

パイルド・ラフト基礎の地震応答解析 — 地盤振動と上部構造の応答が杭応力に及ぼす影響 —

正会員 ○永井 宏*
同 土屋 勉**

パイルド・ラフト 杭基礎 杭頭接合条件
時刻歴応答解析 相互作用

1. はじめに

パイルド・ラフト基礎の地震時挙動に関して、著者らは数値解析^{1),2)}および原位置水平載荷実験³⁾を行い、本基礎形式の有用性や杭頭接合部の非剛接合化の効果を検討してきた。また、地震時の杭応力の評価には、上部構造のロッキングによる柱脚部の変動軸力や曲げモーメントを考慮する必要性も指摘¹⁾していた。ただし、これらは静的荷重に対する検討であり、地震動による動的荷重に対する応答については未検討であった。一方、上部構造も含めた振動模型実験による研究^{例えば4)7)}はあるが、ロッキングやラフト-杭頭部間の接合部条件、ラフト平面に配置された杭位置の影響に関する検討は十分に行われてない。

そこで、本論文では上部構造/基礎/地盤を連成した3D FEMによる時刻歴応答弾性解析を行い、地震時における地盤や上部構造の応答がパイルド・ラフト基礎の杭応力に及ぼす影響を検討した。

2. 解析方法および解析モデル

本論文では、Soil Plus Dynamic 2010 (CTC) を用いた。地盤は立体要素、杭および柱には梁要素、床および基礎スラブには平板要素を用いた。また、構造物/地盤の内部粘性減衰として2%のRayleigh減衰を、地盤への逸散減衰として側方自由地盤および表層地盤下方の基礎層との境界にそれぞれ粘性ダンパーを考慮した。

図1に検討モデル(対称条件を導入して1/2の領域)を示す。地盤は基礎層を有する2層地盤とし、表層地盤の一次固有周期は $T_{S1}=0.4\text{sec}$ である。上部構造はRC造5F(全重量は約12.4MN;基礎を含む)で、基礎固定時の一次固有周期 $T_{F1}=0.3\text{sec}$ となるよう柱の断面寸法を調整した。また、入力地震波(X方向)は、工学的基礎面において告示1461号の加速度応答スペクトルを目標スペクトルとする稀な地震動を想定し60sec加振した。

検討項目は表1に示す基礎形式、杭頭接合条件および上部構造の剛性の有無である。パイルド・ラフト基礎は柱直下に配置された9本杭で支持し、建物重量による杭の鉛直荷重負担率は静的自重解析に基づく48.6%となる。また、杭基礎は基礎スラブ底面を地盤面+0.1mとして底面の地盤反力は作用させないように設定した。

3. 解析結果

上部構造/基礎/地盤を連成したFモデルにて杭頭接合条件が杭応力に及ぼす影響を検討する。

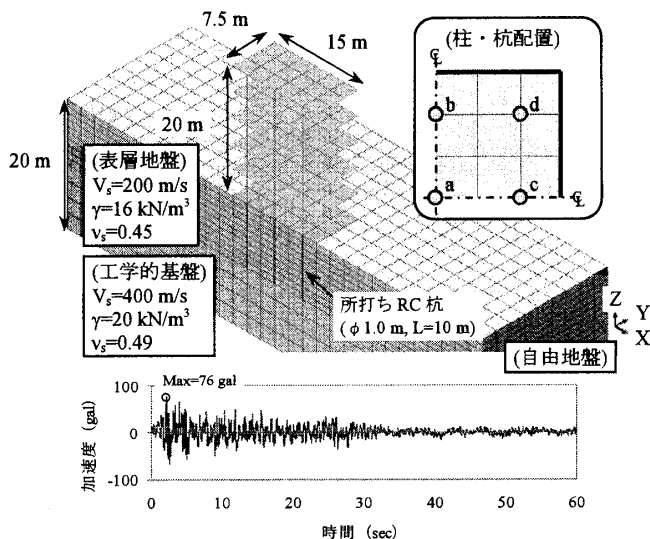


図1 解析モデルと入力地震動

表1 検討項目

基礎形式	パイルド・ラフト基礎 (PR)	杭基礎 (PG)
杭頭接合条件	剛 (r)	ピン (p)
上部構造	有 (F)	無 (N)

