

⑨ 饱和粘土中静压桩沉桩机理及挤土效应研究综述

38-41, 59 陈文 施建勇 龚友平

孙邦宾 ✓

(河海大学岩土工程研究所 南京 210098) (淮阴市人防指挥办 江苏淮阴 223001)

TU43
TL1473.1

摘要 在分析饱和粘土中静压桩的贯入机理的基础上,对静压桩沉桩分析的圆孔扩张理论、应变路径法、有限元分析、滑移线理论和模型槽试验等五种方法逐一进行评述,并提出在传统的平面圆孔扩张理论上加以改进,采用准静态空间轴对称方程组对静压桩贯入过程进行模拟,从而得出土体位移、应力、初始超孔压的空间解析解,同时采用有限元分析、模型槽试验相互印证的研究方法。

关键词 饱和粘土;静压桩;挤土效应;圆孔扩张理论

桩基工程较多地采用打入桩施工,但其锤击和振动所产生的噪音、地层扰动、废气、漏油、烟火等公害问题愈来愈严重。在城市建设中,对公害污染的限制要求愈来愈高^[1],因此,静压桩以其振动小、噪音低、对环境影响小的优点,在我国越来越受到重视。静压桩在江、浙、沪、粤等沿海软土分布较广的地区以及人口密集的大城市的应用很广,取得了良好的效果,是一项很有发展潜力的施工技术。

就本质而言,静压桩属于挤土桩。虽然较之打入桩,静压桩的贯入过程要平稳得多,但它在贯入过程中将使下部土体侧向移动,地表隆起,因而不可避免地要对相邻建筑物产生影响,地基土的侧向位移和隆起现象必将对已入土的邻桩产生径向压力及垂直向拉拔力,从而使邻桩产生一系列不良后果,如桩身弯曲、倾斜、水平位移等,给工程带来不良影响^[2]。另外,先压入的桩将使地基土产生挤密作用,一方面使土体密实度增大,地基承载力增加;另一方面可能产生后续施工压桩力增大的负面影响。人们迫切需要对静压桩的沉桩机理及挤土效应有较为明确的认识。国外对挤土桩的研究较早,但主要注重于打入桩的研究,而对静压桩的研究甚少;国内的研究工作始于 80 年代初^[3],取得了一定的成果,但尚限于初步认识。因此,对粘性土中静压桩沉桩机理及挤土效应研究,不但有利于提高理论上的认识,而且对于估计静压桩的施工影响和指导设计具有现实意义。

1 饱和粘土中静压桩的贯入机理

静压桩施工时采用专用机架自重和配重或结构物自重,通过压梁或压柱将整个桩架自重和配重或

结构物自重反力,以卷扬机滑轮组或电动油泵液压方式施加在桩顶或桩身上。当施加给桩的静压力与桩的入土阻力达动态平衡时,桩在自重或静压力作用下逐渐压入地基土中。压桩过程中,沉桩速率一般保持在一定数值以内,故可将桩体贯入视为匀速直线运动。静压桩在贯入过程中造成了桩周土体的复杂运动,桩尖以下土体产生压缩变形,随着桩贯入压力的增大,当桩尖处土体所受压力超过其抗剪强度时,土体发生急剧变形而破坏,桩侧土体产生塑性流动(粘性土)或挤密侧移和拖带下沉(砂性土),桩尖下土体被向下和侧向压缩挤开,地表处,粘性土体会向上隆起,地面深处由于上覆土层的压力,土体主要向桩周挤开,使贴近桩周土体结构完全破坏,周围土体亦受较大的扰动影响,而桩身受到土体强大的法向抗力所引起的桩周摩擦力和桩尖阻力的抵抗。同时,对于饱和粘性土,由于瞬时排水固结效应不明显,桩体的贯入产生超静孔隙水应力,随后孔压消散、再固结和触变恢复,在桩周形成硬壳层^[1]。对于静压桩,由于其贯入过程近乎匀速,因此,从理论上讲,采用准静态条件下的静力平衡对其模拟是合适的。

