

PSⅢ-21 杭基礎の水平および鉛直方向の動的復元力特性

佐藤工業(株) 正会員 ○小林 恒一
関西大学 八尾 真太郎

1. はじめに 杭基礎～構造物の連成系において構造物の動的応答を調べる場合に、杭基礎～地盤系の動的相互作用を解明する必要がある。この動的相互作用問題の1つとして、杭頭に動的外力が作用する場合の杭頭応答を表す杭頭インピーダンスを求める研究がある。このような研究として、T.Nogami, M.Novakらの弾性波動論を用いた単杭または群杭の理論的研究などが挙げられる^{1), 2)}。これらの理論的研究は、地盤を粘弾性体と考え、杭と地盤は完全に密着していると仮定している。しかし、実際の杭基礎～地盤の動的挙動を考えた場合、杭と杭周辺地盤の間の滑り現象や地盤の非線形性などが生ずる可能性も考えられる。ここでは、鋼管杭を用いた9本群杭の起振機による強制振動実験から動的復元力特性を求め、これらを弾性波動論的な手法による解析結果と比較する。

2. 解析モデル 弾性波動論を応用した解析は、杭および地盤を図-1のようにモデル化し、単杭杭頭に調和外力を作用させて行った。単杭の杭頭荷重と杭頭変位の関係を表す杭頭複素剛性($K_T + iK_T'$)は、T.Nogami, M.Novakの手法^{1), 2)}を用いて算定される弾性複素剛性($K_E + iK_E'$)と、杭頭荷重が作用する場合の杭体と杭周辺地盤の間に生ずる地盤の非線形性や滑り現象などが杭頭剛性に与える影響を杭境界複素剛性($K_B + iK_B'$)として表したものを、(1)式のように複素剛性の直列和として求めた。

$$\frac{1}{K_T + iK_T'} = \frac{1}{K_E + iK_E'} + \frac{1}{K_B + iK_B'} \quad (1)$$

ここで、杭境界複素剛性は、振動実験に用いた杭の1本に静的な繰返し荷重を作用させた場合の載荷実験結果から以下のように求めた。図-2, 3は、それぞれ水平および鉛直方向の静的な繰返し履歴曲線のうち、振動実験によって生ずる杭頭荷重レベルの部分を取り出したものである^{3), 4)}。ところで、静的な繰返し荷重が作用する場合の単杭の杭頭変位は、杭境界部分の挙動と地盤の弾性的変形による挙動の和として表されると考える。静的な杭頭複素剛性 K_T' は、図-2, 3の履歴曲線によって囲まれるエネルギー損失 ΔW とその時の変位振幅 U の関係式⁵⁾により求められる。このようにして求めた単杭の静的な杭頭複素剛性($K_T + iK_T'$)は、水平方向に対して $K_T = 5.9 \times 10^4 \text{ t/cm}$, $K_T' = 0.6 \times 10^4 \text{ t/cm}$, 鉛直方向に対して $K_T = 125.0 \times 10^4 \text{ t/cm}$, $K_T' = 64.8 \times 10^4 \text{ t/cm}$ である。また、単杭の弾性複素剛性($K_E + iK_E'$)は、文献(1), (2)で示される式で、 $\omega = 0$ とした時の値であり、これと静的な杭頭複素剛性($K_T + iK_T'$)を(1)式に代入することにより、杭境界複素剛性を求めることとした。なお、この弾性複素剛性を求めるのに際し、地盤のせん断波速度 $V_s = 120 \text{ m/sec}$, 地盤の履歴減衰比 D_v, D_B ($D_v = \lambda' / \lambda$, $D_B = \mu' / \mu$; λ, μ はLame定数, λ', μ' は損失率)

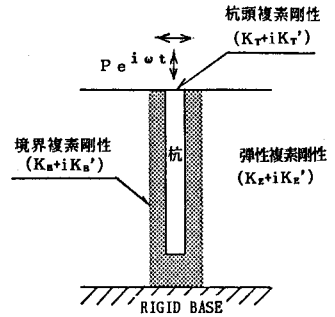


図-1 解析モデル

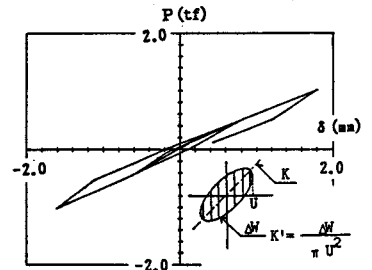


図-2 杭頭荷重-変位履歴曲線(水平)

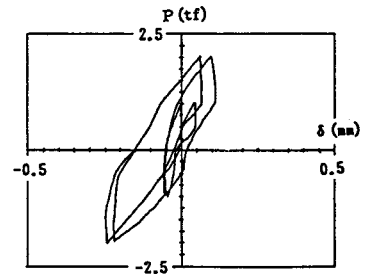


図-3 杭頭荷重-変位履歴曲線(鉛直)

