

## 2 方向偏心杭頭接合部の応力状態に関する解析的研究

FEM 解析                      破壊性状                      応力伝達  
 材料構成則                      扁平梁

1220062                      久保田 八重\*1  
 指導教員                      鈴木 卓

### 1. はじめに

近年の鉄筋コンクリート造建物において大口径の場所打ち杭や既製杭を使用する傾向にあり、従来使われてきた複数杭を用いる形式から柱1本に対して杭1本の杭基礎形式が増えている。このような杭1本で柱を支持する配置で基礎を設計する際、様々な要因から柱と杭の偏心が生じる場合が多くみられる。

鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>1)</sup>に記載されている柱と杭が2方向に偏心する杭頭接合部の設計方法では杭頭接合部底面に大量の鉄筋が必要となり、現実的な設計方法とは言い難いことが指摘されている<sup>2)</sup>。一方で、将来的に杭頭接合部の設計法の構築のためには3次元有限要素法（以下、FEMと呼称）解析を用いることで実験では把握しきれない内部応力状態の検討が必要となる。

以上を背景として本研究では、杭頭接合部内部の応力状態を明らかにすることを目的として柱と杭が2方向に偏心する杭頭接合部の構造実験を対象としたFEM解析を実施した。本論文では実験結果と解析結果の妥当性を示すとともに、杭頭接合部内部の応力状態の検討結果を示す。

### 2. 解析対象試験体

試験体の形状を図1に、試験体概要を表1にそれぞれ示す。試験体は実大の20%のもの2体である。柱の頂部をピン支点、2方向の梁先端をローラー支点とし、自由端とした杭脚部から上向きの鉛直力を载荷した。柱断面は200mm角、杭径は339mm、杭頭接合部の寸法は400×400×400mmである。2体の解析モデルともに柱芯から杭芯までの水平2方向偏心距離 $e$ は113.1mm ( $=80\sqrt{2}$ mm) である。

実験変数は水平2方向偏心距離 $e$ を基礎梁の応力中心間距離 $j$ で除した比率 $e/j$ （以下、偏心比と呼称）である。基準試験体E39は偏心比が0.39であり、基礎梁断面 $b \times D$ は200×400mm、有効せい $d$ は327.5mmである。扁平試験体E88は偏心比が基準試験体の約2倍の0.88であり、基礎梁断面 $b \times D$ は360×220mm、有効せい $d$ は147.5mmである。

表2にコンクリート、表3に鉄筋の材料特性を示す。コンクリートの圧縮強度は柱が40.5N/mm<sup>2</sup>、その他の部材が30.8N/mm<sup>2</sup>である。圧縮強度および圧縮強度時のひずみは実験による数値を用いた。コンクリートのヤング係数 $E_c$ は式(1)<sup>1)</sup>より算出した。引張強度 $F_t$ は式(2)<sup>1)</sup>により算出したものを式(3)<sup>3)</sup>により低減した。記号の詳細は各文献を参照されたい。

