

复合桩基的非线性沉降简化计算

何立明

(南京工业大学, 南京 210009)

【摘要】 以双曲线荷载传递函数关系加以推广, 推导出应用于复合桩基中单桩和群桩的一种简便实用计算沉降的非线性方法。最后由实测的试桩结果与计算结果的 $p-s$ 曲线进行对比, 表明其方法的可靠性与有效性。

【关键词】 等代墩; 双曲线传递函数; 非线性; 径长比; $p-s$ 曲线; 极限承载力

【中图分类号】 TU 473.11

A Simple Calculation for Composite Pile Foundations Nonlinear Settlement

【Abstract】 Through using the load-transfer hyperbolic function, deducing a simple method to calculate the nonlinear settlement of composite pile foundation. Its feasibility is proved by comparing the $p-s$ curve of testing to that of calculating.

【Key Word】 equivalent pier; load-transfer hyperbolic function; nonlinear; overall aspect ratio R ; $p-s$ curve; bearing capacity

0 引言

荷载传递函数法在应用于单桩与土的共同作用的分析中以其实用性强, 概念明确等原因具有明显的优越性。这方法的假设前提是单桩划分成若干单元, 每一单元与土体之间用非线性弹簧联系, 桩端处土也用非线性弹簧与桩端联系, 这样桩侧摩阻力 P_s 与桩端阻力 P_b 与位移之间就建立了一种双曲线关系, 其还有方便之处就是不用考虑桩土之间是否产生了相对滑移。当然, 桩土之间达到极限摩阻力 P_{u0} 时, 则认为发生了相对滑移。荷载传递法及位移协调法是对应于相对刚度的有压缩性的桩而言, 对于刚性无压缩性的桩, 则不需用位移协调法中迭代求解了。由于描述桩的荷载传递函数的基本微分方程较难以得到满意的解, 文献[1]介绍了潘时声对传递函数法的改进, 推导出了一个运用简单积分的计算方

法。还有何思明等很多学者提出了不同的传递函数法^[1], 但这些传递函数中运用较复杂或其中参数难以确定, 总的来说不如下面的常用传递函数法方便。文献[2]对广义剪切位移法在复合桩基中桩与土共同作用的非线性变形给了详细的介绍。

至于群桩的计算分析, 有分层总和法^[3], 基于 Mindlin 解的弹性理论基础上的叠加法^[3]。我国现行规范中的分层总和法计算沉降中未考虑桩间土的压缩性, 因而与实际工程是不相符的。单桩的计算还有经典的弹性理论法, 有限元方法, 而弹性理论是在线弹性基础理论上进行计算的, 对于桩-土-筏整体的三维有限元, 由于单元的剖分及节点数量, 对计算机性能的要求较高以致于目前难以实现其三维有限元的计算。

桩筏基础的沉降过程及组成是先由桩底

土的沉降和桩间土的沉降,但因桩的刚度远大于土的刚度,开始承台(筏)受较大荷载后,桩可能产生刺入,也即桩的沉降比桩间的沉降要大,且桩的沉降开始就几乎完成,但因土的变形的时间效应,随着时间的推移桩间土的沉降慢慢地增加,若筏很厚,刚度大,这样,最终桩间土和桩的沉降几乎相等。

群桩的分析还因涉及桩、承台(筏)的几何尺寸、桩距、与桩筏共同作用的土的性质以及成桩方式等很多因素,因此,目前还难以给出能够综合反映所有因素的精确计算桩筏基础的沉降方法。本文运用经典的单桩荷载传递函数,对群桩进行了等代墩处理,给出了群桩沉降的非线性简化计算模式。

