

表 4 終局耐力の計算結果

| | H1 | N1 | U1 | H2 | N2 | U2 |
|----------------|----|---------|-----|---------|----|----|
| 柱 (kN) | | | 197 | | | |
| 柱脚 1/柱脚 2 (kN) | | 113/123 | | 113/196 | | |
| 基礎梁 (kN) | | | 231 | | | |
| 杭 (kN) | | | 509 | | | |

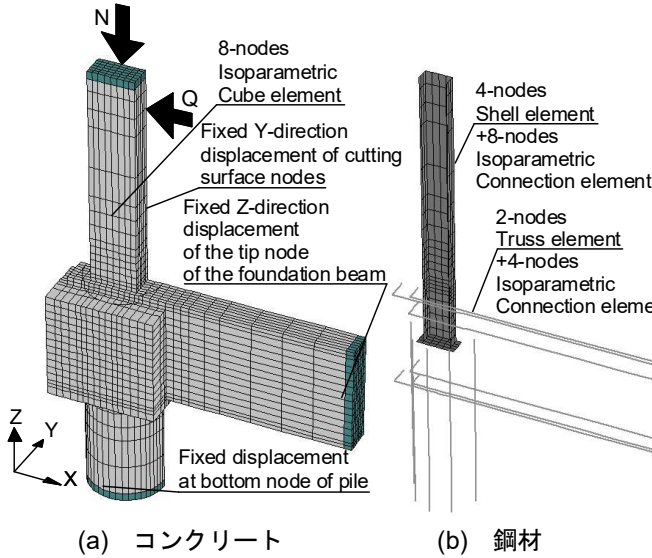


図 2 試験体 U2 の要素分割

コンクリートを用い、基礎梁、杭頭接合部および RC 杭には普通コンクリートを用いた。

試験体は帯筋を用いた試験体 H1、帯筋のない試験体 N1 および帯筋の省略に加えて基礎梁主筋を U 字形定着とした試験体 U1 の 3 種類である。さらに、柱鉄骨の埋込み深さを鉄骨せいで除した値（以下、埋込み深さ比）を 1.0（鉄骨の埋込み深さ：175mm）から 2.0（鉄骨の埋込み深さ：350mm）とした H2、N2 および U2 の 3 種類を加えた合計 6 種類である。試験体 H1 および H2 における帯筋は D13 を 100mm 間隔で設計した。また、破壊モードは後述の 2.2 節に示すように全試験体ともに柱脚曲げ破壊型が想定される。

2.2 終局耐力計算

表 4 に全試験体の終局耐力の計算結果を示す。終局耐力の計算には、CES 柱および柱脚は文献 1) に従い、RC 基礎梁および杭は文献 3) に従い算定した。なお、RC 杭の計算では円形断面を同じ断面積の正方形断面に置換して行った。CES 柱脚の柱脚曲げ耐力では柱コンクリートの曲げ耐力と埋込み部鉄骨の耐力の加算により求められる。帯筋のある試験体 H1 および H2 の柱脚曲げ耐力は、埋込み部鉄骨の耐力が負の値となることから、柱コンクリートの曲げ終局耐力値のみとなる。帯筋のない試験体 N1、N2、U1 および U2 の柱脚曲げ耐力では、式(1)に示す埋込み部の支圧強度が計算できないため、前述のものと同様に柱コンクリートの曲げ終局耐力値のみで算定した。これらの数値を柱脚 1 として表 4 に示す。一方で式(1)中の第 3 項を考慮しないで算出した柱脚曲げ耐力値を柱脚 2 として表 4 に示す。

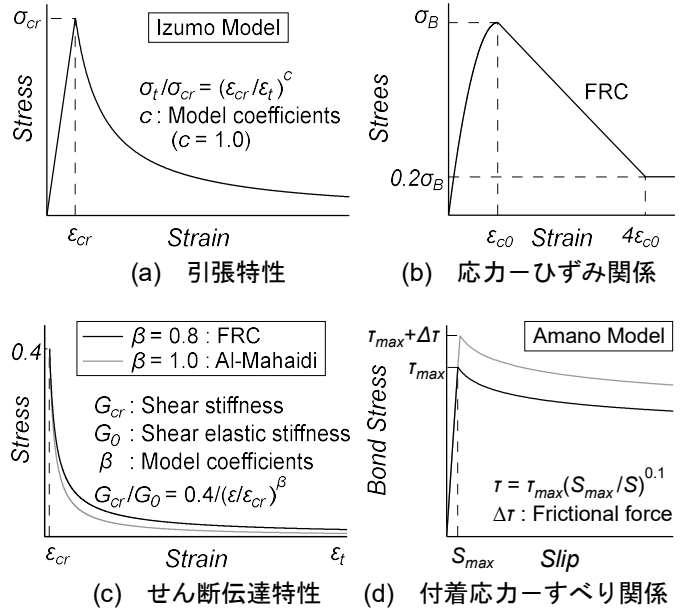


図 3 材料構成則

$$F_b = \min \left(\sqrt{\frac{b}{b_e}} \cdot \sigma_B, 12\sigma_B \frac{w_a \cdot w_{\sigma_y}}{b_e \cdot x} \right) \quad (1)$$

