

船坞坞室基坑开挖后单桩的竖向荷载位移关系 非线性简化分析

江 杰¹, 顾倩燕¹, 黄茂松²

(1. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 20092)

摘要: 基于荷载传递法, 提出了船坞坞室基坑开挖卸荷后单桩竖向荷载位移关系非线性简化分析方法。计算模型考虑了桩土相互作用的非线性特性和土体超固结效应对单桩承载力的影响, 比较符合船坞底板桩基实际工作性状。采用有限差分法对单桩进行求解, 计算结果与有限元计算值进行对比分析, 验证了本文方法的正确性, 可应用于实际工程问题的分析。

关键词: 非线性; 荷载传递法; 卸载; 超固结; 有限差分法

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0212-05

作者简介: 江 杰(1979-), 男, 湖北麻城人, 博士, 高级工程师, 从事岩土工程方面的设计及科研工作。E-mail: jie_jiang001@126.com。

Nonlinear analysis for settlement of vertically loaded single pile in dock pits after excavation

JIANG Jie¹, GU Qian-yan¹, HUANG Mao-song²

(1. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The load transfer method is adopted to obtain the simplified nonlinear analysis of settlement of vertically loaded single pile in dock pits after excavation. Considering the overconsolidation effect and nonlinear interaction between piles and soils, the theoretical model agrees with the fact quite well. The governing equation of single pile is solved by the finite difference method. The results of the finite element are compared with the calculated results, which proves the predictive capacity of the proposed method.

Key words: nonlinearity; load transfer method; unloading; overconsolidation; finite difference method

0 引 言

软土地区船坞坞室底板大多采用桩基, 由于施工条件的限制, 需先进行桩基施工, 然后开挖基坑, 最后浇筑底板并承受造船荷载。于是坑底的桩基都要经历开挖卸载之后再加载的过程, 这比常规的桩基础受力体系更为复杂, 是目前岩土工程研究中的热点、难点问题。三维数值方法(有限单元法或有限差分法)对桩基进行分析时, 可以考虑土体的非均匀性和桩土相互非线性特性, 还可模拟施工工况, 是比较精确的计算方法。但建模比较复杂, 且参数选取和本构模型的选择需要较强的理论基础, 因而不被一般工程设计人员所接受。

笔者^[1-2]提出了非均质地基中桩基础竖向荷载位移关系非线性简化分析方法, 并在文献[3]中分析重复加卸载下桩基础沉降特性, 这些方法都没有考虑基坑

开挖卸载对单桩承载力的影响, 显得过于保守。

船坞坞室基坑开挖后, 位于坑底的土体处于超固结状态, 土体的超固结程度将会对桩土界面的法向应力产生影响, 进而会影响到桩侧的极限摩阻力。本文采用荷载传递法, 对单桩卸载后再加载过程进行非线性分析, 考虑土体超固结对单桩承载力的影响, 采用有限差分法对单桩进行求解, 得到了单桩竖向荷载位移关系, 并将计算结果与有限元计算结果进行了对比。

1 单桩非线性卸载计算方法

在桩土相互作用过程中, 桩被视作弹性单元组合体, 每一单元与土体之间均用非线性弹簧联系, 其应力-应变关系表示桩侧摩阻力与剪切位移之间的关

系, 通常称为荷载传递函数, 文献[4]给出了荷载传递法基本微分方程:

$$\frac{d^2 w(z)}{dz^2} - \frac{U_p}{E_p A_p} \tau(z) = 0 \quad (1)$$

式中 $w(z)$ 为深度 z 处桩身位移; U_p 为桩的周长; E_p 和 A_p 分别为桩的弹性模量和横截面积; $\tau(z)$ 为深度 z 处桩侧摩阻力, 荷载传递函数用式 (2) 定义。

$$\tau(z) = \begin{cases} \frac{s(z)}{a + bs(z)} & (s(z) \geq 0) \\ -\frac{|s(z)|}{a + b|s(z)|} & (s(z) < 0) \end{cases}, \quad (2)$$

