

水平力を受ける群杭の非線形挙動解析法に関する一考察

九州大学工学部 学生員 ○河野謙治
建設省建築研究所 正会員 大塚久哲
九州大学工学部 正会員 John Bolander Jr.

1. はじめに

現行の道路橋示方書は、いわゆる許容応力度設計法と呼ばれるものであり、杭基礎の設計では、地盤を弾性体とした線形弾性解析が行われている。しかし、基礎の限界状態に対する照査が行われていないなど問題点も指摘されている。そこで現在、杭基礎の設計において限界状態設計法の導入が検討されている。導入に際しては、杭基礎の大変形挙動を追跡可能な非線形解析をもとにした設計法の確立が必要となる。本研究はそれに呼応し、杭基礎の水平抵抗解析法の提案と、その解析案をもとに建設省土木研究所で行われた杭基礎の水平載荷試験のシミュレーション解析を行ったものである。

2. 群杭の水平抵抗解析法について

海外の設計規準である DNV・API で用いられている Focht & Koch¹⁾の方法を参考にする。これは、単杭の解析を基本にした群杭の水平抵抗解析法である。

(1) 単杭の解析

杭の支配方程式を差分法し、境界条件とともに連立方程式として解析する。これにより、杭頭に鉛直力・水平力・曲げモーメントが作用する単杭の挙動を算定することができる。本解析法では、図-1のように地盤をバイリニア P-Y 曲線(岸田式⁴⁾)で、杭を弾性体としてモデル化している(場所打ち杭などでは M-φ 関係を非線形にする必要がある)。

(2) 群杭の解析

Focht らによると、群杭の変位 y_g は次のように表される。

$$y_g = y_e + y_i \quad \dots (1)$$

基本は P-Y 曲線法による単杭の変位 y_e であり、それに杭間相互作用による付加変位 y_i が加わるとしている。この考えをもとに Focht らは、Poulos の式を次のように修正した。

$$y_g = \rho_E (R \cdot H_k + \sum H_j \cdot \alpha_{kj}) \quad \dots (2)$$

$$H_g = \sum H_j \quad \dots (3)$$

(j, k = 1 ~ m; j ≠ k, m は杭本数)

ここに、R : ρ_{EP} / ρ_E

ρ_E, ρ_{EP} : 単杭の単位荷重当り弾性、弾塑性変位量

H_k : 杭 k に作用する水平荷重

α_{kj} : 相互作用係数

Focht & Koch の方法では(2)・(3)式を連立して解くが、各杭の分担荷重が対称位置で等しくなり実際と合わない。そこで、図-2のように Focht & Koch の方法を修正した。これによれば、荷重分担率をあらかじめ設定することで、連立方程式を解くことなく、群杭解析が可能である。なお図中の P・Y factor は、図-3のようなものである。

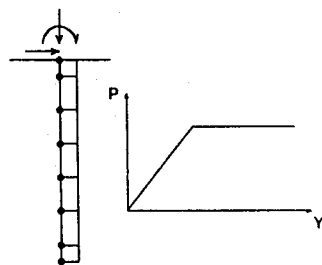


図-1 単杭解析モデル

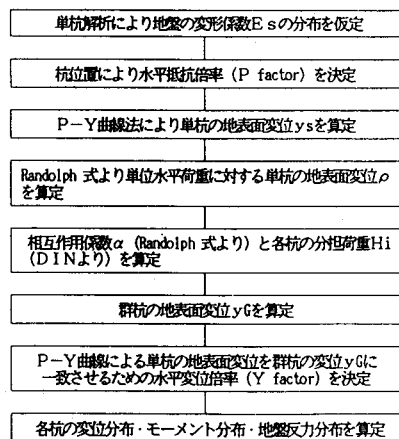


図-2 群杭解析フロー

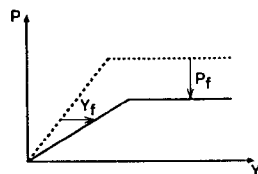


図-3 P・Y factor

3. 土木研究所群杭水平載荷試験のシミュレーション解析

模型鋼管杭による水平載荷試験³⁾は、砂質土土槽内で単杭・2本直列／並列・3本直列／並列・9本組杭の6ケースが行われた。実験の変位レベルは杭体降伏までである。杭材諸元は表-1の通り。

(1) 単杭の解析

単杭の解析にあたり、バイリニアP-Y曲線を作成するため、地盤の変形係数 E_s の分布を仮定する必要がある。実験ではコーン試験が行われており、その結果をもとに砂質土地盤の E_s 分布を仮定した。図-4の解析結果のように実験結果とよく合っている。杭体断面力分布も比較的良好に合った結果が得られた。

(2) 群杭の解析

群杭5ケースのうち、9本組杭についてシミュレーションした結果を図-5、6に示す。ここで用いた各杭の荷重分担率はドイツ標準DINを参考にし、図-7に示すように前列杭が大きく、中・後列杭は前列杭の半分程度と設定した。解析は前列中央杭(B1杭)に着目し、(2)式のうちこの杭に対する式を取り出して群杭の地表面変位 y_0 を算定した。ただし、相互作用係数の算定はRandolphの式²⁾を用い、杭間の地盤の変形係数 E_s を周辺地盤より大きく設定した。解析データを表-2に示す。この解析により、荷重-変位曲線・モーメント分布・地盤反力分布とも実験値を比較的良好に説明できた。