2 静压桩沉桩机理及挤土效应的研究进展

国际上对于静压桩的研究方法大致可以分为圆孔扩张理论(cavity expansion method,简称 CEM)、应变路径法(strain path method,简称 SPM)、有限元分析法(finite element method,简称 FEM)、滑移线理论和模型槽试验五类。

2.1 圆孔扩张理论(CEM)

圆孔扩张理论首先假设土体是理想弹塑性体,

材料服从 Tresca 或 Mohr-Coulomb 屈服准则, 根据弹塑性理论给出无限土体内, 具有初始半径的柱形孔或球形孔, 被均匀分布的内压力 p 所扩张的一般解. 由于桩体贯入时, 一定深度处的土体逐渐出现半径为桩径的孔洞, 周围一定范围土体进入塑性状态, 因此, 一般采用柱形孔扩张来模拟除去靠近桩端和桩尖土体的变形情况^[4,5]. Butterfield 和 Banerjee^[5] 首先提出将平面应变条件下的柱形孔扩张用来解决桩体贯入问题. 他们假定: ①土是均匀的、各向同性的理想弹塑性材料; ②土体饱和、不可压缩; ③土体屈服满足 Mohr-Coulomb 强度准则; ④小孔扩张前, 土体具有各向等到的有效应力. 随着内压 p 的增大, 围绕柱形孔的柱形区域将由弹性状态进入塑性状态, 塑性区随 p 的增大而不断扩大, 以外土体仍保持弹性状态. 扩张过程如图 1 所示.

对于柱形孔扩张的平面应变轴对称问题, 在极坐标下, 平衡微分方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

塑性边界上满足 Mohr-Coulomb 屈服准则

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2C_u \quad (2)$$

边界条件为

$$r = R_u, \quad \sigma_r = p_u \quad (3)$$

按照土体体积不变的原理, 求出该微分方程的解答, 推出 σ_r 、 σ_θ 及径向位移 u_r 的表达式. 对于压桩引起的瞬时超孔隙水应力, 则采用亨克尔的孔压方程导出:

$$\Delta u = \beta \Delta \sigma_0 + \alpha \Delta \tau_0 \quad (4)$$

CEM 提出之后, 经过 Vesic^[4], Carter 等^[6], Randolph 等^[7]的发展, 已经成为解决沉桩对周围土体影响应用最为广泛的一种方法, 这与 CEM 形式简单、易于求解是密不可分的. CEM 具有以下优点: ①径向对称的平面应变假定将问题简化为一维问题, 未知变量数目很少; ②控制方程由一套复杂的偏微分方程减为一个一次微分方程, 可直接求解; ③由于求

解方法的简单性, 可以对该贯入问题的许多复杂方面进行考虑, 如大应变、高梯度、多重介质等.

近年来, CEM 还发展到可以考虑材料应变硬化、应变软化^[7~10]等, 这反映在土体本构模型的采用由简单的 Mohr-Coulomb 模型发展为可以考虑应变硬化的修正剑桥模型^[7]和应变软化的应力一次跌落模型^[11], 从而有利于考虑土体的实际变形特性, 如剪胀等. 这是 CEM 的一大进步. 国内的王启铜^[10]等提出考虑土体拉、压模量不同时的柱形孔扩张解答. 另外, 施建勇^[12]和蒋明镜^[11]等还拟将“损伤”概念引入沉桩研究中, 这也是 CEM 的发展方向之一.

但是, 应当指出, 经典的 CEM 具有一个很大的缺点, 即将一维的圆孔扩张解应用于桩体贯入这样一个三维轴对称问题, 它假设应力只与径向坐标 r 有关, 而与竖向坐标 z 无关, 忽略孔壁竖向摩擦力 τ_z 的影响. 然而, 如前所述, 沉桩过程中 τ_z 显然是存在的^[1], 它对土体中应力和位移必定要产生影响, CEM 对之未加考虑即予以忽略, 这是不恰当的. CEM 模拟静压桩沉桩有其合理的内核, 但尚存在上述问题, 应当在 CEM 的发展中对其进行改进.