式中, $s(z)$ 为桩土相对位移, $s(z) = w(z) - w_s(z)$, $w_s(z)$ 桩所处位置的深度 z 处的卸载回弹后的自由土体位移场, 卸载可视为反向加载, 可采用层状弹性半空间中轴对称问题的位移解答^[5]。

$1/a$ 是 $\tau(z) - s$ 曲线的初始斜率, 根据 Randolph 等^[6]的研究成果, a 值可取为

$$a = \frac{r_0 \ln(r_m/r_0)}{G} \quad (3)$$

式中 G 为土体剪切模量; r_0 为桩半径; r_m 为受荷桩体对土体的最大影响半径, $r_m = \chi_1 \chi_2 L(1 - \nu_s)$, χ_1, χ_2 为考虑土体不均匀程度的经验系数^[7], L 为桩长, ν_s 为土体泊松比。

$$b = \frac{1}{\tau_f}, \quad (4)$$

式中, τ_f 为桩侧极限摩阻力, 可表示为 $\tau_f = \sigma'_n \tan \delta$, $\sigma'_n = K_{0(OC)}(\gamma'z)$, $K_{0(OC)}$ 是卸载条件下静止土压力系数。开挖将使坑底土体处于超固结状态, 其静止土压力系数也会发生改变, 可取 $K_{0(OC)} = K_{0(NC)} \text{OCR}^\alpha$, $\alpha = \sin \phi'$, $K_{0(NC)}$ 为正常固结土的静止土压力数, 可取 $K_{0(NC)} = 1 - \sin \phi'$, OCR 为超固结比。 γ' 、 ϕ' 分别为桩侧土的有效重度和有效内摩擦角, δ 为桩土接触面摩擦角, δ 不受土体超固结效应的影响^[8]。

单桩卸载时桩顶边界条件为 $P(0) = 0$, 桩底土不能承受拉力, 故桩底的边界条件为:

$$P(l) = \begin{cases} k_{bz} s(l) & (s(l) \geq 0) \\ 0 & (s(l) < 0) \end{cases}. \quad (5)$$

采用有限差分法对单桩进行求解, 将桩沿桩长进行 n 等分, 并在桩的顶部和底部各增加一个虚拟等分节点-1 和 $n+1$, 每等分的长度为 h 。

将桩身控制方程 (1) 差分离散:

$$w_i = \frac{1}{2} \left(w_{i+1} + w_{i-1} - \frac{U_p h^2}{E_p A_p} \tau_i \right); \quad (6)$$

边界条件的差分离散:

$$\text{桩顶: } w_1 - w_{-1} = -\frac{2hP(0)}{E_p A_p} = 0,$$

$$w_0 = \frac{1}{2} \left(w_1 + w_{-1} - \frac{U_p h^2}{E_p A_p} \tau_0 \right) = w_1 - \frac{U_p h^2}{2E_p A_p} \tau_0. \quad (7)$$

桩底:

$$\begin{cases} w_n = w_{n-1} - \frac{hk_{bz} w_n}{E_p A_p} - \frac{U_p h^2}{2E_p A_p} \tau_n & (w_i - w_{s,i}) \geq 0, \\ w_n = w_{n-1} - \frac{U_p h^2}{2E_p A_p} \tau_n & (w_i - w_{s,i}) < 0. \end{cases} \quad (8)$$

式中, K_{bz} 为桩端土体简化为弹簧其刚度, 可以用 Boussinesq 公式求得:

$$K_{bz} = \frac{P_b}{W_b} = \frac{dE_b}{1 - \nu_b^2} (1 + 0.65 \frac{d}{h_b}), \quad (9)$$

式中 E_b, ν_b 表示桩端土体的弹性模量、泊松比; h_b 表示桩端到基岩的深度; d 为桩直径。

卸载过程中的桩土界面荷载传递函数的差分离散:

$$\tau_i = \begin{cases} \frac{s_i}{a + bs_i} = \frac{w_i - w_{s,i}}{a + b(w_i - w_{s,i})} & (w_i - w_{s,i} \geq 0), \\ -\frac{|s_i|}{a + b|s_i|} = -\frac{|w_i - w_{s,i}|}{a + b|w_i - w_{s,i}|} & (w_i - w_{s,i} < 0). \end{cases} \quad (10)$$