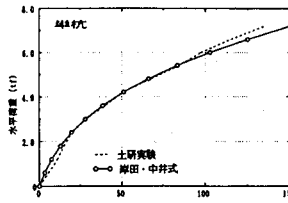


図-4 単杭の荷重-変位曲線

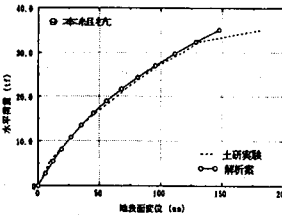


図-5 9本組杭の荷重-変位曲線

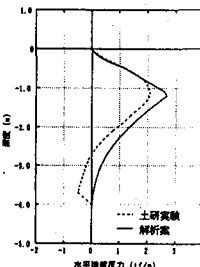
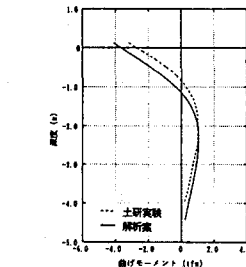


図-6 9本組杭(前列中央)のモーメント・地盤反力分布

表-1 杭材諸元

材 質: STK55 鋼管杭
外 径: 101.6(mm)
肉 厚: 11.75(mm)
断面積: 33.2(mm ²)
試験長: 4.4(m)
降伏点: 62(kgf/mm ²)

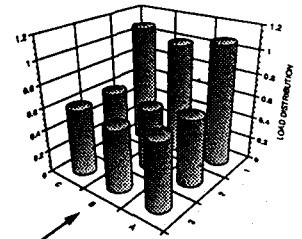


図-7 荷重分担率(B1杭を1)

全荷重 H _g (t)	分担荷重 H _k (t)									解析値 (mm)				実験値 y _g (mm)	
	H1	H2,3	H4,7	H5,6,8,9	α2,3	α4	α5,6	α8,9	合計	単杭変位 y _{s1}	付加変位	α2,3	α4	α5,6	α8,9
0.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.00
2.7	0.405	0.437	0.224	0.243	0.697	0.494	0.404	0.357	3.688	2.19	5.87	0.318	0.318	0.318	4.48
5.4	0.810	0.875	0.448	0.486	1.394	0.987	0.808	0.714	7.376	4.30	12.28	0.635	0.635	0.635	9.55
8.1	1.215	1.312	0.672	0.729	2.091	1.481	1.213	1.071	11.064	6.42	18.06	0.953	0.953	0.953	14.06
10.8	1.620	1.750	0.896	0.972	2.788	1.975	1.617	1.428	14.752	8.52	26.86	1.270	1.270	1.270	18.76
13.5	2.025	2.187	1.121	1.215	3.484	2.469	2.021	1.785	18.440	10.62	35.56	1.588	1.588	1.588	23.16
16.2	2.430	2.624	1.345	1.458	4.181	2.962	2.425	2.142	22.128	12.71	44.27	1.905	1.905	1.905	27.16
18.9	2.835	3.062	1.569	1.701	4.878	3.456	2.830	2.489	25.816	14.80	52.97	2.223	2.223	2.223	31.16
21.6	3.240	3.459	1.793	1.944	5.575	3.950	3.234	2.858	29.504	16.89	61.78	2.540	2.540	2.540	34.46
24.3	3.645	3.937	2.017	2.187	6.272	4.443	3.638	3.213	33.192	18.98	70.59	2.858	2.858	2.858	37.76
27.0	4.050	4.374	2.241	2.430	6.969	4.937	4.042	3.571	36.880	21.07	79.40	3.175	3.175	3.175	41.06
29.7	4.455	4.811	2.465	2.673	7.666	5.431	4.447	3.928	40.569	23.16	88.21	3.493	3.493	3.493	44.36
32.4	4.860	5.249	2.689	2.916	8.363	5.924	4.851	4.285	44.257	25.25	97.02	3.810	3.810	3.810	47.66
35.1	5.265	5.686	2.913	3.159	9.060	6.418	5.255	4.642	47.945	27.34	105.83	4.128	4.128	4.128	50.96
										P factor	0.80				

表-2 9本組杭の解析データ

4. おわりに

単杭解析を基本にしたこの解析法により、P・Y factor を適切に設定すれば、群杭の挙動をシミュレーションできることが分かった。今後は、実大杭の載荷試験、特に剛性低下の著しいRC場所打ち杭を対象に解析を進める予定である。

[参考文献]

- 1) Focht, J.A. & Koch, K.J. : Rational Analysis of the Lateral Performance of Offshore Pile Groups, Offshore Technology Conference 1896, 1973
- 2) Randolph, M.F. : The response of flexible piles to lateral loading, Geotechnique 31, No. 2, 247-259, 1981
- 3) 建設省土木研究所: 「群杭の水平方向載荷実験」、土木研究所資料第3079号、平成4年3月
- 4) 岸田他: 「地盤反力-変位関係の非線形性」、土と基礎 VOL. 25, No. 8, 1977