

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.018

取土器贯入土体引起土体扰动的理论分析

左文荣,吴跃东,李治国,李 宁

(河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要:为了研究取土器贯入对土体产生的扰动影响,基于贯入问题的半无限空间特性,根据半无限空间内球孔扩张产生的变形和应变解,推导出取土器贯入土体过程中产生的应变公式.分析了取土器管中心线上土体单元应变变化和其影响因素,并与 Balign 的结果进行了比较.结果表明,取土器贯入土体对其内部土体产生了扰动影响,其中对两端土体扰动相对较大,中间土体相对较小.取土器径厚比、长径比均对贯入过程中土体单元的应变产生影响.

关键词:圆孔扩张法 半无限空间 取土器 贯入 扰动

中图分类号: TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2009)06-0702-05

在勘察中要采取‘原状土样’供实验室内土工试验测定土的物理力学性质之用.取土的质量对岩土工程性质评价的可靠性起着关键作用.然而取土引起的扰动会使土体的变形特性发生显著的改变,其中取土器贯入土中会对土体产生较大的扰动,而目前国内对于这一方面的理论研究还很少.

圆孔扩张法(cavity expansion method)首先由 Bishop 等^[1]提出,用于解决金属压痕问题;Gibson^[2]将球形孔扩张法用于计算软土中桩基承载力,随后 Gibson 等^[3]又将柱形孔扩张法用于解释旁压试验的结果;Chadwick^[4]提出了在金属及理想土体中的球形孔扩张问题的通解. Butterfield 等^[5]首先提出用平面应变条件下柱形孔扩张来解决桩体的贯入问题. Palmer^[6]利用柱形孔扩张法,对非完全塑性的饱和土体中旁压试验的结果进行了分析.

用球孔扩张来模拟取土器的贯入过程是分析贯入问题的一种重要方法,但球孔扩张的基本解答是在无限空间下得到的,而贯入问题是半无限空间问题,在现有计算方法中对贯入问题的半无限特性的分析并不充分,因此本文从贯入问题的半无限特性入手,推导了半无限空间取土器贯入产生的位移解及应变解.

1 半无限空间内取土器贯入土体引起土体的应变解

1.1 半无限空间球孔扩张位移场表达式

半无限土体中球孔扩张引起的土体位移为^[7]

$$S_r = \frac{a^3}{3} \left(\frac{r}{R_1^3} + (3 - 4\nu) \frac{r}{R_2^3} - \frac{6rz(z+h)}{R_1^5} \right) \quad (1)$$

$$S_z = \frac{a^3}{3} \left(\frac{z-h}{R_1^3} - (3 - 4\nu) \frac{z+h}{R_2^3} + \frac{2z}{R_2^3} - \frac{6z(z+h)^2}{R_1^5} \right) \quad (2)$$

其中

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (z-h)^2} \quad R_2 = \sqrt{r^2 + (z+h)^2}$$

式中: r ——计算点的径向坐标; z ——计算点的竖向坐标; a ——扩张球孔半径; h ——扩张球孔距离地表的竖向距离; ν ——泊松比.

由于土体饱和不可压缩,取 $\nu = 0.5$,得

$$S_r = \frac{a^3}{3} \left(\frac{r}{R_1^3} + \frac{r}{R_2^3} - \frac{6rz(z+h)}{R_1^5} \right) \quad S_z = \frac{a^3}{3} \left(\frac{z-h}{R_1^3} + \frac{z-h}{R_2^3} - \frac{6z(z+h)^2}{R_2^5} \right)$$

1.2 求解思路

a. 取土器贯入土体是空间轴对称的过程,因此可以简化为二维坐标来计算.

b. 将两直径为取土器壁厚的球孔对称置于半无限土体中同时扩张,计算任意位置土体应变值,如图 1 所示.

c. 为了得到整个贯入过程中的位移场和应变场,将任一微段的管体等效为同体积的扩张球孔并以一定速度向下运动.

1.3 基本假定

(a)土体为均质线弹性体,满足胡克定律 ;(b)土体变形为小变形,且饱和不可压缩 ;(c)忽略土体的自重作用.

