

論文 地震荷重を受ける場所打ち杭頭接合部の 3 次元非線形 FEM 解析

米澤 健次^{*1}・倉本 洋^{*2}・井上 芳生^{*3}

要旨：地震力を受ける杭頭接合部の非線形挙動に対する解析モデル及び解析手法を検討するために、既往の実験試験体を対象とした 3 次元非線形 FEM 解析を実施した。その結果、内柱下及び側柱下の杭頭接合部を想定した合計 7 体の試験体について、解析により実験の非線形挙動を良好な精度で再現できることを確認した。さらに、解析結果の考察により、杭頭接合部の応力伝達機構及びパイルキャップのせん断有効断面積は内柱下と側柱下で異なり、また、側柱下に関しては、せん断力の方向によっても異なることを確認した。

キーワード：杭頭接合部、三次元非線形 FEM 解析、場所打ち杭

1. はじめに

中高層建物に多く用いられる杭基礎に関しては、二次設計が義務付けられておらず、大地震に対する設計においては、統一的な設計手法はなく設計者に委ねられている部分が多いのが現状である。そのような背景の中、震災で多くの基礎の被害事例が報告され、大地震に対する杭基礎の設計が見直され、その要求性能及び性能評価に関する議論が行われ始めている。しかし、地震力が作用した場合の杭基礎の構造性能に関する研究例は非常に少なく、その強度及び変形性能に関して未解明な部分が多く、合理的な評価手法が確立されていない。大地震を対象とした杭基礎の設計を行うためには、特に複雑な応力状態になる杭頭接合部の強度及び変形性能に対する影響因子を把握し、その定量的な評価手法の立案が不可欠と考えられる。

ここでは、数少ない杭頭接合部の構造性能に関する研究の中から、小林らが実施した場所打ち杭—基礎梁部分架構実験^{1),2)}を対象とした三次元非線形 FEM 解析を行い、地震力が作用する杭頭接合部の強度・変形性能に対する解析手法及び解析モデルの適用性について検討した。さらに、解析結果を用いて杭頭接合部の応力伝達機構及び変形性状を考察した。

2. 解析対象試験体

小林らは大地震時における場所打ち杭の変形特性を考慮した力学モデルを作成することを目的に、内柱下と側柱下の両方を対象として杭頭—基礎梁部分架構実験を実施している^{1),2)}。この実験では、隣接する基礎梁との相関作用を考慮した杭主筋の付着・定着性能と杭頭部の力学性能の評価に主眼をおき、主な実験変数は杭主筋量、杭主筋の定着長さ（パイルキャップ成）、杭軸力として、7 体の試験体の正負交番載荷を行っている。試験体は杭・基礎梁・パイルキャップがモデル化され、10～15 階の建物を想定した約 1/3 縮小模型である。本解析ではこれらの内柱下 4 体及び側柱下 3 体の実験を解析対象とした。

内柱下の杭頭接合部は形状も左右対称でほぼ一定軸力が作用するものと考えられ、図-1(a)に示すような応力状態になる。一方、側柱下の場合、建物の転倒モーメントの影響により大きな変動軸力が作用し、図-1(b)に示すように形状が対称でないことから、杭のせん断力の方向によって、接合部内の応力状態が異なる。なお、軸力増大時には基礎梁と杭が閉じる方向に、軸力減少時には開く方向にせん断力が生じる。実験ではそれぞれの応力状態を模擬した載荷方法が採用されている。試験体の諸元を表-1 に示

*1 (株)大林組 技術研究所建築構造研究室主査 博士(工学) (正会員)

*2 豊橋技術科学大学 工学部建設工学系助教授 博士(工学) (正会員)

*3 (独)都市再生機構 技術・コスト管理室部長 (正会員)