ここで、 b : CES 柱幅、 b_e : CES 柱埋込み型柱脚の有効幅、 σ_B : 柱コンクリートの圧縮強度、 w_a : 一組の帯筋の断面積、 w_{σ_y} : 帯筋の降伏強度、 x : 一組の帯筋の間隔である。

2.3 解析モデル

FEM 解析には市販の解析ソフトウェア「FINAL」を使用した。図 2 に試験体 U2 の要素分割を示す。試験体は面外方向の対称性を考慮し半分のみモデル化した。コンクリートは 8 節点アイソパラメトリック立体要素で、鉄骨は 4 節点積層平板シェル要素で、鉄筋は 2 節点トラス要素で再現をした。鉄骨およびコンクリート間には 8 節点アイソパラメトリック接合要素を、鉄筋およびコンクリート間には 4 節点アイソパラメトリック接合要素を用いた。

境界条件は杭下端断面の中心節点および当該節点から Y 軸方向に位置するすべての節点の水平-鉛直変位を固定した。さらに、基礎梁先端の中心節点および当該節点から Y 軸方向に位置するすべての節点の鉛直変位を固定した。また、試験体切断面におけるすべての節点の面外方向変位を固定した。

本解析では、試験体頂部に鉛直方向の分布荷重を加えることにより圧縮軸力を、水平変位は加力位置に強制変位を指定することで考慮した。水平変位 δ は基礎梁上面から加力位置までの高さ h で除した相対部材角 $R (= \delta/h)$ による変位制御とした。加力プログラムは圧縮軸力を与えた後に片側単調荷重とし、 $R=1/33\text{rad}$ まで行った。

2.4 材料構成則

図 3 に解析モデルの材料構成則を示す。材料構成則は文献 4) を参考にした。コンクリートにおいて三軸応力下の破壊条件は 5 パラメータモデルに大沼らの係数⁹⁾を選択した。