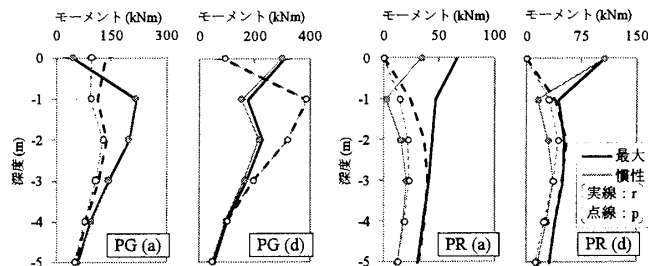


図2 杭の曲げモーメント分布

表2 静的解析による杭の曲げモーメントの割合

基礎	接合	杭	深度	水平	回転	地盤
PG	r	a	0.1 m	2.35	-1.42	0.07
		d	0.1 m	1.69	-0.71	0.02
	p	a	-1 m	1.15	-0.14	-0.01
		d	-1 m	0.93	0.07	0.00
PR	r	a	0 m	1.00	-0.38	0.37
		d	0 m	1.97	-1.11	0.14
	p	a	-3 m	0.16	0.48	0.36
		d	-2 m	0.42	0.53	0.05

図2はラフト中央部(図1a)および隅角部(図1d)における杭の曲げモーメント分布である。最大応答値および慣性力最大時の深度方向分布(絶対値)である。杭基礎では、慣性力最大時に最大応答を示したのが分かる。なお、接合条件の大小関係は各杭の平面位置で異なる。一方、パイルド・ラフト基礎では杭の平面位置によって最大応答を示す時刻が異なる傾向が見られ、また中央杭での慣性力最大時の応力は最大応答値の半分程度である。

そこで、図3では各杭の曲げ応力が最大となる時に着目して、動的解析と静的解析の比較を行った。なお、建物の水平慣性力が正方向(図1のX方向)に作用したとして表現する。①建物の水平慣性力、また②建物のロッキングに伴う柱の変動軸力と柱脚部の曲げモーメントを更に付加して作用させても、特に中央杭で一致しない。一方、③地盤変位に伴い杭体に作用する荷重も含めると、両者の結果は概ね一致するのが分かる。ここで、静的解析において各荷重による発生応力(最大値を示す深度)の割合を示した表2を見ると、地盤変位による応力が約1/3と大きい。ラフト底面の反力により杭が負担する荷重が低減、また、水平荷重による応力は隅角杭よりも中央杭で小さくなるため、地盤変位による影響が相対的に大きくなったと言える。パイルド・ラフト基礎の地震時の杭体応力の評価には、上部構造の応答に伴う荷重と共に、地盤変動に伴う荷重を考慮しないと過小評価となる危険性が示唆される。なお、杭基礎では地盤変位による応力が非常に小さい(表2)。

次に、上部構造のモデル化(剛性)の有無が及ぼす影響を検討する。図4は、各杭位置における最大曲げモーメント応答値および杭頭剛接合杭に対するピン接合杭の応力比である。Nモデル(上部構造をモデル化せず、その重量を基礎スラブで考慮)はFモデルと比較すると、杭頭剛接合ではFモデルの0.89~1.55倍と過大評価、逆にピン接合モデルでは0.30~0.63倍と過小評価する傾向がある。これは、Fモデルでは建物のロッキング作用により、剛接合では応力が低減されるのに対して、ピン接合では応力が付加されるためである。

また、杭頭接合条件を剛接合からピン接合に変更した場合の応力低減効果に着目する。パイルド・ラフト基礎のNモデルでは0.13~0.18倍となっており、既往の研究^{1)~3)}と同様に杭頭ピン接合の応力低減効果が非常に大きいと評価される。一方、Fモデルでは0.52~0.60倍とNモデルよりも応力低減効果が低く評価される。また、図示していないが杭頭せん断力についても同様の傾向を示したが、杭頭の回転剛性を低減した杭体の応力算定には注意が必要となる。

