

饱和粘土中静压桩挤土效应的离心模型试验研究

陈 文 施建勇 龚友平 周林根

(河海大学土木工程学院 南京 210098) (江苏华新建设工程集团 苏州 215128)

摘 要 通过静压桩在不同粘土中贯入的离心模型试验 ,对桩体贯入饱和粘土时的土体位移和初始超孔压的空间分布情况进行了研究 . 研究表明土体径向位移在水平方向具有对数递减的规律 ,而在竖向 $2/3$ 桩长范围内呈线形增加分布 ,约在 $2/3$ 桩长处增加到最大值 ,在其下范围内逐渐减小、直至桩尖以下约 $5 \sim 10$ 桩半径处衰减为零 ;试验结果同时表明 ,大部分桩长范围内 ,初始超孔压具有随计算点至桩轴水平距离的加大而呈对数减小、随深度的加大而增加的分布规律 ,同时得出了初始超孔压的大致影响范围 ,试验结果显示了对该课题进行空间分析的必要性 .

关键词 饱和粘土 静压桩 挤土效应 离心模型试验 模型率

中图号 TU432

静压桩在我国得到了越来越多的重视 . 由于静压桩的施工具有振动小、噪音低等优点 ,故在沿海软土区以及人口密集的大城市的应用很广 ,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^[1] . 虽然较之打入桩 ,静压桩的贯入过程要平稳得多 ,但它的贯入将使下部土体侧向移动、地表隆起 ,因而不可避免地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 . 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 . 静压桩挤土效应的研究已成为环境土力学的一个重要分支 ,引起了各国学者和工程界的广泛关注 .

1 静压桩沉桩机理的国内外研究进展情况

国际上对于静压桩或与其过程类似的静力触探贯入课题的研究方法 ,大致可以分为以下五类 :第一类 ,极限承载力理论 ;第二类 ,圆孔扩张理论^[2] ;第三类 ,应变路径法 ;第四类 ,有限元分析法 ;第五类 ,模型槽试验研究 .

上述方法中前四种主要从理论分析的角度对静压桩沉桩挤土效应进行研究 . 但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^[3~5] ,以建立贯入阻力和土体性质之间的经验关系式 . 经验关系可分为三类 :与相对密度的关系 ;与摩擦角的关系 ;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 . 河海大学岩土所已于 1996 年建造起一座大型多功能模型试验槽 ,尺寸为 $3\text{ m} \times 2\text{ m} \times 3\text{ m}$,侧面设有有机玻璃观察窗 . 丁佩明^[6]利用该模型槽进行了砂土中的静压桩试验 ,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 ,则同一深度处土体自重亦缩小几倍 ,由于试验无法反映土体自重对于沉桩阻力、位移产生的影响 ,因此 ,试验结果不能令人信服 ;另外 ,对于粘性土 ,其固结过程很难控制 ,常常历时数月 ,给大规模试验带来很大不便 . 如果采用离心模型试验则能够很好地解决土体自重的模拟问题 ,而且便于对不同土体中静压桩沉桩过程进行更加全面、方便地分析 ,因此 ,本文采用了离心模型试验来进行研究 .

收稿日期 :1999-03-30

第一作者简介 陈文 ,男 ,助教 ,硕士 ,从事软土地基处理与加固的研究 .

2 静压桩离心模型试验

2.1 离心模型试验简介

静压桩离心模型试验的原理是将土体和桩身尺寸按照一定的模型率缩小 n 倍,先将土体置入模型箱内,在 $n g$ 的离心加速下固结,模拟现场固结情况,然后将桩体放入模型箱中以一定的离心加速度 $n g$ 旋转,同时将桩身匀速下压,以模拟尺寸放大 n 倍后的桩体在现场均匀下压的过程^[7].

离心模型试验在上海铁道大学土木系岩土所进行.上海铁道大学 L-30 土工离心机是国内较早用于土工离心试验的设备.该机可提供的最大离心加速度为 200 倍重力加速度,有效半径 1.66 m,电机功率 15 kW,主轴最高转速为 350 r/min,并可在 0~350 r/min 之间进行无级调速.模型箱有三个侧面和底面是由带筋肋的铝合金板整铸而成,还有一个侧面为 5 cm 厚的有机玻璃板,用于闭路电视监测试验过程中模型的性状及高速摄影拍摄模型的位移情况.