し、試験体形状と加力方法を図-2に示す。実験の詳細は文献 1),2)を参照されたい。

3. 解析概要

本解析はコンクリート系部材の非線形有限要素解析プログラム“FINAL”を用い、材料非線形だけでなく幾何学的非線形も考慮した。

3.1 モデル化手法

図-3に解析モデル例を示す。解析は試験体の対称性を利用して半分のみをモデル化し、対称面は面ローラ支持とした。コンクリートは六面体要素、基礎梁と柱の主筋はトラス要素、杭主筋・補強筋、及びパイルキャップ補強筋には鉄筋層のみを有する四辺形要素を用い、基礎梁と柱のせん断補強筋は、コンクリート要素に鉄筋の剛性を重ね合わせてモデル化した(図-4参照)。

3.2 材料構成則

(1) コンクリート

コンクリートは、等価一軸ひずみに基づく直交異方性体とし、ひび割れは一つの積分点に対して合計 9 方向のひび割れが考慮できる非直交分散ひび割れモデル³⁾を用いた。

圧縮側の主応力～等価一軸ひずみ関係は、かぶりコンクリート部分と、コアコンクリートに分けてモデル化した。補強筋の拘束効果が期待できるコアコンクリートには、多軸応力効果に

表-1 試験体諸元¹⁾²⁾

		杭主筋比 Pg(%)	軸力 (MN)	パイルキャップ成 /基礎梁成	杭主筋の 定着長さ	Q_{bu}/Q_{pu} 注1)
No.1	内柱下 接合部	0.7	0.7	0.5	40 d_{bd}	1.4
No.2		0.7	0.2	0.5	40 d_{bd}	2.0
No.3		0.7	0.7	1.0	74 d_{bd}	1.4
No.4		1.26	0.7	0.5	30 d_{bd}	1.1
No.5	側柱下 接合部	0.7	0.05~1.37	0.5	40 d_{bd}	1.77~1.44
No.6		1.26	0.05~1.62	0.69	40 d_{bd}	1.08~1.15
No.7		0.7	0.05~1.37	1.0	65 d_{bd}	1.77~1.42

