

# 動的非線形解析における群杭モデルの簡略化の検討

藤川 智<sup>1</sup>・上田 稔<sup>2</sup>・熊崎幾太郎<sup>3</sup>・上村 均<sup>4</sup>・福武毅芳<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 清水建設株式会社 和泉研究室 (〒100東京都千代田区内幸町2-2-2)

<sup>2</sup>正会員 工博 中部電力株式会社 電力技術研究所 (〒459名古屋市緑区大高町字北関山20-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 中部電力株式会社 電力技術研究所 (〒459名古屋市緑区大高町字北関山20-1)

<sup>4</sup>正会員 中部電力株式会社 中央送変電建設所土木建築課課長 (〒456名古屋市熱田区横田2-3-24)

本研究では、非線形地盤上の大規模な群杭モデルの計算負荷を軽減するための一手法として、基礎の一部のみに着目した簡易なモデル化の方法に着目し、その適用性を検討した。この簡易モデルは、杭1本とそれが負担する周辺部分のみをモデル化したものであり、側方周期境界により一定間隔を保った杭配列のパターンが無限に繰り返されるモデルに対応する。解析は簡易モデルと群杭全体モデルに対して行い、それぞれ二次元と三次元解析を実施し、杭の曲げモーメントに着目して比較した。簡易モデルの解析結果は、群杭モデルの結果とほぼ対応した。これより、群杭基礎の杭応力を近似的に把握するためには、大規模な全体モデルを解かなくても、二次元簡易モデルで十分検討可能であることを示した。

**Key Words :** *pile group, bending moment, nonlinear, dynamic, three-dimension*

## 1. はじめに

地震時に非線形性を示すような軟弱な表層地盤上の構造物は、水平力に抵抗するため多本数の杭に支持された群杭の基礎形式をとることが多い。群杭基礎においては、三次元的な杭の配置から、地震時には杭位置により荷重分担率の違いが生じることなど、その挙動は複雑である。このため、群杭基礎の挙動を解析により厳密に検討する場合には、基礎全体をモデル化した三次元解析によるのが理想的である。さらに、軟弱地盤では地盤の非線形性を考慮する必要がある。しかし、FEMを用いた動的逐次非線形解析により三次元群杭モデルを解析しようとすれば、非常に大きな計算容量とCPU時間が必要となる。そこで、ある鉛直断面に着目した二次元群杭モデルを用いる場合が多いが、この場合にも、杭本数が多ければ大規模な解析となることには変わらない。本研究では、このような解析上の負担を軽減するための一手法として、計算負荷が小さい簡易なモデル化の方法に着目し、その適用性を群杭全体モデルの結果と比較しながら検討した。解析の対象は軟弱地盤上の群杭基礎とし、群杭基礎のモデル化の方法と解析の次元の違いによる応答の差異を、杭の曲げモーメントに着目して比較した。

## 2. 解析モデルと解析条件

解析対象とした構造物は、上載機器と基礎スラブを支持する群杭基礎である。支持地盤の地層構成とその物性を表-1に示す。EL-4.0m ~ -8.9mの細砂層は簡易判定結果から液状化が予測されるため、この層をSCP工法による地盤改良部分とした。従って、解析では地盤の液状化を考慮しているが過剰間隙水圧の発生はほとんど見られなかった。他の層では非線形性のみ考慮した。図-1に三次元群杭モデルを示す。基礎幅は30m×30mとし、杭(PHC, B種φ600)はEL-49.6mの砂礫層を支持層とし、間隔3mで11本×11本の配置とした。加振は一方向(x方向)とするため、三次元群杭モデルではモデルの対称性を考慮して対称面(y=0)で切った1/2モデルとした。杭は梁要素で、地盤はソリッド要素でモデル化した。基礎スラブは十分剛な物性とした。上載機器は梁要素と集中重量でモデル化し、重量は1.0 tf/m<sup>2</sup>とした。境界条件は、底面は粘性境界、左右の側方境界は周期境界とした。二次元群杭モデルでは地盤の奥行きは基礎幅と同じ30mとした。杭は、奥行き方向の11本分の物性を足し合わせることで集約化した。つまり、杭1本分の断面二次モーメントIと断面積Aを11倍した値を1本の梁要素に与えた。

