

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

正会員 ○土屋 勉 *1
池田篤則 *2
正会員 水上大樹 *3

1. はじめに

近年、鉛直荷重が作用するパイルドラフト形式の基礎の支持力や沈下に関する研究の進展に伴い、外国では高層建築物にも適用が試みられるようになった。しかし、地震国である我が国では、地震力を受ける場合の挙動が未だ十分に明確にされていないため、パイルドラフトの実施例は低層のごく少数のものに限られている。パイルドラフトが軟弱地盤における合理的な基礎形式として我が国で広く認知されるためには、地震力に伴う水平力、柱脚モーメント、ロッキングを受ける場合の挙動を早急に明らかにされる必要がある。また、杭頭の応力を減少させることを目的とし、杭頭をピン接合とした杭基礎も開発されているが、パイルドラフトに組み込まれた場合の挙動とその有効性は十分に明らかになっていない。

そこで本論文では、地震力として上部構造物の慣性力を受けるパイルドラフトに着目して、従来検討されてきた水平力¹⁾の他に柱脚モーメントやロッキングを受ける場合も含めて、パイルドラフトの挙動をより総合的に明らかにすることを目的とした。従って、群杭基礎との比較を行うと共に、杭頭接合条件（剛接合またはピン接合）による影響も検討する。

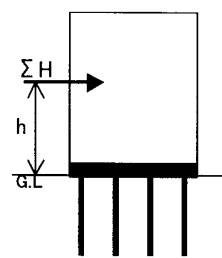


図1 水平力を受ける構造物

2. 解析モデル及び解析方法

2.1 パイルドラフトに作用する外力

地震力が作用する場合、構造物には図1に示すようにある高さ h に水平力 ΣH が作用する。この水平力により、建物基礎には図2に示すように、ΣH の (a) 水平力及び ΣH・h のモーメントとして (b) 柱脚モーメントと (c) ロッキングが作用する。本論文では、パイルドラフトの外力として、水平力、柱脚モーメント及びロッキングを検討の対象とした。

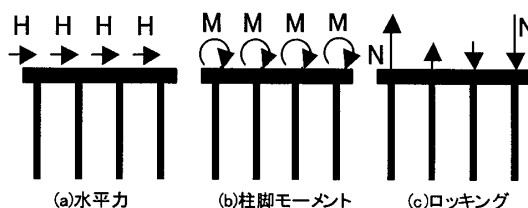


図2 ラフト部に作用する外力

2.2 解析モデルの諸元

図3に示すように、均一な半無限弾性地盤に 5×5=25本の杭が等間隔に配置されており、それに正方形平面のラフトが設置されている場合を本論文の解析対象とした。杭は中実と見なしたときのヤング係数 E_p を有している。なお、本論文では杭1本当たりの作用荷重 (H, M 及び N)、杭径 (d) および地盤のヤング係数 (E_s) を単位として取り扱う。杭頭部とラフトの接合条件は、剛接合及びピン接合の2種類である。

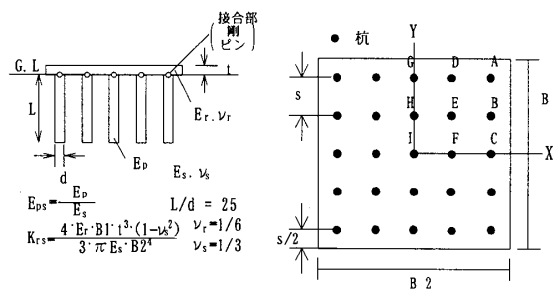


図3 解析モデル

解析の際に変化させた因子は、表1に示すとおり、杭間隔 s/d、杭と地盤のヤング係数比 E_{ps}、ラフトと地盤の相対剛性 K_{rs} であり、太枠で囲んだ基本モデルを設定した。したがって、ある因子を変化させる場合、他の因子は全て基本モデルの値をとるものとする。

表1 変化させた諸元

s/d	2.5	5	10	20
E _{ps}	8.0×10 ²	8.0×10 ³	8.0×10 ⁴	—
K _{rs}	0.01	0.1	1	10

An Analytical Study on Behavior of Piled Raft subjected to Seismic Load

TSUCHIYA Tsutomu et al.