1 单桩计算

1.1 单桩的传递函数

根据Chin和Kondner等提出的对于刚性桩(也即指桩身无压缩)而言,侧阻和端阻与桩身位移的双曲线关系^{[4][5]}经过变化后为:

$$W/Q = m_1 W + C_1 \quad (1)$$

$$W/P = m_2 W + C_2 \quad (2)$$

两直线上的斜率 m_1 、 m_2 分别反映了桩的总极限侧阻 Q_u 和极限端阻 P_u ,其值为总极限侧阻总极限端阻的倒数,截距 C_1 、 C_2 反映了桩侧、桩端初始刚度,其值分别为桩侧桩端初始刚度的倒数。由侧阻曲线式(1)可表示为

$$W = K_s Q_u Q / (Q_u - Q) \quad (3)$$

式中: W 为桩身位移; Q 、 P 分别代表桩身总侧阻与总端阻; K_s 为桩侧初始刚度的倒数,其值也等于 W/Q 轴上的截距 C_1 。

同样,桩端阻也可表示为

$$W = K_b P_u P / (P_u - P) \quad (4)$$

式中: K_b 为反映桩端初始刚度,为桩端初始刚度的倒数,其值也等于 W/P 轴上的截距 C_2 。

通过研究(Randolph和Wroth, 1982)得出,在给定的荷载作用下,桩身的沉降是直径 D_s 的函数,桩的沉降随着桩身极限荷载的增加而下降,因此给出了下式:

$$K_s = M_s D_s / Q_u \quad (5)$$

式中: M_s 为量纲一的柔度系数,反映了桩直径与沉降的关系,与桩身侧阻双曲线初始斜率有关。Randolph(1991)指出:

$$M_s = \frac{\tau \ln(r_m/r)}{2G}$$

则式(3)可以写成

$$W = M_s D_s Q / (Q_u - Q) \quad (6)$$

式中: τ 为桩身表面剪应力; G 为土的剪切模量; r_m 为桩周影响半径; r 为桩的半径。

G/τ 取值范围是500~1000,而 M_s 取值在0.001~0.004,这也被很多试验证实。土质越硬 M_s 越小, M_s 值也与桩长与桩径的比值有关。

1.2 桩端荷载与沉降

对桩端沉降的计算由弹性理论解得

$$W_b = \frac{\pi q}{4 E_b} D_b (1 - \nu^2) f \quad (7)$$

式中: E_b 为桩底土模量; q 为桩底压应力; W_b 为桩端沉降; ν 为土的泊松比; f 为由于深度因素影响的沉降降低系数。

根据 $\nu=0.3$, $f=0.85$ 时

$$W_b = 0.6075 q D_b / E_b \quad (8)$$

让荷载为 $P_u/4$ 时,令式(4)与式(9)相等,则得

$$K_b = \frac{0.58}{D_b E_b} \approx \frac{0.6}{D_b E_b} \quad (9)$$

于是式(4)可改写成

$$W_b = \frac{0.6 P_u P}{D_b E_b (P_u - P)} \quad (10)$$

假定桩完全是刚性的,则桩顶沉降与桩底沉降相等,即

$$W_s = W_b = W \quad (11)$$

$$\text{总荷载为 } P_t = P + Q \quad (12)$$

$$\text{由式(6)改写成 } Q = \frac{Q_u W}{M_s D_s + W} \quad (13)$$

桩端荷载由式(10)得

$$P = \frac{D_b E_b W P_u}{0.6 P_u + D_b E_b W} \quad (14)$$

把式(13)与式(14)代入式(12)则可得到在桩端沉降 W 时的刚性桩 $P-W$ 函数

$$P_t = \frac{aW}{c+W} + \frac{bW}{d+eW} \quad (15)$$

式中: $a=Q_u$, $b=D_b E_b P_u$, $c=M_s D_b$, $d=0.6 P_u$ 和 $e=D_b E_b$ 。

由式(15)可得到在任意荷载作用下的沉降计算公式。

1.3 桩的弹性压缩

若考虑桩的弹性压缩,则桩的弹性压缩量为:

$$W_e = 4P_t(L_0 + K_e L_f) / D_s^2 E \quad (16)$$

较大荷载时,可按式(16)计算:

$$W_e = \frac{4}{\pi} \frac{1}{D_s^2 E} [P_t(L_0 + L_f) - L_f Q_u(1 - K_e)] \quad (17)$$

