DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.06.36

成层土中静力触探锥头阻力分析

陈刚,黄沛

(上海理工大学土木工程系,上海 200093)

摘 要:为了解决成层土静力触探锥头阻力沿深度变化的问题,在经典球孔扩张理论的基础上,给出了考虑土体剪 胀性、不同土层参数影响的同心分层球孔扩张解答。通过比较同心分层与水平分层土体球孔扩张压力变化规律的 相关性,提出当探头位于土层分界面时,周围土体的变形可视为在另一种均质土中的球孔扩张,得到了锥头阻力沿 深度变化的估算方法。结果表明:该方法与现有几种方法相比更为直观、精确;双层土情况下的估算值与模拟值较 为接近,而夹层土情况下估算值与模拟值存在一定的误差。

关键词:静力触探;成层土;球孔扩张理论;锥头阻力

中图分类号:TU441 文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0204-05

Analysis of cone tip resistance in layered soil

CHEN Gang, HUANG Pei

(Department of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to investigate the variation rule of cone tip resistance along depth in layered soil, a spherical cavity expansion solution in concentrically layered soil is developed based on the classical cavity expansion theory. The influence of dilation angle and the parameters of different soil layers is considered. By comparing the cavity expansion in concentrically and horizontally layered soil, here it is assumed that when the probe is located in the interface of soil layers, the deformation of surrounding soil can be regarded as a spherical cavity expansion in another kind of homogeneous soil. Based on this assumption, a simple evaluation method of cone tip resistance along the depth is obtained. The results show that this method can provide a more intuitional and accurate result compared with several existing methods. In the case of two-layer soil, the estimates are close to the finite element method results, but there is a certain deviation in the case of thin-layer soil.

Key words: static cone penetration; layered soil; spherical cavity expansion theory; cone tip resistance

1 研究背景

静力触探试验具有连续性好、可靠性强、适用范 围广等优点,被广泛应用于岩土工程勘察领域。其 试验数据可用于划分土层、辨别土性以及确定土体 参数等方面^[1]。由于天然土体是由性质各异的不 同土层组成,在利用双桥静力触探锥头阻力数据划 分土层时,需要考虑超前、滞后深度的影响^[2]。然 而目前对于成层土静力触探锥头阻力沿深度的变化 问题缺乏有效的理论解释,导致只能通过经验或半 经验方法来确定,具有严重的地区限制。

不论采用理论、试验还是数值模拟的方法,分析

成层土中静力触探机理都是一件非常复杂的问题。 Ahmadi 等^[3]采用有限元模拟的方法分析土体分层 对 CPT 结果的影响,并提出一种用于修正薄砂层锥 头阻力的参数;Xu Xiangtao 等^[4]基于 Plaxis 模拟双 层土球孔扩张,拟合得到扩张压力比与球心离土层 分界面距离的归一化关系式,与试验结果能较好吻 合。Walker 等^[5]通过 ABAQUS 软件模拟了双层、多 层土体中锥头贯入过程,分析了锥头阻力随刚度指 数、夹层土厚度的变化。

李月健等^[6]采用体积权重的方法分析静压桩 临界深度与最小厚度,方法简单易行。李波等^[7]基 于压缩机理,推导出极限锥头阻力与临界深度的解

收稿日期:2017-05-11; 修回日期:2017-07-02

作者简介:陈刚(1980-),男,河南南阳人,硕士,实验师,主要从事土木工程教学与科研工作。

(4)

析解。周瑜等^[8]根据 Mindlin 解提出超前深度的确 定方法,并应用到土层划分中,与实际情况对比验证 了方法的准确性。宋玲等^[9]对旋压入式静力触探 的贯入进行分析,推导了锥尖阻力与扭矩的理论解 答。李鹏等^[10]模拟静力触探贯入过程,分析了锥头 周围土体的径向应力,提出径向应力影响范围为4 ~5D。以上研究成果也存在一定局限性,这主要是 由于缺乏理论分析支持,从而限制了在工程中的推 广与应用。