一方、このような大規模な群杭モデルに対して、

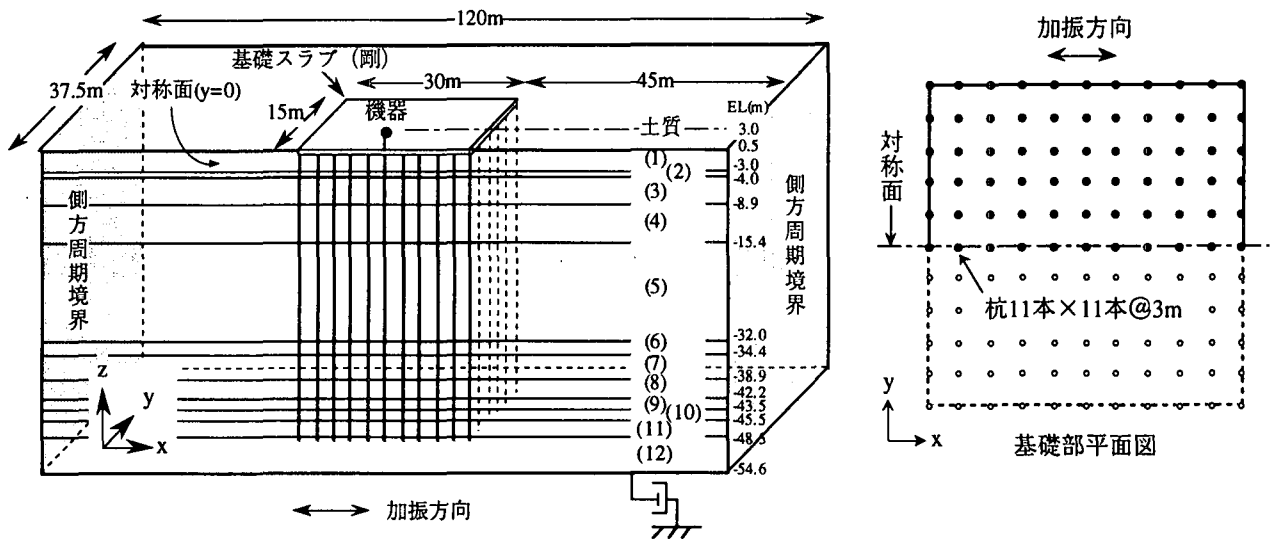


図-1 三次元群杭モデル (1/2モデル)

表-1 地層構成と地盤物性

	土質	$\gamma$ (tf/m <sup>3</sup> )	$V_s$ (m/s)	$h_{max}$	$\gamma_{0.5}$ ( $\times 10^{-3}$ )
(1)	砂礫	1.90	215	0.20	0.0731
(2)	シルト	1.77	94	0.22	4.00
(3)	細砂*	1.62	250	0.24	1.20
(4)	砂質シルト	1.84	131	0.22	1.40
(5)	シルト	1.61	137	0.22	1.80
(6)	砂混りシルト	1.77	177	0.22	4.00
(7)	砂質シルト	1.77	186	0.22	4.00
(8)	シルト質細砂	1.77	214	0.24	0.963
(9)	細砂	1.80	218	0.24	0.992
(10)	砂質シルト	1.72	226	0.22	4.00
(11)	細砂	1.82	267	0.24	1.04
(12)	砂礫	1.90	340	0.20	0.274
	砂礫	1.90	361	-	-