2 群桩分析模型

对群桩一筏一土的共同作用按等代墩法进行考虑。Randolph^[6]建议,无论摩擦桩还是端承桩,其等代墩的直径按下式考虑

$$D_{eq} = 2 \sqrt{A_g} / \pi \quad (18)$$

式中: A_g 为群桩作为等代墩整体的平面面积。

群桩等代墩的等代模量

$$E_{eq} = E_s + (E_p - E_s) A_{tp} / A_g \quad (19)$$

式中: E_p 为桩的弹性模量; E_s 为桩刺入的各层土平均模量; A_{tp} 为群桩中所有桩体横截面积。

这种方法可以方便地计算等代墩的径长比。对于 n 根桩,桩距为 s ,埋入桩长为 L_p 的群桩,等代墩径长比 k 是 $[(\sqrt{n}-1)s + D] / L_p$ 或近似为 \sqrt{ns} / L_p ,对于通常情况下 R 值小于 4 时,证明这等代墩是适合的。

把传递函数法同样应用于群桩中的等代墩,考虑到邻桩之间的相互作用影响,等代墩中的初始刚度不同于单桩,因此通过下式给予折减:

$$K_{gi} = K_{ti} \left(\frac{D}{D_{eq}}\right)^\beta \quad (20)$$

式中: K_{gi} 为群桩中桩土作为整体等代墩的初始刚度; $K_{ti} = 1 / K_s$; β 为指数, $\beta = 0.3$ 。

桩顶沉降也由于桩与桩之间相互作用效

应,对沉降给与以下考虑。

$$W_g = W \left(\frac{D}{D_{eq}}\right)^{-\epsilon} \quad (21)$$

式中: W_g 为作为等代墩的群桩桩顶平均沉降; ϵ 为指数, $\epsilon = 0.15$ 。

3 实例

试验采用的是刚管桩,外径为 137 mm,壁厚 9.3 mm,打入粘土中深度 12.5 mm,承台为刚性钢筋混凝土,分别对单桩,4 根群桩,9 根群桩的三组复合桩基进行了试验。在 3×3 的 9 根群桩试验中,桩距为 6 R (R 为桩的半径),桩侧极限摩阻力 τ_{su} 为随深度线性增加,其与土的不排水强度的关系系统 α 取为 0.4,这样单位桩身侧阻 $\tau_{su} = \alpha C_u = 19 \text{ kN/m}^2$ 线性增加至桩端 93 kN/m^2 ,而极限总端阻 P_u 为 130 kN,土的变形模量 E_0 取 $195 \times 10^3 \text{ kPa}$,钢管杨氏模量 $F_p = 2.1 \times 10^8 \text{ kPa}$ 。

单桩的分析中,假定 $M_s = 0.0034$,在桩端土初始刚度 $D_{sb} = 1 / K_b$,取值为 $6 \times 10^2 \text{ MN/m}^3$ 。单桩在荷载作用下的沉降实测值与计算结果见图 1。

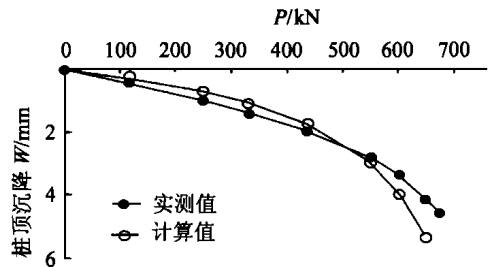


图 1 单桩在荷载下的沉降实测值与计算值曲线图

群桩中根据上述等代墩法,使用如下的模型参数:

9 根群桩的等代墩 $A_{tp} = 0.531 \text{ m}^2$, $A_g = 3.65 \text{ m}^2$, $D_{eq} = 2.16 \text{ m}$, 4 根群桩的等代墩 $A_{tp} = 0.236 \text{ m}^2$, $A_g = 1.19 \text{ m}^2$, $D_{eq} = 1.23 \text{ m}$ 。等代墩的承载力是根据假定为单桩时的桩身应力,而等代墩的初始刚度由式(20)确定。

9 根桩和 4 根桩的群桩基础按等代墩考虑的计算值和实测结果见图 2。从图 2 上可

看出,计算的结果与实测值较为一致,但可看出计算出的结果反映开始时的刚度比实测结果反映出的刚度要大,当荷载增大到一定程度以后,这种情况又相反,这是由于在测试过程中后来得到的侧阻的降低而端阻的增加所致。