4. おわりに

本論文の結果を以下にまとめる。

- ① ラフトー杭頭部間の接合条件(剛, ピン)が上部構造

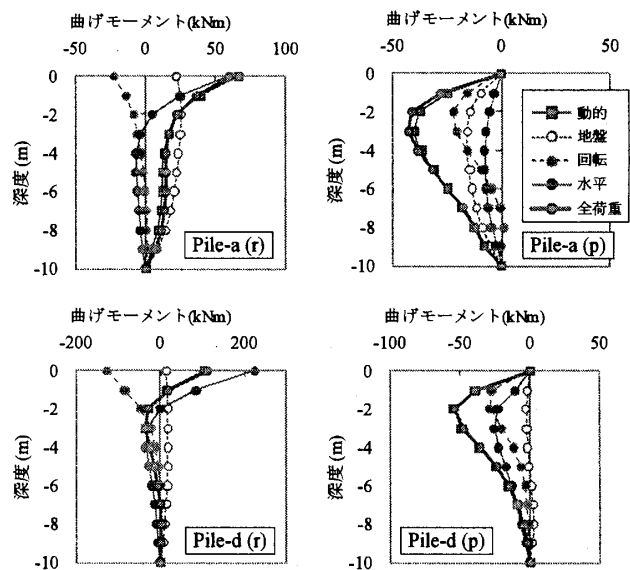


図3 静的解析との比較 (PR)

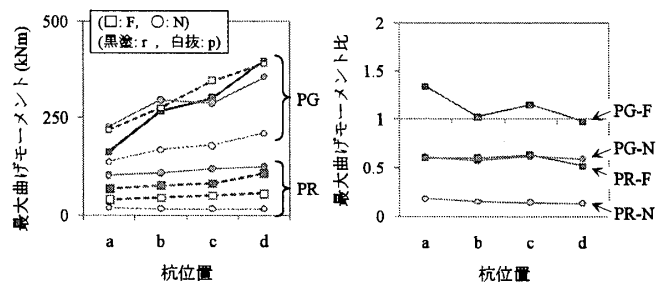


図4 杭の最大曲げモーメント

の応答に及ぼす影響は小さい。

- ② 建物のロッキングにより、杭頭非剛接合化による杭体の応力低減効果は小さくなる場合がある。
- ③ 地震時の杭体応力の評価には、水平荷重だけでなく、上部構造のロッキングに伴う変動軸力および地盤変位による荷重を考慮する必要がある。

本解析は限られたケースでの検討結果であり、今後更に地盤条件・基礎形状や地震波の影響、材料の非線形性の検討を実施する予定である。

参考文献

1) 土屋 勉, 永井 宏, 池田篤則: 地震力を受けるパイルドラフトの挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.343-350, 2002.3 2) 永井 宏, 土屋 勉: 水平力が作用するパイルド・ラフト基礎の非線形挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.52B, pp.1-8, 2006.3 3) 永井 宏, 土屋 勉: 杭頭拘束条件に着目したパイルド・ラフトの原位置水平載荷実験, 日本建築学会構造系論文集, No.579, pp.47-53, 2004.5. 4) 真野英之, 中井正一ほか: 水平力を受けるパイルドラフト基礎の遠心模型実験 その2 振動実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊, pp. 663-664, 2002.8 5) 藤森健史, 西山高士ほか: 大型遠心せん断土槽実験によるパイルドラフト基礎の地震時挙動評価 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1 分冊, pp.487-488, 2003.9 6) 上田剛志, 沖明香ほか: フレキシブルな上部構造物を有するパイルド・ラフトの振動実験 (その1~その3), 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 1415-1420, 2006.7 7) 飯場正紀, 田守伸一郎, 北川良和: 建物-地盤連成系模型の振動台実験による杭基礎への地震作用の基本性状, 日本建築学会構造系論文集, No.566, pp.29-36, 2003.4

* 室蘭工業大学大学院 助教・博士 (工学)

** 室蘭工業大学大学院 教授・工博

* Assistant Professor, Muroran Inst. of Tech., Dr. Eng.

** Professor, Muroran Inst. of Tech., Dr. Eng.