1.4 模型建立及求解过程

如图 1 所示,在半无限土体内两直径为 a 的球孔扩张,坐标分别为 $(-D/2, h)$ 和 $(D/2, h)$,其中 D 为取土器管径.则坐标为 (r, z) 的任意一点在两孔同时扩张时产生的位移(取 $r > 0, \nu = 0.5$)为

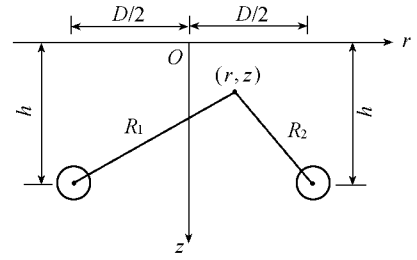


图 1 计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation

$$S_r = \frac{a^3}{3} \left(\frac{r + D/2}{R_1^3} + \frac{r + D/2}{P_1^3} - \frac{6(r + D/2)z(z + h)}{P_1^5} + \frac{r - D/2}{R_2^3} + \frac{r - D/2}{P_2^3} - \frac{6(r - D/2)z(z + h)}{P_2^5} \right) \quad (3)$$

$$S_z = \frac{a^3}{3} \left(\frac{z - h}{R_1^3} + \frac{z - h}{P_1^3} - \frac{6z(z + h)^2}{P_1^5} + \frac{z - h}{R_2^3} + \frac{z - h}{P_2^3} - \frac{6z(z + h)^2}{P_2^5} \right) \quad (4)$$

其中

$$R_1 = \sqrt{(r + D/2)^2 + (z - h)^2} \quad P_1 = \sqrt{(r + D/2)^2 + (z + h)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{(r - D/2)^2 + (z - h)^2} \quad P_2 = \sqrt{(r - D/2)^2 + (z + h)^2}$$

土体中任意一点产生的相应应变为

$$\epsilon_{r0} = \frac{\partial S_r}{\partial r} = \frac{a^3}{3} \left[\frac{(z - h)^2 - 2(r + D/2)^2}{R_1^5} + \frac{(z + h)^2 - 2(r + D/2)^2}{P_1^5} - 6z(z + h) \frac{(z + h)^2 - 4(r + D/2)^2}{P_1^7} + \frac{(z - h)^2 - 2(r - D/2)^2}{R_2^5} + \frac{(z + h)^2 - 2(r - D/2)^2}{P_2^5} - 6z(z + h) \frac{(z + h)^2 - 4(r - D/2)^2}{P_2^7} \right] \quad (5)$$

$$\epsilon_{z0} = \frac{\partial S_z}{\partial z} = \frac{a^3}{3} \left[\frac{(r + D/2)^2 - 2(z - h)^2}{R_1^5} + \frac{(r + D/2)^2 - 2(z + h)^2}{P_1^5} - (z + h) \frac{(3z + h)(r + D/2)^2 + (r + D/2)^2(h - 2z)}{P_1^7} + \frac{(r - D/2)^2 - 2(z - h)^2}{R_2^5} + \frac{(r - D/2)^2 - 2(z + h)^2}{P_2^5} - (z + h) \frac{(3z + h)(r - D/2)^2 + (r - D/2)^2(h - 2z)}{P_2^7} \right] \quad (6)$$

对任一微段的取土管体可以等效为同体积的扩张球孔(图 2),即

$$\frac{1}{4} \pi t^2 dh = \frac{4}{3} \pi a_0^3$$

式中: t ——取土管壁厚; a_0 ——等效球孔半径.可得

$$\frac{1}{3} a_0^3 = \frac{1}{16} t^2 dh$$

对于长度为 L 的取土管压入土体的过程,则可以表示为对 h 进行从 0 到 L 的积分,得到相应的解答为

$$\epsilon_r = \frac{t^2}{16} \int_0^L \epsilon_{r0} dh \quad \epsilon_z = \frac{t^2}{16} \int_0^L \epsilon_{z0} dh$$

定义函数 $f(x) = \frac{1}{(x^2 + 1)^{3/2}}, g(x) = \frac{1}{(x^2 + 1)^{1/2}}, h(x) = \frac{x^5}{(x^2 + 1)^{5/2}}, l(x) =$

$\frac{x^3}{(x^2 + 1)^{3/2}}$,整理积分可得

$$\epsilon_r = \frac{t^2}{16} \left\{ \frac{1}{(r + D/2)^2} \left[f\left(\frac{r + D/2}{L + z}\right) - 2g\left(\frac{r + D/2}{L + z}\right) \right] - \frac{z}{(r + D/2)^3} \left[\frac{18}{5} h\left(\frac{r + D/2}{L + z}\right) - \frac{18}{5} h\left(\frac{r + D/2}{z}\right) + 2l\left(\frac{r + D/2}{L + z}\right) - 2l\left(\frac{r + D/2}{z}\right) \right] + \frac{1}{(r - D/2)^2} \left[f\left(\frac{r - D/2}{L + z}\right) - 2g\left(\frac{r - D/2}{L + z}\right) \right] - \frac{z}{(r - D/2)^3} \left[\frac{18}{5} h\left(\frac{r - D/2}{L + z}\right) - \frac{18}{5} h\left(\frac{r - D/2}{z}\right) + 2l\left(\frac{r - D/2}{L + z}\right) - 2l\left(\frac{r - D/2}{z}\right) \right] \right\} \quad (7)$$