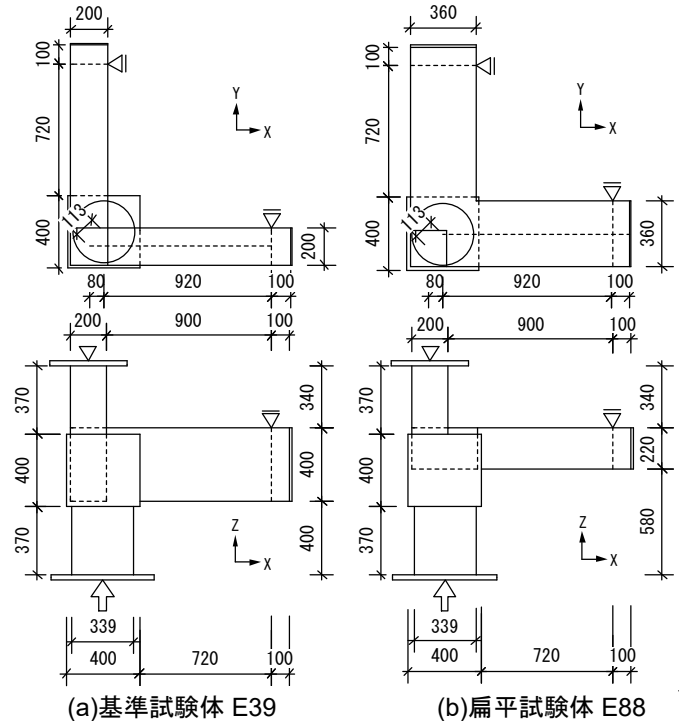


図1 試験体形状および荷重条件

表1 試験体概要

解析モデル		E39	E88
柱芯と杭芯の偏心距離 $e$ (mm)		113.1 ( $=80\sqrt{2}$ )	
偏心比 $e/j$		0.39	0.88
柱	断面 $d \times D$ (mm)	200×200	
	主筋、鉄筋比	12-D13, 3.8%	
	せん断補強筋、せん断補強筋比	19-D4@35, 0.4%	
基礎梁	$b \times D \times L$ (mm)	200×400×720	360×220×720
	有効せい $d$ (mm)	327.5	147.5
	上端筋	5-D10	12-D10
	下端筋	3-D10	6-D10
杭	せん断補強筋	29-D4@35	25-D6@35
	杭径	339	
	主筋	12-D13	
杭頭接合部	せん断補強筋	12-D4@35	
	寸法(mm)	400×400×400	

表2 コンクリートの材料特性

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度時のひずみ ( $\mu$ )
柱	40.5	28.2	2,060
その他	30.8	24.6	1,950

表3 鉄筋の材料特性

	D13	D10	D6	D4
降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	821	348	369	351
ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	189	195	198	184

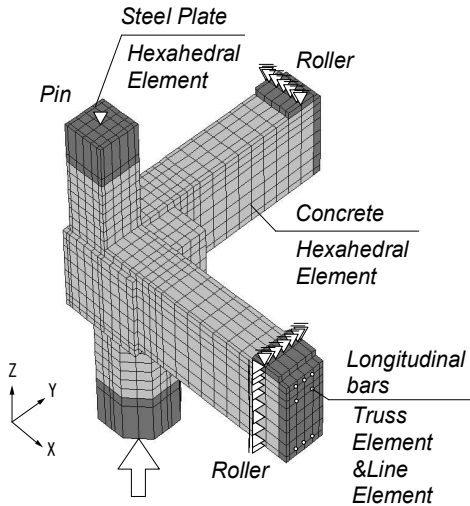


図2 解析モデルの形状

$$E_c = 33500(\gamma/24)^2(F_c/60)^{1/3} \quad (1)$$

$$F_t = 0.313\sqrt{F_c} \quad (2)$$

$$f_{bck} = 0.6/\sqrt[3]{h} \cdot F_t \quad (3)$$

### 3. FEM 解析

#### 3.1 解析モデル

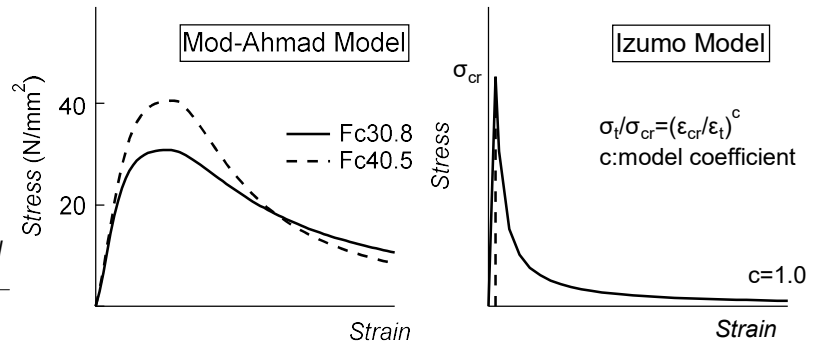
図2に基準試験体E39の解析モデルおよび要素分割状況を示す。解析は3次元モデルとし、コンクリートは6面体要素に置換した。杭は6面体要素と3角柱5面体要素を用いて8角形断面として再現した。梁主筋はトラス要素に置換し、主筋とコンクリートの節点の間にライン要素を定義することで付着すべり挙動を再現した。梁主筋以外の鉄筋はコンクリート要素内に埋め込み鉄筋とした。柱頂部、両側梁端部の鉄板は6面体要素を剛性としてモデル化した。

境界条件は柱頂部中央における節点のZ方向変位を拘束し、梁下端部ローラー位置における節点のZ方向鉛直変位を拘束した。また、X梁側面ローラー位置における節点のY方向変位、およびY梁側面ローラー位置における節点のX方向変位を拘束した。

解析では、単調載荷として上方向の鉛直変位を杭脚部中央の節点に作用させた。解析は非線形解析ソフト「FINAL」を用い、収束計算が不安定になるまで実施した。

#### 3.2 材料構成則

図3に材料構成則を示す。三軸応力下の破壊条件はOttosenの4パラメータモデルに畑中らの係数を適用したものに従った。圧縮応力-ひずみ関係は修正Ahmadモデル<sup>4)</sup>を用いた(図3(a))。ひび割れ後のTension-Stiffening特性は出雲らの提案モデル<sup>5)</sup>を用いた(図3(b))。また、ひび割れ後の圧縮劣化特性をCollinsらの提案式により低減を考慮した。ひび割れ後のせん断伝達モデルは長沼モデルを選択した。鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルとした。梁主筋とコンクリートの付着応力-すべり関係は、Elmorsiらのモデルを用いた。最大付着応力は文献3)に従って算出し、最大付着応力時のすべり量は文献6)に従って



