転自由と回転拘束の中間的な状態となることが推測される。

(3)　試験体諸元

実験で用いた RC 杭試験体は全て，100mm 四方の正方形断面とした。軸方向鉄筋には SD345 の D6 異形鉄筋を 4 本用い，縁から鉄筋中心までの距離を 20mm とした。また，帯鉄筋は試験体がせん断破壊を生じず，曲げ破壊モードとなるために充分な鉄筋量として，φ3.2mm の鋼線（降伏強度 800MPa 程度）を 100mm 間隔で配置した。以上の諸元は，実験で用いた試験体 5 体全てにおいて同一とした。なお，コンクリートのシリンダー強度はいずれの試験体においても 40～45MPa 程度であった。

2.2　実験結果

(1)　地盤の状態と試験体の損傷状況

表-1　実験ケース一覧

No.	Pile	Soil	Pile Head	Axial Stress
L-2	RC	Loose	Free	2 MPa
D-2		Dense		2 MPa
D-4				4 MPa
D-V				0 ~ 4 MPa
D-C			Confine	2 MPa

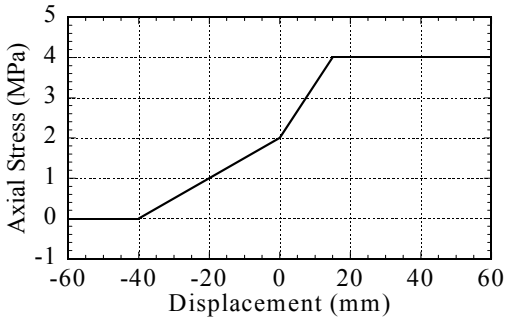

図-2　軸応力変動パターン（D-V）

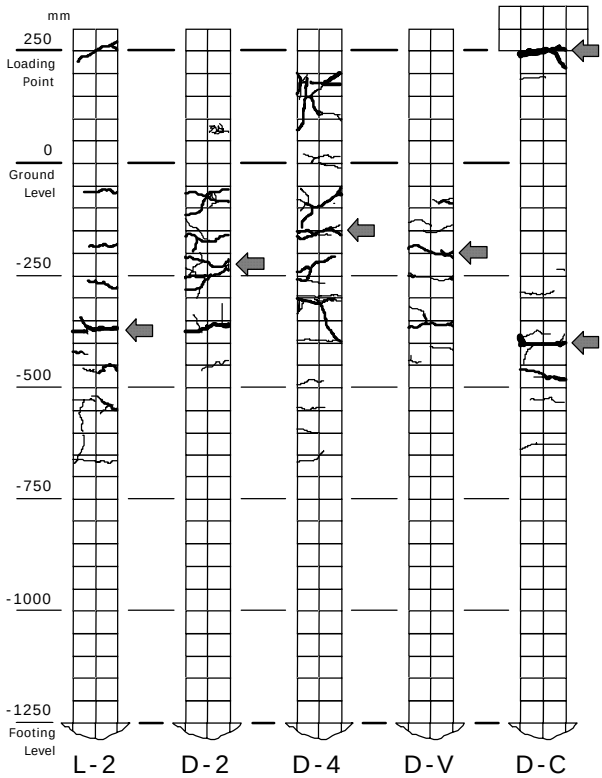

図-3　各試験体のひび割れ状況

地盤材料として乾燥砂を用いているため，載荷中において杭体の周囲に砂が流れ込んで沈下する現象が生じた。これは既往の実験結果[3]においても見られた現象である。各試験体の損傷（ひび割れ）状況を**図-3** に示す。載荷終了後，試験体を地盤中から取り出して最大損傷位置の目視確認を行ったところ，緩詰め地盤のケース

（L-2）では G.L.-350～-400mm 付近，密詰め地盤で杭頭回転自由のケース（図中 D-2，D-4，D-V）では G.L.-150～-250mm 付近，杭頭回転を拘束したケース（図中 D-C）では G.L.+250mm および G.L.-400mm 付近であった。それぞれの最大損傷深さは図中に灰色矢印で示してある。既往の研究[4]より，杭体に生じる最大損傷深さは，杭体と周辺地盤との相対剛性に依存することが明らかとなっている。本実験においても，同様の傾向が見受けられた。なお，鉄筋とコンクリートの付着に影響を及ぼすのを避けるために，軸方向鉄筋へのゲージ貼付は最小限の枚数（350mm 間隔）にとどめた。このため，目視確認による損傷位置はゲージ貼付位置と必ずしも一致していないが，目視確認による損傷位置に最も近いゲージの実測値から，軸方向鉄筋が降伏した位置は**図-3** 中の矢印位置とほぼ一致するものと考えられる。