注1) Q_{bu} : 基礎梁の終局曲げ耐力時杭頭せん断力の計算値
 Q_{pu} : 杭の終局曲げ耐力の計算値, d_{bd} : 杭主筋径

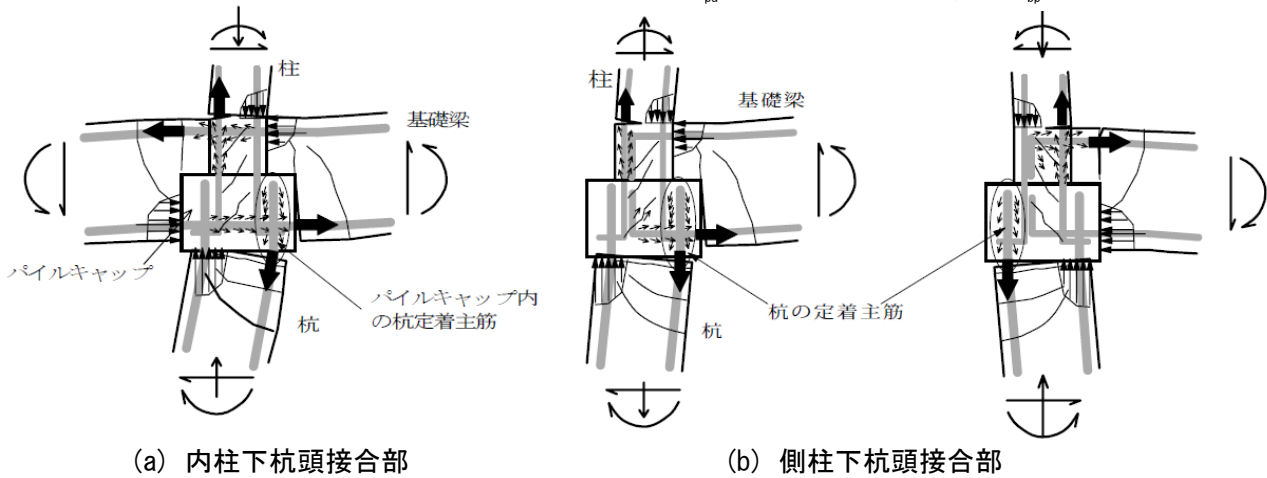


図-1 杭頭接合部内の応力状態¹⁾²⁾

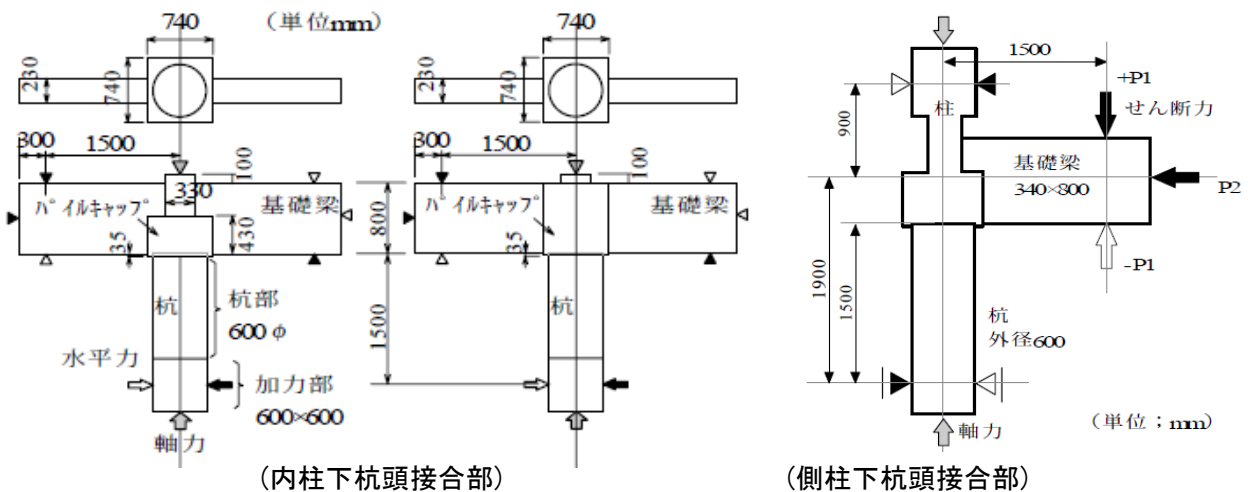


図-2 試験体形状・载荷条件¹⁾²⁾

よる強度上昇及び靱性の向上を表現できる修正 Ahmad モデル⁴⁾を用いた。かぶりコンクリートには一軸圧縮下の応力～ひずみ関係を用い、コアコンクリートに比べ、最大強度後の下り勾配が急なモデルとした(図-5 参照)。引張側に関しては、ひび割れまでは線形を仮定し、ひび割れ後は図-5 に示す式⁵⁾を用いて、若干の引張軟化特性を考慮した。

ひび割れ面のせん断伝達特性には、ひび割れと直交方向のひずみを関数とした Al-Mahaidi モデル⁶⁾を用い、コンクリートの破壊条件は Ottosen の 4 パラメータモデル⁴⁾により決定した。なお、鉄筋の要素とコンクリート要素は共有節点とし、両者の相対すべりは考慮しない。

(2) 鉄筋

鉄筋はバイリニアを仮定し、Ciampi らの修正 Menegotto-Pinto モデル⁷⁾を用いた。

3.3 荷荷条件

実験時の荷荷条件として、側柱下の杭頭接合部では、基礎梁せん断力に比例させて変動軸力を荷荷し、軸力増大時においては、基礎梁せん断力に比例させた水平力を基礎梁端部に荷荷している。このような実験の荷荷条件を解析で再現するためには、荷重制御による解析が最も適しているが、荷重制御では荷重低下を表現できない欠点を持つ。そこで、本解析では最大耐力近傍までは荷重制御により解析し、それ以降は軸力及び基礎梁水平力(内柱下及び側柱下軸力増大時のみ)を保持したまま、内柱下には杭端、側柱下には基礎梁端部にせん断力を変位制御により与えた。

