

现浇混凝土薄壁管桩单桩性状简化分析

费 康,刘汉龙,周云东,高玉峰

(河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要 考虑了土塞与桩的相互作用,提出一种针对振动沉模现浇混凝土薄壁管桩(简称 PCC 桩)荷载~沉降关系分析的简化方法.与现场试验和有限元模拟结果的对比表明,该简化方法具有较高的准确性,可以更方便地应用于工程实际.

关键词 薄壁管桩 现浇混凝土 土塞 简化方法

中图分类号 :TU435 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)01-0059-04

现浇混凝土薄壁管桩又称 PCC 桩^[1,2],是河海大学岩土工程研究所刘汉龙教授等人开发的专利技术(专利号 ZL01273182.X,CN1367296A).该技术是依靠振动力将内外双层钢套管所形成的环形腔体在活瓣桩靴的保护下打入到设计深度,在腔体内浇注混凝土后振动拔管,环形域中便形成混凝土管桩.成桩后将土塞顶部的部分土体挖出,现浇混凝土盖板.由桩内、外侧摩阻力,桩端阻力,土塞顶部反力共同承担竖向荷载.

单桩轴向荷载~沉降关系分析方法主要可以分为三大类^[3].第 1 类是荷载传递法,该类方法将桩离散为一系列的桩段弹性单元,在桩身结点处土体抗力与桩身位移之间的关系用一系列预先确定的曲线来表示,选择合适的曲线可以考虑非线性因素.第 2 类是弹性理论法,桩和土作为弹性材料,由轴向荷载下桩身的压缩求得桩的位移,由荷载作用于半无限空间内某一点所产生的 Mindlin 位移解求得桩周土体的位移,假定桩土界面不发生滑移,由此即可求得桩身摩阻力和桩端力的分布,并进而求得桩的位移分布.土的屈服、土层的有限深度、土的非均匀性和桩端的局部扩大等一些因素都得到了近似的考虑^[4],但是桩和土之间的滑移和脱离没有得到合适的模拟.第 3 种方法是以有限元法为代表的数值分析方法,可以较好地模拟桩和桩周土的几何形状,本构模型,边界条件,以及桩和土之间的接触状况.

对土塞及其特殊边界条件的合理模拟是影响分析结果可靠性的关键因素之一.本文基于荷载传递法并考虑土塞的作用,提出了一种简化分析方法.

1 简化模型

桩荷载~沉降曲线的非线性主要是桩土界面间的塑性变形和滑移造成的,内外桩土界面上的相互作用模型可以采用 Smith 提出的弹塑性模型^[5],在分析静载试验时忽略阻尼作用.桩体和土塞均用一系列的集中质量块体和线性弹簧模拟^[6,7],桩结点和土塞结点之间通过弹簧与滑块连接(图 1),从而在分析中可以考虑土塞和桩的相互作用.桩结点和桩周土结点之间、桩端和桩端土之间也都采用弹簧与滑块连接.

将作用在长度 ΔL 的桩身单元的外摩擦力等效为一个摩擦力 r_m 施加于桩身第 m 个结点上,则有

$$r_m = d_m u_{sm} \leq 2\pi r_0 \Delta L \tau_{\max} \tag{1}$$

$$d_m = 2\pi r_0 \Delta L \times k_{sm} \tag{2}$$

式中: u_s —— 桩土界面上土的位移; k_s —— 弹簧的刚度.

桩身与桩周土或土塞之间的界面处在剪应力达到最大剪应力前,不会发生相对位移,即桩身位移 $u = u_s$.

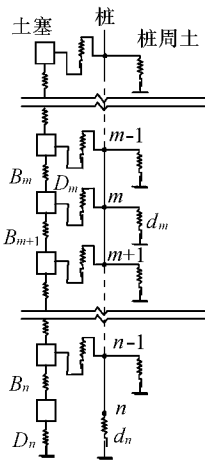


图 1 简化模型

Fig.1 Simplified model

内摩擦力的发挥伴随着土塞中心与土塞边缘的相对位移,桩内摩擦力

$$R_m = D_m(U_m^2 - U_m^1) \leq 2\pi r_i \Delta L \tau_{\max} \quad (3)$$

桩端土体反力

$$r_n = d_n u_n \leq \sigma_{\max} A \quad (4)$$

土塞底部反力

$$R_n = D_n U_n^2 \leq \sigma_{\max} A_s \quad (5)$$

$$D_m = 2\pi r_i \Delta L K_{sm} \quad d_n = A k_b \quad D_n = A_s K_b$$

式中: r_i ——桩的内半径; U^1 ——土塞中心点的位移; U^2 ——桩与土塞界面处土的位移; u_n ——桩底位移; k_b ——弹簧刚度; A ——桩的横截面面积; U_n^2 ——土塞在桩底处的位移; K_b ——弹簧刚度系数; A_s ——土塞的面积。

