

半无限体静压沉桩挤土位移弹性解答

杨振坤, 陈有亮, 崔纪飞

(上海理工大学 土木工程系, 上海 200093)

摘要:以现有半无限土体中球孔扩张挤土位移的解答为基础,运用球体体积和圆柱体体积相等的原则,通过线性叠加法,模拟了静压沉桩贯入土体的动态过程,得到静压沉桩挤土位移的简化计算公式,并对土体弹性模量和泊松比等因素对挤土位移的影响进行了分析。结果表明:随着弹性模量的增加,挤土位移显著减小,且在较硬土体中压桩会对周围建筑和管线产生较为严重的危害;泊松比对挤土位移的影响较小,但总体来说,随着泊松比的不断变大,产生的挤土位移也越大。文中解答半无限体条件下的静压沉桩以及相关扩孔问题的设计和施工具有一定的指导意义和实用价值。

关键词:静压沉桩;球孔扩张;叠加法;挤土位移

中图分类号:TV16; TU473.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)04-0215-05

Elastic solution of squeezing displacement of single pile jacked in semi - infinite soil

YANG Zhenkun, CHEN Youliang, CUI Jifei

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

Abstract: Based on the solutions of existing semi infinite soil ball hole expansion extrusion soil displacement, using the principle of sphere volume and the volume of a cylinder be equal, by linear elastic superposition method, the paper simulated the soil dynamic process of static pressure sinking pile penetration and got the simplified calculation formula of jacked pile soil displacement, and analyzed the elastic modulus and Poisson's ratio and other factors on the extrusion effect of soil displacement. These results indicated that the elastic modulus has an obvious influence on squeezing displacement of single pile jacked. With the increase of elastic modulus the, soil compaction displacement will significantly decrease; The medium pressure pile in the hard soil will have a more serious damage to the surrounding buildings and pipelines. The effect of Poisson's ratio on soil compaction displacement is less, but the larger the Poisson's ratio, the larger the soil compaction displacement will be. The outcome can provide certain guiding significance for the design and construction of static piling under the condition of semi - infinite soil and the related issue of cavity expansion.

Key words: static pressure sinking pile; spherical cavity expansion; superposition method; squeezing displacement

1 研究背景

静压桩由于具有质量好,价格低,无污染,施工效率高等优点,被广泛应用于工程实际中,特别是软土地基上各类建筑所广泛采用的桩型。但静压桩由于属于排土置换桩,在沉桩时会对桩周土体产生巨

大的侧向挤压作用。如果处理措施采取不当,会对周边环境造成不利影响,严重时还会引发工程事故。由于对此认识不足而造成的工程事故屡见不鲜。如上海某高层建筑施工时,由于附近民房基础埋深较浅,因打桩造成基础开裂,居民不得不被迫搬迁,打桩附近的地下煤气管道也因受土体受挤位移而破

收稿日期:2016-01-07; 修回日期:2016-04-20

基金项目:上海市自然科学基金项目(14ZR1428200);中德合作科研项目(ppp)

作者简介:杨振坤(1987-),男,山东鄄城人,硕士研究生,主要从事岩土力学及基坑工程科研工作。

通讯作者:陈有亮(1966-),男,河北故城人,博士,教授,从事岩石力学及基坑工程教学与科研工作。

裂,造成泄露和火灾^[1]。静压桩产生的挤土效应以及对周边环境的影响主要有以下几个方面:①在压桩区一定范围内产生水平挤土位移;②对邻近建筑物、构筑物以及地下管线等产生一定的影响,甚至破坏;③沉桩过程中,土体中会产生较高的孔隙水压力,影响土体强度,从而对桩基的承载力产生不利影响。因此,研究静压桩沉桩机理以及挤土效应,对预估沉桩施工影响以及指导压桩设计都具有重要的现实意义。

