論文 2本杭で支持されたパイルキャップのパンチングシア耐力に関する 解析的検討

米澤 健次*1·小林 勝已*2

要旨:2本杭で支持されたパイルキャップのパンチングシア耐力を把握するために、3次元非線形 FEM 解析 を行った。まず、4本杭及び2本杭で支持されたパイルキャップに対する既往の研究の中から、パンチング シア破壊及び一方向せん断破壊に至った実験を対象に解析を行い、実験結果との比較により、解析手法及び 解析モデルの適用性を検証した。次に、同様の解析モデルを用いて、2本杭で支持された場合のパンチング シア耐力に着目した解析を行い、2本杭と4本杭の場合における解析結果を比較した。その結果、2本杭で 支持されたパイルキャップのパンチングシア耐力は、4本杭で支持された場合の耐力に対して 0.7 倍程度で あることがわかった。

キーワード: 3次元非線形 FEM 解析, 群杭, パイルキャップ, パンチングシア

1. はじめに

パイルキャップは上部構造物の自重や地震力を杭に伝 達する重要な役割を果たす部位である。近年、超高強度 材料を用いた高支持力杭が使われるようになり、その高 支持力を伝達するパイルキャップには大きな応力が生じ ることになる。しかし、パイルキャップだけでなく、基 礎梁や杭などの建築基礎部材の大地震に対する設計は義 務づけられてなく、設計者に委ねられており、基礎構造 部材の力学的挙動に関しては未解明な部分が多く、統一 された設計手法が確立されていないのが現状である。ま た,パイルキャップの力学的挙動に関しては,研究例が 非常に少なく、特に複数杭が取り付く(群杭)パイルキ ャップについては、その耐力を評価する統一的な手法は 提案されていない。群杭のパイルキャップの主な研究例 として鈴木等¹⁾と酒井等²⁾の研究が挙げられる。鈴木等 ¹⁾は, 4本杭で支持されたパイルキャップに着目し, パ イルキャップ厚, 配筋量, 柱寸法, 杭間距離等を変数と した多くの実験を行い、4本杭のパイルキャップに対し て、パンチングシアを含めたせん断耐力算定式を提案し ている。また,酒井等²⁾は2本杭で支持されたパイルキ ャップに対して,パイルキャップ厚及びせん断補強量を 変数とした実験を行い、せん断耐力について検討してい るが、2本杭のパイルキャップのパンチングシアに対す る研究例は見当たらない。

そこで、本研究では2本杭で支持されたパイルキャッ プのパンチングシア耐力に着目し、非線形 FEM 解析に より解析的な検討を行った。先ず、鈴木等の実験の中か ら4本杭で支持されたパイルキャップにおいてパンチン グシア破壊に至った試験体を、酒井等の実験の中から2 本杭で支持されたパイルキャップにおいてせん断破壊に 至った試験体を対象に解析を行い,パイルキャップのパ ンチングシア耐力及び一方向せん断耐力に対する解析手 法及びモデルの適用性を確認した。次に,パンチングシ ア破壊に至った4本杭の試験体に対する解析モデルを用 いて,2本杭で支持された場合の解析を行い,2本杭と 4本杭の場合における解析結果の比較により,2本杭に 対するパンチングシア耐力の算定法について検討した。

2. 解析手法及びモデルの適用性の検証

2.1 解析対象試験体

解析対象とした試験体は、鈴木等の4本杭で支持され たパイルキャップの実験¹⁾の中から、パイルキャップ厚 及び配筋量を変数とした4ケース(4種類8体)の試験 体を、酒井等の2本杭で支持されたパイルキャップの実 験²⁾の中から、パイルキャップ厚を変数とした2体を選 定した。図-1(a)(b)に試験体形状例を示し、表-1(a)(b) に試験体一覧を示す。実験では、杭を想定した円形の支 承板(ϕ =150mm)或いは鋼管コンクリート(ϕ =156mm) で試験体を支持し、柱に相当する部分(2本杭は載荷板) に鉛直荷重を与えて、破壊に至るまで静的に押抜き載荷



*1 ㈱大林組 技術研究所 構造技術研究所 主任研究員 博士(工学) (正会員) *2 ㈱フジタ 技術センター 博士(工学) (非会員)



