

簡易解析プログラム PRAB を用いた水平荷重時のパイルド・ラフトの挙動解析

金沢大学 学 ○キティヨドム・パーサコーン
金沢大学 学 橋爪芳徳

金沢大学 正 松本樹典
大成建設(株) 正 堀越研一

はじめに 著者らはこれまでに、パイルド・ラフトの水平抵抗特性の解明を目的とした、一連の静的水平荷重実験および振動実験を遠心荷重装置を利用して実施してきた¹⁾。本報告では、簡易解析プログラム PRAB^{2) 3)}の適用性を検証することを目的として、杭頭の剛結度が異なるパイルド・ラフトの静的水平荷重実験を対象とした解析を実施した。

解析法と解析条件 本研究で用いた簡易解析プログラム PRAB は、鉛直・水平およびモーメント荷重を受けるパイルド・ラフトの変形および荷重分担を計算することが可能である。図-1 は、PRAB におけるパイルド・ラフト基礎のモデル化の概要を示したものである。ラフトは薄板要素、杭は梁要素、地盤はラフト節点あるいは杭節点に連結された3本のばねで表現する。杭—地盤—杭、杭—地盤—ラフト、ラフト—地盤—ラフトの相互作用は Mindlin の解に基づいて求められる。解析手法の詳細については、Kitiyodom & Matsumoto (2002, 2003)を参照されたい。PRAB では、弾・完全塑性の地盤ばねを用いることで、ラフト底面地盤の支持力破壊、ラフト底面のすべり現象、ラフト底面と地盤表面の剥離、杭先端地盤の破壊、杭周面のすべり現象も考慮できる。

50g の遠心場において、解析対象となるラフト模型とパイルド・ラフト模型の水平荷重実験が実施された¹⁾。解析で設定した条件をモデルスケールにて表-1 に示す。模型実験では繰り返し荷重を行ったが、解析では図-2 に示すように一方向水平荷重の解析を行った。解析では、地盤を均質な有限深さ等方弾性体としてモデル化した。微小ひずみレベルにおける砂地盤のせん断剛性 G_0 は Iwasaki & Tatsuoka (1977)が提案したせん断剛性 G_0 (kgf/cm²)と間隙比 e の関係(式-1)を用いて地表面から杭長の2/3の深さでの有効拘束圧 p (kgf/cm²)を用いて計算した結果、 $G_0 = 73.2$ GN/m²、微小ひずみレベルの地盤弾性係数 $E_0 = 2(1+0.3) G_0 = 190.3$ GN/m² となる。

$$G_0 = 850 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} p^{0.44} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (1)$$

ラフトの水平荷重実験を対象とした解析結果(図-3)から逆算された地盤弾性係数は $G = 6.7$ GN/m²であり、式(1)から算定される値の約9%となっている。水平変位の問題も非線形性が高く、地盤に与えるひずみレベルにも依存しているが、杭の鉛直変位問題でよく使われている地盤弾性係数 $0.1 \sim 0.3 E_0$ ⁵⁾の下限値に相当している。なお、実験結果から推定されるラフト底面の摩擦係数は、 $\mu = 0.42$ であり、解析においてもこの値を使用している。

パイルド・ラフトの解析に際しては、水平荷重直前のラフトから

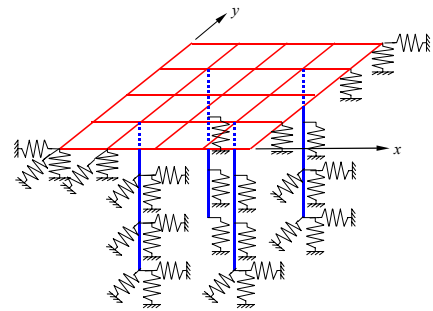


図-1 パイルド・ラフトの解析モデル

表-1 解析条件一覧

杭	杭長	180 mm	外径	10 mm
	内径	8 mm	弾性係数	70.6 GN/m ²
ラフト	長さ	80 mm	ポアソン比	0.16
	幅	80 mm	弾性係数	70.6 GN/m ²
	厚さ	25 mm (実質的に剛なラフト)		
地盤	層厚	460 mm	ポアソン比	0.3
	間隙比	0.76	密度	1.52 t/m ³
	摩擦角	35 度	$K_0 = 1 - \sin \phi'$	0.43
	一様な有限深さ地盤としてモデル化			
地盤とラフトの摩擦係数				0.42