(a) 応力-ひずみ関係

(b) Tension-Stiffening

図3 材料構成則

算出した。接合部内における梁主筋先端の機械式定着部は鉄筋とコンクリートの節点を剛接合としている。

### 4. 実験結果および解析結果の比較

#### 4.1 荷重-変位関係および破壊性状

図4に各試験体の実験と解析の荷重-変位関係の比較を示す。

解析における荷重-変形関係は実験における初期剛性をよく捉えることができた。ただし、基準試験体E39では、変位2.0mm以降の解析の剛性および最大耐力は実験のもの比べて高い。扁平試験体E88では、解析の梁の曲げひび割れ発生に起因する剛性低下点は実験のもの比べて高いが、最大耐力は実験結果と概ね一致した。

図5に各試験体の最終破壊性状を示す。同図の解析結果では、ひび割れ幅は10倍に拡大しており、黒色はコンクリートがひずみ軟化した要素を示している。

基準試験体E39では、最大耐力点において柱および柱脚部直下の杭頭接合部内のコンクリートの圧縮軟化が進行したことから、当該試験体は実験と同様に柱および柱直下杭頭接合部の圧縮破壊と判断された。扁平試験体E88では、最大耐力点において柱下部におけるコンクリートの圧縮軟化および柱鉄筋の降伏が顕著であったことから、当該試験体の破壊性状は実験と同様に柱の圧縮破壊であると判断された。

#### 4.2 杭頭接合部鉄筋のひずみ推移

図6に実験の各載荷サイクルピーク時での実験結果および解析結果における杭頭接合部はかま筋とかご筋のひずみ推移を示す。図7に実験における各試験体の杭頭接合部のひずみ測定位置をそれぞれ示す。ただし、扁平試験体E88は解析の最大耐力が実験の最大耐力より低いため、解析のひずみ推移は解析の最大耐力までとした。