(2) 杭頭復元力－水平変位関係

ケース D-2，D-4，D-V について，杭頭復元力－水平変位関係の履歴曲線を**図-4** に示す。軸応力レベルが高いほど，最大荷重値も大きくなっているが，最大荷重後の荷重低下もやはり大きくなることが分かる。また，荷重低下が生じる変形レベルにおいては，履歴ループが大きな瓢箪型を描く。さらに，正負の杭頭変位に応じて作用軸応力を変動させた D-V においては，高軸応力を作用させた正側で D-4 と同程度の荷重低下が見られるのに対し，軸応力を減少させた負側においては荷重低下が生じていないことが分かる。

全ケースの復元力－塑性率骨格曲線（正側）を**図-5** に示す。ここで，塑性率は水平変位を降伏変位で除した値とし，降伏変位は試験体軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した時点の変位として定義した。杭頭拘束のケース（D-C）では部材の降伏が 2 箇所で生じる（**図-3** 参照）ため，ここでは 2 個目の塑性ヒンジ（G.L.-400mm）が生成された時の変位を降伏変位とした。この結果より，高軸応力が作用する D-4 や D-V では部材

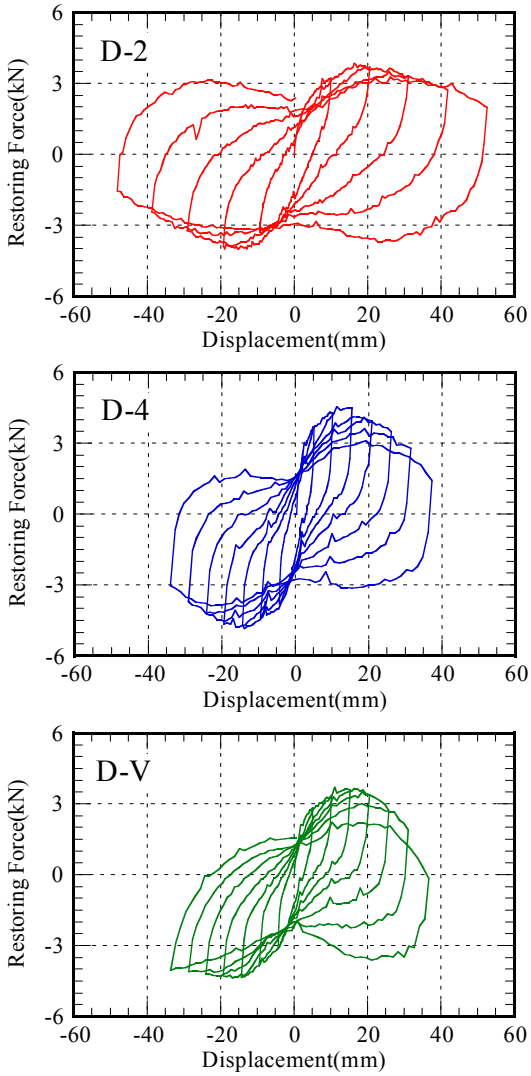

図-4　杭頭復元力－水平変位履歴曲線

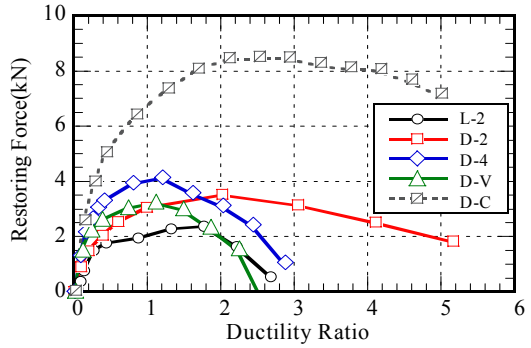

図-5　杭頭復元力－塑性率骨格曲線

降伏時点で最大荷重を示し，その直後から急激な荷重低下を生じるのに対し，軸応力が低レベルのケース（L-2，D-2）では部材降伏後も荷重の増加が見られる。また，杭頭拘束のケース（D-C）では杭体降伏後も安定した復元力を維持し，非常に靭性的な挙動を示した。これは，1 個目のヒンジが部材頂部（G.L.+250mm）で生じ