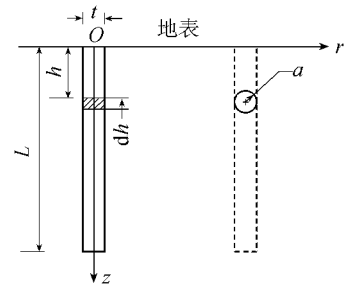


图 2 取土贯入等效作用示意图

Fig. 2 Equivalent diagram of sampling penetration

$$\epsilon_z = \frac{t^2}{16} \left\{ \frac{1}{(r + D/2)^2} \left[g\left(\frac{r + D/2}{L \pm z}\right) - f\left(\frac{r + D/2}{L - z}\right) - \frac{4}{3}f\left(\frac{r + D/2}{L + z}\right) + f\left(\frac{r + D/2}{z}\right) \right] - \frac{z}{(r + D/2)^3} \left[h\left(\frac{r + D/2}{L + z}\right) - h\left(\frac{r + D/2}{z}\right) - l\left(\frac{r + D/2}{L + z}\right) + l\left(\frac{r + D/2}{z}\right) \right] + \frac{1}{(r - D/2)^2} \left[g\left(\frac{r - D/2}{L \pm z}\right) - f\left(\frac{r - D/2}{L - z}\right) - \frac{4}{3}f\left(\frac{r - D/2}{L + z}\right) + f\left(\frac{r - D/2}{z}\right) \right] - \frac{z}{(r - D/2)^3} \left[h\left(\frac{r - D/2}{L + z}\right) - h\left(\frac{r - D/2}{z}\right) - l\left(\frac{r - D/2}{L + z}\right) + l\left(\frac{r - D/2}{z}\right) \right] \right\} \tag{8}$$

定义函数： $F_r(x) = \frac{1}{x^2} \left[f\left(\frac{x}{L \pm z}\right) - 2g\left(\frac{x}{L \pm z}\right) \right]$, $G_r(x) = \frac{1}{x^3} \left[\frac{18}{5}h\left(\frac{x}{L + z}\right) - \frac{18}{5}h\left(\frac{x}{z}\right) + 2l\left(\frac{x}{L + z}\right) - 2l\left(\frac{x}{z}\right) \right]$,
 $F_z(x) = \frac{1}{x^2} \left[g\left(\frac{x}{L \pm z}\right) - f\left(\frac{x}{L - z}\right) - \frac{4}{3}f\left(\frac{x}{L + z}\right) + f\left(\frac{x}{z}\right) \right]$, $G_z(x) = \frac{1}{x^3} \left[h\left(\frac{x}{L + z}\right) - h\left(\frac{x}{z}\right) - l\left(\frac{x}{L + z}\right) + l\left(\frac{x}{z}\right) \right]$, 得
$$\epsilon_r = \frac{t^2}{16} [F_r(r \pm D) + zG_r(r \pm D)] \qquad \epsilon_z = \frac{t^2}{16} [F_z(r \pm D) + zG_z(r \pm D)] \tag{9}$$

2 取土器贯入土体扰动分析

2.1 扰动分析的理论方法比较

取土器贯入土体会引起土样的扰动,因此受到了很多岩土工作者的关注,并试图通过室内试验方法来获取原状土样的性质指标.多年以来,很多学者在总结工程经验和众多试验观察的基础上发展了多种获取原状土样的方法,以减小取样扰动的影响.然而研究大多集中在通过试验来评价原状条件和取样条件下对应力和孔压的影响的区别上.应变路径法的提出为取土器贯入产生的扰动影响提供了一种有效的方法.

Baligh 等^[8]提出的 SPM 法是作用于无限空间体中的,而实际的贯入过程是作用于半无限空间介质中的,其违背了自由表面无约束的边界条件.本文提出的应变求解方法正是基于半无限空间提出的,与无限空间问题相比,增加了地表的自由边界.由于边界的存在,使得无限球孔扩张的简单球对称问题变化为空间轴对称问题,大大增加了求解的难度.半无限球孔扩张位移问题实质上是在土体内有球孔向外扩张,土体存在自由表面,需要满足的边界条件为:地表竖向应力为零,同时地表剪应力也为零.

与应变路径法相比,本文从地表的自由边界这一实际情况考虑来分析取土器贯入土体产生的扰动影响,从而更有效评价和改进现存的取土方法.