求解过程如下: ① 求出开挖卸载回弹后沿桩身的自由土体位移场 $w_s(z)$; ② 沿桩身的初始位移取为零; ③ 由桩土相对位移 $s(z)$ 利用式 (10) 算出桩侧摩阻力 $\tau(z)$; ④ 利用差分方程 (6)、(7) 和 (8) 沿桩身节点依次求出新的桩节点位移 w_i^k , 并把新求出的节点位移值代入到下个节点位移的计算中, 即 $w_{i+1}^{k-1} = w_i^k$; ⑤ 取 $|w^k - w^{k-1}|$ 作为控制迭代控制误差, 若误差大于限定值则重复③~④直至迭代误差小于限值。

求桩身轴力的差分格式为

$$P_i = -E_p A_p \frac{(w_{i+1} - w_{i-1})}{2h}, \quad (i = 0, 1, \dots, n). \quad (11)$$

2 单桩非线性再加载计算方法

桩顶卸载后再加载时的桩节点总位移为

$$w = w_{\text{guc}} + w_{\text{src}}, \quad (12)$$

式中, w_{guc} 为卸载产生的位移, w_{src} 为再加载时的桩侧的新增的位移。

对式 (12) 差分离散得

$$w_i = w_{\text{guc},i} + w_{\text{src},i}. \quad (13)$$

将式 (12) 代入式 (6) 可得卸载后再加载时桩身控制方程差分离散格式为

$$\begin{cases} w_{\text{guc},i} + w_{\text{src},i} = \frac{1}{2} \left((w_{\text{guc},i+1} + w_{\text{src},i+1}) + (w_{\text{guc},i-1} + w_{\text{src},i-1}) - \frac{U_p h^2}{E_p A_p} \tau_i \right), \\ w_{\text{src},i} = \frac{1}{2} \left((w_{\text{guc},i+1} + w_{\text{src},i+1}) + (w_{\text{guc},i-1} + w_{\text{src},i-1}) - \frac{U_p h^2}{E_p A_p} \tau_i \right) - w_{\text{guc},i} \end{cases}$$

(14)

桩顶边界条件为 $w_{src,0} = s$, s 为已知的再加载位移

$$w_{src,1} = \frac{1}{2} \left((w_{guc,2} + w_{src,2}) + (w_{guc,0} + w_{src,0}) - \frac{U_p h^2}{E_p A_p} \tau_1 \right) - w_{guc,1} \quad (15)$$

将式(13)代入式(8)可得卸载后再加载时桩底边界条件为:

$$\begin{cases} w_{src,n} = w_{guc,n-1} + w_{src,n-1} - \frac{hk_{bz}(w_{guc,n} + w_{src,n} - w_{s,n})}{E_p A_p} - \frac{U_p h^2}{2E_p A_p} \tau_n - \\ w_{guc,n} \quad (w_{guc,n} + w_{src,n} - w_{s,n}) \geq 0, \\ w_{src,n} = w_{guc,n-1} + w_{src,n-1} - \frac{U_p h^2}{2E_p A_p} \tau_n - w_{guc,n} \quad (w_{guc,n} + w_{src,n} - w_{s,n}) < 0. \end{cases} \quad (16)$$

卸载后桩土之间将会产生一个中性点(摩擦阻力为零的点),对于中性点以上的桩土界面桩土相对位移 $w_{guc} - w_s(z) > 0$, 桩侧产生正摩阻力,当桩顶再加载时依然是加载过程,即

$$\tau(z) = \frac{s(z)}{a + bs(z)} = \frac{w_{guc} + w_{src} - w_s(z)}{a + b(w_{guc} + w_{src} - w_s(z))}, \quad (w_{guc} - w_s(z)) > 0. \quad (17)$$

