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	破壞性状	応力伝達
材料構成則	扁平梁	

1220062 指導教員

久保田 八重*1 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・同解説りに記載されて 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²⁾。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載荷した。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√2mm) 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×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×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/mm²,その他の部材が 30.8N/mm²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Ecは 式(1)¹⁾より算出した。引張強度F_tは式(2)¹⁾により算出した ものを式(3)3)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 試験体形状および載荷条件

表1 試験体概要

桂芯と杭芯の偏心距離 e(mm) 113.1 (=80√2) 偏心比 e/j 0.39 0.88 断面 d×D(mm) 200×200 柱 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% b×D×L(mm) 200×400×720 360×220×720 有効せい d(mm) 327.5 147.5 基礎梁 上端筋 5-D10 12-D10 下端筋 3-D10 6-D10 世ん断補強筋 29-D4@35 25-D6@35 杭径 339 抗 12-D13 世ん断補強筋 12-D4@35 25-D6@35 抗種 12-D13 12-D4@35 枝白 12-D4@35 25-D6@35 杭種 12-D4@35 12-D4@35 杭頭 12-D4@35 25-D6@35 杭夏 12-D4@35 12-D4@35 枝腐 12-D4@35 25-D6@35 杭夏 12-D4@35 25-D6@35 杭夏 12-D13 200×400×400 麦2 コンクリートの材料特性 200×400×400 長3 鉄筋の材料特性 1950 198 <	解析モデル				E39		E88			
偏心比 e// 0.39 0.88 断面 d×D(mm) 200×200 柱 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% b×D×L(mm) 200×400×720 有効せい d(mm) 327.5 基礎梁 上端筋 生端筋 5-D10 12-D10 12-D10 下端筋 3-D10 6-D10 12-D10 世人断補強筋 29-D4@35 丸格径 339 杭 主筋 12-D13 12-D13 世ん断補強筋 12-D4@35 杭頭 寸法(mm) 400×400×400 養名 コンクリートの材料特性 上縮強度 ヤング係数 (N/mm²) いずみ (µ) 柱 40.5 28.2 2,060 その他 その 1,950 表3 鉄筋の材料特性 回 D13 D10 D6 D4 降伏強度(N/mm²) 189 195 ヤング係数(kN/m²) 189 195				113.1 (=80√2)						
推 断面 d×D(mm) 200×200 柱 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% b×D×L(mm) 200×400×720 360×220×720 有効せい d(mm) 327.5 147.5 基礎梁 上端筋 5-D10 12-D10 下端筋 3-D10 6-D10 せん断補強筋 29-D4@35 25-D6@35 杭 主筋 12-D13 せん断補強筋 12-D4@35 400×400×400 枝合部 寸法(mm) 400×400×400 表2 コンクリートの材料特性 近衛強度時の (N/mm²) (kN/mm²) ひずみ (µ) 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 回 D13 D10 D6 D4 降伏強度(N/mm²) 821 348 369 351 ヤング係数(kN/m²) 189 195 198 184		偏心比 e/j				0.:	0.39		0.88	
柱 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% b×D×L(mm) 200×400×720 有効せい d(mm) 327.5 基礎梁 上端筋 上端筋 5-D10 12-D10 12-D10 下端筋 3-D10 セん断補強筋 29-D4@35 12-D10 12-D10 世ん断補強筋 29-D4@35 12-D13 12-D13 セん断補強筋 12-D4@35 林径 339 杭 主筋 12-D13 12-D4@35 林谷 339 大 王筋 12-D4@35 12-D4@35 林額強防 12-D4@35 林 12-D4@35 林 12-D4@35 林 12-D4@35 林 12-D4@35 大協丁 ビ(N/mm²) 火谷(M) 七橋強度時の (N/mm²) (kN/mm²) 大ジグ係数的の材料特性 195 中ング係数(kN/mm²) 189 195 198		断面 <i>d×D</i> (mm)				200×200				