2.2 相似原理简述

离心模型试验的各项参数应与原型有一定的相似关系,才能保证模型的模拟精度,这种相似关系称为比尺关系.它是联系模型试验与工程实际的桥梁.根据相似准则,若将原型的几何尺寸缩小 n 倍而制成模型,而且模型与原型采用具有相同弹模的材料,即当模型材料的容重为原型材料的 n 倍时,模型中观测到的应力为原型中存在的应力,模型中观测到的位移放大 n 倍为原型中的位移^[8,9].

离心模型试验是用人工的加速度场来模拟提高模型材料的容重.若离心装置提供了 n 倍重力加速度,即离心加速度 $n \cdot g$,且模型选用与原型相同的材料,这样用模型观测结果推算原型的参数是极为方便的.

2.3 桩体材料及模型土制作

2.3.1 模型率选择

模型箱尺寸 $L \times b \times h = 41.5 \text{ cm} \times 23 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,考虑到模型箱尺寸和桩体制作的便利及测量精度,试验取模型率 $n = 20$.

2.3.2 桩体制作、桩型材料及模型材料

为模拟轴对称条件,其中 $D = 20 \text{ mm}$ 、 30 mm 的桩为半圆形,锥角 60° ; $D = 50 \text{ mm}$ 的桩为圆形,锥角 30° .桩材采用木质,但需将桩体表面凿毛,先通涂沥青一层,再涂刷 20 号水泥砂浆一道,以模拟桩与土之间的摩擦,待 28 d 龄期后再行试验,效果良好.

2.3.3 地基土的制作及物理力学性质指标

采用物理力学性质指标不同的两种上海粘土分别进行试验,一种为灰色粉质粘土,一种为黄色粘土.至于地基土的制备,在两只外形相同的模型箱中,先分别在箱底铺一层粗砂,厚 1 cm,并用砂布和滤纸盖好,再同时放入相同重量的重塑软粘土,高 30 cm,再用砂布、滤纸盖好,上面加一层细砂,用盖板盖好,并保证两箱所加重相等.将模型箱和配重箱同时放

表 1 地基土的物理力学性质指标						
Table 1 Physical and mechanical property indexes of foundation soil						
土名	w /%	w_p /%	γ_{sat} ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	I_p	e	S_r /%
粉质粘土	33.2	28.8	19.5	14.2	0.85	0.95
粘土	31.1	26.8	19.4	17.8	0.80	0.98
土名	A_f	E_{s1-2} /MPa	C_a /kPa	φ_a ($^\circ$)	c' /kPa	φ' ($^\circ$)
粉质粘土	0.71	3.61	25.1	22.0	5	25
粘土	0.62	3.43	30.3	22.6	15	28

入离心机中,根据相似准则,在 $20 g$ 的离心加速度下运转 30 h,相当于新沉积土层 1.4 a 后的情况.在固结过程中,打开箱底的排水阀,以加速固结.离心固结后,土体高度为 28 cm,模型的制作以含水率作为控制标准,在每箱地基土模型中选 3 点(沿深度方向自上至下每 5 cm 采取一个土样),实测土体含水率,其分布应比较均匀,最大波动小于 5%,各箱地基土的平均含水率差值不大于 3%).为进一步了解土体其它的物理、力学性质指标,对固结后的模型土原状取样,进行应变控制式三轴排水试验,应变控制式三轴固结不排水试验,土体直剪试验,液、塑限试验,压缩试验.各土性指标如表 1.

2.4 埋设位移量测标记和孔压计

试验对土体位移和孔压变化进行量测. 为观测由于压桩而产生的土体变形, 在模型箱的临窗断面设置位移量测标记: 钉形银针位移标记点, 其布置方式为离开桩体两侧各 1 cm 处开始, 上下左右各按 1 cm × 1 cm 的方格布点, 如图 1 所示的网格交叉点. 在土体固结完成后, 利用钻孔将孔压计埋入土体中, 孔压计中心深度均位于地表以下 12.5 cm 处, 每次试验在径向埋设 3 个, 至桩体中心的距离分别为 3 cm, 6 cm, 10.5 cm, 所测数值模拟实际工程在地表以下 2.5 m 深度, 距桩轴径向距离分别为 0.6 m, 1.2 m, 2.1 m 处的超孔压值. 孔压计的具体布置见图 2 和图 3 所示.