2. 3 解析方法

パイルドラフトの解析に用いた本論文のハイブリッドモデル¹⁾の基本的考え方を、図4に示した。すなわち、杭には線要素、ラフトには薄板要素を用いた有限要素法、地盤には境界要素法を適用し、両者を結合する方法を採用した。なお、杭頭部がピン接合の場合には、杭の最上段要素として、一端剛・他端ピンの線要素³⁾を導入した。

地盤を表現する変位影響マトリックス内の対角要素(図4の①~④)については、Mindlin 解を積分して等分布荷重が作用する問題として取り扱った。対角要素以外の成分のうち、図4の(a)~(c)については集中荷重を仮定するため Mindlin 解を直接使用するが、(d)については杭断面に円形等分布荷重が作用する問題として取り扱った。これらの地盤に関する変位影響マトリックスから逆マトリックスを計算して、ラフトや杭を構成する剛性マトリックスと結合することで、最終的なラフト-杭-地盤を連成した剛性マトリックスが得られる。

Mindlin 解を積分した等分布荷重と Mindlin 解そのものの集中荷重を上記のように併用する場合、要素分割幅を小さくすることの悪影響が指摘⁴⁾されている。そこで、要素分割幅は $1d$ 以上となることを原則として、本論文の基本モデルでは杭長さを 20 等分割、杭間ラフトを 4 等分割とした。

3. 解析結果及び考察

水平力、柱脚モーメント及びロッキングが作用する解析モデルとして、パイルドラフト (PR)、群杭基礎 (PG) 及び直接基礎 (RO) を設定して、それぞれの解析結果を比較検討する。

3. 1 水平力が作用する場合

図5~図6はそれぞれ杭頭固定条件および杭頭ピン条件での X 軸断面における変位分布を示している。PR では、杭頭固定条件での水平変位が杭頭ピン条件に比べて 5% 程減少するに過ぎない。また、PG では杭頭条件によって約 20% の差が生じている。これらのことから、PR における杭頭条件の影響がなくなるのは、群杭効果の他にラフトから地盤への荷重伝達の影響が含まれていることが明らかになった。

杭頭固定条件における PR の水平変位は PG のそれよりも約 20% 小さくなるが、RO の水平よりも 5% 小さいに過ぎない。このことから、PR ではラフトと地盤が接触することによる変位の抑制が大きな割合を占めることが理解できる。なお、実務で使用されることの多い Chang 式では PR の約 40% の水平変位にとどまっているばかりでなく、表層を除く深度ではほとんど水平変位が生じていない。

次にラフト端部の鉛直変位に着目すると、PG では PR の約 2 倍となるのに対して、RO では PR よりも幾分か小

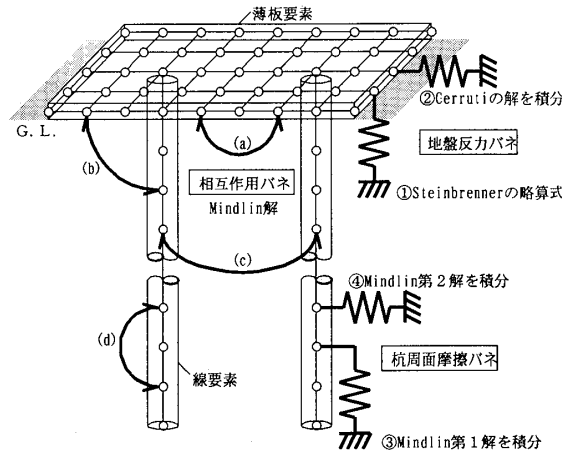


図4 ハイブリッドモデル

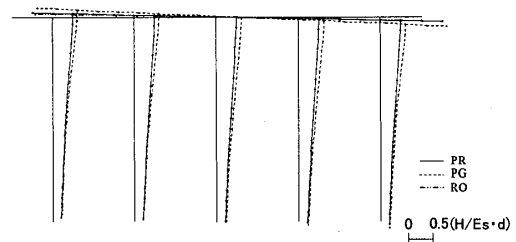


図5 X軸断面変位図(杭頭固定条件)

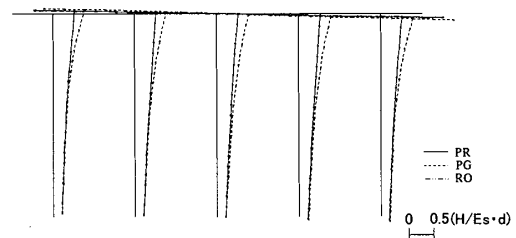


図6 X軸断面変位図(杭頭ピン条件)