なお、実験では正負繰返し荷荷が行われているが、荷荷条件が複雑なため単調荷荷解析とした。

4. 解析結果

7 体の試験体について、解析と実験から得られた荷重～変位関係の比較を図-6 に示す。

内柱下の接合部では、すべての試験体に関して解析と実験は剛性及び耐力ともにほぼ一致し、破壊モードに関しても、実験と同様にすべて杭

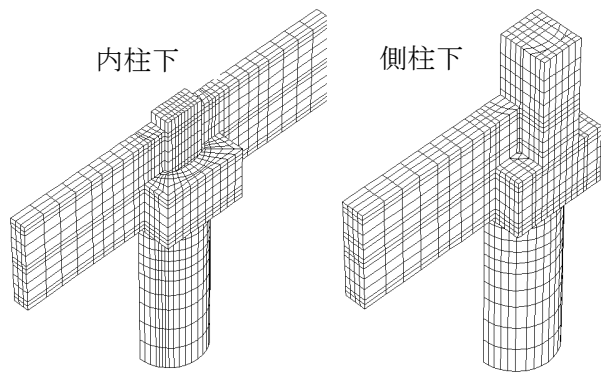


図-3 解析モデル

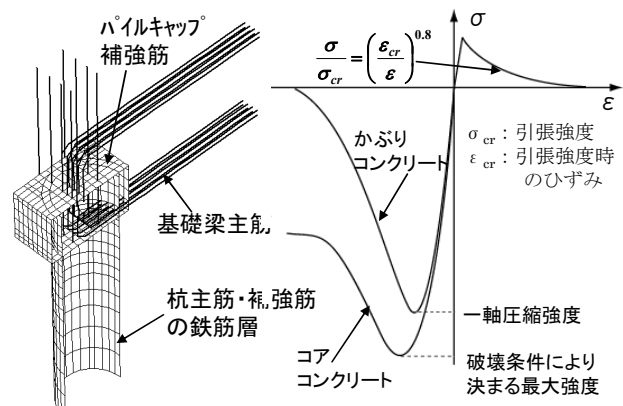
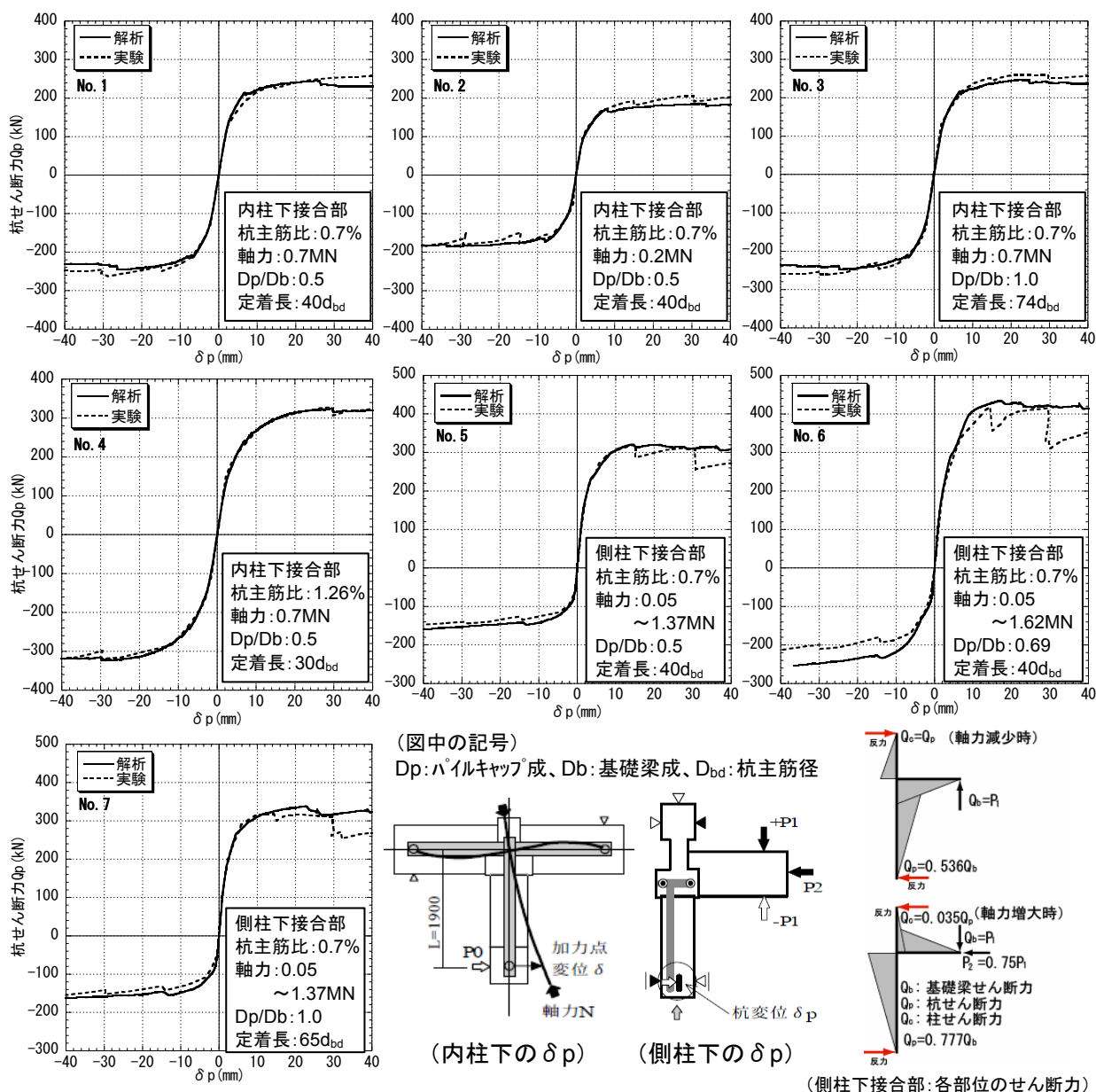