解析結果における杭頭接合部のひずみ推移は、両試験体ともに実験結果と同様な傾向を示している。特に、図6に示した基準試験体E39の上端位置では実験結果および解

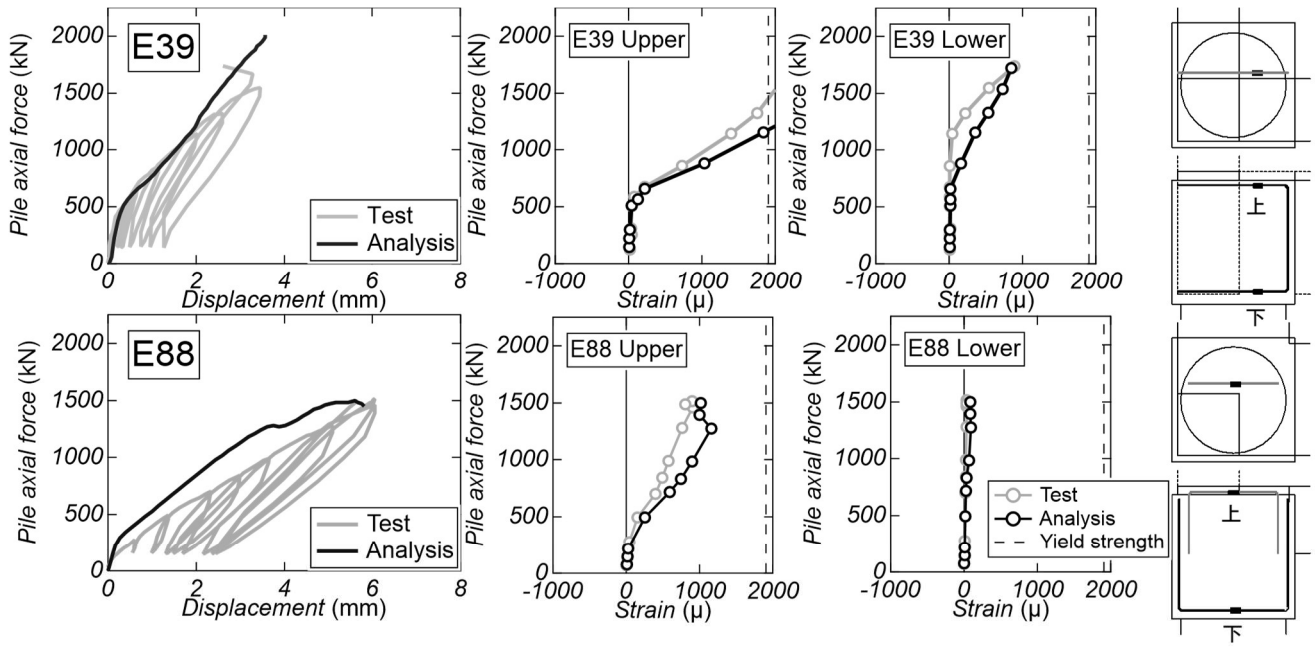


図4 荷重－変位関係

図6 ひずみ推移

図7 ひずみ測定位置

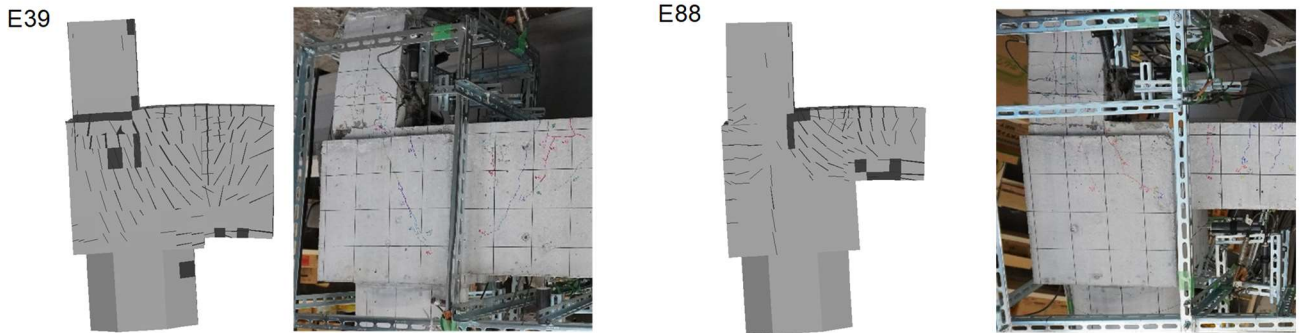


図5 最終破壊性状

析結果ともに降伏強度 (1,905 $\mu$ ) に達した。

解析の上端位置では、図4に示す荷重－変位関係の剛性低下点付近からひずみの増加が確認され、解析と実験のひずみ推移は良好な対応を示した。一方で解析の下端位置では、ひずみの顕著な増加はみられず、解析と実験のひずみ推移は良好な対応を示した。

## 5. 内部応力状態

### 5.1 コンクリートの軸方向応力度分布

図8に各試験体における実験の最大耐力相当時における杭頭接合部周辺コンクリートのZ方向応力度分布を示す。同図は杭頭接合部上端位置および基礎梁下端位置を表している。

杭頭接合部上端位置では、両試験体ともに柱直下に高い圧縮応力が生じている。基礎梁下端位置では、両試験体ともに柱投影位置から基礎梁にかけて圧縮応力の発生が認められる。しかし、基準試験体E39の応力は扁平試験体E88のものとは比較して高くなる傾向にあり、基礎梁断面形状の差異の影響が確認された。

### 5.2 杭頭接合部の負担軸力

図9に杭頭接合部における鉛直方向負担軸力分布を示す。負担軸力は図10に示すように杭頭接合部上端、基礎梁下端におけるコンクリートおよび鉄筋のZ方向応力度に要素面積を乗じて算出した。負担軸力は図10に示すように領域Aを白色、領域Bを黒色および領域Cを灰色に色分けした。

両試験体ともに上端から下端にかけて杭頭接合部の負担軸力の合計値の増加が認められる。これは、基礎梁におけるせん断力の影響である。両試験体ともに領域Aにおいて上端から下端にかけて軸力の減少が認められる。しかし、基準試験体E39の領域Aにおける上端と下端の差は扁平試験体E88のものとは比較して大きいことがわかる。一方で、両試験体ともに領域BとCにおいて上端から下端にかけて軸力の増加が認められる。しかし、基準試験体E39の上端と下端の差は扁平試験体E88のものとは比較して領域Bでは大きく、領域Cでは小さい。これらのことから、5.1節に示したように2方向偏心杭頭接合部では、上端の柱から下端の柱投影位置と基礎梁の間に向けて圧縮力の伝達が生じるものと推測される。また基礎梁断面形状の違いによ