2.2 中心线上土体单元应变变化分析

经验表明,位于圆柱形原状样中心线上的土体单元扰动最小.为了减小扰动对土样工程性质的影响,室内试验通常使用垂直、快速、准静态推入的光滑取土管获取的圆柱形原状样的中心线或其附近土样进行试验.因此研究中心线上土体单元的应变变化对于分析扰动影响是十分重要的. Baligh 等^[9]通过应变路径法分析了中心线上土体单元的应变变化过程,认为土样中心线上的土体单元经历了初始压缩、压缩-拉伸和再压缩 3 个不同的阶段. 厚径比对扰动的影响很大,径厚比为 40~47 的谢尔比薄壁取土器的扰动比径厚比为 6.4 的厚壁取土器要大得多.

图 3 为在长径比 $L/D = 10$ 时,径厚比 $D/t = 10, 20, 40$ 下的中心线上土体单元应变情况,与 Baligh 等^[8]的结论基本一致.取土管内中心线上土体单元从上至下应变为拉伸、压缩、拉伸、压缩.取土管下端管底水平面上出现较大的压缩应变值,然后逐渐减小并出现较小范围的拉伸应变.随后大部分土体处于压缩状态,这是由于取土管切入过程对内侧土体为压缩作用产生的.上端土体为拉伸状态.

与 Baligh 等^[8]的结论不同之处有:(a)取土管上端土体出现拉伸应变(文献[8]该处土体处于压缩状态),取土管上端的土体无约束作用,故有一定隆起,所以上端土体出现拉伸是正确的;(b)取土管内土体出现拉应变,并且拉伸应变随着 D/t 的变化而产生明显的变化;(c)取土管下端管底水平面上出现较大的压缩应变,并且零应变出现在其上方,而 Baligh 等^[9]认为在该处为零应变.

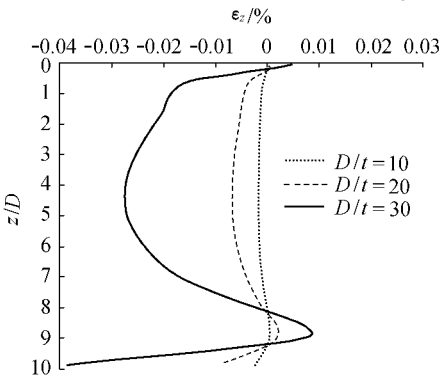


图 3 中心线土体单元在不同 D/t 时的应变变化
Fig. 3 Variation of strain of soil elements at centerline with different D/t

2.3 中心线上土体单元竖直应变影响因素分析

从本文推导的公式(9)中可以看出,中心线上竖直应变为取土器的壁厚 t 、管径 D 、管长 L 及土体单元的位置 z 共 4 个因素的函数,也可认为其影响因素为径厚比 D/t 、长径比 L/D 和相对位置 z/D 这 3 个因素.

从图 3 可看出,整个取土管在贯入过程中对管内范围上下两端的土体单元扰动最大,中间部分最小,而且随着厚径比的减小两端的应变值明显减小,中间部分的应变值同时也减小.因此,管径越大,壁厚越小,土体的应变值也就越小,取土器贯入过程中对土体的扰动也就越小,在取原状土样时应使用薄壁取土器.

管径和长度对贯入过程中产生的应变也有较大的影响,但并不是长度和直径越大产生的应变就越小.文献[9-10]提出长径比这一参数将这两者的影响综合考虑,也许可以看出比较明显的趋势.图 4 为 $D/t = 10$, $L/D = 10, 20, 40$ 时的中心线上土体单元应变变化情况.从图 4 可以看出,当 $L/D = 10$ 时,轴线上土体单元的竖向应变相对较小.因此,当要减小扰动的影响时,对不同的土体要采用适度的长径比.

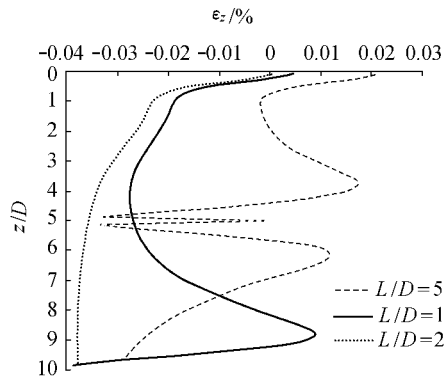


图 4 中心线土体单元在不同 L/D 时的应变
Fig. 4 Variation of strain of soil elements at centerline with different L/D

3 结 论

a. 考虑实际取土时地表的自由边界,基于半无限空间球孔扩张应变场,推导出更加符合实际情况的取土管贯入土体过程中产生的变形和应变公式.