図-4 鉄筋のモデル 図-5 コンクリートの主 応力～等価一軸ひずみ関係

頭の曲げ破壊に至り、解析と実験は杭主筋量、軸力及びパイルキャップ成の違いに拘わらず良好な対応を示した。

側柱下の接合部では、軸力増大時の正側に関しては、3 体ともに内柱下と同様に実験と解析の剛性・耐力はほぼ一致し、良好な対応を示していることが確認できる。一方、軸力減少時の負側では、No.5, No.7 においては解析と実験は概ね良好に対応しているが、比較的杭主筋量の多い No.6 に関しては、解析は実験に比べて耐力が大きい。この理由として、解析において各鉄筋とコンクリートの要素を同一節点として定義しており、両者の相対すべりを考慮していないことが挙げられる。No.6 は杭主筋径が大きく、軸力減少時は基礎梁下端主筋の引張力の影響を受けて、杭主筋降伏後の定着破壊が生じており、杭主筋の抜け出しが他の試験体に比べて顕著であったことが実験でも確認されている。鉄筋要素とコンクリート要素を同一節点として定義した場合でも、鉄筋周辺のコンクリート要素がひび



図－6 解析と実験の荷重～変位関係の比較

割れることにより、鉄筋とコンクリート間の力の伝達が弱まり、相対すべりは考慮できないまでも、付着特性の劣化は間接的に考慮されている。しかし、相対すべりが顕著に生じる場合においては、鉄筋とコンクリート間に接合要素を設けて、付着すべり特性を定義する必要がある、その付着特性としては、周囲のコンクリートが損傷を受けることによる劣化を適切に再現できるモデルが必要と推察される。

以上、FEM 解析と実験の対応性に関しては、No.6 の軸力減少時（負側）を除いて、実験と解析の剛性及び耐力は良好に対応することを確認できた。よって、ここで用いた解析手法及び解

析モデルにより、顕著に鉄筋の抜け出しが生じた試験体を除いて、杭頭接合部の非線形挙動を概ね再現できることがわかった。しかし、杭及び基礎梁の耐力が比較的大きく、パイルキャップの損傷が大きな場合については、実験データがないため、解析の妥当性は検証されていない。今後、実験データの収集が必要である。

