

文章编号: 1000-7598 (2009) 04-1181-05

基于球孔扩张理论和侧阻力退化效应的压桩力计算模拟

刘俊伟¹, 张明义², 赵洪福², 王静静²

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310058; 2. 青岛理工大学, 青岛 266033)

摘 要: 根据静压桩的贯入机制, 将沉桩过程模拟为半无限土体中一系列球形孔的连续扩张, 土体假定为 Mohr-Coulomb 材料。利用球孔扩张和源-源假设理论, 并采用 Boussinesq 解进行地面应力的修正, 在此基础上分别计算出桩侧极限摩阻力和桩端阻力。通过现场试验研究发现, 沉桩过程中侧摩阻力退化效应带来的影响是明显的, 提出了相应的侧阻力退化公式。在充分考虑以上因素的基础上推导出了静压桩压桩力的模拟计算公式。使用 Matlab6.5 软件进行理论计算, 并与山西太原某试验进行对比分析, 一定深度以下理论值与实测数据基本吻合, 证明该计算模拟是可行的。

关 键 词: 静压桩; 压桩力; 球孔扩张; 侧阻力退化; 贯入

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Computational simulation of jacking force based on spherical cavity expansion theory and friction fatigue effect

LIU Jun-wei¹, ZHANG Ming-yi², ZHAO Hong-fu², WANG Jing-jing²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: According to penetration mechanism of jacked pile, the expansion of a series of spherical cavities in semi-infinite space is used to simulate the process of pile installation; and soil is assumed as Mohr-Coulomb material. By using the theory of spherical cavity expansion, imaging method and Boussinesq solution, the surface stresses is corrected; then ultimate frictional resistance and end-bearing capacity can be confirmed respectively. The data from field test show that the effect of friction fatigue during installation is obvious; and the relevant formula of friction fatigue is presented; then the computation formula is deduced based on the factors above. It is proved that this method is feasible because the values calculated by the presented formula with software Matlab6.5 are consistent with the field test results in Taiyuan of Shanxi Province under given depth.

Key words: jacked pile; jacking force; spherical cavity expansion; friction fatigue; penetration

1 前 言

静压桩凭借无震动、噪音低、污染小等优点已得到广泛的应用, 施工前准确地估算压桩力对于桩型的合理设计、压桩机的正确选择、沉桩可能性的准确判断等具有重要意义。目前压桩力的计算多数基于静力触探试验, 针对特定的地质情况提出修正系数进而建立的经验公式, 而修正系数的确定过多地依赖于经验和静力触探资料, 地区局限性明显, 且均未考虑侧阻退化效应的影响。

自 1945 年提出圆孔扩张理论后, 经过 Vesic

(1972 年)^[1]、Yu et al. (1991 年)^[2]、Collins et al. (1992 年)^[3]、Salgado (1993 年)^[4]、Collins et al. (1996 年)^[5]等的发展现已被广泛应用于岩土领域的研究, 但多数侧重于打入桩挤土效应等方面。本文将土体视为均匀的、各向同性的半无限体, 将静压桩的贯入过程模拟为一系列球孔的扩张, 分别计算出桩侧滑动摩阻力和桩端阻力, 比采用平面应变轴对称假设的柱形孔扩张理论^[1]更符合实际状态。另外, 充分考虑压桩过程中的侧阻力退化效应, 使压桩力的计算更加准确。

收稿日期: 2007-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.50678086)资助。

第一作者简介: 刘俊伟, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事桩基础及岩土工程相关方面的研究。Email: liujunwei0208@126.com

2 沉桩贯入的球孔扩张模拟

2.1 基本假设

本文假设①土体为均匀的、各向同性的半无限体；②桩的贯入假定为一列球孔的连续扩张，球半径等于桩径 R_u ；③方形截面桩等效为截面相等的圆形截面桩；④不考虑桩体自重的影响。