差分离散可得

$$\tau_i = \frac{w_{guc,i} + w_{src,i} - w_{s,i}}{a + b(w_{guc,i} + w_{src,i} - w_{s,i})} \quad (w_{guc,i} - w_{s,i}) > 0. \quad (18)$$

对于中性面以下的点,卸载后桩土界面桩土相对位移 $w_{guc} - w_s(z) < 0$, 桩侧产生负摩阻力,当桩顶加载时,处于中性点以下的桩土界面将随着桩顶加载而逐渐卸载,桩土界面的剪应力卸载至零后,若继续加载桩土界面剪应力将会进入加载过程,并产生正的桩侧剪应力,其桩土界面荷载传递函数如下:

$$\tau(z) = \begin{cases} \frac{s(z) - s_p(z)}{a} & (s(z) < s_p(z)) \\ \frac{s(z) - s_p(z)}{a + b(s(z) - s_p(z))} & (s(z) > s_p(z)) \end{cases}, \quad (19)$$

式中, $s_p(z)$ 为桩土界面残余相对位移。

将式(13)代入式(19)得到荷载传递函数的差分格式:

$$\tau(z) = \begin{cases} \frac{w_{guc,i} + w_{src,i} - w_{s,i} - s_{pi}}{a}, & (w_{guc,i} + w_{src,i} - w_{s,i} < s_{pi}) \\ \frac{w_{guc,i} + w_{src,i} - w_{s,i} - s_{pi}}{a + b(w_{guc,i} + w_{src,i} - w_{s,i} - s_{pi})}, & (w_{guc,i} + w_{src,i} - w_{s,i} > s_{pi}) \end{cases}. \quad (20)$$

求解过程如下:①按第1节的方法求出开挖卸载后的桩侧自由土体位移场 $w_s(z)$ 和回弹后的桩身位移 w_{guc} ; ②取沿桩身卸载后初始再加载位移 $w_{src} = s$; ③由桩土相对位移 $s(z)$ 利用式(18)和(20)算出桩侧摩阻力 $\tau(z)$; ④利用差分方程(14)、(15)和(16)沿桩身节点依次求出新的桩节点再加载位移 $w_{src,i}^k$, 并把新求出的节点再加载位移值代入到下个节点位移的计算中,即另 $w_{src,i+1}^{k-1} = w_{src,i}^k$; ⑤取 $|w_{src}^k - w_{src}^{k-1}|$ 作为控制

迭代控制误差,若误差大于限定值则重复③~④直至迭代误差小于限定值。

桩身轴力差分格式为

$$P_i = -E_p A_p \frac{((w_{guc,i+1} + w_{src,i+1}) - (w_{guc,i-1} + w_{src,i-1}))}{2h}, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (21)$$

对于桩顶采用向前差分格式:

$$P_0 = -E_p A_p \frac{((w_{guc,1} + w_{src,1}) - (w_{guc,0} + w_{src,0}))}{h}. \quad (22)$$

3 算例分析

对中船长兴造船基地一期工程#3、#4船坞底板桩基进行静载荷试验,试桩在地面上进行(不开挖),其中#3试桩桩型为 $\Phi 600$ PHC管桩,桩长39m,重度 2500 kg/m^3 ,弹性模量为 20 GPa ,泊松比为 0.16 ,土体采用 Mohr-Coulomb 模型,具体的土层参数见表1。采用库仑摩擦模型来描述桩土之间相互作用,根据以往的计算经验,摩擦系数取为 0.33 。

为了验证本文简化分析方法的正确性,采用 ABAQUS 软件对该桩进行数值模拟,利用对称性,取 $1/4$ 模型进行分析。其中土体模型在 x , y 和 z 方向的尺寸分别为 $70, 70, 80 \text{ m}$,共 18444 个单元, 21118 个节点。底面边界条件除两端外设置支座固定竖向和水平向位移,2个侧面采用水平连杆支座固定侧向位移,顶面为自由面。