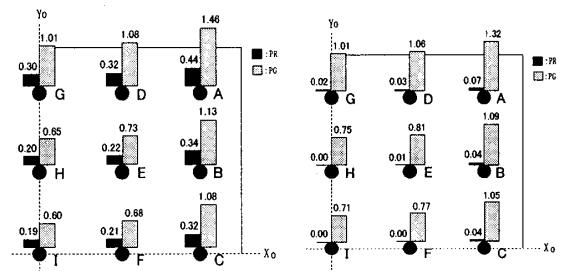


図7 杭頭せん断力図(H)

左: 杭頭固定条件 右: 杭頭ピン条件

いだけとなっている。鉛直方向変位に対してもラフト部の作用が大きいことが理解されよう。

図7は基本モデルにおける各杭の杭頭せん断力を示したものである。これによると、PRは杭頭接合条件に関わらず、中心部杭のせん断力が最も小さく、隅角部杭に向かうのに従い大きなせん断力を示す。ただし、最も大きい杭頭固定条件の隅角部杭でも作用荷重の半分以下しか負担してなく、PGに比べても0.3倍程度に過ぎない。また、杭頭をピンとすることでPRの杭頭せん断力は大幅に減少し、周辺部では作用荷重の3~7%、中央部ではほとんど0である。

図8は基本モデルにおける各杭の最大曲げモーメントであって、杭頭固定条件では杭頭曲げモーメント、杭頭ピン条件では地中最大曲げモーメントを示している。これによると、PRの曲げモーメントは杭頭条件に関わらず、中心杭が最も小さく、隅角部杭が最も大きい。杭頭をピンとすることで、PRの地中部の最大曲げモーメントは杭頭固定の杭頭の値に比べて0.1~0.2倍程度となる。次にPGと比較すると、PRの曲げモーメントは杭頭固定条件で0.5倍程度、杭頭ピン条件で0.1~0.2倍程度となる。

図9は、杭頭固定条件および杭頭ピン条件での、 s/d が変化した場合の杭による水平力負担率を示している。これによると、PGでは1.00であるのに対して、PRでは、 s/d が増加するのに従い、杭負担率は減少している。 $s/d=10$ の場合、水平力負担率は杭頭固定条件で30%であるが、杭頭ピン条件ではほとんど0である。

Epsが減少する場合も上記と同様の傾向が見られたが、Krs変化による水平力負担率に及ぼす影響はほとんど見られなかった。

3. 2 柱脚モーメントが作用する場合

図10~図11は、それぞれ杭頭固定条件および杭頭ピン条件でのX軸断面における変位分布を示している。水平力が作用する図5~図6と比較すると、右方向の水平変位は表層付近に限定されている。PRの水平変位はPGより小さく、ROとほぼ同じであることから、PRではラフトと地盤が接触することによる変位抑制が大きな割合を占めることが理解できる。

ラフト端部鉛直変位では、PGはROとほぼ同じであり、PRはこれよりも小さい変位となっている。このことから、モーメントを受ける場合、PRでは杭による支持と、ラフトが地盤に抵抗することの双方により、ラフト端部鉛直変位が抑えられているのがわかる。

図12は、基本モデルにおける各杭の杭頭せん断力を示したものであるが、PRは杭頭固定条件において、水平力が作用する場合とは逆向きにせん断力が生じている。杭頭をピンとすると、せん断力の向きは固定条件の場合と逆となるが、その大きさは小さくなる。特に前列(A, B, C杭)以外でせん断力が小さくなるのが目立つ。なお、PGのせん

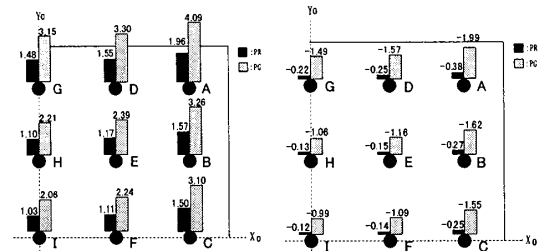


図8 杭最大モーメント図(H・d)
左：杭頭固定条件 右：杭頭ピン条件

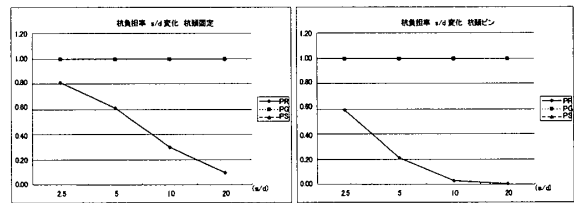


図9 杭による水平力負担率
(左：杭頭固定, 右：杭頭ピン)