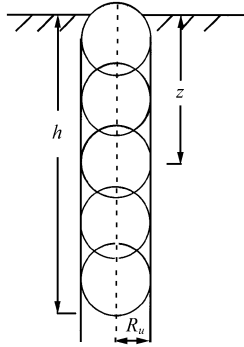


图1 桩体的模拟贯入

Fig.1 Simulation penetration of pile

2.2 无限体球孔扩张理论^[6]

Mohr-Coulomb 材料无限体中球孔扩张时塑性区内各点的应力为

$$\sigma_r = (p_u + c \cot \varphi) \left(\frac{R_u}{r} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} - \frac{2c \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (2)$$

式中：

$$\left. \begin{aligned} p_u &= (q_0 + c \cot \varphi) \frac{3(1 + \sin \varphi)}{3 - \sin \varphi} [I_\pi]^{\frac{4 \sin \varphi}{3(1 + \sin \varphi)}} - c \cot \varphi; \\ I_\pi &= \frac{I_r}{1 + I_r \Delta}; I_r = \frac{G}{S} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： c 为土体的黏聚力； φ 为土体内摩擦角； R_u 为球孔扩张后的最终孔径（其值等于桩径）； I_π 为修正刚度指标； I_r 为刚度指标； G 为剪切模量； q_0 为土中初始应力； S 为抗剪强度； P_u 为球孔半径为 R_u 时的孔压； r 为距球心的距离； Δ 为塑性区平均体应变，亦即等向固结试验的体应变，可采用迭代法求得^[7]。

首先，假设一个平均塑性体积应变，计算出应力状态，再根据固结试验体积应变与应力的关系，确定修正后的平均塑性体积应变。重复以上步骤进行迭代最终确定 Δ 的值。

无限体中球孔扩张时弹性区内各点的应力：

$$\sigma_r = \frac{R_p^3}{r^3} \sigma_R; \sigma_\theta = -\frac{1}{2} \sigma_r \quad (4)$$

式中： R_p 为塑性区最大半径， $R_p = \sqrt[3]{I_\pi} R_u$ 。

σ_R 为弹塑性交界处的应力，且满足以下关系：

$$\sigma_R = \frac{4c \cos \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (5)$$

2.3 采用源-源方法求解半无限土体中各点的应力

半无限体应力的求解采用源-源影射^[8-9]的方法，如图2所示，假设在地表以上对应真实源的位置有一影射源，将二者在无限土体中产生的应力进行叠加，并假设上下球孔扩张对某点的应力只是叠加，对塑性区的大小不产生影响；采用 Boussinesq 解除并不存在的地表竖向应力，最终得到半无限体中应力。采用柱坐标系，真实源、影射源在土体内各点产生的应力见式(6)和式(7)，其中 σ_{r_1} 、 σ_{r_2} 、 σ_{θ_1} 、 σ_{θ_2} 的取值可由式(1)~(4)确定，需考虑塑性区和弹性区取值的不同。

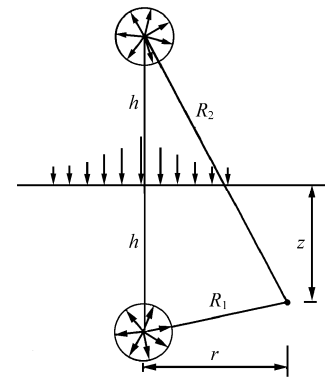


图2 源-源方法示意图

Fig.2 Sketch of imaging method

真实源在土体内各点产生的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r(\text{源})} &= \frac{r^2}{R_1^2} \sigma_{r_1} + \frac{(z-h)^2}{R_1^2} \sigma_{\theta_1}; \\ \sigma_{z(\text{源})} &= \frac{(z-h)^2}{R_1^2} \sigma_{r_1} + \frac{r^2}{R_1^2} \sigma_{\theta_1}; \\ \sigma_{\theta(\text{源})} &= \sigma_{\theta_1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