采用球孔扩张理论研究静压桩的挤土效应已经在国内外得到了广泛的应用。国内外的研究学者在理论分析^[2-3],现场及模型试验^[4-5]以及数值模拟^[6-7]等方面都取得了丰硕的成果。尤其在理论分析方面,已经发展到可以考虑土体的弹塑性、剪胀性、大变形等特性,并运用非相关联的流动法则来分析无限土体中的球(柱)形孔的扩张问题。同时半无限土体中的球孔扩张理论近年来也得到了较快的发展。Sagasetta^[8]创造性的提出运用镜像法,通过对称的源或汇来求解存在水平地表边界条件的半无限土体中的扩孔问题。相比于扩孔问题研究取得的大量成果,对于如何利用扩孔理论来模拟沉桩过程的研究仍很不充分,如何进一步求出沉桩任一深度时影响范围内各点的挤土位移仍然不足。李月健等^[9-10]曾用源-源法来分析半无限土体中的扩孔问题,并采用 Boussinesq 解答修正地表应力,然后运用沿深度积分的方法求解沉桩挤土位移,但由于用该解答修正地表应力有局限,积分过程繁琐,得到的结果并不合理,且不适合工程应用。

要得到合理且便于工程实际应用的沉桩挤土位移解答,一方面需要有合理简洁的半无限体中球孔扩张解答为基础,另一方便需要简单有效的方法利用球孔扩张来模拟沉桩的过程。本文利用文献[11]提出的半无限体球孔扩张解答为基础,采取球体体积和等桩径圆柱体体积相等的原则,得到了适于工程实际运用的沉桩挤土位移的简化解答。

2 半无限体中扩孔问题挤土位移解答

2.1 基本假定

- (1) 土体为均质线弹性体,满足胡克定律;
- (2) 土体变形为小变形;
- (3) 忽略土体自重作用;
- (4) 土体饱和,各向同性。

2.2 半无限土体中的求解

文献[11]中采用 Mindlin 求解半无限体问题的

方法,将地表视为对称面,在对应位置同时作用基本的无限土体球孔的扩张,如图 1 所示。将两个球孔解答进行叠加,并转换到柱坐标系下,得到相应的应力和位移的解答。

$$\sigma_r^0 = \frac{a^3 p}{2} \left(\frac{2}{R_1^3} - \frac{3(z-h)^2}{R_2^5} + \frac{2}{R_2^3} - \frac{3(z+h)^2}{R_2^5} \right) \quad (1)$$

$$\tau_r^0 = \frac{3a^3 p}{2} \left(\frac{r(z-h)}{R_1^5} + \frac{r(z+h)}{R_2^5} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_z^0 = \frac{a^3 p}{2} \left(\frac{3(z-h)^2}{R_1^5} - \frac{1}{R_1^3} + \frac{3(z+h)^2}{R_2^5} - \frac{2}{R_2^3} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_\theta^0 = -\frac{a^3 p}{2R_1^3} - \frac{a^3 p}{2R_2^3} \quad (4)$$

$$u_r^0 = \frac{a^3 p}{4G} \left(\frac{r}{R_1^3} - \frac{r}{R_2^3} \right) \quad (5)$$

$$u_z^0 = \frac{a^3 p}{4G} \left(\frac{z-h}{R_1^3} - \frac{z+h}{R_2^3} \right) \quad (6)$$

式中: $\sigma_r^0, \tau_r^0, \sigma_z^0, \sigma_\theta^0$ 分别为对称球孔叠加后柱坐标下土体内的径向应力、剪应力、竖向应力、环向应力; u_r^0, u_z^0 分别为对称球孔叠加后柱坐标下土体内的径向位移、竖向位移。 $R_1 = \sqrt{r^2 + (z-h)^2}$; $R_2 = \sqrt{r^2 + (z+h)^2}$, h 是球孔中心到地表边界的距离。因此,在地表边界 $z=0$ 处会产生竖向应力,大小为:

$$\sigma_z^0|_{z=0} = \frac{a^3 p}{R_0^3} \left(3 \frac{h^2}{R_0^2} - 1 \right) \quad (7)$$