が行われた。4本杭の試験体は4ケースともに、パンチ ングシア破壊に至り、2本杭の試験体は2ケースともに せん断破壊に至ったものと判定された。ここで、パンチ ングシアとは、図-2 に示すように、柱周囲を取り囲む ような錐状体の破壊面を形成する破壊を示し、せん断破 壊とは梁や柱にみられるものと同様に、一方向にパイル キャップの幅方向を貫通した破壊面を形成する破壊のこ とを示す。

2.2 解析モデル及び境界条件

解析モデルを図-3(a) (b) に示し,一例として4本杭 の境界条件を図-4 に示す。試験体形状及び載荷条件の 対称性を利用して,4分の1を対象にモデル化した。コ ンクリート躯体,支承板,鋼管コンクリート及び載荷板 は六面体要素でモデル化し,鉄筋は四辺形要素の鉄筋層 としてモデル化した。境界条件としては,試験体の対称 面は面ローラ支持として,支承板の中心をピン・ローラ 支持とした。実験における載荷部分に一様な変位を与え て,実験と同様に耐力が低下するまで,変位制御により 押抜き載荷を行った。

2.3 材料構成則

コンクリートは等価一軸ひずみに基づく, 直交異方性 体³⁾として, 圧縮側の主応力~等価一軸ひずみ関係は修 正 Ahmad モデル⁴⁾で表現した。また,引張側の特性とし ては, ひび割れ前は線形を仮定し,ひび割れ後はコンク リート示方書⁵⁾に準じた引張軟化特性を仮定した(図-5 参照)。ひび割れ面のせん断伝達特性には長沼モデル⁶⁾ を用い,多方向に生じるひび割れが考慮できる非直交ひ び割れモデル⁷⁾を用いた。コンクリートの破壊条件とし



支承板(杭)

載荷板

解析モデル(4本杭)

図-3(b) 解析モデル(2本杭)

載荷板

ては、大沼らの係数⁸⁾を用いた5パラメータモデルを用 い、Collins 等の提案⁶⁾に準じてひび割れ後の圧縮劣化特 性を考慮した。鉄筋は、バイリニア型の弾塑性モデルと し、鉄筋とコンクリート間の相対的なすべりは無視した。

各材料定数は文献 1)及び文献 2)に記載の値を用いた。 解析は「FINAL V11」⁹⁾を用いて行った。

2.3 解析結果と実験結果の比較

図-6 に解析から得られた荷重~変位関係を各パラメ ータ別に示す。なお、図中には実験における最大耐力を 併記した。4本杭の実験は、同じ条件下の実験で2体の 試験体を用いて行っており、2体の最大耐力の平均値を 示している。最大耐力時の変形は、パイルキャップ厚が 大きくなるに従い小さくなり、杭間距離が狭まることに より最大耐力が上昇する傾向が見られる。4本杭の4ケ ースの荷重~変位関係における共通の事象として、最大 耐力以前に一時的に荷重が低下する個所がある。これは パイルキャップに主要なせん断ひび割れが発生して、一



図-8 実験と解析の損傷状況の比較(2本杭)

時的に荷重が下がり,以降は,応力の再分配がなされ, 柱から支承板に向かうアーチにより力が伝達されて最大 耐力まで荷重が上昇したものと考えられる。一例として 4本杭のパイルキャップ厚30mmの解析の最大耐力時に おけるコンクリート最小主応力コンター,損傷変形状況 を図-7に示す。図よりアーチ機構による圧縮ストラッ トが形成され,また,柱周囲のコンクリートが局部的に 圧縮軟化領域に達し,変形状況や荷重~変位関係におい て耐力低下が生じていることから,解析は実験と同様に 柱周囲の錘状体に破壊が集中するパンチングシアで最大

図-9 実験と解析の補強筋ひずみの推移の比較(2本杭)

表-2	解析と実験の最大耐力の比較	(単位:kN)

	4本杭 ¹⁾				2本杭 ²⁾	
	No.1,2	No.3,4	No.5,6	No.25,26	No.1	No.2
	D=250	D=300	D=350	D=300	D=560	D=360
実験	883	1143	1487	1284	1252	1080
FEM解析	896	1184	1423	1286	1208	977
解/実	1.01	1.04	0.96	1.00	0.96	0.90

耐力に至っているものと判断した。

2本杭における解析と実験の損傷状況の比較を図-8 に示し、各補強筋ひずみの推移の比較を図-9に示す。 解析では、要素内の平均ひずみを基にひび割れを表現し ているため、実験の損傷状況と直接的に比較はできない