球孔扩张理论是目前静力触探理论研究的常用 方法之一。本文在 Mo 等^[11]基础上给出了基于统 一强度屈服准则的同心分层球孔扩张解答,并将理 论解答应用于成层土锥头贯入过程中阻力的估算。 该方法能够考虑土层分界面两侧土体参数对超前、 滞后深度的影响。

2 模型的建立与求解

2.1 力学模型

图 1 为同心分层土体中球孔扩张示意图。在孔 壁压力 p_a (应力单位均为 MPa)的作用下,孔周土体 发生屈服,球孔从初始孔径 a₀ 扩张至 a (单位为 m),外层土体 B 由内径 b₀ 扩张至 b (单位为 m)。土 体 A 和土体 B 的弹性区与塑性区分别以 c₄ 和 c₈ (单位为 m)为界。土体被假定为各项同性理想弹 塑性体,不考虑土体自重,土中作用有初始应力 p₀。 由于土体 B 可采用初始孔径 b₀ 的均质土球孔扩张解 答^[12],对于这部分推导已有详细过程,本文不再赘 述,仅给出内层土体 A 的扩张压力推导过程。



2.2 土体 A 弹性区解答 球孔周围土体满足如下平衡微分方程:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = 0 \tag{1}$$

式中: $\sigma_r, \sigma_{\theta}$ 分别为径向和切向应力, MPa。 弹性区物理方程:

$$\varepsilon_r = -\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r}, \ \varepsilon_\theta = -\frac{u}{r}$$
 (2)

式中: $\varepsilon_r \ \varepsilon_{\theta}$ 分别为径向和切向应变;u为任一点径 向位移,m;r为该点扩张后的半径,m。

将弹性力学中球对称问题的相关解答与方程式 (2)代入平衡方程(1),利用位移边界条件,得到弹 性区应力解答:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \Big[(1+\mu)D_1 - \\ & (2-4\mu)\frac{D_2}{r^3} \Big] + p_0 \\ \sigma_\theta &= -\frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \Big[(1+\mu)D_1 + \\ & (1-2\mu)\frac{D_2}{r^3} \Big] + p_0 \end{aligned}$$
(3)

式中: E 为弹性模量; µ 为泊松比。

$$D_{1} = \frac{(c_{A} - c_{A0})c_{A}^{2} - (b - b_{0})b^{2}}{c_{A}^{3} - b^{3}};$$
$$D_{2} = \frac{(c_{A0}b - c_{A}b_{0})c_{A}^{2}b^{2}}{c_{A}^{3} - b^{3}};$$

2.3 土体 A 塑性区解答
 土体 A 服从统一强度准则:
 σ_r - ασ_θ = γ

式中:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2(1+n)(1+\sin\varphi) + mn(\sin\varphi - 1)}{[2(1+n) - mn](1-\sin\varphi)} \\ y = \frac{4(1+n)c\cos\varphi}{[2(1+n) - mn](1-\sin\varphi)} \end{cases}$$

φ为土体 A 内摩擦角; c 为粘聚力, MPa; n 为反映中 间主剪应力影响的权系数; m 为中主应力与大小主 应力平均值之比。

联立平衡微分方程(1)和屈服准则(4),有:

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{y}{\alpha - 1} - M \cdot r^{-\frac{2(\alpha - 1)}{\alpha}} \\ \sigma_{\theta} = -\frac{y}{\alpha - 1} - \frac{M}{\alpha} \cdot r^{-\frac{2(\alpha - 1)}{\alpha}} \end{cases}$$
(5)

式中: *M* 为积分常数,可通过边界条件确定。 塑性区采用非相关联流动法则,有:

$$\frac{\dot{\varepsilon}_{r}^{p}}{\dot{\varepsilon}_{\theta}^{p}} = \frac{\dot{\varepsilon}_{r} - \dot{\varepsilon}_{r}^{e}}{\dot{\varepsilon}_{\theta} - \dot{\varepsilon}_{\theta}^{e}} = -\frac{2}{\beta}$$
(6)

式中: $\beta = (1 + \sin\psi)/(1 - \sin\psi)$; ψ 为土体 A 剪胀 角; ε_{i}^{p} 、 ε_{a}^{p} 分别为径向、切向塑性应变。