5. 内部応力状態の考察

内柱下の No.4, 側柱下の No.5 について、解析結果における最大耐力時のコンクリート最小主応力コンターを図－7(a)～(c)に示し、No.5 についてひび割れ状況例を図－8 に示す。図からわか

るように、解析から得られた断面内部の応力状態は、内柱下と側柱下で大きく異なり、さらに側柱下においては、軸力増大時と軸力減少時で応力伝達機構が大きく異なっている。また、パイルキャップの応力状態に関しては、当然のことながら断面中央の応力が高く、表面の応力は比較的小さい。また、ひび割れ状況からも表面に比べ断面中央の損傷が大きいことがわかる。No.4, No.5 についてパイルキャップの成中央位置の水平断面におけるせん断応力コンターを図-9 に示し、No.5 についてパイルキャップ断面中央位置と表面におけるせん断変形を、杭せん

断力を縦軸に取って図-10 に示す。図-9 において黒く塗りつぶされた部分が高いせん断応力が生じている部分を示し、パイルキャップ内で高いせん断応力が分布する位置は、図-7 に示す最小主応力コンターで確認できる圧縮ストラットの位置にほぼ対応している。図-10 に示すようにパイルキャップ表面のせん断変形は断面中央面よりも遅れて推移し、図-9 より表面よりも断面中央部分のせん断応力が大きく、せん断有効断面は図-9 に示す3 ケースで各々異なっていることがわかる。このことより、パイルキャップを設計する際には、内柱下か側柱下かの違