せん断補強筋, せん断補強筋比 19-D4@35, 0.4% b×D×L(mm) 200×400×720 360×220×720 有効せい d(mm) 327.5 147.5 基礎梁 上端筋 5-D10 12-D10 下端筋 3-D10 6-D10 12-D10 世ん断補強筋 29-D4@35 25-D6@35 杭径 339 39 杭 主筋 12-D13 世ん断補強筋 12-D4@35 5 横合部 12-D4@35 5 枕径 339 35 枕径 339 35 枕径 339 36 大白の 12-D13 12-D4@35 林福強筋 12-D4@35 12-D4@35 林頭 寸法(mm) 400×400×400 麦2 コンクリートの材料特性 12-D4@35 上端強度 ヤング係数 圧縮強度時の (N/mm²) (kN/mm²) ひずみ (µ) 柱 40.5 28.2 2,060 その他 30.8 24.6 1,950 麦3 鉄筋の材料特性 195 198 1	柱	主筋, 鉄筋比				12-D13, 3.8%				
b×D×L(mm) 200×400×720 360×220×720 有効せい d(mm) 327.5 147.5 基礎梁 上端筋 5-D10 12-D10 下端筋 3-D10 6-D10 世ん断補強筋 29-D4@35 25-D6@35 杭 主筋 12-D13 村径 339 12-D4@35 杭 主筋 12-D4@35 村頭 寸法(mm) 400×400×400 麦2 コンクリートの材料特性 上縮強度時の (N/mm²) ひずみ (µ) 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 195 198		せん断補強筋, せん断補強筋比				19-D4@35, 0.4%				
有効せい d(mm) 327.5 147.5 基礎梁 上端筋 5-D10 12-D10 下端筋 3-D10 6-D10 せん断補強筋 29-D4@35 25-D6@35 杭径 339 339 杭 主筋 12-D13 せん断補強筋 12-D4@35 12-D4@35 杭頭 寸法(mm) 400×400×400 接合部 寸法(mm) 400×400×400 麦2 コンクリートの材料特性 上縮強度 ヤング係数 圧縮強度時の (N/mm²) (kN/mm²) ひずみ (µ) 柱 40.5 28.2 2,060 その他 30.8 24.6 1,950 麦3 鉄筋の材料特性 回13 D10 D6 D4 降伏強度(N/mm²) 821 348 369 351 ヤング係数(kN/mm²) 189 195 198 184		<i>b×D×L</i> (mm)				200×40)0×720	36	60×220×720	
基礎梁 上端筋 5-D10 12-D10 下端筋 3-D10 6-D10 せん断補強筋 29-D4@35 25-D6@35 杭 主筋 12-D13 枯径 339 12-D13 村田 七ん断補強筋 12-D4@35 枯夏 12-D4@35 12-D4@35 枯頭 十3.00×400×400 400×400×400 麦2 コンクリートの材料特性 上縮強度時の (N/mm ²) ひずみ (µ) 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 上 回13 D10 D6 D4 降伏強度(N/mm ²) 821 348 369 351 ヤング係数(kN/mm ²) 189 195 198 184	基礎梁	有効せい <i>d</i> (mm)				32	27.5 147.5			
下端筋 3-D10 6-D10 せん断補強筋 29-D4@35 25-D6@35 杭径 339 杭径 339 杭径 339 七ん断補強筋 12-D13 せん断補強筋 12-D4@35 精頭 寸法(mm) 400×400×400 麦2 コンクリートの材料特性 上縮強度 ヤング係数 「圧縮強度 ヤング係数 (N/mm²) いずみ (µ) 柱 40.5 28.2 その他 30.8 24.6 支合の他 30.8 24.6 東3 鉄筋の材料特性 ①13 D10 D6 陸伏強度(N/mm²) 821 348 369 351 ヤング係数(kN/mm²) 189 195 198 184		上端筋			5-E	D10		12-D10		
せん断補強筋 29-D4@35 25-D6@35 杭径 339 杭 主筋 12-D13 せん断補強筋 12-D4@35 杭頭 寸法(mm) 400×400×400 麦2 コンクリートの材料特性 長舎部 ヤング係数 正縮強度 ヤング係数 (N/mm²) (kN/mm²) 支 29.060 その他 30.8 24.6 1,950 麦3 鉄筋の材料特性 回13 D10 D6 降伏強度(N/mm²) 821 348 369 351 ヤング係数(kN/mm²) 189 195 198 184		下端筋			3-E	3-D10		6-D10		
杭径 339 杭 主筋 12-D13 せん断補強筋 12-D4@35 杭頭 接合部 寸法(mm) 400×400×400 麦2 コンクリートの材料特性 上縮強度 ヤング係数 圧縮強度時の (N/mm ²) 住 40.5 28.2 2,060 その他 30.8 24.6 1,950 麦3 鉄筋の材料特性 単伏強度(N/mm ²) 821 348 369 351 ヤング係数(kN/mm ²) 189 195 198 184		せん断補強筋			29-D4	4@35	2	25-D6@35		
杭頭 技合部 主筋 12-D13 七ん断補強筋 12-D4@35 杭頭 技合部 寸法(mm) 400×400×400 麦2 コンクリートの材料特性 上縮強度 ヤング係数 圧縮強度時の (N/mm ²) 化N/mm ²) ひずみ (µ) 柱 40.5 28.2 2,060 その他 30.8 24.6 1,950 麦3 鉄筋の材料特性 13 D10 D6 D4 降伏強度(N/mm ²) 821 348 369 351 ヤング係数(kN/mm ²) 189 195 198 184	杭	杭径			339					
せん断補強筋 12-D4@35 杭頭 接合部 寸法(mm) 400×400×400 表2 コンクリートの材料特性 上縮強度 (N/mm ²) ヤング係数 (kN/mm ²) 圧縮強度時の ひずみ (µ) 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 回13 D10 D6 D4 降伏強度(N/mm ²) 821 348 369 351 ヤング係数(kN/mm ²) 189 195 198 184		主筋				12-D13				