るため，軸力に伴う P-δモーメントの影響が比較的小さかったものと考えられる。

3． 3 次元有限要素解析による検討

3.1 解析手法の概要

本研究では，東京大学で開発された 3 次元有限要素解析コード COM3[3), 4)] を用いた。本コードは Fiber モデルに立脚した RC 構造の 3 次元骨組み解析が実現され，併せて 3 次元立体要素による地盤のモデル化も可能である。Fiber モデルは平面保持の仮定の下，要素の平均軸ひずみと 2 方向曲率から，断面内各ファイバーの軸ひずみを算定する。これにコンクリートおよび軸方向鉄筋の履歴依存型材料構成則を適用して各ファイバーの応力を算定し，これを積分して要素の断面力が計算される。また各ファイバーを，鉄筋とコンクリートの付着作用が及ぶ領域（RC Zone）と及ばない領域（PL Zone）に分類するゾーニング手法[5)] が取り入れられており，配筋に応じて適切な領域を設定する。なお，本解析ではかぶりコンクリートの剥落や軸方向鉄筋の座屈・抜け出しといった，高非線形域における挙動は考慮しておらず，杭における上記挙動の解明と定量化は今後の課題である。RC 梁要素の詳細な定式化については参考文献[4)] に譲る。

本解析で用いた解析モデルを**図-6** に示す。杭体は上述した Fiber モデルに基づく 3 次元 RC 梁要素，周辺地盤は 3 次元立体要素によってモデル化した。地盤立体要素は，要素の偏差応力－偏差ひずみ関係に対して，Ohsaki モデルを導入してせん断非線形を記述し，体積成分については線形弾性を仮定している。なお，RC 梁要素と地盤要素との間には，界面の挙動を記述するようなジョイント要素は設置せず，完全節点共有としている。

3.2 解析結果と実験結果の比較

解析から得られた杭頭復元力－変位履歴曲線を実験結果と比較した例を，D-2 と D-4 のケースについて**図-7** に示す。復元力の推定値が若干小さく，履歴ループもかなり小さめに評価されているが，軸力作用に伴う復元力の低下および瓢箪型の履歴形状については，解析は実験で見られた現象を追跡していると言える。**図-8** は塑性率の増加に伴う履歴吸収エネルギーの変化を示しているが，このように実験結果をかなり過少評価している。以上の傾向は，他の実験ケースについても同様であった。なお，杭体と地盤