2.5 离心试验

试验进行了五次, 其中灰色粉质粘土三次, 黄色粘土两次, 模型率 $n = 20$. 采用半圆形桩紧贴有机玻璃, 沿模型箱中心下压, 入土深度为 25 cm, 模拟现场桩径 $D = 600$ mm, 桩长 $L = 5$ m 的桩体贯入土体中的挤土情况. 各组试验采用的土质和桩径如下.

试验一: 灰色粉质粘土, 桩径 $D = 30$ mm, 模拟现场桩径 $D = 600$ mm, 桩长 $L = 5$ m 的桩体贯入情况; 试验二: 灰色粉质粘土, 桩径 $D = 50$ mm, 模拟现场桩径 $D = 1000$ mm, 桩长 $L = 5$ m 的桩体贯入情况; 试验三: 灰色粉质粘土, 桩径 $D = 20$ mm, 模拟现场桩径 $D = 400$ mm, 桩长 $L = 5$ m 的桩体贯入情况; 试验四: 黄色粘土, 桩径 $D = 30$ mm, 模拟现场 $D = 600$ mm, 桩长 $L = 5$ m 的桩体贯入土体中的挤土情况; 试验五: 黄色粘土, 桩径 $D = 20$ mm, 模拟现场桩径 $D = 400$ mm, 桩长 $L = 5$ m 的桩体贯入土体中的挤土情况.

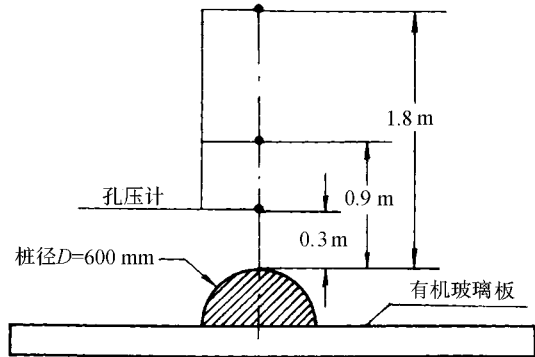


图 2 离心模型试验孔压计布置平面图

Fig.2 Plane of layout of piezometer in centrifugal model test

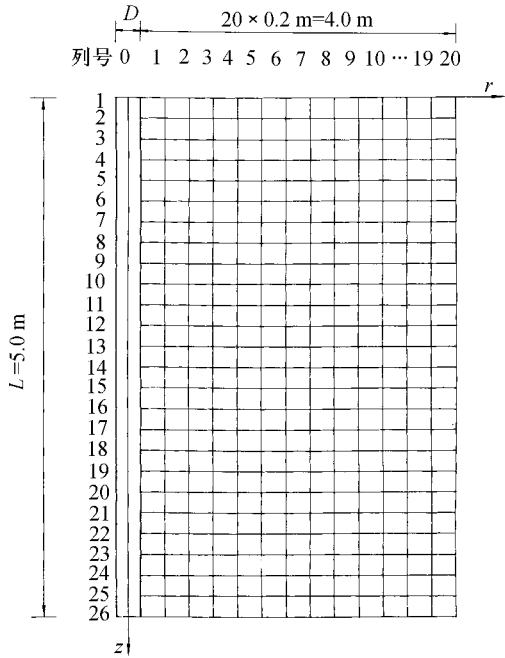


图 1 位移观测点布置图(网格交叉点)

Fig.1 Layout of displacement monitoring points(mesh points)