b. 位于圆柱形原状样的中心线上的土体单元扰动最小,对以中心土样为重点的取土来说,选用中心线上土体单元的应变变化来分析扰动影响是可以的.取土管内中心线上土体单元从上至下应变为拉伸、压缩、拉伸、压缩.取土管下端管底水平面上出现较大的压缩应变值,然后逐渐减小至零并出现较小范围的拉伸应变.随后大部分土体处于压缩状态,取土管上端土体为拉伸状态.

c. 取土管中心线上土体单元应变的影响因素为径厚比 D/t 、长径比 L/D 和相对位置 z/D .整个取土管在贯入过程中对管内范围上下两端土体单元的扰动最大,中间部分最小,而且随着厚径比的减小两端的应变值明显减小,中间部分的应变值同时也减小.所以用薄壁取土器有明显的优越性.长径比对贯入过程中产生的应变也有较大的影响,对不同的土体要采用适度的长径比.

当然,由于土性复杂,采用理论研究的成果还较少,本文仅仅是一些初步研究,考虑的影响因素不多,采用了一些假设条件,建立的模型还有很多不足之处,今后还需要进一步深入研究.

参考文献:

[1] BISHOP R F, HILL R, MOTT N F. The theory of indentation and hardness tests[J]. Proc Phys Soc, 1945, 57: 147-159.
[2] GIBSON R E. Discussion to “the bearing capacity of screw piles. and screwcrete cylinders” by Wilson, G [J]. Journal of the Institution of Civil Engineers, 1950, 34: 382-383.
[3] GIBSON R E, ANDERSON W F. In-situ measurement of soil properties with the pressuremeter [J]. Civil Engineering and Public Works Review, 1961, 56: 615-618.
[4] CHADWICK P. The quasi-static expansion of a spherical cavity in metals and ideal soils [J]. Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1959, 12(1): 52-71.
[5] BUTTERFIELD R, BANERJEE P K. Application of electro-osmosis to soils: part 2 (Civil Engineering Research Report, No. 31) [R]. Southampton, U.K.: Department of Civil engineering, Southampton Univ., 1968: 56-60.
[6] PALMER A C. Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay: a simple interpretation of the pressuremeter test [J]. Geotechnique, 1972, 22(3): 451-457.
[7] 朱宁. 静力压桩引起桩周土体变形的理论分析 [D]. 南京: 河海大学, 2005.
[8] BALIGH M M, AZZOUZ A S, CHIN Chung-tien. Disturbance due to “ideal” tube sampling [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(7): 739-757.

[9] 魏汝龙. 软黏土取土技术及其改进 [J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6) : 113-125. (WER Ru-long. Sampling techniques of soft clay and its improvement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6) : 113-125. (in Chinese))

[10] 吴跃东, STAVAREN M T. 高质量连续取土技术研究 [J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 1) : 275-278. (WU Yue-dong, STAVAREN M T. Research on high quality continuous sampling techniques [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(S1) : 275-278. (in Chinese))

Theoretical analysis of disturbance of soils caused
by penetration of soil samplers

ZUO Wen-rong, WU Yue-dong, LI Zhi-guo, LI Ning

(Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : In order to determine the disturbance effects on soils of the penetration of soil samplers, an equation for the strain induced by sampling penetration was derived according to the deformation and strain of a half-space spherical cavity expansion based on the half-space characteristics of penetration problems. The strain history and factors of soil elements at the centerline of the sampling tube were analyzed, and they were compared with Baligh 's results. The results show that sampling penetration has a disturbance effect on the soils in the sampler. The disturbance effect on the soils is larger at the two ends and smaller in the center. The ratios of D/t and L/D of the sampler influence the strain of the soils caused by sampling penetration.

Key words : cavity expansion method ; half-space ; soil sampler ; penetration ; disturbance

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244, CN32-1439/TV, ISSN1006-7647, 双月刊, A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办,是全国中文核心期刊,中国科技核心期刊,全国水利系统优秀期刊,华东地区优秀期刊,江苏省优秀期刊. 主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文,主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等,适合与水利、水电、水科学、水工程、水资源、水环境有关的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读.

本刊由邮局发行,邮发代号 28-244,2010 年每期定价 10 元,全年 6 期共计 60 元. 可在全国各地邮局订阅,也可直接向编辑部订阅.

编辑部地址 南京市西康路 1 号 《水利水电科技进展》编辑部

邮政编码 210098

电话/传真 025-83786335

E-mail :jz@hhu.edu.cn

网址 :http://kkb.hhu.edu.cn/jz/index_jz.htm