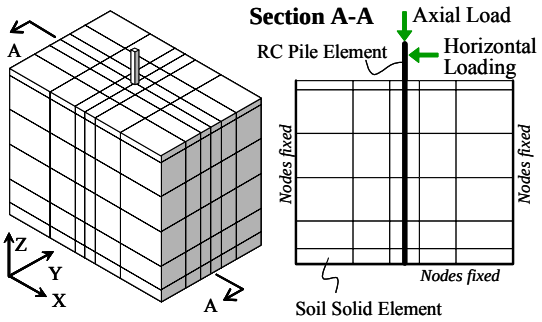

図-6 杭－地盤系の有限要素解析モデル

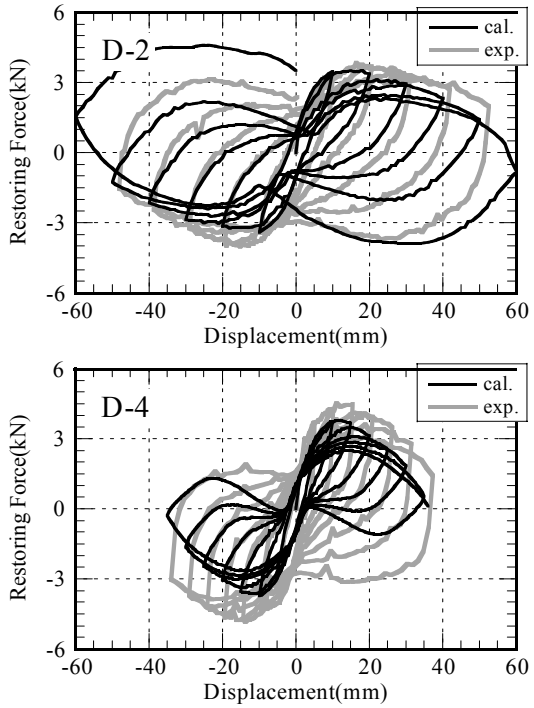

図-7 復元力－変位関係の比較

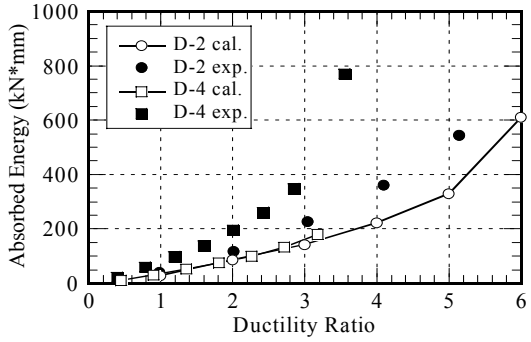

図-8 履歴吸収エネルギーの推移

との間を節点共有させた解析条件が実験のシミュレーション結果に及ぼす影響については，既往の研究[6]で述べられており，本検討においても同一の考察が該当する。特に変位ゼロ近傍における復元力には，この杭－地盤間の条件が影響しているものと考えられる。

3.3　杭頭水平復元力特性に及ぼす幾何非線形性の影響

(1)　幾何非線形性と杭基礎の挙動

前節 **3.2** で行った解析結果は，幾何非線形性を考慮したものである。特に部材の大変形域を対象とした解析を行う場合，微小変形理論では無視できた変位とひずみの関係式における二次の微分項が無視出来なくなることを意味する。この顕著な例として，高軸力・大変形を受ける柱の P-δ 効果が挙げられるが，一般の RC 部材に対しては，幾何非線形性を考慮した設計を行うことが原則とされている。

地盤中に設置された杭基礎については，大変形域の検討例が少ないこともあり，幾何非線形性の影響は全く議論されていない。本節では，幾何非線形性が杭の挙動，特に杭頭復元力特性に及ぼす影響について，解析的検討を試みる。**２．**で述べた載荷実験 5 ケースを軸として，幾何非線形を考慮しない解析を追加し，主として杭頭復元力のピーク後の荷重低下および杭体の変形状態について検討を行った。

(2)　復元力特性と変形性状に及ぼす影響

一定軸応力（D-2），杭頭回転拘束（D-C）のケースにおける復元力－変位関係の比較を**図-9** に示す。これらの図より，軸力作用に伴い，幾何非線形考慮／非考慮の差異が著しく増大し，復元力の値のみならず，履歴ループの形状とその大きさに影響を及ぼすこと，杭頭の回転が拘束されるケースではその影響が小さくなることが分かる。

幾何非線形を考慮した解析における杭頭復元力（①）に対する，非考慮解析の復元力（②）の比（荷重比②／①）を，各ケースの塑性率に対してプロットした結果を**図-10** に示す。軸応

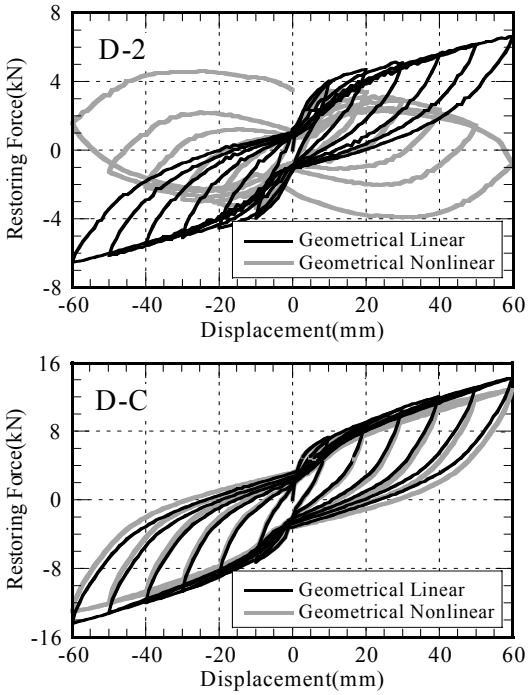

図-9　復元力－変位関係に及ぼす影響

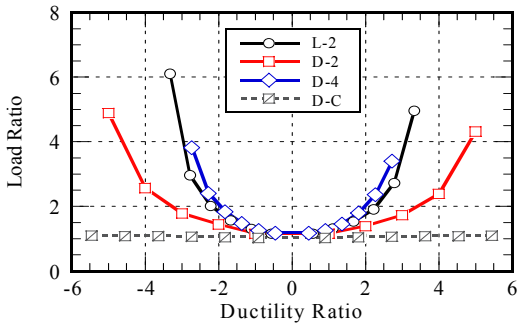

図-10　塑性率－荷重比関係

力レベルの上昇と共に，荷重比の増大が加速されることが明らかである。また，L-2 と D-2 の比較から，同一の軸応力レベルであれば緩詰め地盤の方が荷重比の増大が大きい。この理由は次のように考えられる。すなわち，杭体が同一諸元であれば，緩詰め地盤における杭の方が，最大損傷位置が深くなる。杭体の最大損傷位置（最大モーメント位置）におけるモーメントが同一であれば，その位置が深いケースほど杭頭変位が大きくなり，結果として杭体に作用する P-δ モーメントも大きくなるためである。