影射源在土体内各点产生的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r(\text{影})} &= \frac{r^2}{R_2^2} \sigma_{r_2} + \frac{(z+h)^2}{R_2^2} \sigma_{\theta_2}; \\ \sigma_{z(\text{影})} &= \frac{(z+h)^2}{R_2^2} \sigma_{r_2} + \frac{r^2}{R_2^2} \sigma_{\theta_2}; \\ \sigma_{\theta(\text{影})} &= \sigma_{\theta_2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

n 个球体扩张后土体中任意一点在柱坐标系下的径向应力为

$$\sigma_r' = \sum_{i=1}^n \left[\frac{r^2}{R_{li}^2} \sigma_{\eta_i} + \frac{(z-h_i)^2}{R_{li}^2} \sigma_{\theta_i} + \frac{r^2}{R_{2i}^2} \sigma_{r_{2i}} + \frac{(z+h_i)^2}{R_{2i}^2} \sigma_{\theta_{2i}} \right] \quad (8)$$

上述应力叠加后地表处出现并不存在的竖向应力:

$$q = 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{h_i^2}{R_i^2} \sigma_{\eta_i} + \frac{r^2}{R_i^2} \sigma_{\theta_i} \right) \quad (9)$$

在地面施加竖向应力 $-q$, 采用 Boussinesq 解进行修正, 上述轴对称面荷载在土体中产生的柱坐标下的径向荷载为

$$\sigma_r'' = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \left\{ \frac{-q}{2\pi R'^2} \left[\frac{(1-2u)}{R'+z} - \frac{3r'^2 z}{R'^3} \right] \cos^2 \alpha + \frac{-q(1-2u)}{2\pi R'^2} \left(\frac{z}{R'} - \frac{R'}{R'+z} \right) \sin^2 \alpha \right\} \rho d\theta dp \quad (10)$$

将式(8)~(10)进行叠加得到半无限体中的径向应力:

$$\sigma_r = \sigma_r' + \sigma_r'' \quad (11)$$

桩径为 R_u , 桩贯入 h 时模拟成 n 个球孔的扩张, 由体积等价代换可得

$$n = 3h/4R_u \quad (12)$$

值得注意的是, 桩体贯入所模拟成的 n 个球孔是连续扩张产生的而不是同时发生的。式(8)采用了 n 个球孔扩张所产生应力的直接叠加, 不同于实际状态的径向应力, 此方面带来的影响可在侧阻退化效应中得到体现, 进而得到修正。

3 桩侧滑动摩阻力退化效应的讨论

试验发现, 同一水平位置处的单位桩侧滑动摩阻力随着桩的贯入在不断减小, Heerema.E.P (1980 年) 称此现象为侧阻力退化^[10]。

Fugro (1996 年) 在密砂中进行足尺桩桩侧滑动摩阻力退化的观察研究^[8], 试验采用直径为 762 mm 的开口管桩, 贯入到地面以下 30.45、38.47 m 和 46.90 m 处时侧阻力的分布情况如图 3 所示。当桩贯入深度为 38.7 m 时, 30~35 m 范围内的平均摩阻力为 330 kPa, 而当桩继续贯入到 46.90 m 时此值减小到 130 kPa, 仅为前者的 40%, 该两部分如图 3 中阴影部分所示。

为了进一步研究桩侧滑动摩阻力退化现象, 选择山西太原某场地(与下部分试验为同一场地)进

行现场试验。图 4 为某试验桩桩侧摩阻力随着桩体贯入深度增加的变化曲线, 可以直观地观察到侧阻力变化情况。由图 4 可以看出, 随着贯入深度的增加, 同一深度处的侧阻力产生了明显的退化现象。地表以下一定深度范围内变化幅度较小, 4 m 以下退化幅度较大。