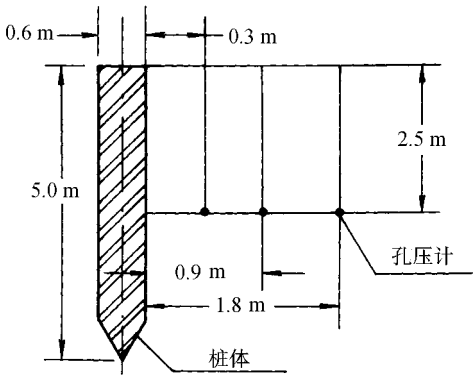


图 3 离心模型试验孔压计布置剖面图

Fig.3 Profile of layout of piezometer in centrifugal model test

土体固结后, 将桩体就位. 试验中先读取初始孔压值 u_0 . 然后在 10 min 之内将离心机转速均匀增加到 107.5 r/min(即离心加速度 20 g), 并在这一转速下运转, 同时以 2.5 mm/s 的速率将其压入土中, 模拟实际工程 0.05 m/s 的压桩速率. 桩体压入后立即对土体位移和超孔压进行量测, 数据通过自动采集仪传送至控制室的微机系统中处理, 并详细地记录.

3 试验成果分析

3.1 土体径向位移

3.1.1 试验数据

以下选取两组最为有代表性的试验成果进行分析,试验二和试验四分别代表粉质粘土和粘土中静压桩贯入的情况.第一组试验成果:灰色粉质粘土,模拟实际桩径 $D = 0.6\text{ m}$,入土深 5 m .分别取地表以下深度 $z = 2.0\text{ m}$ 2.4 m 3.0 m 处光标径向位移作为土体径向位移来进行分析,这三处的土体径向位移 u_r 沿径向坐标 r 的变化情况见图 4.

第四组试验成果:黄色粘土,实际桩径 $D = 0.6\text{ m}$,入土深 5 m .分别取 $z = 2.0\text{ m}$ (图 1 第 11 行) 2.4 m (图 1 第 13 行) 3.0 m (图 1 第 16 行)处光标径向位移作为土体位移来进行分析,这三处深度土体的径向位移 u_r 沿径向坐标 r 的变化情况见图 5.

其它三组试验的径向位移通过分析也可以发现,它们具有与上述两组试验相似的分布规律.

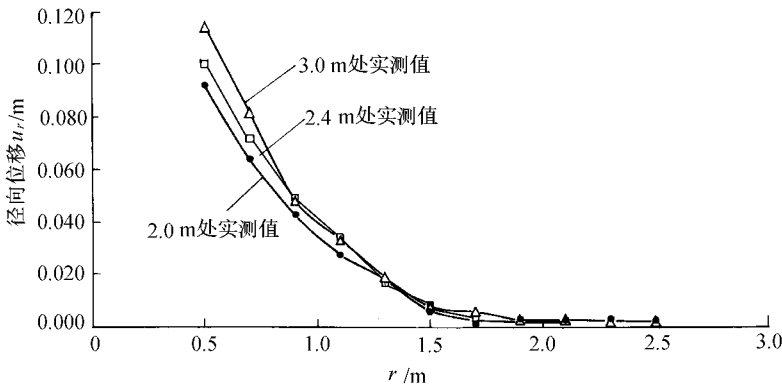


图 4 试验一的径向位移结果

Fig.4 Results of radial displacement test No.1

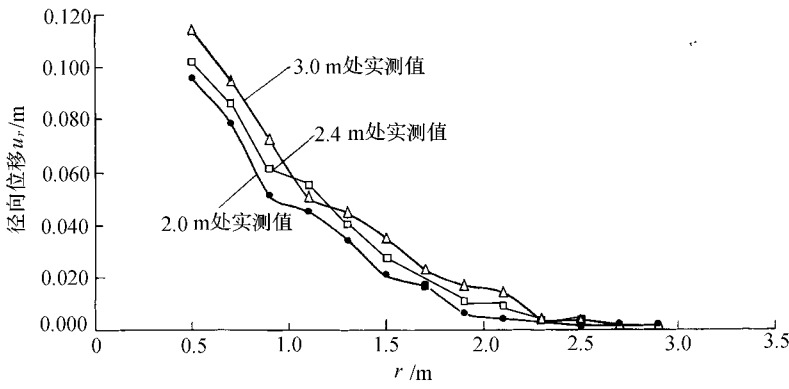


图 5 试验四的径向位移结果

Fig.5 Results of radial displacement test No.4

3.1.2 数据分析

根据试验数据可以发现,土体径向位移有以下特点:

- a. 随着测点离桩体中心轴距离的增大,位移呈减小趋势.经过对各组数据的回归分析,发现径向位移 u_r 与 $\ln(1/r)$ 呈正比例关系;
- b. 对于同一组试验,可以发现,除去靠近桩顶和桩底的部位,同一半径处各点径向位移随测点深度的增加有线性增大趋势,但这种增大趋势随着与桩轴距离的加大而减小,在约 5 ~ 6 倍桩半径处,增加趋势变得很微弱;
- c. 对于强度较低、含水率较高的土,如灰色粉质粘土,在桩侧约 1 倍桩半径以内的土体发生了明显的拖带下沉.对于强度较高的土,如本试验采用的黄色粘土,桩侧拖带下沉并不明显,相反,在很大的深度范围内

出现了土体的隆起现象.这是由于土体强度较高,或含水率较低时,土体发生水平位移比发生竖向位移的可能性要大,而一定范围内土体自重有限,故土体发生竖向隆起.在桩径较大时,由于排土体积的增大,在土体径向约束下,这种“隆起”趋势尤为明显.根据试验的量测,土体的隆起量占到了桩体入土体积的 30%.隆起范围一般在 10 倍桩半径以内.

d. 饱和粘土中静压桩的土体位移影响范围,根据试验实测数据分析结果,发生在约 $6R \sim 10R$ 之间, R 为桩半径.这与通常采用的平面应变圆孔扩张理论分析所得出的 $20R$ 相比要小,这种差别是由于:一方面平面应变解答无法考虑土体的竖向位移情况,而土体隆起与下沉将使得影响范围要小一些;另外,工程中往往以打入桩来预估沉桩的土体位移范围,而打入桩与压入桩的机理有很大不同,前者受到外力振动、冲击要大得多,所以估值要大得多,并且,试验中也无法像离心模型试验这样全面地反映大范围内土体的位移情况,所以,利用离心模型试验来测定土体影响范围是很有意义的.

e. 试验结果表明,沉桩到位后,桩侧土体径向位移随深度的增加而增大,但往往在数米内只增大几毫米,其最大值大约发生在地面以下桩长 $2/3$ 处.虽然随深度的增大,该处径向压力和剪切力均增大,但由于上覆土重的增大,土体不排水抗剪强度亦增大,两者对于土体水平位移的影响相互抵消一部分,使得位移增大趋势不是很大;另一方面,靠近桩端处土体由于桩端呈锥形,其位移主要发生在与锥形面垂直的方向,呈球状分布,使得竖向位移分量减小,该处主应力发生反转,因此,桩长 $2/3$ 以下的土体径向位移值不再增加,而是逐渐减小,直至桩尖以下 $5 \sim 10$ 倍桩半径处,径向位移已衰减为零.试验清楚地反映了这一点,这一点的认识,对于设计中桩长和桩距的选择将有着很重要的意义.

3.2 压桩后土体初始超孔压

3.2.1 超孔压实测数据

a. 灰色粉质粘土中试验成果(试验一)

本次试验采用灰色粉质粘土,桩径 0.3 m,桩长 5.0 m.压桩过程产生的土体初试超孔压可采用文献 [10] 推导的理论公式:

$$\Delta u = \frac{1}{3} \left[\chi 2c - K_p \cdot \gamma \cdot R_u \cdot \tan \varphi_a \right] \cdot \ln \frac{R_p}{r} + \frac{C_a'}{r} \cdot z \Big] + 0.9 \alpha_f \cdot c \tag{1}$$

式中: Δu ——土体初始超孔压值, kPa; c ——土体不排水强度; R_u ——桩半径; R_p ——塑性区半径; K_p ——被动土压力系数; C_a', φ_a ——桩土界面有效粘聚力、摩擦角; α_f ——破坏时孔压系数, $\alpha_f = 0.70(3A_f - 1)$; r ——计算点至桩轴距离.