式中: $R_0 = \sqrt{r^2 + h^2}$

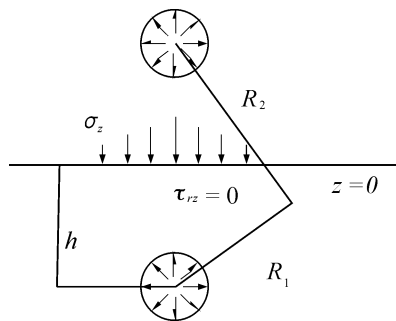


图1 半无限体球孔叠加及修正示意图

为消除此竖向应力,需要将与此 σ_z 大小相等、方向相反的竖向应力作用于地表,从而产生一个新的轴对称的空间问题,边界条件如图 1 所示,为:

$$\text{地表正应力: } \sigma_z|_{z=0} = -\frac{a^3 p}{R_0^3} \left(3 \frac{h^2}{R_0^2} - 1 \right)$$

$$\text{地表剪应力: } \tau_{rz}|_{z=0} = 0$$

对于这样一个边界条件的弹性问题,可以采用

轴对称的调和应力函数得到解答。取应力函数 $f =$

$\frac{a^3 p}{2GR_3}$, 满足 $\nabla^4 f = 0$, 得到的位移的解答为:

$$u_r' = \frac{a^3 p}{2G} \left[- (1 - 2\nu) \frac{r}{R_2^3} + z \frac{3r(z+h)}{R_2^5} \right] \quad (8)$$

$$u_z' = \frac{a^3 p}{2G} \left[- 2(1 - \nu) \frac{r}{R_2^3} - z \left(- \frac{1}{R_2^3} + \frac{3r(z+h)^2}{R_2^5} \right) \right] \quad (9)$$

式中: u_r', u_z' 分别为地表应力修正在土体内产生的径向位移、竖向位移。

将此应力函数的解答和上述球孔解答进行叠加, 即得到最终半无限土体中球孔扩张产生的位移的解答:

$$u_r = \frac{a^3 p r}{4GR_1^3} + \frac{a^3 p r}{4GR_2^3} + \frac{a^3 p}{2G} \left[- (1 - 2\nu) \frac{r}{R_2^3} + z \frac{3r(z+h)}{R_2^5} \right] \quad (10)$$

$$u_z = \frac{a^3 p(z-h)}{4GR_1^3} + \frac{a^3 p(z+h)}{4GR_2^3} - \frac{a^3 p}{2G} \left[- 2(1 - \nu) \frac{r}{R_2^3} + z \left(- \frac{1}{R_2^3} + \frac{3(z+h)^2}{R_2^5} \right) \right] \quad (11)$$

3 半无限体沉桩挤土位移解答

3.1 求解思路

静压沉桩时, 桩身为圆柱体, 而真实源和影像源为球体, 因此需要将球形体积向圆柱形转化。采取球体体积和等桩径圆柱体体积相等的原则, 求出某一扩张球体当量桩身圆柱的高度 δH , 即:

$$U_r = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{a^3 p r}{4GR_{1i}^3} + \frac{a^3 p r}{4GR_{2i}^3} + \frac{a^3 p}{2G} \left[- (1 - 2\nu) \frac{r}{R_{2i}^3} + z \frac{3r(z+h_i)}{R_{2i}^5} \right] \right\} \quad (15)$$

$$U_z = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{a^3 p(z-h_i)}{4GR_{1i}^3} + \frac{a^3 p(z+h_i)}{4GR_{2i}^3} - \frac{a^3 p}{2G} \left[- 2(1 - \nu) \frac{r}{R_{2i}^3} + z \left(- \frac{1}{R_{2i}^3} + \frac{3(z+h_i)^2}{R_{2i}^5} \right) \right] \right\} \quad (16)$$

式中: U_r, U_z 分别为沉桩产生的水平和竖向挤土位移; h_i 为第 i 个圆孔的深度。

$$n = \frac{L}{\delta H}, \quad \delta H = \frac{4}{3}R, \quad R_{1i} = \sqrt{r^2 + (z-h_i)^2}$$

$$R_{2i} = \sqrt{r^2 + (z+h_i)^2}$$

3.3 本文解答分析

本文推导是以半无限土体中球孔扩张理论为基础的, 运用球体体积和圆柱体体积相等的原则, 通过线弹性的叠加法, 得到静压沉桩挤土位移的计算公式。本文的计算公式不仅可以得到沉桩完成时的挤