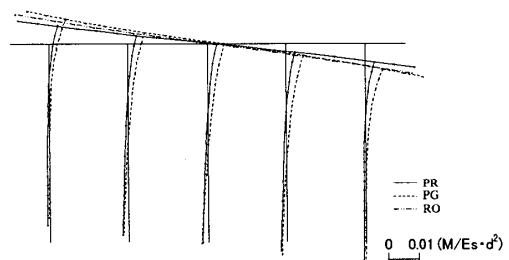


図10 X軸断面変位図(杭頭固定条件)

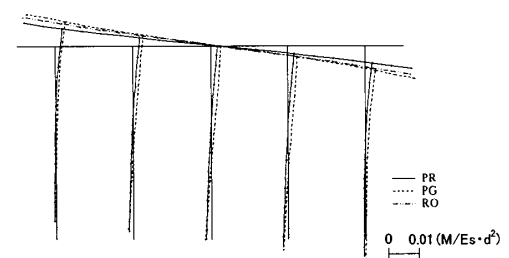


図11 X軸断面変位図(杭頭ピン条件)

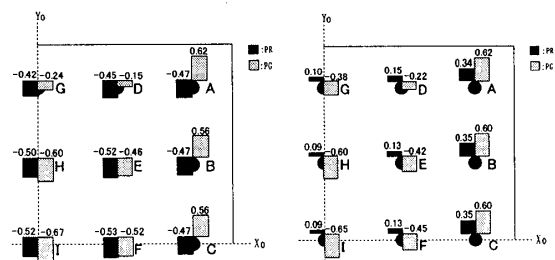


図12 杭頭せん断力図(10⁻²M/d)
左：杭頭固定条件 右：杭頭ピン条件

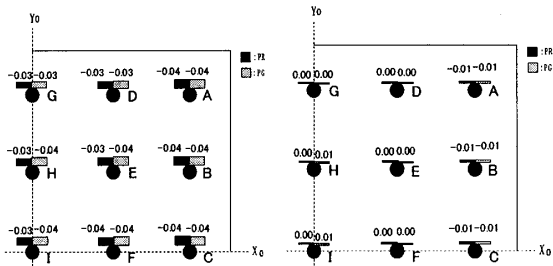


図 13 杭最大モーメント図(M)
左：杭頭固定条件 右：杭頭ピン条件

断力の向きが、杭頭接合条件に関わらず外側の A~C 杭とそれ以外の D~I 杭と逆になる傾向がある。

図 1 3 は、基本モデルにおける各杭の最大曲げモーメントを図 8 と同様に示している。これによると、PR は杭頭固定条件では 0.03~0.04M と非常に小さい値を示し、水平力を受ける図 8 とは逆向きである。PR は杭頭をピンとすることで、地中部の最大曲げモーメントもほとんど生じていない。また、PR と PG の差は杭頭条件に関わらず、ほとんどないのが特徴的である。

図 1 4~図 1 5 は、隅角部 A 杭と中央部 I 杭について、 s/d が変化した場合の杭のせん断力を示している。これによると、基本的に杭頭条件に関わらず、 s/d が増加するのに従い、せん断力は減少する。なお、 Krs と Eps が増加する場合も同様の傾向が見られた。その他に、杭をピンとすることによるせん断力の減少は、 s/d が小さいほど大きいこと、 $s/d=20$ では杭頭条件に関わらず、せん断力はほとんど生じていないこと、 s/d が小さい場合、PG よりも PR の方が大きなせん断力を生じること等が分かる。

3. 3 ロッキングが作用する場合

図 1 6~図 1 7 は、それぞれ杭頭固定条件および杭頭ピン条件での X 軸断面における変位分布を示している。ラフト端部鉛直変位の杭頭条件による差はあまりないが、水平変位は固定条件の方がピンの場合よりも大きくなっている。PR の水平変位は R0 よりも大きく、PG よりも小さい。これは PR ではラフトの接触効果による抑制が利いているためである。ラフト端部鉛直変位は、PG や R0 に比べて 0.7 倍程度となる。このことから、PR では鉛直変位に関してはラフトと地盤の接触効果と、杭による抑制の双方が効果的に作用していると思われる。