为得到式(1)中的 $c, K_p, C_a', \varphi_a, A_f$ 等值,本文进行了土体不排水剪试验、压缩试验、桩土界面大型直剪试验、固结不排水试验,各土性指标列于表 1 中.将所得土性指标代入式(1),可得超孔压理论公式:

$$\Delta u = 18.1 \ln \frac{2.5}{r} + \frac{20.8}{r} + 10.8 \tag{2}$$

并将 $r = 0.6 \text{ m}, 1.2 \text{ m}, 2.1 \text{ m}$ 分别代入上式,可以得到三处的超孔压理论值,理论值与实测值的对比见图 6.

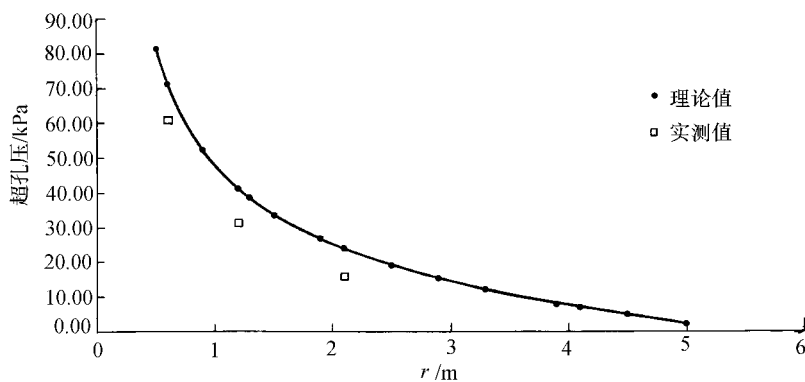


图 6 试验一的超孔压

Fig.6 Excess pore water pressure of test No.1

b. 黄色粘土中试验成果(试验四)

当桩体压入土中 5.0m 时,记录超孔压值,如表 1 所示.采用本文推导的超孔压理论公式进行计算,将表 1 中各土性指标代入式(1),可得:

$$\Delta u = 12.2 \ln \frac{2.07}{r} + \frac{25}{r} + 11 \tag{3}$$

将 $r = 0.6\text{ m}$ 、 1.2 m 、 2.1 m 分别代入式(3),可以得到三处的超孔压值,理论值与实测值的对比见图 7.

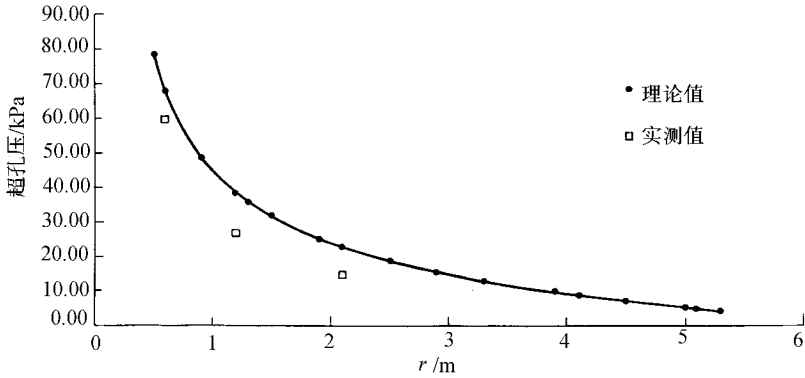


图 7 试验四的超孔压
Fig.7 Excess pore water pressure of test No.4

3.2.2 试验结果分析

通过静压桩贯入饱和粘土的离心模型试验结果可以发现,桩体贯入过程产生的初始超孔压在水平方向具有分布规律:(a)超孔压在水平方向随测点至桩轴的距离加大而呈对数减小的规律;(b)超孔压的产生范围约在 20 倍桩半径,在此范围以外,土体超孔压已经很小.

在竖直方向由于试验设备尺寸的限制,只对深度 $z = 2.5\text{ m}$ 处的初始超孔压进行了量测,不能全面地反映各个深度处的情况,但由上述分析可见,实测值与超孔压空间理论公式十分接近,而且理论公式反映了超孔压在大部分桩长范围以内随深度线性增加.因此,离心模型试验成果进一步表明,在桩长范围内,超孔压在竖向随深度的加大而增大.本文所采用的理论公式和离心模型试验值较为吻合,两者都反映了超孔压分布的空间性.