\*SCP改良部,  $h_{max}$ : 最大減衰定数,  $\gamma_{0.5}$ : 基準ひずみ

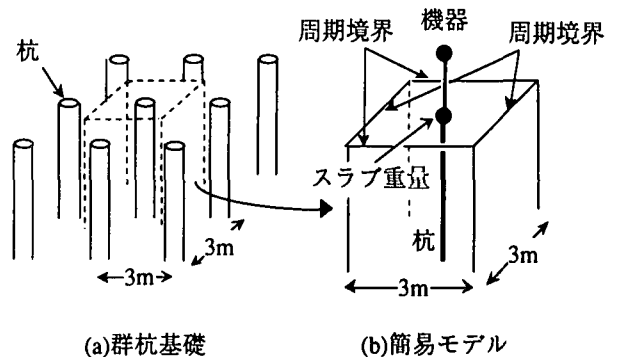


図-2 簡易モデル

群杭基礎の一部のみに着目した簡易モデルでの解析も行った。簡易モデルは、図-2に示すように、群杭基礎の杭1本と杭1本分が負担する上載機器、基礎スラブ、地盤の1ブロックのみをモデル化したものである。三次元モデルの地盤部分は、幅・奥行き共に杭1本の支配面積に対応する3mとし、同様に二次元モデルでは、地盤幅を3m、地盤奥行き幅も3mとした。杭は梁要素でモデル化し、杭1本分の断面二次モーメントIと断面積Aを与えた。簡易モデルの側方境界条件は、図-3に示すように、対面する同一深度の節点同士を同変位条件とする周期境界とした。これにより一定の間隔を保った杭配列のパターンが無限に繰り返されるモデルに対応する。すなわち、杭1本だけのモデル化で杭が水平方向に無限に配置する状態(無限群杭)と等価な効果が表現できる。ここでは、さらに簡便なモデルにするという目的から、基礎スラブは集中重量でモデル化し、杭1本分が負担する基礎スラブの重量を杭頭に与えた。このとき、杭頭は回転固定の拘束条件を与えた。

解析ケースを表-2に示す。群杭および簡易モデル

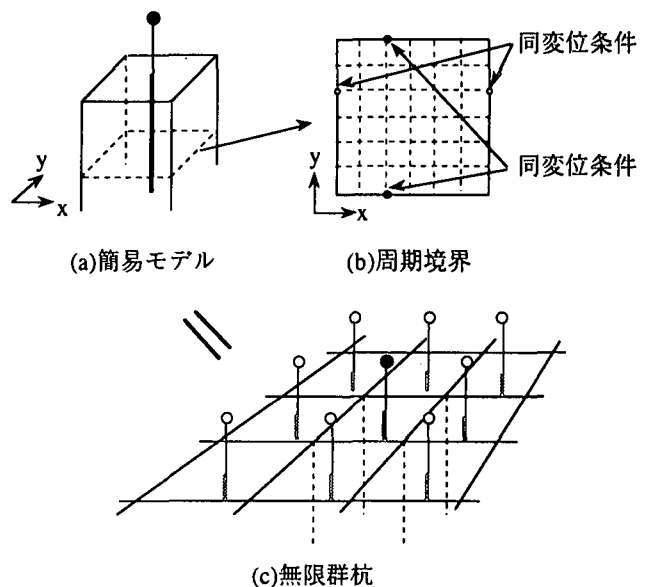


図-3 周期境界と簡易モデル

のそれぞれに対して、二次元と三次元解析を行い、合計4ケースの解析を実施した。表-2には、各解析モデルの自由度の比も合わせて示した。ここで、三次元簡易モデルの自由度が二次元群杭モデルより大きい

のは、簡易モデルでは杭間のメッシュ分割数を細かくしているためである。解析の入力波は、文献2)による1995年兵庫県南部地震新神戸記録の基盤波とした。本解析地点の工学的基盤で最大加速度165Gal(2E)として入力し、デコンボリューションにより解析モデル底面(EL-54.6m)での入力波(124Gal(2E))を求めた。解析時間は主要動部分の7秒間とした。図-4に入力加速度波形を示す。用いた解析コードは二次元ではALISS<sup>3)</sup>、三次元ではHIPER<sup>4)</sup>とした。両者とも土の構成式は、修正R-Oモデルとダイレイタンシーモデル(おわんモデル)を併用している。