2.2 应变路径法 (SPM)

为克服 CEM 的缺点, Baligh^[13]提出了应变路径法. 他假设土体变形可在不考虑本构关系的情况下, 推广对速度积分求得变形, 然后由微分求出应变. 将桩体贯入模拟为单个边界以速度 v 扩大的球形孔沿竖向匀速运动, 通过对应变路径的描述, 即三个偏应变 ε_i ($i=1, 2, 3$) 的分析, 从而得出桩体贯入工程中土体位移和应变的变化情况, 并得到了一些有意义的结论^[14]: ①发现桩周一定范围内土体存在“应变反转”和主应力旋转现象, 土体有可能由“压”变为“拉”, 这种现象将对应力和孔压产生显著影响, 而 CEM 忽略土单元的应变路径, 无法对其加以解释; ②证实了沉桩时土体可分为“塑性区”和“弹性区”两部分. CEM 对弹性区的应力和孔压估计较为合理; ③指出了考虑土体“扰动”后性质变化的重要性.

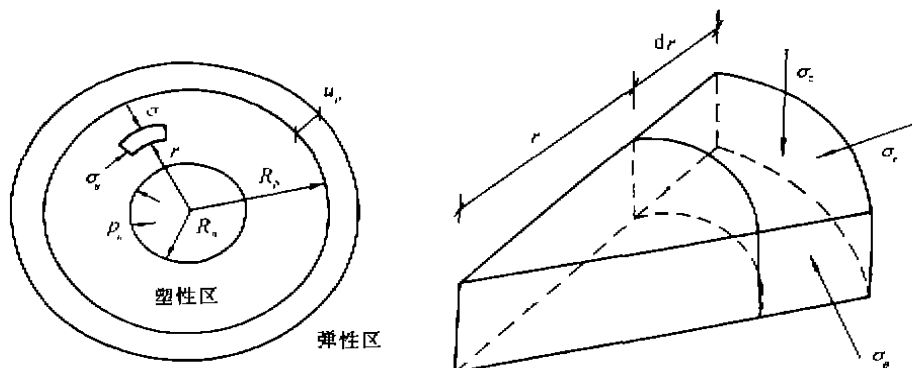


图 1 沉桩桩周应力、变形状态

较之 CEM, SPM 优点在于,一方面可以考虑竖向贯入过程中,土体变形与竖向坐标的关系;另一方面可以考虑匀速贯入的连续性。所以, Baligh 等人的研究有其独到之处,它可以给出贯入过程中土体应力、位移分布的大致情况。但是, SPM 也有其缺点,它本质上只是一种近似的方法,而且计算较为繁琐,可以将之与 CEM 联合起来考虑,互为补充。

2.3 有限单元法(FEM)

有限单元法广泛地用于桩基计算中,它是十分有力的计算工具。许多学者已将之引入桩体贯入过程分析中,桩体的有限单元分析有采用小应变和大变形模型两种类型。

a. 小变形分析。在小应变分析中,将桩体置入预先钻好的孔中,周围土体仍处于初始应力状态,然后进行增量的塑性破坏计算,并假定破坏荷载等于贯入阻力。该过程并非完全正确,因为在静力贯入中,在桩侧将产生很大的侧向应力。正如所料,所产生的桩侧应力将导致实际阻力比小应变结果要大。静力贯入问题的小应变研究首先由 de Borst 和 Vermeer^[15]给出, Griffiths^[16]对具有光滑表面的贯入仪阻力进行了分析。国内的周健采用变网格有限元对静压桩沉桩进行了数值模拟,得到了一些关于沉桩挤土效应和超孔压分布的成果^[17]。