以上结论,对于大部分桩长范围内的土体是适用的,在靠近桩尖处,由于土体主要呈球形排开趋势,与其它位置土体位移模式有所不同,根据现场测试资料,该处超孔压将突然增大,在桩尖以下将逐渐减小,直至为零.

4 结 论

本文对不同土体中静压桩贯入进行了五组离心模型试验,通过对试验结果的分析,可以得出静压桩引起的土体位移分布情况为:(a)同一深度处,径向位移随径向距离的增加而呈对数减小趋势;(b)同一径向距离处,在地面以下 2/3 桩长的深度范围内土体径向位移近似线性增加,在约 2/3 桩长深度以下径向位移急剧衰减,至桩尖以下约 5~10 倍桩半径处减小到零,在此范围内,可认为径向位移呈线形递减分布.(c)在静压桩贯入过程中,发生土体拖带下沉和隆起现象,该部分体积可达桩体入土体积的 30%,这将减小压桩对水平方向土体位移的影响.单桩贯入时对土体的水平向影响范围约 $6R \sim 10R$ 之间, R 为桩半径.这与通常采用的平面应变圆孔扩张理论分析所得出的 $20R$ 相比要小.

试验结果表明,初始超孔压的分布具有空间性,其分布情况为:(a)初始超孔压随计算点至桩轴水平距离的加大而呈对数减小;(b)在大部分桩长范围内,初始超孔压随深度的加大而增加,在桩尖处达到最大,桩尖以下将逐渐减小,直至为零;(c)初始超孔压的影响范围在约 20 倍桩半径.

总之,从离心模型试验成果来看,静压桩挤土课题是一个空间课题,在对静压桩的理论分析中,传统的平面圆孔扩张理论有其合理之处,但其关于该课题的“平面应变”假设是不合理的,平面圆孔扩张理论无法得到土体位移的空间分布模式.只有采用空间分析的方法,才能解决这个问题^[10].

在试验中,上海铁道大学岩土所周顺华教授、王炳龙高工给予了大量帮助,在此表示衷心的感谢.

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 ,1995.5

2 Vesic A S. Expansion of cavity in infinite soil mass. Jour Soil Mech Found Div ,A S C E ,1972 ,98(3) 265 ~ 289

3 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

4 Allersma H G B. Optical analysis of stress and strain in photoelastic investigation of the stress distrubution during penetration. Proc 2nd Europ Symp Penetration Test. 1982. 411 ~ 417

5 俞季民 魏杰. 砂土中桩端阻力深度影响机理分析. 岩土工程学报 ,1991 ,13(5) 46 ~ 52

6 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

7 Ko H Y ,Atkinson R H , Goble G G ,et al. Centrifugal modeling of pile foundations. In : Meyer J R. Analysis and Design of Pile Foundations. A S C E , 1984. 21 ~ 20

8 Schofield A N. Cambridge geotechnical centrifuge operation(20th Rankine Lecture). Geotechnique , 1980 , 20 227 ~ 268

9 姜朴. 现代土工测试技术. 北京 :中国水利水电出版社 ,1997. 111 ~ 121

10 陈文. 饱和粘土中静压桩沉桩挤土效应理论分析与试验研究 [学位论文]. 河海大学 ,1999

Centrifugal Model Tests of Piles Jacked in Saturated Clay

Chen Wen Shi Jianyong Gong Youping
(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098)

Zhou Lingeng
(Jiangsu Huaxin Const. Corp. , Suzhou 215128)

Abstract Centrifugal model tests of piles jacked in saturated clay are conducted , and the modes of soil displacements and initial excess pore water pressures generated during pile penetration are studied. It is shown that both the radial displacements of the soil and the initial excess pore water pressure decrease logarithmically with increasing distance from the pile axis in the horizontal direction. In the depth direction , radial displacements of the soil increase in the upper 2/3 area below that it begins to decrease. The initial excess pore water pressure increases linearly with the depth in the area from the ground to the pile tip. Also obtained is the scope in which the initial excess water pore pressure is obvious. It is shown that it is necessary to conduct spatial analysis on pile jacking.

Key words saturated clay jacked pile soil compaction effect centrifugal model test model scale