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \delta H \cdot \pi R^2 \quad (12)$$

$$\delta H = \frac{4}{3}R \quad (13)$$

上述计算表明一个从小孔扩张到 R_u 的球体, 相当于产生高度为 δH 的桩身长度, 也即一个球孔的扩张可以模拟桩体下沉 δH 的长度。因此可以计算得出桩体下沉 L 深度, 需要的球体个数:

$$n = \frac{L}{\delta H} \quad (14)$$

由此可以看出随着球孔扩张个数的不断增加, 可以模拟静压沉桩压桩的动态过程如图2所示。沉桩 L 长度过程中产生的挤土位移可以等效为 L 长度所需扩张球孔产生的挤土位移的叠加。

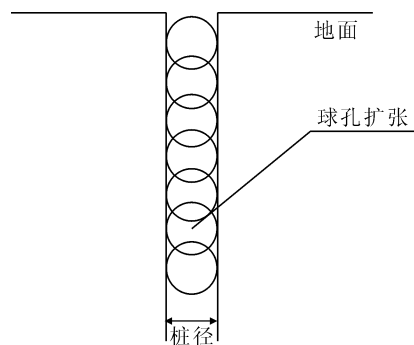


图2 球孔扩张模拟沉桩示意图

3.2 具体求解过程

利用上节所述的文献[11]求得的圆孔扩张挤土位移的解答, 把静压沉桩过程看成多个圆孔扩张叠加的结果, 可依据以下公式计算半无限体沉桩的挤土位移:

土位移, 而且还可以计算沉桩至任一深度时的挤土位移, 从而可以模拟桩体下沉的动态过程。同时, 本文是基于土体线弹性假设的基础上进行的推导, 得出的公式计算简单, 其中各参数以及物理量的意义明确, 且易于获得, 便于工程实际应用。

为了验证本文的计算结果的正确性, 作者运用本文公式对文献[12]中报道的工程实例进行了计算。该工程位于浙江省海盐青山核电厂, 所采用的静压桩直径为 600 mm, 桩长为 35 m, 压桩范围内土层的物理力学参数如表1所示。静力触探结果如图

3 所示。

表 1 土的物理力学参数

土层	土层 代码	层厚/ m	含水 量/m	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙 比	承载 力/kPa	比贯入 阻力/MPa
杂填土	MF	2.0					1.38
粉质粘土	SC	2.0	26.0	19.4	0.77	100	1.10
黏质粉土	SI	7.0	31.1	18.8	0.89	120	1.37
淤泥质粉 质黏土	CL	9.0	41.6	17.5	1.20	90	0.66
砂质粉土	SS	11.0	31.3	19.0	0.91	150	2.99
粉砂土	SA	10.0	29.8	18.7	0.86	156	3.53