b. 大变形分析。在以往的分析中,尤其是经典的 CEM 中,一般均基于小变形假设,但事实上,在桩体贯入过程中应变很大,靠近桩周的土体中应变可达 10%~20%^[13],呈现出材料与几何双重非线性,这时用小变形假设显然不合实际。而采用大变形有限元则有可能克服上述缺陷。在静压桩的沉桩机理及挤土效应研究中,为考虑土体材料、几何双重非线性,以及静力贯入对初始应力条件的影响,有必要采用大变形有限元。Banerjee 和 Fathallah^[18]发展了一套欧拉方程,通过应力变化率和应变变化率之间的关系,用有限元计算得出了沉桩过程中的应力和孔隙水应力。Sikora 等^[19]同样在假设大变形的拉格朗日方程基础上,用时间积分的方法得出其有限元解答。虽然 Banerjee 等人的工作克服了前人的研究中不考虑几何非线性的不足,但其所用的欧拉方法却很不方便,所以 Kioussis^[20]等对此提出了改进。近年来,国内的谢永利^[21]开展了土体固结大变形的研究,鲁祖统^[22]建立了空间轴对称问题考虑大变形和弹塑性耦合的有限元方程和采用修正 Lagrangian 算法的表达式,应用虚功原理推得了空间轴对称问题采用修正 Lagrangian 格式的 Biot 固结有限元方法,并对单桩压入饱和粘土中桩和土体变形情况进行了研究。

应该说,有限元在静压桩的沉桩机理及挤土效

应研究的分析中显示出很强的生命力。从理论上讲,有限元方法可在工程计算中较为通用,它可以全面地反映土体中的应力、位移、孔压情况。大变形有限元在理论上较为完美,但在现阶段,有限元模拟桩基贯入还存在以下实际问题:①贯入过程难以精确地模拟;②有限元计算精度严重依赖于本构模型的选用,以及参数的确定。而现有土工试验试样制备难度较大,模型参数确定的难度可想而知。试验中一般采用重塑土的土性指标来代替天然土的土性指标,而这两者差别很大,其带来的误差往往比不考虑大变形要大得多。

因此,对静压桩贯入的有限元模拟以及更广泛意义的沉桩过程(包括打入式、钻入式)的数值模拟作一些探索具有十分积极的意义。但是,将大变形有限元法的理论成果应用于实际分析,使其研究成果得到工程界的广泛接受,尚有待于进一步的探索。

2.4 滑移线理论

Mayerhof 等学者提出将贯入问题视为承载力问题,并采用滑移线理论来解决^[23]。Koumoto 曾运用它对与静压桩类似的静力触探贯入问题用差分法进行了三维分析^[24]。虽然本方法在数学上简便,但似乎可靠性不高,因而采用的人也不多。

2.5 模型槽试验

由于对土体中静力贯入问题的严格分析难度较大,所以人们纷纷借助于模型槽试验^[25],以建立贯入阻力和土体性质之间的经验关系式。上述经验关系可分为三类:①与相对密度的关系;②与摩擦角的关系;③与状态参数的关系。

模型槽试验中,一个重要的问题是土体位移和应力及超孔压的量测。人们已在这方面取得了许多实际经验。Banerjee^[26]在桩体上安装摩擦力和侧压力测量元件,测定模型槽中桩体贯入过程中的应力。至于土体位移的量测,刘祖德等^[27]提出了显微镜跟踪法,应用于模型试验中。河海大学岩土工程研究所已于 1996 年建造起一座大型多功能模型试验槽,尺寸为 3m×2m×3m,侧面设有有机玻璃观察窗。丁佩明^[28]利用该模型槽进行了砂土中的静压桩试验,通过在土体中按一定的距离在垂直于试槽玻璃方向埋设长度小于 5mm 的大头针,取得了有关压桩产生的土体位移的一些成果。