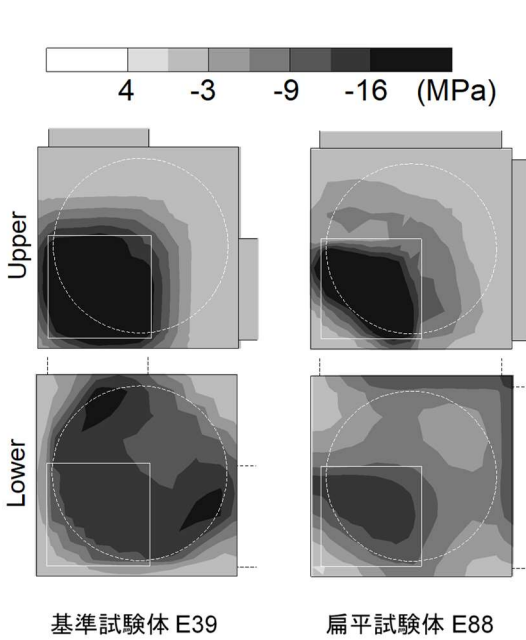


図8 コンクリートのZ方向応力度分布

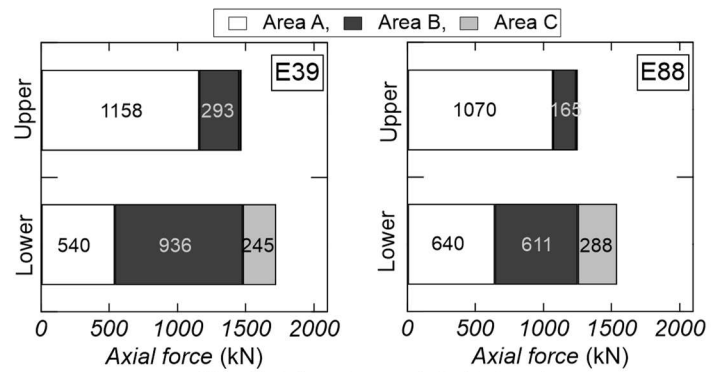


図9 杭頭接合部における負担軸力分布

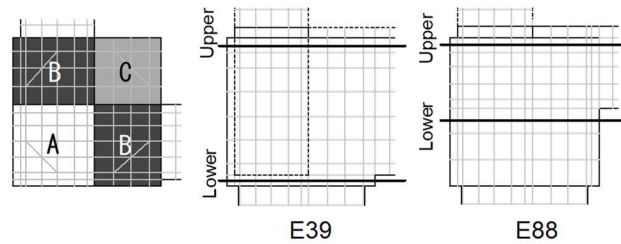


図10 杭頭接合部における応力抽出位置

る伝達状況の応力レベルの差が確認された。

基準試験体E39の負担軸力は扁平試験体E88のものとは比べて、下端における領域Bが大きい。領域Bの上端と下端における負担軸力の差は扁平試験体E88に比べて基準試験体E39が大きい。一方で、領域Aの上端と下端における負担軸力の差は扁平試験体E88に比べて基準試験体E39が小さい。基準試験体E39は扁平試験体E88と比べて柱から基礎梁へ伝達される圧縮力が大きく、柱から杭へ伝達される圧縮力が小さくなり、基礎梁断面形状の差異に伴って杭頭接合部における応力負担の差異が確認された。

## 6. まとめ

本研究では、2方向偏心杭頭接合部の3次元FEM解析を実施し、杭頭接合部内部の応力状態を検討した。本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 解析の荷重-変位関係、破壊性状および杭頭接合部の補強筋のひずみ推移は実験のものと概ね一致する傾向が確認された。
- 2) 両試験体の杭頭接合部下端では柱投影位置から基礎梁にかけて圧縮応力の発生が認められた。一方で基準試験体の応力は扁平試験体のものとは比べて高くなる傾向が確認された。
- 3) 杭頭接合部では、両試験体ともに上端から下端にかけて柱領域の負担軸力は減少するのに対して柱投影位置

から基礎梁の間の領域における軸力の増加が認められた。

- 4) 基準試験体E39は扁平試験体E88と比べて上端の柱から下端の柱投影位置と基礎梁の間に向けて伝達される圧縮力が大きく、基礎梁断面形状の差異に伴う杭頭接合部における応力負担の差異が認められた。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計計算規準・同解説，2018.12
- 2) 「鉄筋コンクリート構造設計計算規準・同解説」Q&A：<http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s48/answer.htm>（閲覧日：2022年1月24日）
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，2012.9
- 4) 長沼一洋：三軸圧縮応力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，No. 474，pp. 163-170，1995.8
- 5) 出雲淳一，他2名：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
- 6) 飯塚敬一，他3名：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