図-11 パンチングシア検証用解析モデル

図-12 2本杭と4本杭の荷重~変位関係の比較

が、ひび割れの方向などは解析と実験で一致しており、 損傷状況に関して実験の傾向を概ね再現していることが わかる。また、各補強筋のひずみに関しては、帯筋ひず みは破壊の進展に伴って急激に増大し、袴筋やベース筋 は初期においては圧縮ひずみを受け、最大耐力の80%程 度の荷重から引張側に転化する現象が、実験と解析の両 者で表れている。このことから、補強筋ひずみの推移に おける定性的な傾向も実験と解析で一致していることが わかる。なお、解析では袴筋やベース筋は鉄筋層として 定義しているため、同じひずみ値を示すことになる。

表-2 に解析と実験の最大耐力の比較を示す。すべて の解析と実験の最大耐力の差異は 10%未満の誤差に収 まり,実験と解析は良好な対応を示している。このこと から,ここで仮定した解析手法及び解析モデルにより, パイルキャップのパンチングシア耐力及びせん断耐力を 良好な精度で評価できるものと判断した。

3. 2本杭のパンチングシア破壊に対する解析

3.1 解析モデル

ここでは、パンチングシア破壊に至った4本杭の実験 を対象とした解析モデルを用いて、図-10に示すように 杭に相当する支承板の位置のみを変えて、2本杭の場合 を想定した解析を行い、2本の杭で支持された場合にお けるパンチングシア耐力の検討を行った。解析モデルを 図-11に示す。解析ケースはパイルキャップ厚、杭芯間 距離を変数とした4ケースである。

3.2 2本杭と4本杭の解析結果の比較

図-12に4ケースにおける2本杭の場合と4本杭の場

合の荷重~変位関係を比較して示す。ここで、2本杭と 4本杭の解析条件においては、杭位置(杭本数)のみが 異なり、杭径、パイルキャップ断面寸法(図-1参照)、 配筋(表-1(a)参照)、及び材料等はすべて同じである。 一例として2本杭の場合における最大耐力近傍のコンク リート躯体の最小主応力コンター及び損傷変形状況を図 -13に示す。変形損傷状況及びコンターより、柱周囲の コンクリートが局部的に損傷を受け、2本杭の場合にお いてもパンチングシアにより最大耐力が決まったことが わかる。

荷重~変位関係の比較から、いずれのケースにおいて も2本杭の場合は、4本杭の場合に比べて、パンチング シア耐力が小さく、また、最大耐力時の変形も小さいこ とがわかる。

表-3 に2本杭の場合と4本杭の場合における解析値 の最大耐力の比較を示す。2本杭の場合は、4本杭の最 大耐力の0.7倍程度である。図-14は両者の同じ荷重レ ベル(P=800kN)における高さ中心水平断面の最小主応 カコンターを示しているが、2本杭に比べて4本杭の場 合には、応力が大きいエリアが分散するため、設計上の 有効断面を大きくとることができる。また、2本杭の場 合は、4本杭の場合に比べて同じ荷重レベルにおける最 大応力値が大きく、2本杭の場合においては、図中の点 線以上のエリアは殆ど荷重に対して抵抗しないことがわ かる。このように、2本杭の場合は、4本杭の場合と杭 による支持条件が異なるため、応力に偏りが生じて、パ ンチングシア耐力が低くなることが推察できる。



表-3 2本杭と4本杭の 最大耐力の比較(単位:kN)

	4本杭	2本杭	2本杭 ⁄4本杭		
No.1,2 D=250mm	896	693	0.77		
No.3,4 D=300mm	1184	883	0.75		
No.5,6 D=350mm	1423	1018	0.72		
No.25,26 D=300mm	1286	964	0.75		

l.

Вx

図-15 耐力算定断面

 l_{px}

 $l_s/2$

杭

算定断面

⇒

図-13 コンクリートの最小主応力コンター及び損傷変形状況(2本杭)



図-14 水平断面のコンクリート最小主応カコンターの比較(2本杭と4本杭)

表-4 計算値と解析値の最大耐力の比較(単位:kN)

			-	
	No.1,2	No.3,4	No.5,6	No.25,26
	D=250mm	D=300mm	D=350mm	D=300mm
4本杭_解析値	896	1184	1423	1286
2本杭_解析値	693	883	1018	964
4本杭_計算値	992	1295	1712	1585
2本杭_計算値	694	907	1198	1110
4本杭_解/計	0.90	0.91	0.83	0.81
2本杭_解/計	1.00	0.97	0.85	0.87