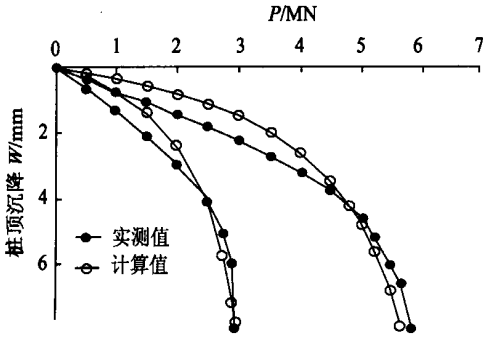


图2 4根群桩与9根群桩在荷载下的沉降实测值与计算值曲线图

比较测试数据的结果,由于群桩中桩与桩之间相互影响,群桩的每根桩与单桩同样大的受荷作用下,沉降总体上比单桩较大,4根桩的群桩与单桩的沉降比率大约是0.8,而9根的群桩与单桩的沉降之比是0.65左右,见表1、表2。

表1 单桩与4根群桩在不同荷载作用下的实测沉降值

单 桩		4 根 群 桩		沉 降 比
荷载 P/kN	沉降 W/mm	荷载 P/MN	沉降 W/mm	
117	0.45	0.47	0.64	0.70
249	1.01	1.01	1.32	0.77
330	1.41	1.32	1.91	0.74
435	2.0	1.73	2.54	0.78
551	2.84	2.2	3.29	0.86
600	3.41	2.41	3.8	0.9
654	4.2	2.6	4.74	0.88

表2 单桩与9根群桩在不同荷载作用下的实测沉降值

单 桩		9 根 群 桩		沉 降 比
荷载 P/kN	沉降 W/mm	荷载 P/MN	沉降 W/mm	
117	0.45	1.06	0.72	0.63
249	1.01	2.25	1.63	0.62
330	1.41	2.98	2.21	0.64
435	2.0	3.92	3.18	0.63
551	2.84	4.96	4.55	0.63
600	3.41	5.4	5.76	0.59
654	4.2	5.9	6.62	0.63

4 结 论

由于群桩基础中,桩与土的相互作用的复杂性,能反映实际的群桩端部的初始刚度计算较为困难。这里巧妙地假定弹性理论解与传递函数法中在 $1/4 P_u$ 时的荷载作用下,两者计算的桩端位移是相等的,根据这一点来确定等代墩后的群桩桩端初始刚度 K_b ,这与实际应是一致的。

传递函数法既可用于桩侧,也可用于桩端,其简化方法既运用于解决单桩,也用来解决了群桩。在本文的实例试验中得到了证实。传递函数法对复合桩基非线性简化分析的简便实用性体现在已知的参数确定后,就可以对群桩的非线性简化分析直接进行手算。为了使上述的模型及其参数反映更有效更准确,以便更加普遍和广泛地应用于实际工程中。可借助于计算机通过有限元分析及在工程中的实测结果进行比较,对参数进行不断地修正、确认,得出更普遍更精确的应用形式。

对于群桩的等代墩径长比一般应用于小于4的情况,当径长比较大时,这种传递函数的复合桩基的非线性简化分析的效果可能较差。

参 考 文 献

- 林天健, 桩基础设计指南. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. 301~304
- 宰金珉, 杨荣昌. 桩周土非线性变形分析的广义剪切位移法. 南京建筑工程学院学报 1993, 24 (1): 1~16
- 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 144~150; 173~185
- Chin F K. The inverse slope as a prediction of ultimate bearing capacity of piles. Pccoc 3rd SE Asian Conf In Soil. Engineering, 1972. 83~91
- Konder R L. "Hyperbolic stress-strain response; cohesive soil." J. Soil Mech. Found. Div., 89, 1963. 115~143
- Clancy P, Randolph M F. Simple design tools for piled raft foundations. Geotechnique. 1996, 46 (2):

收稿日期: 2003-01-13