积分并考虑初始边界条件,得到:

$$(\beta + 2)(1 - 2\mu)p_0]$$
(7)

根据大变形理论,塑性区有:

$$\varepsilon_r = -\ln\left(\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}r_0}\right), \ \varepsilon_\theta = -\ln\left(\frac{r}{r_0}\right)$$
(8)

式中: r_0 为塑性区任意一点的初始半径,m;在扩张 过程中由 r_0 扩张至 r_o

将公式(5)、(8)代入公式(7)得到:

$$\ln\left[\left(\frac{r}{r_0}\right)^{2/\beta} \cdot \frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}r_0}\right] = \ln(\chi) + \delta \cdot M \cdot r^{-\frac{2(\alpha-1)}{\alpha}} (9)$$

式中:

$$\chi = \exp\left\{\frac{(\beta+2)(1-2\mu)[y+(\alpha-1)p_0]}{\beta E(\alpha-1)}\right\}$$
(10)

$$\delta = \frac{\left[\left(\beta - 2\mu\right)\alpha + 2\left(1 - \mu - \mu\beta\right)\right]}{E\alpha\beta}$$
(11)

将式(9) 分离变量并积分,整理后得:

$$\frac{\chi}{\gamma(-M_1)^{\gamma}} \left(c_{A0}^{\frac{\beta+2}{\beta}} - r_0^{\frac{\beta+2}{\beta}} \right) = \int_{p_{e_A} + \frac{\gamma}{a-1}}^{\zeta} \mathrm{e}^{\xi\delta} \cdot \zeta^{-1-\gamma} \mathrm{d}\zeta$$
(12)

式中:
$$\zeta = -M \cdot r^{-\frac{2(\alpha-1)}{\alpha}}, \gamma = \frac{\alpha(\beta+2)}{2(\alpha-1)\beta^{\circ}}$$
则塑性区任意一点的位移表达式可以写为:
 $u = r - r_0$

$$= r - c_A \left[\left(\frac{c_{A0}}{c_A} \right)^{\frac{\beta+2}{\beta}} - \frac{\gamma}{\chi} \Lambda(r) \right]^{\frac{\beta}{\beta+2}}$$
(13)

$$\Lambda(r) = \sum_{n=0}^{\infty} \begin{cases} \frac{2(\alpha-1)\delta^{n}\ln\left(\frac{c_{A}}{r}\right)}{n!\alpha\left(p_{c_{A}}+\frac{y}{\alpha-1}\right)^{-\gamma}} & n = \gamma\\ \frac{\delta^{n}\left(p_{c_{A}}+\frac{y}{\alpha-1}\right)^{\gamma}\left(c_{A}^{-n-\gamma}-r^{n-\gamma}\right)}{n!(n-\gamma)} & n \neq \gamma \end{cases}$$

$$(14)$$

球孔扩张压力
$$p_a$$
 与静力触探锥头阻力 q_c 的关系:
 $q_c = \begin{cases} p_a/(1 - \sin \varphi) & 无黏性土 \\ p_a + \sqrt{3}s_u & 黏性土 \end{cases}$
(15)

式中:s_u为土体不排水抗剪强度,MPa。

3 计算与分析

本文解答能够充分考虑两种土体参数的影响, 若土体 A、B 物理力学参数取值相同,则可退化到文 献[12]中的解答。

3.1 双层土情况

为了分析锥头阻力随深度变化的过程,将探头 周围土体变形视为球孔扩张,采用 ABAQUS 有限元 软件,选取表1 中的土体参数,建立如图2 所示的双 层土球孔扩张模型。

通过改变 b_0 的值,分别给出不同深度位置水平 分层双层土球孔扩张压力模拟值与同心分层土体球 孔扩张解答对比结果,如图 3 所示。从图 3 中可以 看出,由于边界条件不同,同心分层土体球孔扩张解 答在 $b_0/D = 0$ 处间断,与模拟值存在极大差异,不 能给出平滑、可靠的锥头阻力层间过渡。然而该解 答可以部分反映球孔位于上层或下层土体时的扩张 压力变化规律。



图 2 双层土球孔扩张模型简图(单位:m)