由于模型槽尺寸有限,土体、桩体均按比例缩小,因此所得结果与现场实际将有出入。因为试验结果依赖于模型槽的尺寸和采用的边界类型,试验值和现场实测值之间的差别将十分显著。虽然模型槽试验广泛用来得到贯入阻力和土体性质之间的关系,它仍具有以下一些不足之处:①模型槽尺寸有

限、因此、在未对其结果作修正之前,无法应用于工程实际;②在建立基于模型槽试验结果的关系式时,土体刚度常被忽略;③一种土体中所得的模型关系式不能直接用于另一种土体;④模型缩小之后,土体自重的影响与实际情况不符,因此只能作为定性分析,而无法得到精确的定量成果。

3 对饱和粘土中静压桩的沉桩机理及挤土效应研究的展望

对以上各种沉桩贯入研究方法的分析可知,静压桩沉桩机理与挤土效应的研究涉及以下方面:①桩侧土压力(包括径向压力 σ_r ,侧壁摩擦力 τ_z)的分布问题;②土体中应力大小和分布;③超孔隙水应力的分布;④土体位移和影响范围,⑤桩周土体密实度的变化。

在上述方法中,极限承载力理论过于简单;应变路径法则过于复杂,较少有人采用;有限元模拟的力学原理清晰,但其模型参数难以确定;圆孔扩张理论则是几种理论中应用最广的方法,它抓住了问题的本质,可以较好地模拟沉桩过程土体的侧向扩张,且使用方便,但同时,该方法也有其不足之处,主要体现在其不考虑竖向坐标的影响,将空间柱体的扩张简化为平面应变问题。其解答,若应用于旁压仪等竖向坐标影响很小的问题分析是合适的,但对于静压桩贯入这种空间课题,不加讨论即将 z 坐标忽略,势必带来理论和结论上的偏差。因此,可以从理论分析出发,汲取CEM的合理内核,并对其加以改进,从土体非线性、桩土共同作用、空间性等方面对静压桩的沉桩机理及挤土效应的最本质的特性进行分析,而对于大变形问题,则有待今后进一步的研究。

经典的平面圆孔扩张理论对静压桩沉桩进行模拟时,为便于推导,均假设问题为平面应变情况,即孔壁内压沿深度保持不变,同时忽略孔壁摩擦力,土体中应力与 z 坐标无关。这种假定不但忽略土体自重的影响,而且忽略孔壁压力和摩擦力随深度的变化,所求得的位移、应力和超孔压值也与 z 坐标无关。对于桩长不大时, z 坐标的影响有限,但对于桩长为20~30m的长桩, z 坐标的影响不容忽视。许多研究者已逐渐注意到这个问题。

大量的实测资料表明,桩体或触探仪贯入过程中,不但桩壁侧压力,而且桩侧摩擦力亦随深度变化。美国麻省理工学院的Azzouz^[29]和Masood等^[30]分别采用PLS(piezo-lateral stress cell)和CPT(cone penetration test)对沉桩过程中侧壁应力 σ_r , τ_z 和超孔压 Δu 进行量测,发现它们沿桩长呈线性增大分布。

因此,对饱和粘性土中静压桩的沉桩机理及挤

土效应进行空间理论分析,将具有十分重要的理论意义和工程价值。其具体实施可按如下步骤进行:首先在平面应变圆孔扩张理论的基础上,建立空间的平衡微分方程组;然后通过室内和现场试验实测数据的分析,确定其应力边界条件;通过寻找适当的应力函数,推导出上述问题的弹性区的应力、位移、超孔压解析解空间轴对称解答,在塑性区采用Mohr-Coulomb屈服准则,求解方程组,推导出桩侧塑性区应力、位移、超孔压解析解;通过静压桩离心模拟试验,模拟土体竖向自重的影响、测定压桩产生的土体位移、超孔压实测值,并与上述理论值相比较,检验是否满足公式的规律性,并建立反映整个土体位移、超孔压理论计算公式;利用工程实测数据,检验上述理论公式的正确性;采用“位移边界”有限元对离心模拟试验进行数值分析,并将有限元计算值、实测值和理论公式计算值进行对比;进一步对理论公式进行验证,从而得出较为合理的结论。本文作者已经在这方面开展了大量的工作,得到了较为合理的结果^[31]。