図 1 8 は、基本モデルにおける各杭の杭頭せん断力を示したものであるが、PR では柱脚モーメントを受ける場合と同様に、杭頭固定条件と杭頭ピン条件では、杭頭せん断力は逆向きになる。杭頭固定条件では、隅

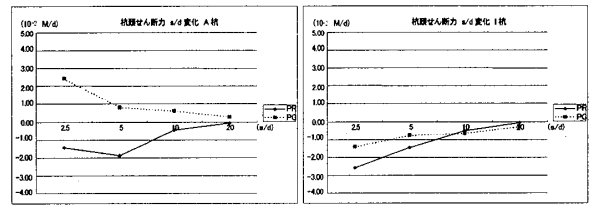


図 1 4 杭頭せん断力 (杭頭固定, 左: A 杭, 右: I 杭)

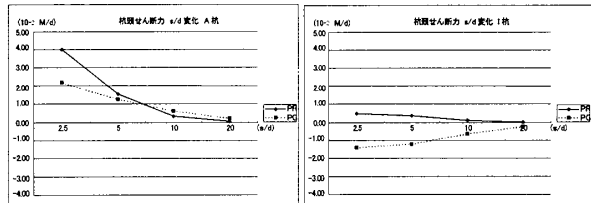


図 1 5 杭頭せん断力 (杭頭ピン, 左: A 杭, 右: I 杭)

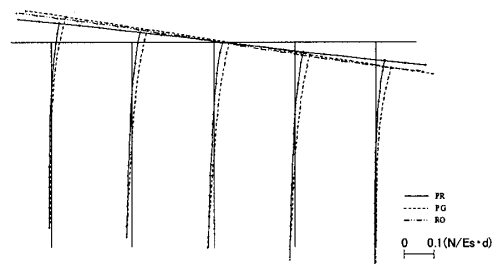


図 1 6 X 軸断面変位図 (杭頭固定条件)

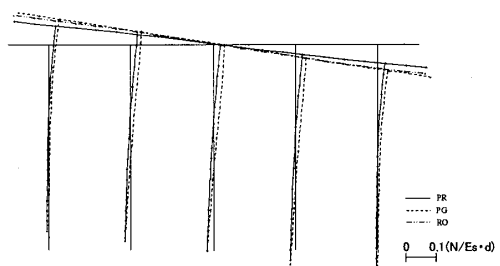


図 1 7 X 軸断面変位図 (杭頭ピン条件)

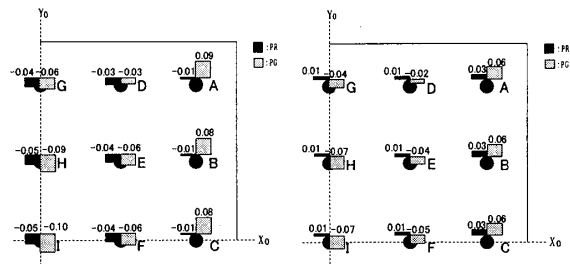


図 1 8 杭頭せん断力(N)
左：杭頭固定条件 右：杭頭ピン条件

角部杭 A 杭から中心部杭 I 杭に向かうのに従い、杭頭せん断力は増加する。杭頭ピン条件では、中心部杭 I 杭から隅角部杭 A 杭に向かうのに従い、杭頭せん断力は増加する。PR は PG に比べて、杭頭固定条件では前列 (A, B, C 杭) で 0.1 倍程度、それ以外では 0.5~1.0 倍程度、杭頭ピン条件では 0.1~0.5 倍程度となる。

図 19 は、基本モデルにおける各杭の最大曲げモーメントを図 8 と同様に示している。PR の最大曲げモーメントは、杭頭固定条件で隅角部杭 A 杭から中心部杭 I 杭に向かうのに従い増加しているが、杭頭ピン条件では逆に中心部杭 I 杭から隅角部杭 A 杭に向かうのに従い増加している。また、PR の最大曲げモーメントは、杭頭をピンとすることで、杭頭固定に比べ 0.1~0.4 倍程度となる。PG の値と比較すると、杭頭固定条件の PR の曲げモーメントは D~I 杭では小さくなるが、前列の A~C 杭でやや大きくなっている。

図 20~図 21 は s/d が変化した場合の杭のせん断力を図 14~図 15 と同様に示している。基本的に s/d, Krs, Eps 等の変化によるせん断力の増減の傾向は、3. 2 の柱脚モーメントを受ける場合と同様であった。ただし、s/d が小さい場合、固定条件の A 杭は I 杭と逆方向のせん断力を示す。