表1 双层土参数

土体类型	E/MPa	μ	c∕MPa	$\varphi/(\circ)$	$\psi/(\circ)$
土体 A	30	0.2	0.04	14	4
土体 B	10	0.2	0.02	10	2



图 3 双层土球孔扩张压力

图4给出了球孔位于水平分层双层土不同深度 位置的扩张压力曲线。当球孔位于较硬土层中时, 随扩张率的增大,球孔扩张压力呈现先增加后减小 的趋势;当球孔位于较软土层中时,随扩张率的增大,球孔扩张压力逐渐增大,并逐渐接近 $b_0/D = 0$ 曲线(球心位于土层交界面,D为球孔直径)。此 外,当 $b_0/D = 0$ 时,扩张压力曲线与 $b_0/D = \pm \infty$ 曲 线的变化规律相同,都是在短暂地上升后迅速达到 稳定值。因此,本文假设当探头贯入到土层交界面 时,探头周围的土体变形可视为另一种均质土 C 中 的球孔扩张过程。



图 4 水平分层双层土球孔扩张压力曲线

根据上述分析,本文提出一种水平分层土体球 孔扩张压力随深度变化的估算方法。该方法将探头 穿透水平分层土体界面的过程分为两部分,如图 5 所示。

(1)当球心位于土层交界面时,视为在另一种 均质土体 C 内的球孔扩张;(2)当球心位于土层交 界面上、下时,视为外侧土体为均质土体 C 的同心 分层球孔扩张,通过这种方式反映上、下不同软硬程 度土层对扩张压力的影响。在均质土体 C 的参数 选择方面(除弹性模量),近似取两种土层参数的平 均值,而弹性模量取值为 $E = E_1 \cdot E_2/(E_1 + E_2)$ 。

为了验证文本估算方法的准确性,将本文估算 得到的扩张压力曲线与现有几种方法做了比较,如 图 6 所示。在较软土层内, Xu Xiangtao $\overset{(4)}{=}$ 的拟合 公式与模拟值十分接近,而本文估算方法与李月健 等^[6]的方法均有一定误差,其中本文方法的误差更 小;在硬土层内,3种方法的计算结果均相差不大, 但与模拟值仍存在一定差距。同时也可以看出,3 种方法都能反映由较硬土层进入较软土层的超前深 度大于由较软土层进入较硬土层的超前深度的现 象。本文估算所得超前、滞后深度略大于模拟结果, 这主要是由于本文方法仅对土体边界条件进行近似 处理而没有给出恰当修正。在这几种方法中,Xu Xiangtao 等^[4]的拟合公式较为准确但在应用中存在 局限性,并且缺乏理论支持,李月健等^[6]的方法存 在较大误差,不易解决实际问题。本文的估算方法 不仅有理论支持、能反映上下土层的影响,而且与模 拟结果较为接近。

3.2 中间夹硬(软)层情况

对于夹层土情况,也可以采用这种方法,其估算 过程与双层土情况相比不仅繁琐而且精度较低。

夹层土情况下,本文估算结果与有限元模拟结 果的比较如图7所示。



3208.

从图 7 中可以看出,本文估算结果在 $b_0/D = 0$ 以及 b_0/D 较大时出现较大误差。这主要是由于夹 层土情况的土体边界条件与双层土情况相比更为复 杂,而本文对该问题并没有做出适当修正。

4 结 论

本文提出的成层土情况静力触探锥头阻力估算 方法与现有方法相比,直观易懂,与模拟值较为接 近,并得到如下主要结论:

(1)本文方法基于同心分层土体球孔扩张解答,能够反映上、下土层性质对锥头阻力的影响。

(2)由较硬土层进入较软土层的超前深度大于 由较软土层进入较硬土层的超前深度。

(3)在估算双层土情况锥头贯入阻力时本文方 法较为准确,而在估算夹层土情况时存在较大误差, 这主要是由于成层土边界条件过于复杂,为减小误 差,有待于进一步完善。

参考文献:

- [1] 马海鹏,陈祖煜,于 沭. 上海地区土体抗剪强度与静力 触探比贯入阻力相关关系研究[J]. 岩土力学, 2014, 35
 (2): 536-542.
- [2] 付超. 静力触探实验在土层划分中的应用研究[J]. 信阳 师范学院学报(自然科学版) 2013, 26(2): 305-308.