4 结 语

通过静压桩沉桩机理和挤土效应研究历史和研究方法的分析,本文提出的在平面圆孔扩张理论基础上发展空间轴对称解析方程,并结合有限元分析和静压桩离心模拟试验相互论证考虑问题的空间性的方法,相对于平面分析更具现实意义。该课题在以后的发展中可以将“大变形”和“损伤”等概念引入研究中。饱和粘土中静压桩的沉桩机理及挤土效应问题的解决,将有助于对静压桩的施工影响范围进行评估,从而为设计和施工提供更好的依据,带来良好的经济效益。并且,其空间应力、位移、超孔压解答还可应用于静力触探应力分析、孔压触探、桩基承载力分析等相关课题中,具有广泛的工程应用前景。因此,对饱和粘土中静压桩的沉桩机理及挤土效应开展一系列深入的研究是十分有益的。

参考文献

- 1 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995
- 2 Cooke R W, Price G, Tarr K. Jacked piles in London clay: a study of load transfer and settlement under working conditions. *Geotechnique*, 1979, 29(2): 113 ~ 147
- 3 施鸣升. 沉入粘性土中桩的挤土效应探讨. *建筑结构学报*, 1983(1): 60 ~ 71
- 4 Vesic A S. Expansion of cavity in infinite soil mass. *Jour Soil Mech Found Div, ASCE*, 1972, 98(3): 265 ~ 289

(下转第59页)

c. 在 2,3 坝段钻孔或灌浆过程中,孔壁、孔底页岩发生软化、泥化,造成孔壁塌孔,影响钻灌,且因泥化页岩易堵塞岩层裂缝,影响灌浆质量.采用改性水泥后,由于它对页岩的渗透被覆作用,使页岩不再软化和塌落,提高了钻灌速度和灌浆质量.

国内湿磨水泥、Cx 灌浆水泥等超细水泥的应用,除上面提到的新安江水电站外,在三峡一期工程、五强溪水电站、清江隔河岩水电站、基院寺水库、黄河上的公伯峡水电站、黄山脚下的毛坦砌石拱坝等工程的帷幕灌浆、固结灌浆、接缝灌浆和漏水处理施工中得

到了应用.改性灌浆水泥的开发,由于其基本性能较其它超细水泥要好,在某些方面已超过化学灌浆材料,灌浆工艺也较简单,随着今后不断试验研究,在水利水电工程施工中将会得到更广泛的应用.