2 计算方法

2.1 支配方程组的形成和求解

由桩体和土塞第 m 个结点的平衡条件可得

$$b_m \Delta u_{m-1} - (b_m + b_{m+1} + d_m + D_m) \Delta u_m + D_m U_m + b_{m+1} \Delta u_{m+1} = 0 \quad (6)$$

$$B_m \Delta U_{m-1} + D_m \Delta u_m - (B_m + B_{m+1} + D_m) \Delta U_m + B_{m+1} \Delta U_{m+1} = 0 \quad (7)$$

其中

$$b_m = AE/\Delta L \quad B_m = A_s E_{cs}/\Delta L$$

桩端结点($m = n$)的平衡条件:

$$b_n \Delta u_{n-1} - (b_n + d_n) \Delta u_n = 0 \quad (8)$$

桩顶结点($m = 0$)的平衡条件:

$$-(d_0 + D_0 + b_1) \Delta u_0 + D_0 \Delta U_0 + b_1 \Delta u_1 = -\Delta P_p \quad (9)$$

土塞底部结点($m = n$)的平衡条件:

$$B_n \Delta U_{n-1} - (B_n + D_n) \Delta U_n = 0 \quad (10)$$

土塞顶部结点 $m = 0$ 的平衡条件:

$$D_0 \Delta u_0 - (B_1 + D_0) \Delta U_0 + B_1 \Delta U_1 = -\Delta P_s \quad (11)$$

式中: $\Delta P_p, \Delta P_s$ ——作用在桩顶上和土塞顶上的荷载增量。

将式(6)~(11)联合写成矩阵形式:

$$K \Delta u = \Delta F \quad (12)$$

其中 K 是 $2(n+1) \times 2(n+1)$ 的对称系数矩阵,

$$\Delta u^T = \{\Delta u_0, \Delta U_0, \Delta u_1, \Delta U_1, \dots, \Delta u_n, \Delta U_n\} \quad (13)$$

$$\Delta F^T = \{-\Delta P_p, -\Delta P_s, 0, \dots, 0\} \quad (14)$$

由于桩头顶板作用,因此有 $\Delta u_0 = \Delta U_0$,同时考虑到 $\Delta P_p + \Delta P_s = \Delta P$,将式(12)变为

$$K' \Delta u' = \Delta F' \quad (15)$$

$$\Delta u'^T = \{\Delta u_0, \Delta u_1, \Delta U_1, \dots, \Delta u_n, \Delta U_n\} \quad (16)$$

$$\Delta F'^T = \{-\Delta P, 0, \dots, 0\} \quad (17)$$

K' 是将 K 中的第 1 列加到第 2 列上,第 1 行加到第 2 行上,然后去掉第 1 行和第 1 列后得到的新的刚度矩阵,为 $(2n+1) \times (2n+1)$ 的对称矩阵。

$$K'_{i,j} = \begin{cases} K_{i+1,j+1} & i > 1, j > 1 \\ K_{1,j} + K_{2,j} & i = 1 \\ K_{i,1} + K_{i,2} & j = 1 \end{cases} \quad (18)$$

当结点上的应力达到极限剪应力或端承力时,相应的刚度取为零,以此来模拟桩土间的滑移或刺入变形。对于给定的荷载增量 ΔP ,由方程组(15)中解出增量位移,就可以进一步求出土塞顶部和桩顶分别承受的荷载、轴力沿桩身和土塞的分布,以及桩内外摩阻力的分布。

2.2 参数确定

分析中所需的参数除了材料的弹性模量之外,最主要的就是弹簧刚度 k_s, K_s, k_b, K_b 的确定。Novak^[8] 给

出了无限、均质、各向同性弹性土体中的无限长刚性圆柱桩垂直谐和运动时土阻力的理论解,弹簧刚度由下式确定:

$$k_s = 2.75 G_s / (\pi r_0)$$

(19)

Lysmer 等^[9]建议土塞底部弹簧刚度按下式确定:

$$K_b = \frac{4 G_s}{\pi r_t (1 - \nu_s)}$$

(20)

式中: G_s ——土的弹性剪切模量; ν_s ——土的泊松比.分析中可以认为 $K_s = k_s, K_b = k_b$.