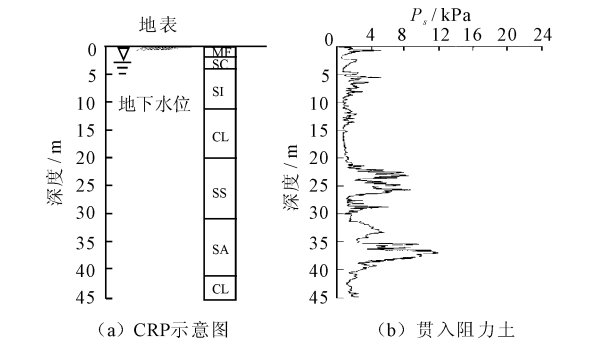


图 3 静力触探贯入阻力图

分别计算了桩体贯入 10、17、25、35 m 时土体沿装土深度方向的位移,并与文献[12]中的现场实测数据进行了对比,对比结果如图 4 所示。

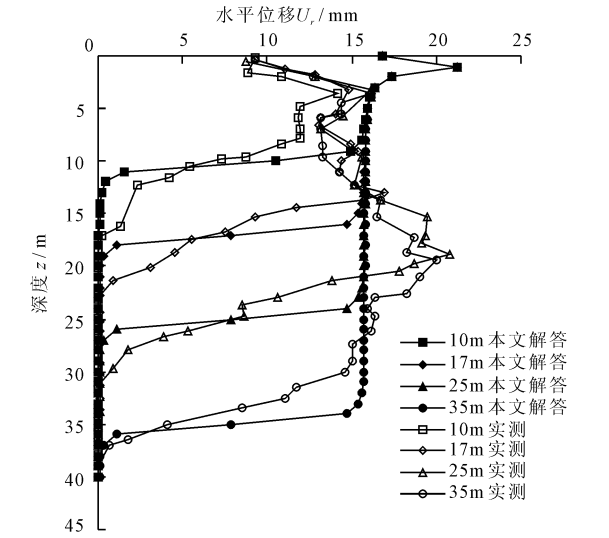


图 4 本文解答与文献[11]解答对比

从图 4 中可以看出,首先本文计算的在不同压桩深度所产生的水平挤土位移的变化规律与实测的挤土位移变化规律是相似的,即随着桩体的不断下沉,挤土位移逐渐沿深度方向上增大;其次,从图中还可以看出实测的水平挤土位移数值分布在本文理论计算值附近,可见本文计算的水平挤土位移的大

小与实测的数值较为接近,对压桩过程中产生的挤土位移起到了很好的预估的作用;最后,从图中还可以看出,理论计算值与实测数据并不完全一致,在有的土层大于理论计算值,在有的土层小于理论计算值,主要是因为本文计算过程中,将土体视为均质线弹性体以及忽略土体自重作用造成的,同时本文理论计算也未能考虑桩土体之间的摩擦作用,这也是造成理论解答和实测值差异的原因。

3.4 与模型试验结果对比

在文献[13]中,李镜培等采用室内模型试验,对均质地基中静力压桩单桩的贯入过程进行了研究,分析了桩周不同深度范围内的土体的位移变化规律,压桩过程距离桩体一定距离土体水平位移如图 5(b)所示。图 5(a)是本文对上节工程实例的计算结果。

对比图 5(a)和图 5(b),可以发现:

- (1)随着桩的不断贯入,本文计算结果与模型试验所得位移变化模式具有一致性,即随着桩的不断下沉,同一标高处土体的侧向位移不断增大,且大部分桩身范围内的径向位移基本相同。
- (2)对于不同的压桩深度,水平位移都会受地表的影响,且受地表影响的区域基本相同,因此对于同一个桩而言,入土深度越大,受地表影响的范围就越小;对于长度不同的桩而言,长桩地表影响所占比例要小于短桩。以上分析显示本文计算结果和模型试验结果较为符合,从侧面证明了本文结果的合理性。

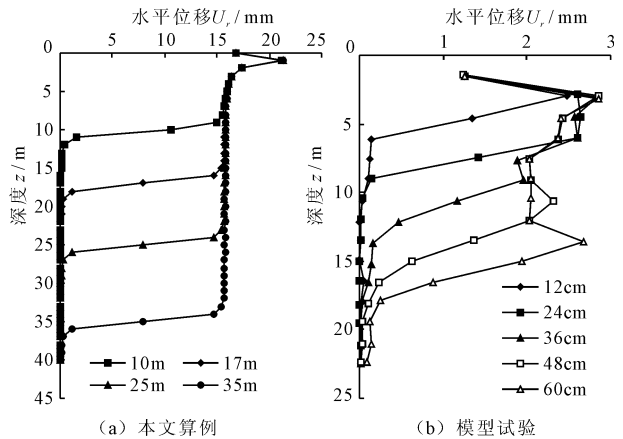


图 5 本文解答与模型试验对比

4 压桩挤土位移影响因素分析

从本文解答结果可以看出,本文解答不但能模拟沉桩的整个过程,还能充分考土层土体弹性模量和泊松比这两个土体最基本参数的影响,且这两个

因素也是实际工程中影响沉桩挤土位移的主要因素。因此,本节主要讨论弹性模量 E 和泊松比 ν 对挤土效应的影响。

4.1 不同弹性模量的影响

图 6 所示是依据本文计算公式,在不同深度设置不同的土体弹性模量计算的沉桩挤土位移结果。弹性模量的设置为:0 ~ 2 m 为 2 MPa;2 ~ 5 m 为 4 MPa;5 ~ 7 m 为 5 MPa;7 ~ 8.5 m 为 3 MPa;8.5 ~ 10 m 为 2 MPa。