4. モデル建物への適用例

4. 1 モデル建物

水平力、柱脚モーメントおよびロッキングによる荷重がパイルドラフトの挙動に及ぼす影響度を検討するために、図 22 に示す具体的な建物を設定して、解析値を相互に比較することを試みた。建物平面と杭配置は図 3 と同様である。杭 1 本当たりの水平荷重 H となるように、建物高さの中間位置に水平荷重 25・H を作用させた。

パイルドラフトに作用するモーメントは、全てが柱脚モーメントとして扱う M-model (図 2 の (b)) と、全てをロッキングとして扱う R-model (図 2 の (c)) の 2 つの場合を想定した。なお、実際の建物では柱脚モーメントとロッキングがある割合で作用すると考えられるので、M-model と R-model の間の値を取ると考えられる。

4. 2 水平変位および杭体応力

図 23 は、それぞれのモデルの水平変位である。柱脚モーメントとロッキングによる水平変位はほとんど同じ値であるが、水平変位の大半は水平力によるものであり、杭頭条件による差もあまりない。

図 24 は、各杭の杭頭せん断力である。杭頭固定条件では、水平力のみと比べて全体的に小さくなり、M-model で 0.31~0.74 倍、R-model で 0.30~0.96 倍となる。杭頭ピン条件では、水平力のみと比べて逆に大きくなる傾向がある。また、杭頭ピン条件における値は杭頭固定条件の場合に比べて、M-model で 0.25~0.62 倍、R-model で 0.32~0.50 倍となる。

図 25 は、各杭の最大曲げモーメントである。杭頭

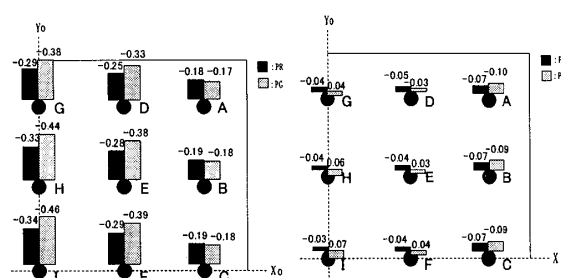


図 19 杭最大モーメント (N・d)
左：杭頭固定条件 右：杭頭ピン条件

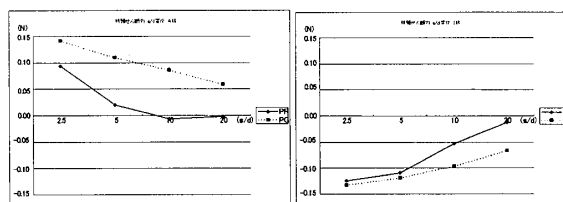


図 20 杭頭せん断力 (杭頭固定, 左: A 杭, 右: I 杭)

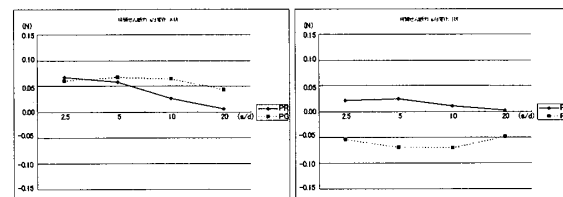


図 21 杭頭せん断力 (杭頭ピン, 左: A 杭, 右: I 杭)

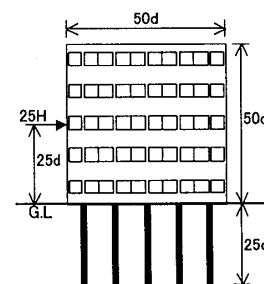


図 22 実物大モデル

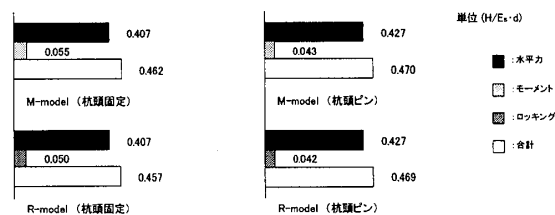


図 23 水平変位比較

固定条件では、水平力みの場合に比べて、M-modelで0.19~0.53倍、R-modelで0.17~0.77倍とかなり小さい値を示す。杭頭ピン条件では、水平力みの場合に比べて、M-modelで1.40~1.90倍、R-modelで1.45~1.75倍と逆に大きな値を示す。杭頭ピン条件では杭頭固定条件に比べて、杭位置によっては杭の最大曲げモーメントが大きくなる所もあるが、全体的に値も小さく杭位置による差もあまり見られない。