を0.1とした。このようにして求められた杭境界複素剛性は、履歴型の減衰に基づくものとして加振振動数に依存しないと仮定した。したがって、各加振振動数時の単杭の杭頭複素剛性($K_T + iK_T'$)は、この杭境界複素剛性($K_B + iK_B'$)と各加振振動数の弾性複素剛性($K_E + iK_E'$)を(1)式に代入することにより求められる。表-1には、単杭の各々の複素剛性を、水平および鉛直载荷に対してそれぞれ示す。

3. 実験結果との比較検討 実験結果から得られた動的復元力特性を、弾性波動論を用いた解析結果と比較する。

図-4, 5には、水平および鉛直加振実験の動的復元力曲線(20 Hz時)を実線で示してある。なお、対象とした実験は、杭頭マス底面と地表面の間に約15cmの隙間があり、偏心モーメント80kgf・cmである。点線(解析(1))は、表-1に示される単杭の弾性複素剛性に群杭効果を考慮せず、9本倍して求めた動的復元力曲線である。また、文献(6)、(7)の弾性波動論的な手法を用いて、隣接杭の影響が加味された2本群杭の弾性複素剛性を求めて、これに重ね合わせの原理を適用して、本実験モデル(9本群杭)の弾性複素剛性を求めた。一点鎖線(解析(2))は、この方法によった群杭の弾性複素剛性の値から求めた曲線である。さらに、この群杭の弾性複素剛性に杭境界要素を導入して求めた動的復元力曲線を、二点鎖線(解析(3))として示してある。

4. まとめ 杭～杭周辺地盤の杭境界複素剛性($K_B + iK_B'$)は、表-1に示されるように、水平加振時には弾性波動論により求められる弾性複素剛性に比べて実部の値は小さい。これは、杭周辺地盤が杭体の振動によって剛性低下している状態を表していると考えられる。一方、鉛直加振時には、杭境界複素剛性は虚部に大きな値を示しており、鉛直加振時に杭～杭周辺地盤での減衰効果の影響が大であることを示している。また、群杭効果を考慮した群杭の弾性複素剛性に杭境界要素剛性を導入して得られる動的復元力特性は、実験結果と水平および鉛直加振ともにより対応を示した。

表-1 杭頭複素剛性

実験名	載荷方向	振動数(Hz)	杭頭複素剛性(tf/cm)		弾性複素剛性(tf/cm)		境界複素剛性(tf/cm)	
			K_T	iK_T'	K_E	iK_E'	K_B	iK_B'
静的繰返し実験	水平	—	5.9	0.6	49.1	4.0	6.7	0.8
		15	5.8	0.8	43.7	10.3	6.7	0.8
振動実験	水平	20	5.8	0.8	45.2	11.7	6.7	0.8
		—	125.0	64.8	158.7	7.3	1.7	335.6
静的繰返し実験	鉛直	—	125.0	64.8	158.7	7.3	1.7	335.6
		15	105.1	73.4	147.1	32.9	1.7	335.6
振動実験	鉛直	20	104.9	78.3	153.4	39.9	1.7	335.6

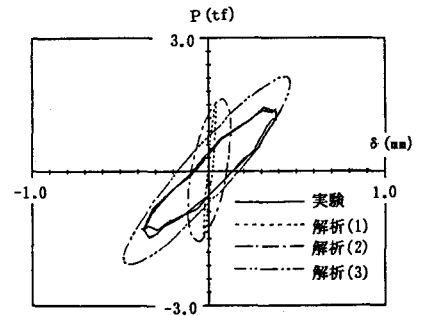


図-4 動的復元力曲線（水平）

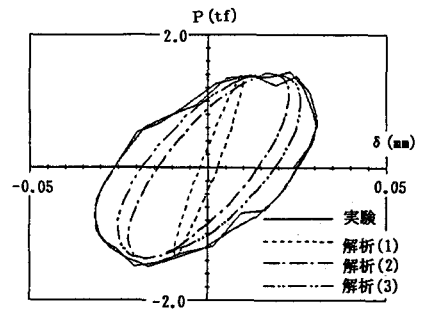


図-5 動的復元力曲線（鉛直）

<参考文献>

- 1) T. Nogami and M. Novak; Soil-Pile Interaction in Vertical Vibration, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.4, 1977
- 2) M. Novak and T. Nogami; Soil-Pile Interaction in Horizontal Vibration, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.5, 1977
- 3) 八尾、小林他；繰返し水平荷重を受ける杭の履歴特性に関する実験的研究，日本建築学会大会号，1985
- 4) 八尾、小林他；杭基礎の鉛直押し引き履歴特性に関する実験的研究，日本建築学会大会号，1985
- 5) 山原 浩；環境保全のための防振設計，彰国社，1974
- 6) T. Nogami; Dynamic Group Effect in Axial Responses of Grouped Piles, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, GT2, 1983
- 7) T. Nogami; Flexural Responses on Grouped Piles under Dynamic Loading, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.13, 1985