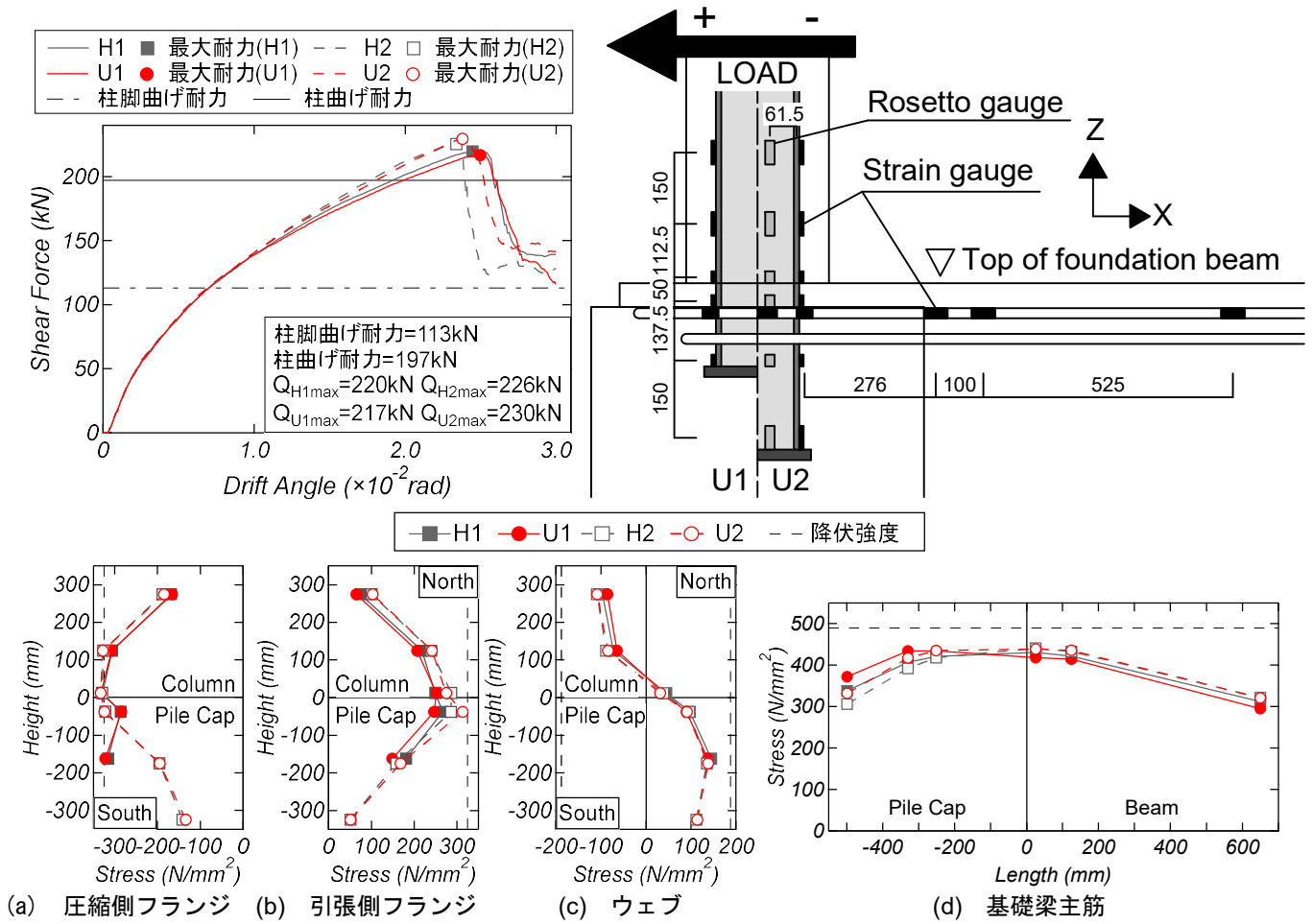


図 6 最大耐力時における鋼材の応力分布

ひび割れ後の引張特性は出雲らの提案モデル⁶⁾ ($C=1.0$, C : モデル係数) とした (同図(a))。応力-ひずみ関係の上昇域は修正 Ahmad モデル⁷⁾, 軟化域は繊維補強コンクリートを使用した柱では二折線でモデル化 (同図(b)), それ以外では Nakamura モデル⁸⁾ を選択した。ひび割れ後のせん断伝達特性は繊維補強コンクリートを用いた柱では多折線 ($\beta=0.8$), その他では Al-Mahaidi モデル ($\beta=1.0$)⁹⁾ とした (同図(c))。

鋼材の履歴特性はバイリニアモデルとし、ひずみ硬化則は等方硬化則とした。鉄骨およびコンクリート間の付着応力-すべり関係は最大付着応力までは線形で仮定し¹⁰⁾, その後の軟化域は天野モデル¹¹⁾ とした (同図(d))。ここで、最大付着応力時のすべり量は $0.05mm$ と仮定した。また、摩擦係数を 0.75 とし、作用圧縮力の増大に伴う付着応力の上昇を考慮した。鉄骨およびコンクリート間の圧縮側の接触挙動は剛とし、引張側の離間挙動は最大応力後に応力を負担しないように定義した。鉄筋およびコンクリート間の付着応力-すべり関係は文献 12) に従って定義した。

3. 解析結果

3.1 履歴特性および鋼材の応力分布

図 4 に全試験体の履歴特性の比較を示す。各試験体の最

大耐力点をマーカーでそれぞれ示している。

埋込み深さおよび柱鉄骨周囲の配筋方法に拘わらず、各試験体の履歴特性に顕著な差異は認められなかった。これは、各試験体の最大耐力が柱脚曲げ耐力の計算値を大きく上回り、柱曲げ破壊が生じたことに起因するものである。

図 5 に鋼材の応力計測位置を、図 6 に最大耐力時における鋼材の応力分布を示す。計測位置は鉄骨および基礎梁の危険断面位置を基準とした。図 6 では、埋込み深さ比 1.0 とした帯筋のある試験体 H1 および U 字型定着とした試験体 U1 と埋込み深さ比 2.0 とした帯筋のある試験体 H2 および U 字型定着とした試験体 U2 の結果をマーカー付きの折れ線で示しており、鋼材の降伏強度を点線で示している。

各試験体のウェブおよび基礎梁主筋の応力分布はほぼ一致していることがわかる。また、埋込み深さ比が同じ試験体において圧縮側および引張側フランジの応力分布に顕著な差異は認められなかった。