3 工程实例

南京市大厂区市政经一路工程位于南京钢铁集团公司厂区北侧,最高填土高度大约 6 m,在填土方量大的地段分布着 8~18 m 厚粉土和粉质粘土,承载力及沉降难以满足要求.通过技术、经济等方面的比较分析,采用现浇管桩技术加固地基.本文采用简化方法对现场静载试验进行了分析.拟分析的桩长 7.8 m,外径 1 000 mm,壁厚 120 mm.为反映土体剪切模量和侧阻力随土层深度增加而增加,将桩长范围内的土层划分为 8 层.计算参数见表 1.

表 1 计算参数
Table 1 Parameters for calculation

层厚/m	$\tau_{\max}$ /kPa	$k_s/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	层厚/m	$\tau_{\max}$ /kPa	$k_s/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$
1	4.1	1.51	5	20.3	3.38
2	8.1	2.14	6	24.3	3.71
3	12.2	2.62	7	28.4	4.01
4	16.2	3.03	7.8	32.4	4.28

注 桩底 $\sigma_{\max} = 100 \text{ kPa}, k_b = 46.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-1}$.

图 2 是简化方法模拟的桩顶荷载~沉降曲线与现场静载实测^①及有限元模拟^[9]结果的对比,可以看出简化分析结果与实测及有限元模拟结果吻合较好.由于桩顶盖板的限制,土塞顶部位移和桩顶位移保持一致,荷载变形曲线是重合的.桩端则产生一定的刺入变形,桩与土塞的位移差反映了内摩擦力的发挥.图 3 是内、外摩阻力沿桩长的分布情况.在荷载较小时,土塞顶附近土体沉降可能比桩沉降还大,出现负摩阻力.随着荷载增大,内摩阻力由下向上发挥,与外摩阻力不同.内、外摩阻力存在着异步发挥的现象,当外摩阻力充分发挥时,内摩阻力对承载力的贡献较小.若要内摩阻力充分发挥,需要很大的刺入变形,往往这时已经出现过大的沉降.图 4 是桩身及土塞的轴力沿桩长分布.土塞也分担了一定的轴向荷载,由于摩擦阻力的作用,桩身轴力逐渐减小,土塞轴力有所增加.

以上结果表明简化方法具有一定的精度,用于工程实际是可行的.

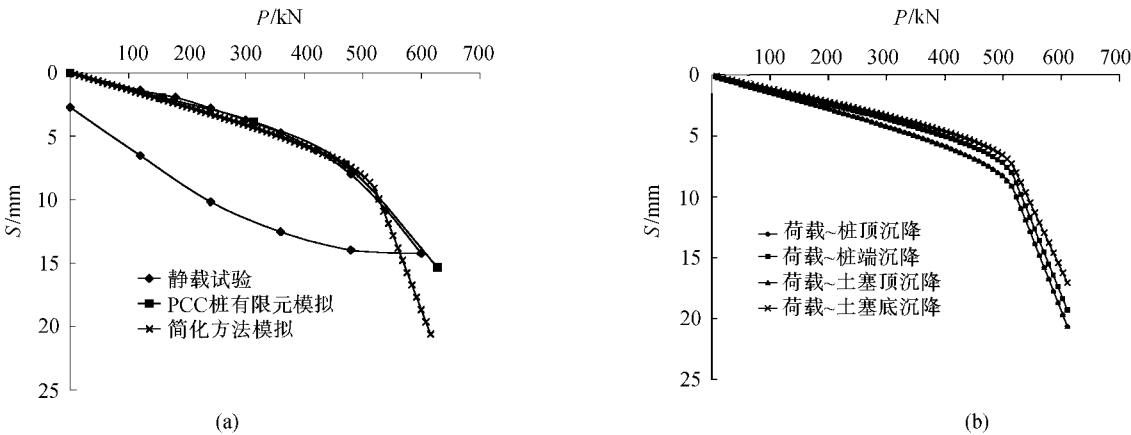


图 2 荷载~沉降曲线
Fig.2 Load-settlement curves

① 铁道部大桥局第二桥梁工程处,南京大厂区五条路经一道路工程单桩竖向静载荷试验报告,2001.