D-4 における杭頭変位 30mm 時，および D-C における杭頭変位 50mm 時の杭体深さ方向曲率分布を**図-11** に示す。D-4 の結果では，幾何非線形を考慮しない解析では，杭体に生じる最大

損傷位置を深く推定することが分かる。このことは杭頭水平荷重が高めに推定されることと密接に関連している。一方，杭頭復元力に顕著な差異が現れなかったケース D-C においては，杭体の変形状態にもそれほど影響が現れない。

4. まとめ

本研究では，軸力を受ける RC 杭の大変形域における復元力特性を明らかにすることを目指すと共に，その性能評価手法の確立を将来に見据え，特に幾何非線形性が杭頭復元力特性に及ぼす影響について実験的･解析的検討を行った。得られた知見を以下に示してまとめとする。

(1) 軸力作用下の RC 杭においても，杭体と地盤との相対的な剛性比に応じて，最大損傷位置が決定される。

(2) 高軸応力レベルでは，杭体降伏と共に復元力の急激な低下が開始する。杭頭回転を拘束したケースでは，これが顕著には現れず，靭性的な挙動を示す。

(3) 適用した 3 次元有限要素解析手法により，軸力作用に伴う復元力の低下傾向を解析的に追跡可能である。ただし，履歴ループの形状や大きさについてはさらなる検討が必要である。

(4) 幾何非線形性を考慮しない解析は，杭頭復元力を過大評価する可能性があり，その程度は軸力レベルが高いケースほど大きい。また，塑性率を指標とした場合は，杭体の最大損傷位置次第では P-δ モーメントが大きくなり，過大評価の傾向が強まる。

謝辞

本研究で用いた解析プログラムは，東京大学前川宏一教授の御厚意により使用させて頂いた。ここに記して感謝の意を表します。また，実験に御尽力頂いた佐々木 満範氏（元 埼玉大学大学院）をはじめ，埼玉大学建設材料研究室メンバー各位に謝意を表する。

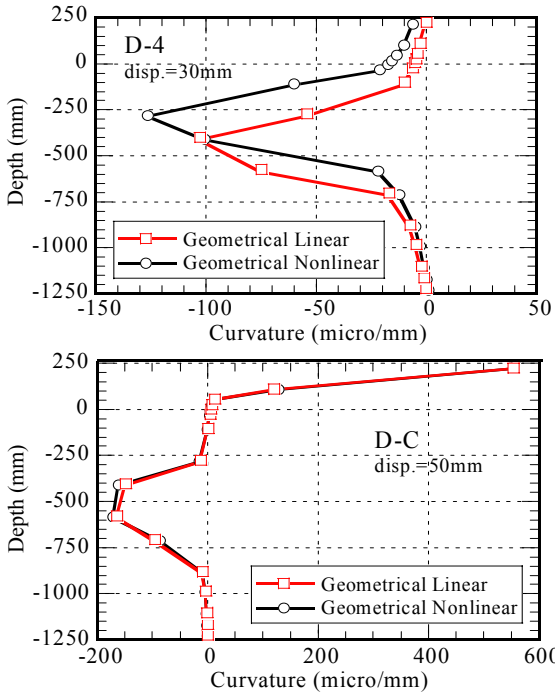

図-11 杭体の深さ方向曲率分布の比較

参考文献

1) 例えば，近藤他：高軸力変動下における高強度せん断補強鉄筋を用いた模型杭の載荷試験，杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム，pp.3-8，2001.9

2) 牧，睦好：鉄筋コンクリート杭の水平復元力特性と変形性状に関する研究，土木学会論文集，No.683/V-52，pp.103-118，2001.8

3) 岡村，前川：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991

4) 土屋他：Fiber Model を用いた 3 次元有限要素動的解析における多方向入力を受ける RC 橋脚の応答，JCI 塑性域の繰り返し劣化性状に関するシンポジウム，pp.359-368，1998.8

5) An, X. et al.: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, Proceedings of JSCE, No.564/V-35, 1997.5

6) 牧　剛史：地盤中における鉄筋コンクリート杭の復元力特性と性能評価手法に関する研究，東京大学学位論文，2002.7