由图 6 可知,弹性模量对沉桩侧向挤土位移影响明显,在由较软土层(弹性模量相对较小)进入较硬土层(弹性模量相对较大)时,挤土位移显著减小,这是由于土体弹性模量变大,其水平应变变小,因此挤土位移变小;反之,当桩体由较硬土层进入较软土层时,水平挤土位移也有明显的增加。同时,在靠近较硬土层的软弱土层部分,由于硬土层的存在,软弱土层的水平位移受到约束,限制了软土层的位移,其位移要明显小于均质土时的位移。

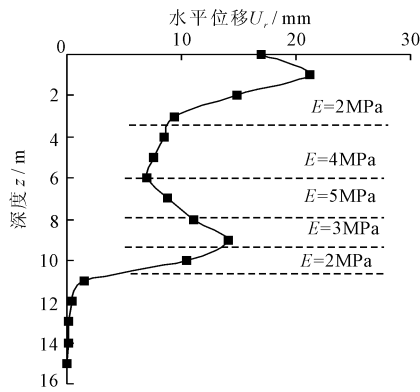


图 6 不同弹性模量 E 对挤土位移的影响

分析图 6 还可以看出,当桩进入硬土层或在较硬土体中压桩时,由于土体具有较大的弹性模量,产生相同的挤土位移,则需要更大的挤压力作用,压桩对周围环境产生的挤压作用也更大,对周围建筑物及管线的危害也就越大。因此,在硬土层中压桩施工时,应综合考虑,合理设计,采用预钻孔或开挖防挤槽等施工措施,保证施工顺利进行以及周围建筑物和管线安全。

4.2 泊松比的影响

图 7 是依据本文计算公式,计算了在不同泊松比情况下在均质土体中沉桩 10 m 所产生的水平挤土位移。3 种算例中泊松比的设置为: $\nu = 0.35$ 、0.4、0.45。

分析图 7 可得:不同泊松比下,沉桩产生的挤土位移模式是一致的,泊松比的变化对沿深度变化的

水平挤土位移有一定影响,总体来讲,泊松比越大,产生的挤土位移也越大,这是由于泊松比在一定程度上反映了土体的压缩特性,对于泊松比较大的土体,土体的体积变化较小,所以在等量压桩体积的情况下,会产生较大的挤土位移。

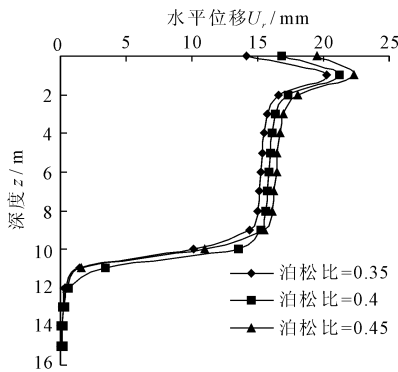


图 7 不同泊松比 对挤土位移的影响

5 结论与展望

本文在现有半无限土体中球孔扩张解答的基础上,运用球体体积和圆柱体体积相等的原则,通过线弹性的叠加法,模拟了静压沉桩的贯入过程,得到以下结论:

(1) 本文的计算公式既可以计算沉桩完成时的挤土位移,还可以计算沉桩至任一深度时的挤土位移,从而可以模拟桩体下沉的动态过程。本文解答为预估半无限体中静压沉桩产生的挤土位移提供理论参考。

(2) 就影响因素而言,随着弹性模量 E 的增加,挤土位移显著减小,且在较硬土体中压桩会对周围建筑和管线产生较为严重的危害;随着泊松比 的不断变大,产生的挤土位移也越大。

(3) 本文解答是基于土体线弹性假设的基础上的,未能考虑土体塑性、剪胀性等性质,因此与实际土体的变形特性仍有一定区别。且沉桩过程中桩土之间的相互作用(如摩擦等),本文解答也不能充分考虑,这也是今后的研究方向之一。

参考文献:

[1] 鹿群. 成层地基中静压桩挤土效应及防治措施[D]. 杭州:浙江大学,2007.
[2] 刘时鹏,施建勇,雷国辉,等. K_0 固结饱和土柱孔扩张问题弹塑性分析[J]. 岩土力学,2013,34(2):389-394+403.