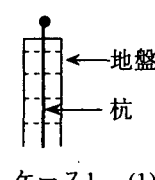
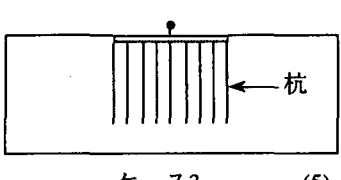
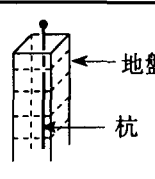
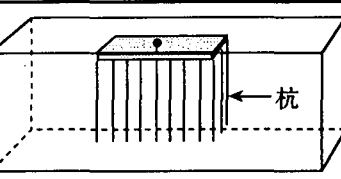
### 3. 解析結果

図-5に簡易モデルと群杭モデルの杭の最大曲げモーメント( $M_{max}$ )の鉛直分布を示す。地盤の表層部は改良部分であるために杭頭部の $M_{max}$ はあまり大きくない。細砂層と砂質シルト層の境界の剛性変化が大きい位置(EL-8.9m)とシルト層内で $M_{max}$ が大きくなっている。二次元解析では、簡易モデルと群杭モデルの中央杭(6)は非常によく対応している。同様に、三次元解析で簡易モデルと群杭モデルの中央杭(1)Aを比較すると、杭頭に近い部分で簡易モデルの方がやや大きいものの、両者はよく対応している。杭位置の違いで比較すると、二次元解析では隅杭(1)は中央杭(6)に比べ最大で1割程度大きくなっている。三次元解析では隅杭(1)Fよりも中央杭(6)Aは最大で2割程度小さい。解析の次元の違いで比較すると、大まかな分布傾向は対応しているが、一部でやや二次元解析の方が大きく安全側の結果を示す。これは、二次元解析では杭が壁状にモデル化されるため、地盤反力の影響を受けやすいためであると考えられる。図-6には $M_{max}$ が比較的大きな値を示す深度付近での群杭の $M_{max}$ の分布を示す。同図には、簡易モデルの値も示した。基礎中央から端部にかけて $M_{max}$ が漸増しており、杭位置による荷重分担率の違いが見られる。三次元群杭で奥行き方向に比較すると、最も外側のF列は対称面のA列よりも、最大で25%(EL-8.9m)程度大きい。図-7には三次元群杭モデルの杭頭における $M_{max}$ の分布を示す。隅部に位置する杭(1)Fが最も大きく、荷重分担率の三次元的な分布が見られる。

### 4. まとめ

簡易モデルによる杭の最大曲げモーメントの分布は、群杭モデルの結果とほぼ対応した。これより、群杭基礎の杭応力を近似的に把握するためには、大規模な群杭全体モデルを解かなくても、簡易モデルでも十分検討可能と考えられる。また、解析の次元の違いで比較すると、二次元モデルは三次元モデルよりやや安全側の結果を与えるが、この違いはさほど大きなものではない。これと、モデルの自由度の比を考慮すれば、二次元簡易モデルの有効性は大きいと言える。一方で、簡易モデルは周期境界により無限群杭に対応するため、次の点に注意を要する。群杭基礎では、杭位置により荷重分担率の違いが生じ、基礎中央部に比べ端部の杭の応力が大きくなるが、簡易モデルではこのような効果は表現できない。また、基礎のロッキングが卓越するようなモデルには不向きであると考えられる。さらに、周辺地盤が基礎を大きく回り込むような三次元挙動を示す場合には、この地盤の動きにより基礎端部の杭が大きな応力集中を受けるが、簡易モデルでは検討不可能である。従って、簡易モデルの適用の際にはこのような適用限界を把握しておくことが重要となる。

表-2 解析ケース

次元	杭のモデル化	
	簡易モデル	群杭モデル
二次元		
三次元		

(\*括弧内は自由度の比)