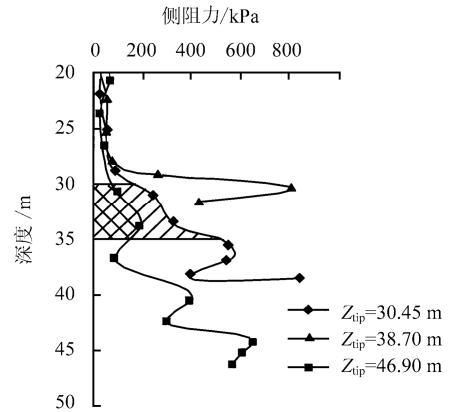


图 3 不同贯入深度时侧摩阻力的分布情况
Fig.3 Distribution of friction of different penetration depths

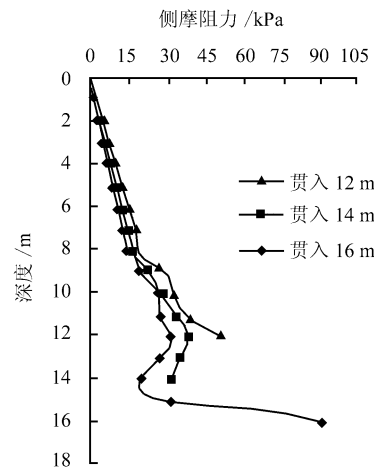


图 4 不同贯入深度时桩侧滑动摩阻力分布情况
Fig.4 Friction distribution of different penetration depths

压桩时桩侧滑动摩阻力的退化效应是明显的, 因此在压桩力的模拟计算时必须加以考虑。静态下侧阻力 $\tau = \sigma_r \tan \phi + c$, 桩体动态贯入过程中 c 值非常小忽略不计, 因此可见侧阻退化效应主要有以下两方面原因: ①径向应力 σ_r 的减小; ②桩土摩擦角 ϕ 的减小。通过计算时桩侧土单元与桩底之间的距离来体现侧阻的退化效应, 采用以下公式:

$$\tau = \tau_{\max} \left(\frac{h-z}{D} \right)^{-m} \quad (13)$$

式中: $\tau_{\max}$ 为桩第一次经过该单元时的摩阻力; m 为退化因子。

4 压桩力的计算

4.1 桩身无侧阻部分的确定

沉桩时因桩身横向晃动,使得浅层土体与桩身之间产生裂缝,加上在超孔隙水压力作用下孔隙水的润滑作用,此段的桩侧滑动摩阻力非常小,通常情况下可忽略不计称为脱离区,桩身侧摩阻力计算时可不考虑此段的摩擦作用。脱离区 h_1 的长度受入土总深度、土的初始状态、土层性质等影响,约为 $(0.15 \sim 0.3)h$, 本文取 $h_1 = 0.2h$ [11]。

4.2 压桩力的确定

静压桩匀速压入时属于稳态贯入,压桩力等于沉桩阻力,见式 (14)。沉桩阻力由桩侧总阻力和桩端阻力组成,如图 5 所示。

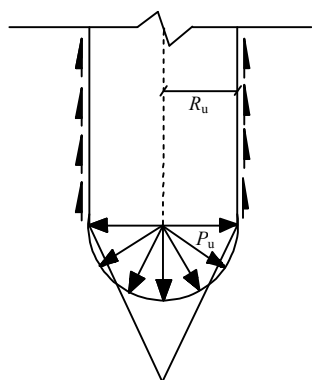


图 5 沉桩阻力示意图
Fig.5 Sketch of jacking force

$$Q = Q_s + Q_p \quad (14)$$

将除去桩尖以外桩身与土的作用看作滑动摩擦,考虑侧阻退化效应以及脱离区 h_1 的影响,当桩贯入深度 h 小于临界深度时可求得桩侧摩阻力 Q_s 的值,此处不考虑超孔隙水压力的影响。

$$Q_s = 2\pi R_u \int_{0.2h}^h \sigma_{Ru} \tan \delta \left(\frac{h-z}{D} \right)^{-m} dz \quad (15)$$