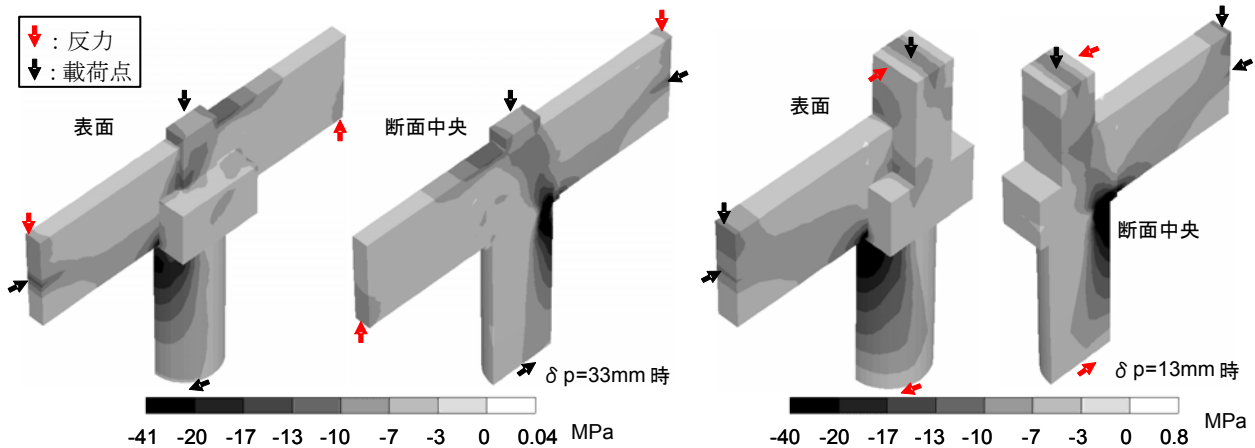


図-7(a) 最小主応力コンター（内柱下） 図-7(b) 最小主応力コンター（側柱下：軸力増大時）

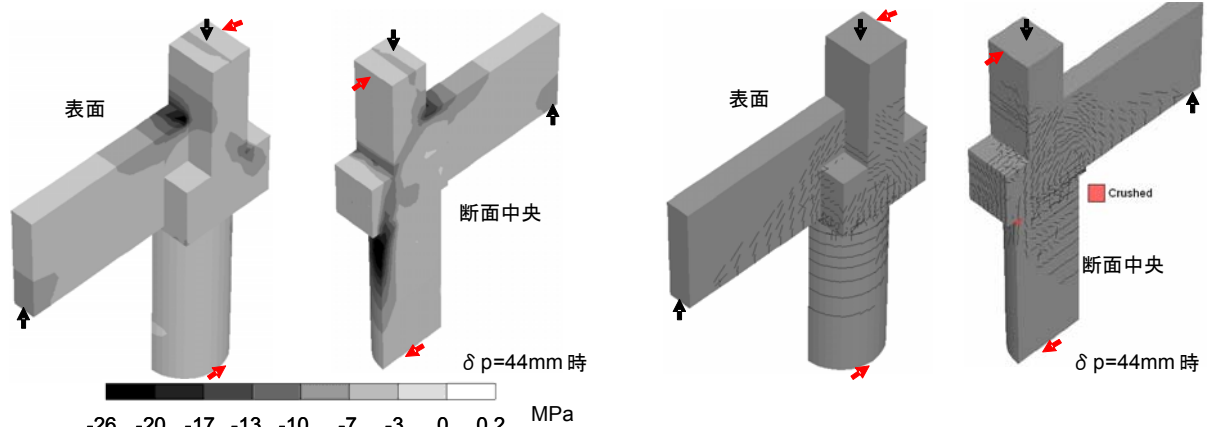


図-7(c) 最小主応力コンター（側柱下：軸力減少時） 図-8 ひび割れ状況（側柱下：軸力減少時）

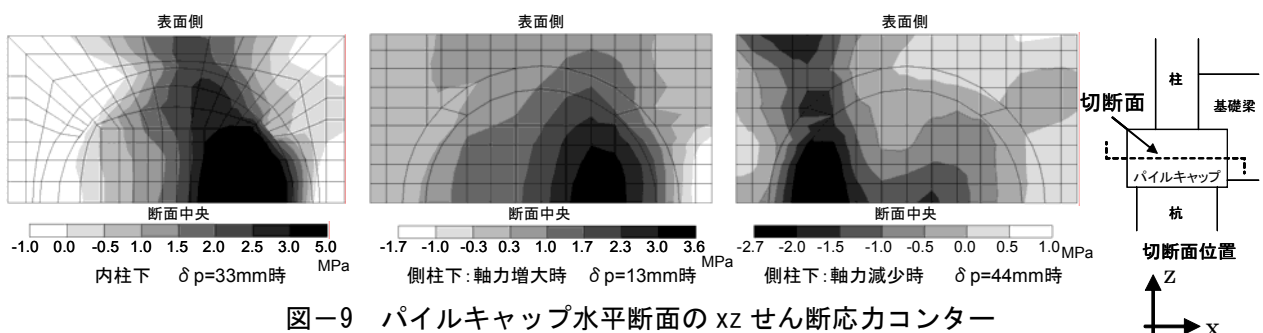


図-9 パイルキャップ水平断面の xz せん断応力コンター

い、加えて側柱下に関してはせん断力の方向によって応力伝達機構が変わり、せん断有効断面積が異なることに留意する必要がある。また、パイルキャップのせん断有効断面積は、基礎梁、杭、及びパイルキャップの断面形状に依存することが考えられ、今後、それら影響因子を変数とした FEM による数値実験を行い、定量的な評価に結びつける必要がある。

一例として内柱下 No.4 と、パイルキャップ成の異なる No.5, No.6, No.7 の軸力減少時におけるコンクリート主応力の流れ（最大耐力時）を図-11 に示す。図より、内柱下は側柱下の軸力減少時に比べて、幅広い圧縮ストラットが形成され、軸力減少時の側柱下ではパイルキャップ成の違いにより圧縮ストラットの幅が異なる傾向がある。これらの結果を利用して、応力伝達機構を考慮した設計法の構築に貢献できるものと考えられる。