杭頭 接合部 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 ²) ヤング係数 (kN/mm ²) 圧縮強度時の ひずみ (µ) 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 回13 D10 D6 D4 降伏強度(N/mm ²) 821 348 369 351 ヤング係数(kN/mm ²) 189 195 198 184		せん断補強筋				12-D4@35				
表2コンクリートの材料特性圧縮強度 (N/mm²)ヤング係数 (kN/mm²)圧縮強度時の ひずみ (µ)柱40.528.22,060その他30.824.61,950表3鉄筋の材料特性単伏強度(N/mm²)821348369マング係数(kN/mm²)189195198184	杭頭 接合部	寸法(mr	去(mm)			400×400×400				
圧縮強度 (N/mm²)ヤング係数 (kN/mm²)圧縮強度時の ひずみ (μ)柱40.528.22,060その他30.824.61,950表3鉄筋の材料特性●D13D10D6D4降伏強度(N/mm²)821348369351ヤング係数(kN/mm²)189195198184	表2 コンクリート				۰ŀ	の材料特性				
(N/mm²) (kN/mm²) ひずみ (μ) 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 回13 D10 D6 D4 降伏強度(N/mm²) 189 195 198 184 		圧縮強度	ヤング		ブ係数 圧		縮強度時の			
柱40.528.22,060その他30.824.61,950表3鉄筋の材料特性013D10D6D4降伏強度(N/mm²)821348369351ヤング係数(kN/mm²)189195198184		(N/mm²)		(kN/mm²)			ひずみ (μ)			
その他30.824.61,950表3鉄筋の材料特性D13D10D6D4降伏強度(N/mm²)821348369351ヤング係数(kN/mm²)189195198184	柱	40.5		28.2			2,060			
表3<鉄筋の材料特性D13D10D6D4降伏強度(N/mm²)821348369351ヤング係数(kN/mm²)189195198184	その他	30.8		24.6			1,950			
D13D10D6D4降伏強度(N/mm²)821348369351ヤング係数(kN/mm²)189195198184	表3 鉄筋の材料特性									
降伏強度(N/mm²)821348369351ヤング係数(kN/mm²)189195198184			D13			D10	D6		D4	
ヤング係数(kN/mm ²) 189 195 198 184			8	21		348	369		351	
	ヤング係数(kN/mm ²)		1	89		195	198		184	

Analytical Studies on Stress State of Pile-Caps with Bi-Axial Eccentricity



$E_c = 33500(\gamma/24)^2 (F_c/60)^{1/3}$	(1)
$F_t = 0.313\sqrt{F_c}$	(2)
$f_{bck} = 0.6 / \sqrt[3]{h} \cdot F_t$	(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。圧縮応力ーひずみ関係は修正Ahmadモデル⁴⁾ 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⁵⁾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。鉄筋の応力ー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ーすべり関係は, 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

凶 3 11 种角风则

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 ものと比べて高い。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と比べ 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



析結果ともに降伏強度(1,905μ)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のものと比べ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のものと比べ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のものと比べて領域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。

- 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

- 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
- 「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
- 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カーすべりーひずみ関係,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