式中: δ 为桩与土的滑动外摩擦角; 将 $r = R_u$ 代入由球孔扩张和源-源假设理论推导得出的式 (11), 即可获得 σ_{Ru} 的值,

将桩端模拟看作半个球面,由球孔扩张理论可求得桩端阻力:

$$Q_p = P_u \pi R_u^2 \quad (16)$$

式中: P_u 由式 (3) 求得; R_u 为桩径,如果是方桩

可进行等面积代换。

5 试验对比

试验地点为山西太原,场地属晋中盆地西北部地区,属汾河冲积平原,后经汾河冲刷改造地貌,地势相对平坦,地表以下具有比较厚的粉土层。试验用混凝土方桩桩截面尺寸为 $350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$, 桩长 7.0 m , 采用全液压式静力压桩机压入,各深度时的压力值可由液压系统的油压换算得到。试验场地内 $0 \sim 7.7 \text{ m}$ 土层为粉土,重度 $\gamma = 19.3 \text{ kN/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 24^\circ$, 黏聚力 $c = 26 \text{ kPa}$ 。利用 Matlab6.5 强大的编程和图象处理功能进行理论值计算,与试验测试数据的对比情况如图 6 所示。

对比发现,深度 $0 \sim 3 \text{ m}$ 范围内计算值明显大于实测值, 3 m 以下二者基本吻合。分析认为,地面以下一定范围内土体受压桩机移动等外部影响较大,此范围内土体的实际状态与勘察时所确定的 c 、 φ 值有较大误差,直接影响到理论分析的精确度。相比之下,较深处土体在施工前基本不受扰动,所以此范围内理论值与实测值吻合较好。建议根据施工条件,通过调整退化因子 m 等方法适当对浅层土体的压桩力计算值进行修正,另文讨论。

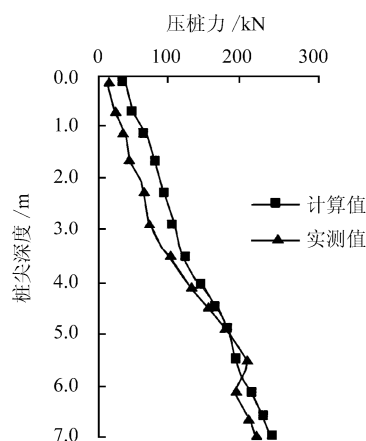


图 6 计算值与实测值的对比情况
Fig.6 Comparison between calculation and test values

6 结 论

(1) 建立了静压桩压桩力问题的实用模拟计算公式。把桩体的贯入模拟为一系列球孔的连续扩张,相比柱形孔扩张更符合贯入的实际状态。通过现场试验证明,桩侧滑动摩阻力的退化效应是明显的,并提出了退化效应公式,进而建立了压桩力的模拟计算公式。

(2) 充分利用 Matlab6.5 强大的计算和图象处

理功能进行了山西某工程理论值的计算, 所得压桩力曲线与现场实测曲线吻合较好, 证明基于球孔扩张理论和侧阻力退化效应的压桩力模拟计算公式是合理可行的。

参考文献

- [1] VESIC A C. Expansion of cavity in infinite soil mass[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 1972, 98(3): 265—289.
 - [2] YU H S, HOULSBY G T. Finite cavity expansion in dilatant soil: Loading analysis[J]. *Geotechnique*, 1991, 41(2): 173—183.
 - [3] COLLINS I F, PENDER M J, WANG Y. Cavity expansion in sands under drained loading conditions[J]. *International Journal Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1992, 16 (1): 3—23.
 - [4] SALGADO R. Analysis of penetration resistance in sands [D]. California: University of California, 1993.
 - [5] COLLINS I F, YU H S. Analysis of penetration resistance in sands[J]. *International Journal Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1996, 20 (7): 489—516.
 - [6] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999: 262—266.
 - [7] 张明义. 层状地基上静力压入桩的沉桩过程及承载力的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
 - [8] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. *Geotechnique*, 1981, 37(3): 301—320.
 - [9] 李月健. 土体内球形空穴扩张及挤土沉桩机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
 - [10] HEEREMA E P. Heather as an illustration of friction fatigue[J]. *Ground Engineering*, 1980, 13: 15—37.
 - [11] 张明义, 邓安福. 静压桩贯入地基的球孔扩张-滑动摩擦计算模式[J]. *岩土力学*, 2003, 24(5): 701—705.
- ZHANG Ming-yi, DENG An-fu. A spherical cavity expansion-sliding friction calculation model on penetration of pressed-in piles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(5): 701—705.