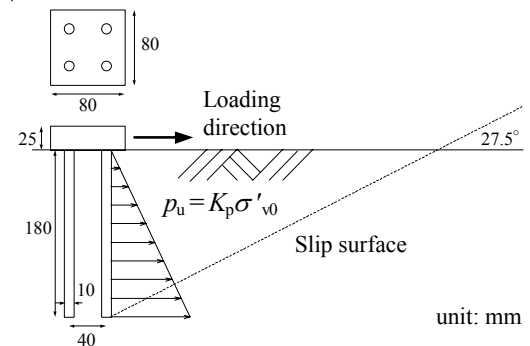


図-2 解析対象

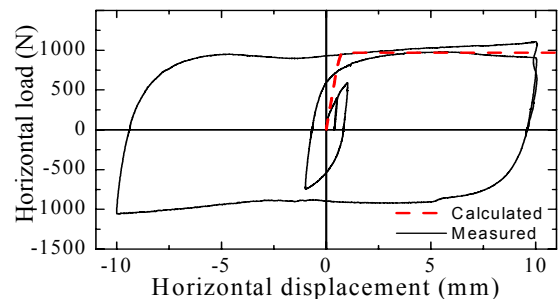


図-3 水平荷重—水平変位関係(ラフト単位)

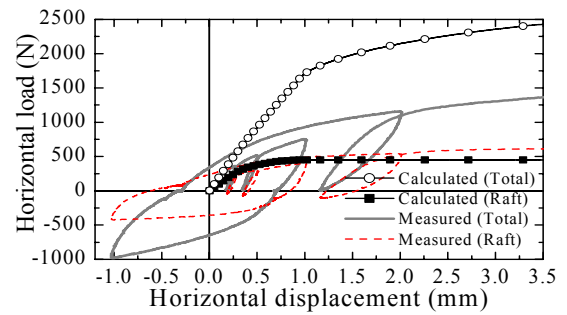
の伝達鉛直荷重(全荷重 2300 N の約 60%)がラフト底面に一様に分布しているとし、各杭節点に配された水平方向ばねをバイリニア化することによって杭の非線形変位挙動を考慮した。杭は線形弾性体としてモデル化した。パイルド・ラフトの場合では、杭の水平方向地盤反力の極限值 p_u として、ラフトからの伝達荷重の影響を考慮した受働土圧抵抗を使う方法が考えられる。受働土圧抵抗の設定に際しては、地盤の内部摩擦角を 35 度とし、受働土圧係数 $K_p = (1+\sin\phi')/(1-\sin\phi') = 3.69$ である。

解析結果 図-4 は、解析で得られた杭頭剛パイルド・ラフトの水平荷重—水平変位関係を実験結果と比較したものである。同図には、併せて、パイルド・ラフト中のラフトへの伝達水平荷重と水平変位との関係も示している。図-4(a)は杭の水平方向地盤反力の極限值を、ラフトからの伝達鉛直荷重の影響を考慮した受働土圧抵抗とした場合である。ラフトからの伝達荷重の影響を考慮した場合の解析結果は、実測結果を過大評価している。今回の解析対象としたパイルド・ラフトでは、図-2 に示すようにラフト幅が杭長に比べて相対的に狭いため、ラフトからの伝達荷重の影響が少ないと考えられる。図-4(b)はラフトからの伝達荷重の影響を考慮しない場合である。ラフトからの伝達荷重の影響を考慮しない場合の解析で得られた荷重—変位関係は実測値に近いことが分かる。そのため、以下の解析ではラフトからの伝達荷重の影響を考慮していない。しかし、通常の大規模なパイルド・ラフトでは、伝達荷重の影響は、当然、考慮すべきである。