参考文献

- 1 刘英伟.日本超细水泥灌浆技术发展状况.水利水电钻探,1991,(1)
- 2 谭洪.新安江水电站大坝二、三坝段帷幕补强新材料的应用.水利水电钻探,1993,(1)
(收稿日期:1998-05-18 编辑:马敏峰)
- 5 Butterfield R, Banerjee P K. The effects of pore water pressures on the ultimate bearing capacity of driven piles. In: Proc 2nd South East Asian Regional Soil Mech Found Engrng, Tokyo, 1970. 385 ~ 394
- 6 Carter J P, Booker J R, Yeung S K. Cavity expansion in cohesive frictional soils. Geotechnique, 1986, 36(3): 349 ~ 358
- 7 Randolph M F, Carter J P, Wroth C P. Driven piles in clay—the effects of installation and subsequent consolidation. Geotechnique 1979, 29(4): 361 ~ 393
- 8 Salgado R, Mitchell J K, Jamiolkowski. Cavity expansion and penetration resistance in sand. Jour Geotech Geoenviron Engrng, ASCE, 1997, 123(4): 344 ~ 357
- 9 Provost J H, Hong K. Analysis of pressuremeter in strain-softening soil. Jour Geotech Engrng Div, ASCE, 1975, 101(8): 717 ~ 721
- 10 王启铜, 龚晓南, 曾国熙. 考虑探讨拉、压模量不同时静压桩的沉桩过程. 浙江大学学报, 1992, 26(6): 678 ~ 687
- 11 蒋明镜, 沈珠江. 考虑材料应变软化的柱形孔扩张问题. 岩土工程学报, 1995, 17(4): 10 ~ 19
- 12 施建勇, 赵维炳, 陈文. 土体变形规律研究. 水利水电科技进展, 1998, 18(1): 24 ~ 26
- 13 Baligh M M. Strain path method. Jour Geotech Engrng Div, ASCE, 1985, 111(9): 1108 ~ 1136
- 14 Baligh M M. Undrained deep consolidation, I: shear stresses. Geotechnique, 1986, 36(4): 471 ~ 485
- 15 de Borst R, Vermeer P A. Finite element of analysis of static penetration tests. In: Proc 2nd Europ Symp on Penetration Testing, 1982. 457 ~ 462
- 16 Griffiths D V. Elasto-plastic analysis of deep foundations in cohesive soils. Int J Numer and Analytical Methods in Geomech, 1982(6): 211 ~ 218
- 17 周健. 排土桩对周围土体挤密作用的动态模拟: [学位论文]. 南京: 河海大学, 1996
- 18 Banerjee P K, Fathallah R C. A Eulerian formulation of the finite element method for predicting the stress and pore pressures around a driven pile. In: Wittke ed. Proc 3rd Int Conf Numer Meth Geomech Aachen. Rotterdam: Netherland Press, 1979. 1053 ~ 1059
- 19 Sikora Z, Gudehus G. Numerical simulation of penetration in sand based on FEM. Computers and Geomechanics, 1990(9): 73 ~ 86
- 20 Kiousis P D, Voyiadis G Z, Tuncay M T. A large strain theory and its application in the analysis of the cone penetration mechanism. Int Jour Numer Anal Methods Geomech, 1988, 12: 45 ~ 60
- 21 谢永利. 大变形固结理论及其有限元分析: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1994
- 22 鲁祖统. 软粘土地基中静力压桩挤土效应的数值模拟: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1998
- 23 Mayerhof G G. The ultimate bearing capacity of wedge-shaped foundations. In: Caquot A ed. Proc 5th ICSMFE. Paris: Dunod Press, 1961. 105 ~ 109
- 24 Koumoto T, Kaku K. Three-dimensional analysis of static cone penetration into clay. In: Verruijt A, et al, eds. Proc 2nd Europ Symp Penetration Test. Amsterdam: Netherland Press, 1982. 635 ~ 640
- 25 陈维家, 陈映南. 砂土静力触探机理分析. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 64 ~ 72
- 26 Banerjee P K, Davis T G, Fathallah R C. Behavior of axially loaded driven piles Chapter 7. In: Banerjee P K, Butterfield R eds. Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering. New York: Elsevier Science Publishing Co Inc: 1982
- 27 刘祖德, 王钊, 夏焕良. 显微镜位移跟踪法在土工模型试验中的应用. 岩土工程学报, 1989, 11(3): 1 ~ 10
- 28 丁佩明. 砂土中静压式模型桩沉桩试验及考虑挤密效应的桩土共同作用分析: [学位论文]. 南京: 河海大学, 1998
- 29 Azzouz A S, Morrison M J. Field measurements on pile in two clay deposits. J Geotech Engrng, ASCE, 1988, 114(1): 104 ~ 121
- 30 Masood T, Mitchell J K. Estimation of in situ lateral stresses in soils by cone-penetration test. J Geotech Engrng, ASCE, 1993, 119(10): 1624 ~ 1639
- 31 陈文. 饱和粘土中静压桩沉桩挤土效应的空间理论分析与离心模拟试验研究: [学位论文]. 南京: 河海大学, 1999
(收稿日期: 1998-03-10 编辑: 熊水斌)

(上接第 41 页)