广东省岩土力学与工程学会 2009 年学术大会（第一号会议通知）

（2009 年 11 月 广州）

主办单位: 广东省岩土力学与工程学会 **承办单位:** 广州市建筑科学研究院

协办单位: 华南理工大学 中山大学 广州大学

协助单位: 广东省岩土力学与工程学会基础工程专业委员会 广东省岩土力学与工程学会测试与监测技术专业委员会 广东省岩土力学与工程学会地基处理专业委员会 广东省岩土力学与工程学会环境岩土工程专业委员会 广东省岩土力学与工程学会基坑工程与锚固注浆技术专业委员会 广东省岩土力学与工程学会隧道与非开挖工程专业委员会

会议主题: 广东省的经济建设飞速发展, 各类基础设施工程处于空前发展时期。在地下空间开发利用、交通建设、水利水电开发、围海造地、防灾减灾、环境保护及许多涉及岩土工程的领域中不断涌现出新的挑战难题, 我省岩土工程界的学者和工程师们在解决这些技术难题的研究和实践中, 近年来在学术与工程方面都取得了引人瞩目的成果。为了及时总结和推介这些成果, 广东省岩土力学与工程学会决定于 2009 年 11 月下旬举办学术大会, 为我省同行提供一次岩土学研究成果和岩土工程实践经验的交流机会。学术大会的主题为“广东岩土工程的学术研究和科技创新”。欢迎本学会会员和从事岩土力学与工程的科研院所、管理机构和设计、施工、检（监）测、监理等企事业单位的专业技术与管理人员参加并积极撰稿。本次大会还将配合学会各专业委员会的换届工作, 采取大会与小组相结合方式, 由各专业委员会分专题组织学术交流。

会议专题: 1. 地基与基础工程的新技术、新工艺、新材料、新设备 2. 岩土工程测试与监测技术的开发与应用 3. 地基处理的理论研究新进展与实践 4. 边坡治理工程及环境岩土工程的研究 5. 深基坑支护技术的研究及地下空间开发利用 6. 隧道、管线非开挖施工技术与工程实践 7. 其他岩土力学与岩土工程问题

论文出版: 论文将由大会学术委员会组织评审, 会同《岩石力学与工程学报》编辑部一起优选其中 20 篇刊登在《岩石力学与工程学报》（核心期刊、EI 收录源刊）的正刊上, 其余通过评审的论文将在《广州建筑》的正刊及增刊上发表。论文格式请参照《岩石力学与工程学报》投稿要求（登陆《岩石力学与工程学报》网站: <http://www.rockmech.org>, 点击“投稿须知”一栏, 下载论文模板), 文章篇幅一般不超过 6 000 字。

重要日期:

1. 2009 年 5 月 30 日以前提交论文全文（拟在《岩石力学与工程学报》上发表的文章应在 5 月 20 日前提提交论文全文）。
2. 2009 年 6 月 30 日发出论文采用通知和修改意见。
3. 2009 年 7 月 30 日以前提交修改后的论文全文。

论文提交方式:

E-mail: gzibse@pub.guangzhou.gd.cn, cuicui80311@163.com

纸质版 邮寄地址: 广州市白云大道北 833 号建研大厦 510 室 邮编: 510440

联系人: 李向翠 联系电话: 020-86335306 传真: 020-8633530