ABAQUS 计算得到的桩顶 $Q-s$ 曲线与本文简化分析方法得到结果对比见图1,可以看出单桩极限承载力的计算结果为 4000 kN ,与实测结果吻合。有限元计算结果和简化分析方法的结果基本吻合,说明本文简化分析方法可以比较合理地模拟桩的受压过程,同时还表明本文中采用的建模方法与计算参数比较符合实际,得到了满意的结果。

表1 土层的物理力学计算参数

土层	厚度 /m	重度 /(kNm^{-3})	c /kPa	φ /($^\circ$)	E_0 /MPa	泊松比
1	3.6	1880	4	12	108.53	0.4
2	0.9	1820	14	15	79.41	0.4
3	10.6	1840	10	17	86.76	0.4
4	6.4	1790	13	19.5	78.29	0.4
5	4.5	1680	11	20	55.96	0.35
6	6	1740	16	25	60.86	0.32
7	4	1800	19	30	60.31	0.30
8	3	1800	21	32	12.9	0.25
9	-	1800	21	32	12.9	0.25

为了研究土体超固结特性、土体开挖深度 ($0.1L, 0.2L, 0.3L, L$ 为桩长) 和开挖半径 ($0.25L, 0.5L, 1L$) 对位于基坑底部的桩基的竖向承载力的影响,分别针对考虑土体超固结特性和不考虑土体的超固结特性时的不同开挖深度和不同开挖直径下的位于基坑底

部的单桩进行了计算, 计算结果如图 2~5 所示。

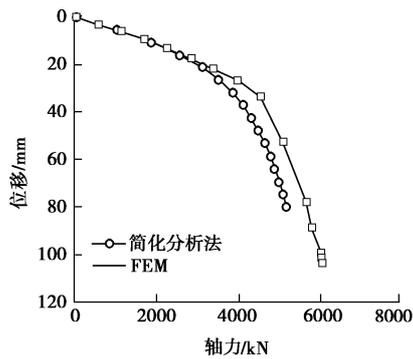


图 1 单桩 $Q-s$ 曲线

Fig. 1 $Q-s$ curves of single pile

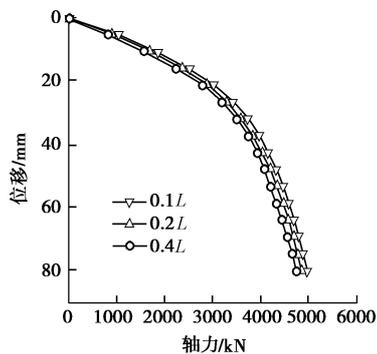


图 2 不同开挖深度下单桩 $Q-s$ 曲线 (不考虑土体超固结效应)

Fig. 2 $Q-s$ curves of single pile under various excavating depths (ignoring overconsolidation effect)

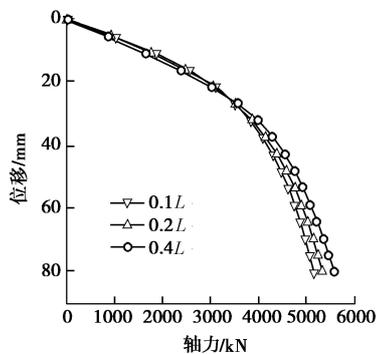


图 3 不同开挖深度下单桩 $Q-s$ 曲线 (考虑土体超固结效应)

Fig. 3 $Q-s$ curves of single pile under various excavating depths (considering overconsolidation effect)

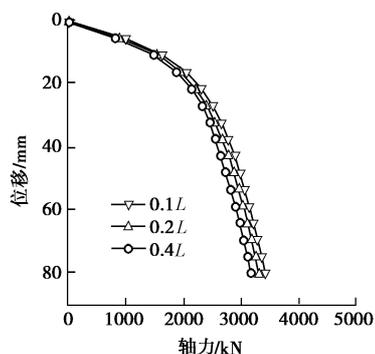


图 4 不同开挖半径下单桩 $Q-s$ 曲线 (不考虑土体超固结效应)