曲线上能增大拟合的参数值,而不同的围压试验点位于拟合曲线以下,不同的动应力比能够比较好的吻合拟合曲线。通过考虑 3 种因素同样能较好的拟合曲线,能更进一步符合土层的实际应力状态。

参考文献:

- [1] 李进军. 交通荷载作用下饱和软黏土长期沉降分析[D]. 上海:同济大学,2005.
 - [2] 魏星,黄茂松. 交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J]. 岩土力学,2009,30(11):3342-3346.
 - [3] 郭世博. 交通移动荷载下软土地基变形特性试验研究及长期沉降预测[D]. 上海:同济大学.
 - [4] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, Transportation Research Board, Washington D C, 1975.
 - [5] Li D, Selig E T. Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering. 1996,122(12):1006-1013.
 - [6] Chai J C, Miura N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002,128(11):907-916.
 - [7] Sugiyama M, Hyodo M, Yamamoto Y. Undrained cyclic shear behavior of normally consolidated clay subjected to initial static shear stress[J]. Soils and Foundations, 1994,34(4):1-11.
 - [8] 周健,屠洪权,安原一哉. 动力荷载作用下软黏土的残余变形计算模式[J]. 岩土力学,1996,17(1):54-60.
 - [9] 刘明,黄茂松,柳艳华. 车振荷载引起的软土越江隧道长期沉降[J]. 岩土工程学报,2009,31(11):1703-1709.
 - [10] 刘明. 饱和软黏土动力本构模型研究与地铁隧道长期振陷分析[D]. 上海:同济大学,2006.
 - [11] 李进军,黄茂松,王育德. 交通荷载作用下软土路基累积塑性变形分析方法[J]. 中国公路学报,2006,19(1):1-5.
 - [12] 黄茂松,李进军,李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报,2006,28(7):891-895.
 - [13] 姚兆明. 饱和软土循环累积变形与交通荷载引起的长期沉降[D]. 上海:同济大学,2011.
-
- (上接第 219 页)
- [3] Ghandeharion A, Indraratna B, Rujikiatkamjorn C. Analysis of soil disturbance associated with mandrel-driven prefabricated vertical drains using an elliptical cavity expansion theory[J]. International Journal of Geomechanics, 2010,10(2):53-64.
 - [4] 周健,邓益兵,叶建忠,等. 砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报,2009,31(4):501-507.
 - [5] 韩文君,刘松玉,章定文. 荷载作用下土体气压劈裂效果试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(7):1951-1956.
 - [6] Guo Y, Hu J P, Zhang L Y. Finite-element analysis of multi-body contacts for pile driving using a hydraulic pile hammer[J]. Journal of mechanical engineering science, 2011,225(5):1153-1161.
 - [7] Zhang M, Tao Mingjiang. A parametric study on factors affecting ground vibrations during pile driving through finite element simulations[C]//The conference of geotechnical risk assessment and management,2011,138(224):931-938.
 - [8] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss, Geotechnique,1988,38(3):301-320.
 - [9] 李月健,陈云敏. 粘性土地基中群桩施工产生土体内的位移场[J]. 建筑结构学报,2001,22(3):88-91.
 - [10] 李月健,陈云敏. 粘性土中打桩引起的应力场及其对土体强度的影响[J]. 铁道学报,2001,23(4):88-93.
 - [11] 朱宁,施建勇,陈海丰. 一种半无限土体中圆孔扩张的分析方法[J]. 岩土力学,2006,27(2):257-260+267.
 - [12] 罗战友,夏建中,龚晓南,等. 压桩过程中静压桩挤土位移的动态模拟和实测对比研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1709-1714.
 - [13] 李镜培,李雨浓,张述涛. 成层地基中静压单桩挤土效应试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(6):824-829.