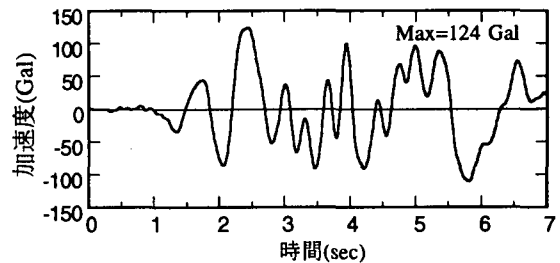


図-4 入力加速度波形(振幅2E)

今回、地盤改良により液状化しない地盤を対象とした。しかし、液状化が生じるような強い非線形性を示す地盤では、杭頭の応力が最も厳しくなると考えられる。さらに、基礎周辺地盤の回り込みや杭間の地盤の動きが生じ、杭応力に影響を与えることも考えられる。このような条件下での解析モデルによる結果の違いの検討を今後の課題としたい。

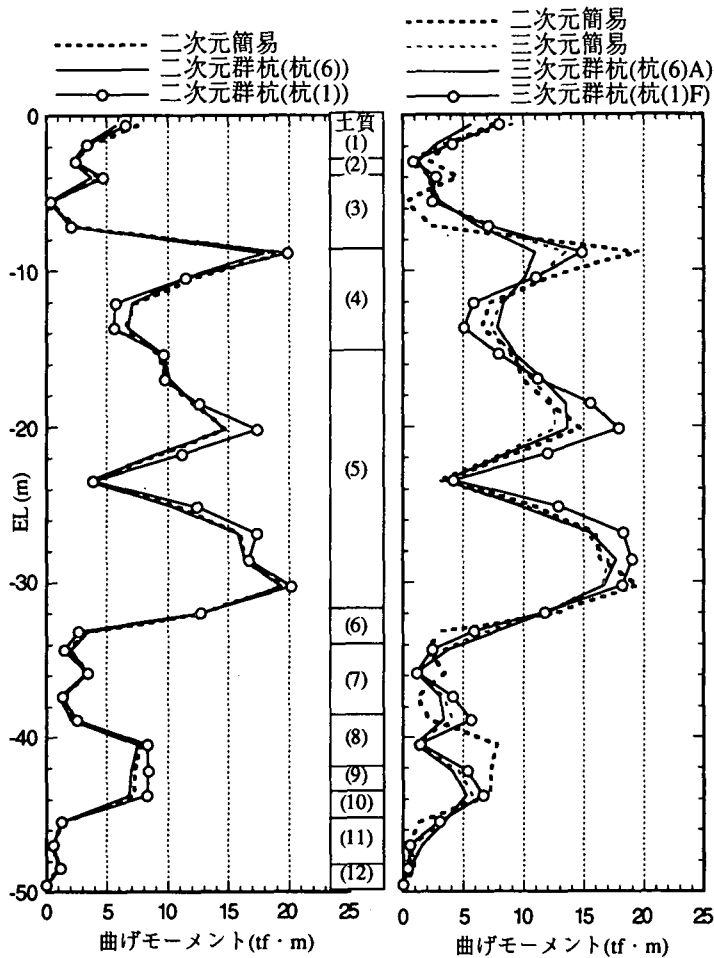


図-5 杭の最大曲げモーメント (鉛直分布)