6. まとめ

- (1)内柱下及び側柱下杭頭接合部 7 体について三次元非線形 FEM 解析を行い、本解析手法により実験の非線形挙動を概ね良好に再現できることを確認した。ただし、杭主筋の拔出し量が顕著な試験体の精度に関しては検討の余地がある。
- (2)杭頭接合部の応力伝達機構及びパイルキャップのせん断有効断面積は内柱下と側柱下で異なり、側柱下に関してはせん断力の方向によって大きく異なることがわかった。

謝辞

本研究は日本建築学会「RC 基礎部材の構造性能検討小委員会（主査：井上芳生）」における活動の一環として実施したものである。貴重なご意見を頂戴した委員各位に記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 小林勝巳, 丸 隆宏, 大西靖和, 寺岡 勝, 和田 章：水平力を受ける場所打ち杭—基礎部分架構の力学的特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 509 号, pp.83-90, 1998.7
- 2) 小林勝巳, 丸 隆宏, 大西靖和, 寺岡 勝, 和田 章：側柱下の場所打ち杭—基礎梁部分架構の耐震性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 520 号, pp.61-68, 1999.6
- 3) 米澤健次, 長沼一洋, 江戸宏彰：RC 構造部材の三次元繰返し FEM 解析の精度向上（その 3, その 4）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅳ, pp.427-430, 2003.9
- 4) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 5) 出雲淳一, 他：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 6) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., Jan. 1979
- 7) Ciampi, V., et al. Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, Nov., 1982.

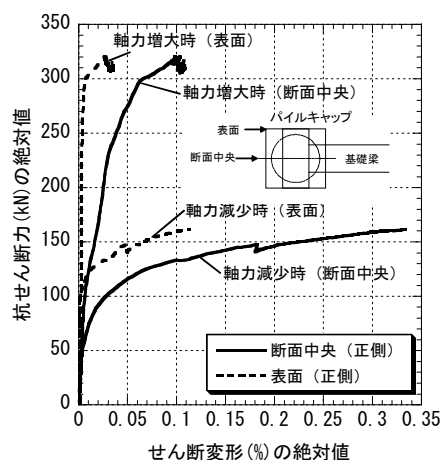


図-10 杭せん断力～パイルキャップせん断変形
(試験体：No. 5)

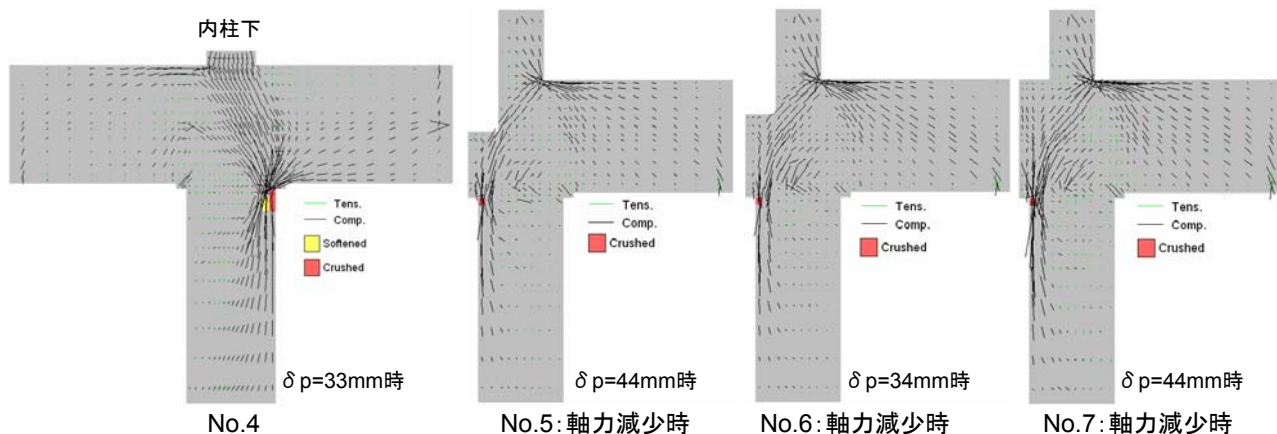


図-11 コンクリート主応力の流れ（断面中心部）