5. まとめ

最初に、①水平力、②柱脚モーメント、③ロッキングがそれぞれ独立して作用する場合のパイルドラフトの応力・変形状に及ぼす影響を検討した結果、以下の知見を得た。

① 水平力を受ける場合には、杭の存在は水平変位の抑制にはあまり効果がない。杭頭ピン条件にすると杭体に発生する応力を大幅に低減できる。ラフトと地盤の相対剛性 K_{rs} はパイルドラフトの応力分布に及ぼす影響は小さい。

② 柱脚モーメントを受ける場合には、杭およびラフトが変位や回転を抑制している。杭頭ピン条件にすると杭頭せん断力が杭頭固定条件の場合と逆向きになり、杭の曲げモーメントも低減できる。PRとPGによる曲げモーメントの違いはほとんどない。杭間隔 s/d を大きくすることにより、杭頭せん断力を大幅に小さくできる。

③ ロッキングを受ける場合には、柱脚モーメントを受ける場合に比べて変形状は近似するが、ラフトの中央部と端部の杭頭応力の分布傾向が異なる。

次に、具体的な建物を設定して建物中央高さに水平力を作用させた場合を解析して、次の知見を得た。

④ パイルドラフトに生ずる水平変位はほとんど水平力成分によるものであり、柱脚モーメントやロッキングによる水平力の増加は小さい。

⑤ 杭頭せん断力や杭最大モーメントは、杭頭固定条件では水平力みの場合より減少する。杭頭をピンとした場合、杭頭せん断力は水平力のみが作用する場合よりむしろ増加するが、杭の最大曲げモーメントは小さくなる。

⑥ パイルドラフトの応力・変形状を合理的に評価するには、水平力の他に柱脚モーメントやロッキングを考慮する必要がある。

今後は地震による地盤の変形が杭体に外力として作用する場合も含めると共に、地盤の塑性域まで考慮した検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 土屋 勉, 木田和宜, 他: 水平力を受けるパイルドラフトの変形状および水平変位の略算法, 第22回情報システム利用技術シンポジウム, 1999.
- 2) 池田篤則, 土屋 勉: パイルドラフトの杭頭接合条件に関する解析的研究(その2; 水平荷重を受ける場合), 建築学会大会学術講演梗概集, 2000.
- 3) 土屋 勉, 永井 宏: 鉛直荷重を受けるパイルドラフトの応力・変形に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol. 47B, 2001.
- 4) 坂本則雄: 多層地盤に設置された杭の簡易沈下計算法, 室蘭工業大学修士論文, 1996.

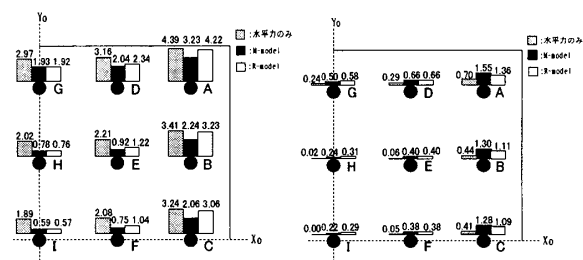


図2-4 杭頭せん断力図 ($10^{-1}H$)
左: 杭頭固定条件 右: 杭頭ピン条件

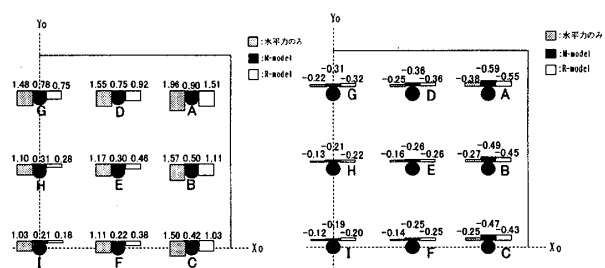


図2-5 杭最大モーメント図 ($H \cdot d$)
左: 杭頭固定条件 右: 杭頭ピン条件

*1 室蘭工業大学建設システム工学科・教授・工博 *2 千代田工営(株)・修士(工学) *3 室蘭工業大学大学院博士前期過程
e-mail: tsuchi@mmm.muroran-it.ac.jp