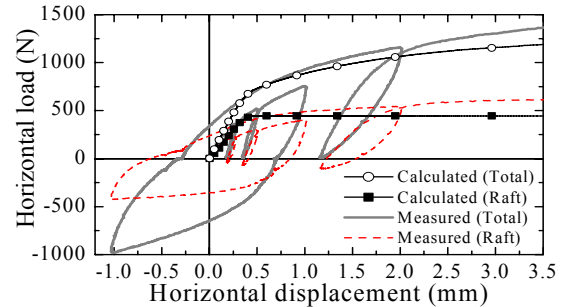
図-5 は、解析で得られた杭頭自由パイルド・ラフトの水平荷重—水平変位関係を実験結果と比較したものである。解析結果は実験結果と同じ傾向である。解析結果および実験結果によれば、杭の水平抵抗は、同じ水平変位で比べると、杭頭自由の場合が杭頭剛の場合より小さい。一方、杭頭剛の場合でも杭頭自由の場合でもラフトの水平抵抗はほとんど変わらない。解析結果によれば、杭頭剛パイルド・ラフトの初期剛性が杭頭自由の場合より約 6% 大きい。

図-6 は、解析で得られた水平載荷実験中の杭 4 本の水平荷重分担率の推移を実験結果と比較したものである。杭頭剛の場合の方が、杭の荷重分担が大きい。解析結果では、初期において杭の荷重分担が一旦下がるが、水平変位が 0.3mm を越えると、ラフトが完全に滑り出したため、杭の分担が水平変位とともに大きくなる。図-7 は、解析で得られた杭の曲げモーメント分布を実験結果と比較したものである。解析結果による曲げモーメントは実測結果を多少上回っている。また、最大曲げモーメント発生深度が実験結果より深い所にある。しかし、全体的には解析結果は実験結果を良く再現している。

参考文献 1) Horikoshi, et al. (2003). Performance of pile raft foundations subjected to horizontal loads. Int. Jour. of Physical Modelling in Geomechanics (submitted). 2) Kitiyodom & Matsumoto (2002). A simplified method for piled raft and pile group foundations with batter piles. Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 26, 1349-1369. 3) Kitiyodom & Matsumoto (2003). A simplified analysis method for piled raft foundations in non-homogeneous soils. Int. Jour. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 27, 85-109. 4) Iwasaki & Tatsuoka. (1977). Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands. Soils and Foundations, 17(3): 19-35. 5) Yamashita, et al. (1994). Investigation of a piled raft foundation on stiff clay. Proc., 13th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., ISSMFE, India, 2, 543-456.



(a) ラフトからの伝達荷重の影響を考慮した場合



(b) ラフトからの伝達荷重の影響を考慮しない場合

図-4 水平荷重—水平変位関係の比較（杭頭剛）

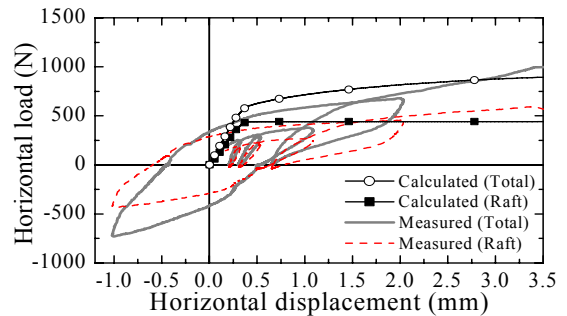


図-5 水平荷重—水平変位関係の比較（杭頭自由）

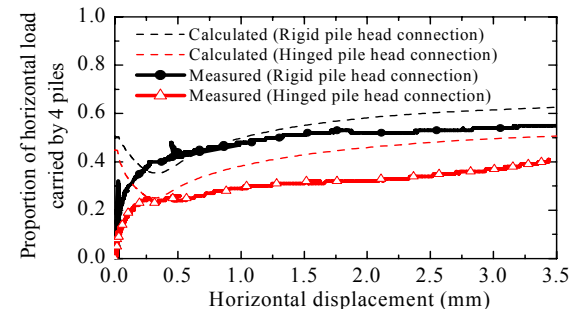


図-6 杭の水平荷重分担率の変化

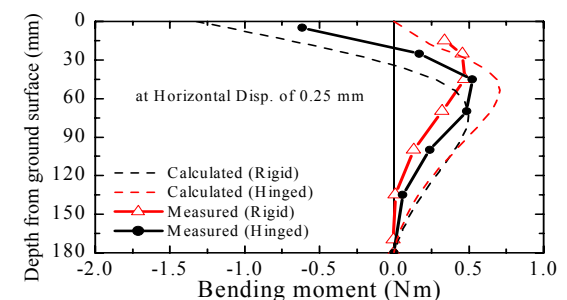


図-7 曲げモーメント分布