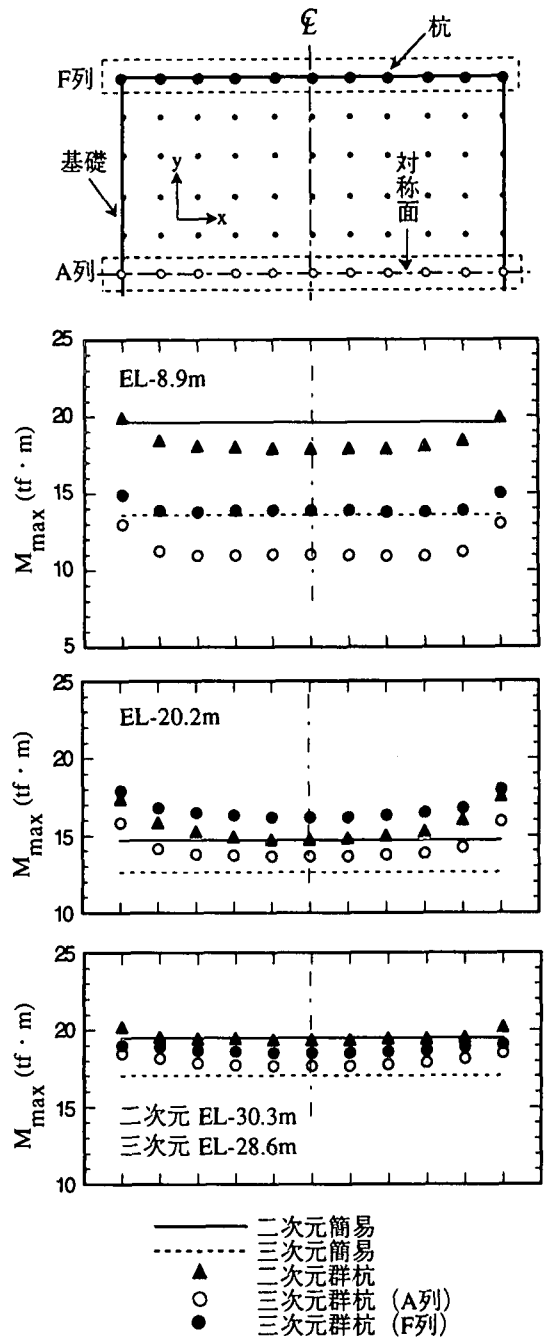


図-6 各杭の最大曲げモーメント

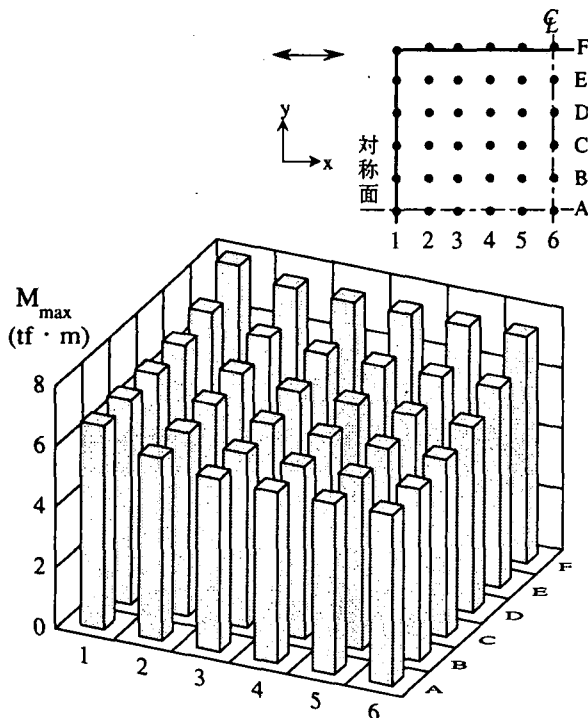


図-7 杭頭の最大曲げモーメント (三次元群杭モデル)

### 参考文献

- 1) 福武毅芳, 太田泰博, 中村紀吉, 勝沢勝栄, 鈴木康夫 (1996): 建屋-杭-地盤系の有効応力解析のモデル化の研究 (その5), 建築学会大会学術講演梗概集, pp.465-466.
- 2) 松本正毅, 小池章久, 沢田義博 (1996): 兵庫県南部地震強震観測地点における基盤地震動特性, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, 土木学会, pp.81-84.
- 3) K.Fukutake, A.Ohtsuki, M.Sato and Y.Shamoto (1990): Analysis of saturated dense sand-structure system and comparison with results from shaking table test, Earthquake eng. struct. dyn. 19, 977-992.
- 4) 大槻明, 福武毅芳, 藤川智, 佐藤正義 (1994): 液化化時群杭挙動の三次元有効応力解析, 土木学会論文集, No.495/I-28, pp.101-110.