(上接第203页)

参考文献:

- [1] 崔德山,项伟,曹李靖,等. ISS 减小红色黏土结合水膜的试验研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(6):944-949.
- [2] 陈 琼. 黏土吸附结合水动力学模型及机理研究[D]. 武 汉:中国地质大学,2013.
- [3] 房营光,谷任国.结合水对软黏土流变性质影响的试验 研究[J].科学技术与工程,2007,7(1):73-78.
- [4] 刘清秉,项 伟,崔德山.离子土固化剂对膨胀土结合水
 影响机制研究[J].岩土工程学报,2012,34(10):1887 1895.
- [5]梁健伟,房营光,谷任国.极细颗粒黏土渗流的微电场效应分析[J].岩土力学,2010,31(10):3043-3050.
- [6] 张忠胤.关于结合水动力学问题[M].北京:地质出版 社,1980.
- [7] Singh P N, Wallender W W. Effects of adsorbed water layer in predicting saturated hydraulic conductivity for clays with kozeny – carman equation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(6):829 – 836.
- [8] 张炳峰,赵坚,陶月赞. 饱水黏性土释水响应压力规律

- [3] Ahmadi M M, Robertson P K. Thin layer effects on the CPT qc measurement[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1302 - 1317.
- [4] Xu Xiangtao, Lehane B M. Pile and penetrometer end bearing resistance in two-layered soil profiles [J]. Géotechnique, 2008, 58(58): 187 - 197.
- [5] Walker J, Yu H S. Analysis of the cone penetration test in layered clay[J]. Géotechnique, 2010, 6001(12):939-948.
- [6] 李月健,陈云敏,凌道盛.静力压桩临界深度和最小厚度 探讨[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 584-587.
- [7] 李 波,王铁良,栾茂田.砂土静力触探锥头阻力增量弹 塑性解[J].武汉理工大学学报,2010,32(6):6-10.
- [8] 周 瑜,晏鄂川,李 辉,等.基于静力触探曲线的土体量化 分层方法[J].工程勘察, 2011, 39(3): 24-26.
- [9] 宋 玲,刘奉银,李 宁. 旋压人土式静力触探机制研究 [J]. 岩土力学, 2011,32(S1): 787-792.
- [10] 李 鹏,许再良,李国和,等. 软土地基静力触探机理分 析[J]. 铁道工程学报, 2012(6): 37-44+49.
- [11] Mo P , Alec A M, Yu H . Elastic plastic solutions for expanding cavities embedded in two different cohesive – frictional materials [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2014, 38 (9): 961-977.
- [12] Yu H S, Houlsby G T. Finite cavity expansion in dilatant soils: loading analysis[J]. Géotechnique, 1991,42(4): 649-654.

研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S1):3203 -

- [9] 刘勇健,符纳,林辉.冲击荷载作用下海积软土的动力 释水规律研究[J]. 岩土力学,2014,35(S1):71-77.
- [10]项伟,崔德山,刘莉.离子土固化剂加固滑坡滑带土的试验研究[J].地球科学一中国地质大学学报,2007,32
 (3):397-402.
- [11] 欧光照,吴益平,王增帅,等. 黏土介质地下水非达西渗 流的研究进展[J]. 安全与环境工程,2013,20(5):140 -143.
- [12] 王洪新.考虑土对水吸附性的渗流破坏理论与应用 [J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(3):563-571.
- [13]李广信.关于有效应力原理的几个问题[J].岩土工程 学报,2011,33(2):315-320.
- [14] 叶为民,黄伟,陈宝,等.双电层理论与高庙子膨润土的体变特征[J].岩土力学.2009,30(7):1899-1903.
- [15] Mitchell J K, Madsen F T. Chemical effects on clay hydraulic conductivity [C]//. Geotechnical Practice for Waste Disposal, 1987, New York: ASCE Geotechnical Special Publication, 1987:87-116.