Fig. 4 $Q-s$ curves of single pile under various excavating radii (ignoring overconsolidation effect)

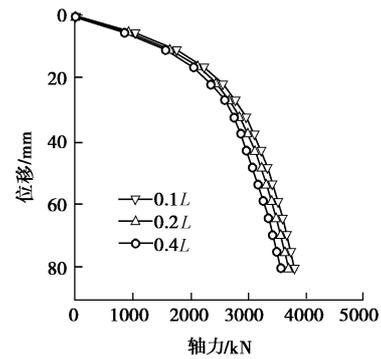


图 5 不同开挖半径下单桩 $Q-s$ 曲线 (考虑土体超固结效应)

Fig. 5 $Q-s$ curves of single pile under various excavating radii (considering overconsolidation effect)

对比图 2, 3 和 4, 5 可以看出考虑土体超固结特性时得出的桩基的承载力比不考虑土体超固结特性时得出的桩基承载力要高, 即不考虑土体的超固结特性将会低估基坑底部的桩基的承载力。

对比图 2, 3 可以看出, 考虑土体超固结特性时, 随着开挖深度的加大桩的承载力将会增大, 而当不考虑土体的超固结特性时将会得出相反的结论。

由图 4, 5 可看出在一定开挖深度下随着开挖半径的扩大, 基坑底部的桩基承载力逐渐降低。

4 结 论

本文采用荷载传递法, 对单桩卸载后再加载过程进行非线性分析, 分别针对考虑土体超固结特性和不考虑土体的超固结特性时, 不同开挖深度和不同开挖直径下, 位于基坑底部的单桩进行了计算, 得到如下 2 点结论。

(1) 不考虑土体的超固结特性将会低估基坑底部的桩基的承载力。

(2) 考虑土体超固结特性时, 随着开挖深度的加大桩的承载力将会增大, 而当不考虑土体的超固结特性时将会得出相反的结论。

参考文献:

- [1] 江 杰, 黄茂松, 梁发云, 等. 桩筏基础相互作用非线性简化分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 112 - 117. (JIANG Jie, HUANG Mao-song, LIANG Fa-yun, et al. Analysis of the interaction mechanism of piled raft foundation with simplified nonlinear model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 112 - 117. (in Chinese))
- [2] 黄茂松, 江 杰, 梁发云, 等. 层状地基中桩基础的竖向荷载位移关系非线性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1423 - 1429. (HUANG Mao-song, JIANG Jie,

- LIANG Fa-yun, et al. Nonlinear analysis for settlement of vertically loaded pile foundation in layered soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(10): 1423 - 1429. (in Chinese))
- [3] 江 杰, 黄茂松, 李 波, 等. 重复加卸载下桩筏基础沉降分析与离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(12): 1811 - 1817. (JIANG Jie, HUANG Mao-song, LI Bo, et al. Analysis on settlement of piled raft foundations under repeated loading and verification by centrifugal model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(12): 1811 - 1817. (in Chinese))
- [4] 赵明华, 邹 丹, 邹新军. 基于荷载传递法的高承台桩基沉降计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(13): 2310 - 2314. (ZHAO Ming-hua, ZOU Dan, ZOU Xin-jun. Settlement calculation of pile foundations with elevated caps by load transfer method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(13): 2310 - 2314. (in Chinese))
- [5] 付佰勇, 黄茂松, 梁发云, 等. 层状弹性半空间中群桩竖向沉降简化分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(2): 198 - 204. (FU Bai-yong, HUANG Mao-song, LIANG Fa-yun, et al. Settlement analysis of pile groups in layered elastic half-space[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(2): 198 - 204. (in Chinese))
- [6] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of vertical deformation of pile groups[J]. Géotechnique, 1979, **29**(4): 423 - 439.
- [7] MYLONAKIS G, GAZETAS G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil[J]. Géotechnique, 1998, **48**(1): 55 - 72.
- [8] MOCHTAR B, EDIL B. Shaft resistance of model pile in clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **114**(11): 1227 - 1244.

(本文责编 孙振远)