4. 2本杭パイルキャップのパンチングシア耐力の算定

鈴木等は、実験結果に基づいて4本杭のパイルキャッ プのパンチングシア耐力に対する算定式として式(1)を 導いている¹⁾ (ただし、 β =1.0)。式(1)は大野・荒川 mean 式¹⁰に準じて最大せん断強度 τ_p を算定し、図-15 に示 す耐力算定断面を乗じることによりパンチングシア耐力 を算定するものである。

$$P_{u1} = \beta \cdot \tau_p \cdot b_p \cdot j \tag{1}$$

$$\tau_p = \frac{0.12 \cdot k_u \cdot 0.82 \cdot p_t^{0.23} \cdot (18 + \sigma_B)}{l_s / d + 0.12}$$
(2)

 b_n : 算定断面の総長 (=2·(r+r')+ π · l_s)

j:応力中心間距離(=7/8d)

- d:有効せい、 $k_u:$ 断面寸法におる補正係数
- σ_{R} :コンクリート圧縮強度,r,r':柱幅



 l_s : $r_p - (r + r')/4$, p_t : 引張鉄筋比(%)

r。: 柱芯から杭表面までの距離

この算定式に基づいて,式(1)の右辺に応力集中よる低 減係数βを乗じることで,2本杭の場合におけるパンチ ングシアを算定できるものと考えられる。ここで,βは 上述の解析結果より,0.7とする。

式(1)による計算値と FEM 解析値の比較を表-4 及び 図-16 に示す。解析から得られたβを乗じているため, 計算値と解析値が良好な対応を示すことは当然なことで あるが、本検討の範囲においては、応力の偏りによる低 減係数を用いることで、2本杭の場合も、4本杭の場合 と同様の方法により最大耐力を算定できる可能性がある と推察される。

5. まとめ

本研究では2本杭のパイルキャップに対するパンチ ングシア耐力について3次元非線形 FEM 解析による解 析的検討を行った。以下に,得られた知見を示す。

(1)パイルキャップに対する既往の実験試験体を対象に 解析を行い,実験結果と比較した結果,パンチングシア 耐力及びせん断耐力に関して,実験と解析は良好な対応 を示し,解析モデルの適用性を検証した。

(2) 2本杭パイルキャップのパンチングシアに着目した 解析を行い、4本杭の結果と比較した結果、2本杭の場 合は、4本杭の場合に比べて、パンチングシア耐力が小 さく、4本杭の場合のパンチングシア耐力の 0.7 倍程度 であった。この理由としては、両者で杭による支持条件 が異なり、2本杭の場合は、応力の偏りが生じ、有効断 面が狭まることが挙げられる。

(3) 2本杭のパイルキャップのパンチングシア耐力は, 4本杭の場合に対する算定式に基づき,応力の偏りによ る強度低減係数を乗じることで算定できるものと考えら れる。ただし,算定式の妥当性の確認として,実験的な 検証が望まれる。

謝辞

本研究は、日本建築学会「RC基礎部材の耐震設計指 針作成小委員会(委員長:東京大学・塩原教授)」の一環 として実施したものである。委員の方々には、貴重なご 意見を戴きました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 鈴木邦康,大築和夫:4本杭支持独立フーチングの せん断耐力に関する実験的研究,日本建築学会構造 系論文集,第548号,pp.123-130,2001
- 酒井慎二,岸田慎司,小林恒一,田中佑二郎:2本 群杭で支持されたパイルキャップの鉛直載荷に対 する耐震性能評価,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, 2007.
- 色部誠,河角誠,安達洋,W.F. Chen:コンクリート 構造物の塑性解析,丸善株式会社,1985
- 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
- 5) コンクリート標準示方書「構造性能照査編」:土木 学会,2002 制定
- 6) 長沼一洋:鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解 析手法に関する研究(その1),日本建築学会構造系 論文報告集,第421号,pp.39-48,1991.3
- 米澤健次,長沼一洋,江戸宏彰:正負繰返し荷重を 受ける RC 柱の三次元 FEM 解析,コンクリート工学 年次論文集 Vol.25,No.2,pp.43-48,2003
- 大沼博志,青柳征夫:三軸圧縮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, No.381021, 1981.126
- 9) 伊藤忠テクノソリューションズ(株): FINAL/V11HELP
- 10) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同 解説-許容応力度設計法-, 1999