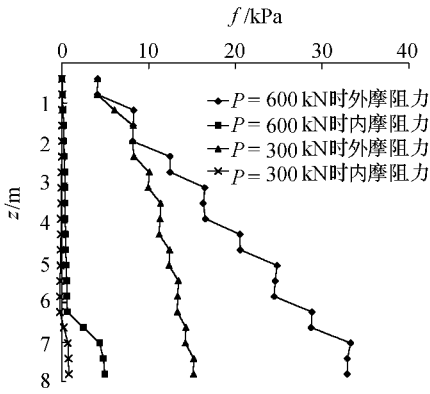


图 3 内外摩阻力沿桩深分布

Fig.3 Inner and outer friction resistance along pile depth

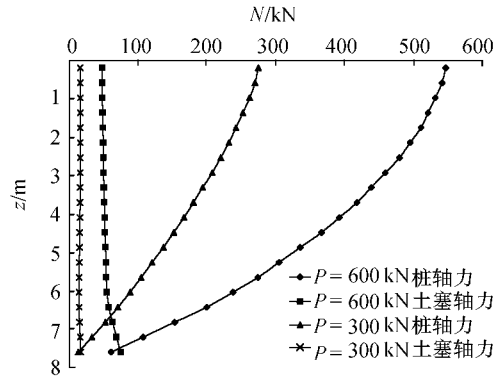


图 4 土塞和桩轴力沿桩深分布

Fig.4 Axial force and soil plug along pile depth

4 结 语

a. PCC 桩在轴向静载作用下土塞的作用十分复杂,受到桩的内径、土体剪胀性、土塞的拱效应诸多因素的影响.为简化起见,本文将桩体和土塞均用一系列的集中质量块体和线性弹簧模拟,桩土之间的相互作用采用弹簧与滑块连接,考虑了土塞的作用,提出一种 PCC 桩单桩性状的简化分析方法.与工程实例的对比表明,该简化方法具有较高的准确性,可以更方便地应用于工程实际.

b. PCC 桩是一种全新的桩型,其承载特性还需要结合更多工程实例的测试结果进行研究.

参考文献：

- [1] 刘汉龙,费康,马晓辉,等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用 (I 开发研制与设计理论) [J]. 岩土力学,2003,24 (2) :164—198.
- [2] 刘汉龙,郝小员,费康,等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用 (II 工程应用与现场试验) [J]. 岩土力学,2003,24 (3) :372—375.
- [3] 林天健,熊厚金,王利群. 桩基础设计指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社,1999. 195—325.
- [4] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design [M]. New York: John Wiley and Sons,1980. 87—93.
- [5] SMITH E A L. Pile driving analysis by the wave equation [J]. J Soil Mech and Found Div, ASCE, 1960,86(4) :35—61.
- [6] HEEREMA E P, de JONG A. An advanced wave equation compute program which simulates dynamic pile plugging through a coupled mass-spring system [A]. In: Institution of Civil Engineers. Proc Int Conf on Numerical Methods in Offshore Piling [C]. London: ICE, 1980. 37—42.
- [7] TATSUNORI M, MASATAKA T. Effects of soil plug on behaviour of driven pipe piles [J]. Soils and Foundations, 1991,31(2) :14—34.
- [8] NOVAK M, NOGGAMI T, ABOUL-ELLA F. Dynamic soil reaction for plane strain case [J]. Jour Eng Mech Div, ASCE, 1978,104(4) : 953—959.
- [9] LYSMER M, RICHART F E. Dynamic response of footing to vertical loading [J]. Jour Soil Mech, Found Div, ASCE, 1966,92(1) : 65—91.

Simplified analysis of performance of in-situ concrete thin-wall pipe piles

FEI Kang, LIU Han-long, ZHOU Yun-dong, GAO Yu-feng

(Geo-technical Research Institute of Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract : In consideration of the interaction between the soil plug and pile, a simplified method is proposed for analysis of the load-settlement relationship of the in-situ concrete thin-wall pipe piles (PCC pile). The comparison of the analytic result by the simplified method with that obtained from field tests and the finite element simulation shows that the simplified method is highly accurate, and very convenient for practical use.

Key words : thin-wall pipe pile ; in-situ concrete ; soil plug ; simplified method