3.2 最小主応力分布

図 7 に最大耐力時におけるコンクリートの最小主応力分布を示す。これは、試験体の面外方向切断面位置 (試験体中心) のものである。

各試験体ともに、柱脚部の曲げ圧縮域および基礎梁と杭

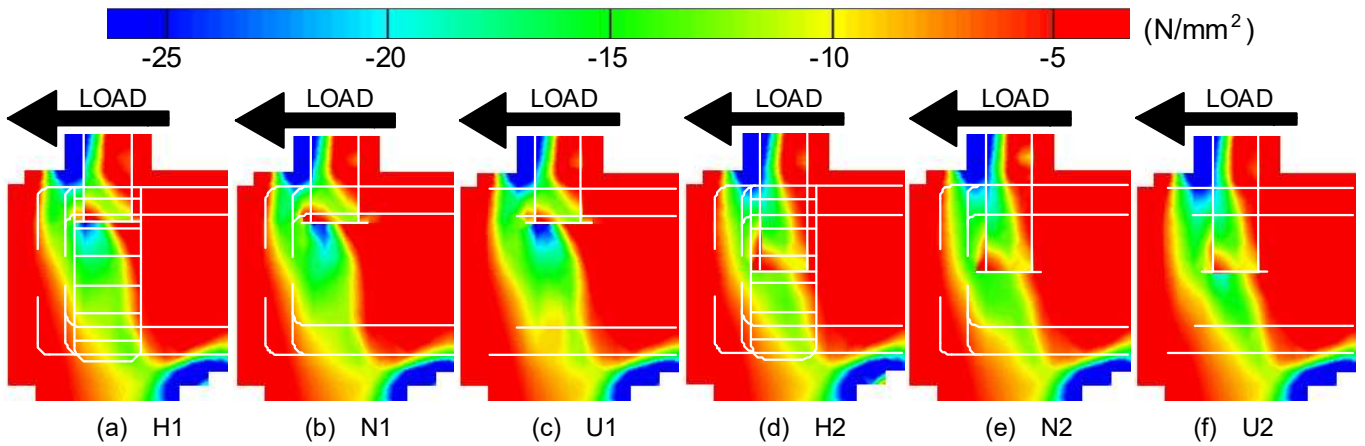


図7 最大耐力時におけるコンクリートの最小主応力分布

の曲げ圧縮域に高い応力の発生が認められ、これらを結ぶような応力伝達が認められた。また、埋込み深さ比 1.0 の試験体では、ベースプレート下面の曲げ圧縮域に高い圧縮応力が認められた。しかし、柱鉄骨埋込み部周囲の配筋方法による圧縮応力の伝達状況に顕著な差異は認められなかった。

以上に示したように、本論に示す試験体の最大耐力は埋込み深さ比および柱鉄骨埋込み部周囲の配筋方法に拘わらず柱脚曲げ耐力を上回り、柱曲げ破壊する傾向が認められた。また、配筋方法が鋼材の応力分布および杭頭接合部内の圧縮力の伝達に顕著な差異は認められなかったことから、文献 1) に示される帯筋の引張強度による支圧強度の算定法は外柱 CES 埋込み柱脚の柱脚曲げ耐力評価法として妥当ではない可能性がある。

4. まとめ

本研究では、柱鉄骨埋込み部周囲の配筋方法を変数とした CES 外柱-RC 杭頭接合部試験体の 3 次元 FEM 解析を実施した。限られた範囲の検討ではあるものの、本論より得られた知見を以下に示す。

- 1) 埋込み深さ比および柱鉄骨埋込み部周囲の配筋方法に拘わらず、柱脚曲げ破壊型として設計された本試験体の最大耐力は文献 1) の柱脚曲げ耐力を大幅に上回った。
- 2) 柱鉄骨埋込み部周囲の配筋方法に拘わらず、各試験体に鋼材の応力分布およびコンクリートの最小主応力分布に顕著な差異は認められなかった。
- 3) 文献 1) などに示される帯筋の引張強度による支圧強度算定法は外柱 CES 埋込み柱脚の柱脚曲げ耐力評価法として妥当ではない可能性がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄骨コンクリート (CES) 造建物の性能評価型構造設計指針 (案)・同解説, 2022.3

- 2) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針, 2012.3
- 3) 全国官報販売協同組合：2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2007.8
- 4) 今井真奈美, 鈴木卓：CES 埋込み柱脚における柱脚内部応力伝達の把握, コンクリート工学年次論文集, Vol. 46, No. 2, pp. 271-276, 2024.6
- 5) 大沼博志, 青柳征夫：三軸応力下におけるコンクリートの強度特性, 電力中央研究所報告, No. 474, 1981.12
- 6) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫：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, Vol. 25, No. 9, pp. 134-147, 1987.9
- 7) 長沼一洋：三軸圧縮下におけるコンクリートの強度特性, 日本建築学会構造系論文集, No. 474, pp. 163-170, 1995.8
- 8) H. Nakamura, and T. Higai : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone length of Concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structure Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol. 2, pp. 259-272, 1999.10
- 9) Al-Mahaidi, R.S.H. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Beam Member, Report 78-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, 1979.1
- 10) 佐藤政勝, 田中祐人：鋼管, H 形鋼の付着強度に及ぼすコンクリートの拘束効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, pp. 183-186, 1993.7
- 11) 天野修, 他 3 名：鋼管・コンクリート複合構造橋脚のせん断挙動解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 823-828, 1998.7
- 12) 飯塚敬, 檜貝勇, 齊藤成彦, 高橋良輔：かぶり厚の影響を考慮した異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 67, No. 2, pp. 280-296, 2011.6