

文章编号: 1000-7598(2011)增刊1-0275-05

滨海沉积软土中旁压试验成果分析

杨超, 汪稔, 孟庆山

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 运用旁压仪在长江入海口进行原位试验, 获得了旁压试验各参数的变化规律。旁压试验结果表明: 初始压力 P_0 与土层随深度而线性增加; 而临塑压力 P_f 、极限压力 P_l 和旁压模量 E_m 等试验参数受到土层性质影响十分显著, 各参数在土层中变化趋势基本相同, 总体趋势为: 淤泥质黏土<黏土<粉质黏土<黏质粉土<粉砂; 但同一土层中, 各试验参数随深度呈线性增大。旁压试验在确定侧向基床反力系数 K_h 时土体处于似弹性阶段, 水平变形约5~8 mm, 同时受到排水条件的影响, 导致计算的 K_h 值与规范参考值存在一定差异, 在使用中应根据实际情况作适当修正。

关键词: 旁压试验; 强度参数; 旁压模量 E_m ; 侧向基床反力系数 K_h

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Analysis of pressuremeter test result in littoral deposit soft soil

YANG Chao, WANG Ren, MENG Qing-shan

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The regularities of parameters are gotten from the pressuremeter test at the estuary of the Yangtze River. The result of pressuremeter test shows that: the initial pressure P_0 increases linearly with depth; the P_f , limit pressure P_l and the pressuremeter modulus E_m are significantly impacted by soil properties and they have the same trend in the soil layers. The trend is: muddy clay < clay < silty clay < clayey silt < silt. But in the same soil horizon, parameters increase linearly with depth. When K_h is gotten from the pressuremeter test, soil is in the elastic phase and horizontal deformation is about 5-8 mm; at the same time K_h is affected by drainage conditions. So K_h is discrepant with standard one. Thus, K_h should be properly modified according to actual situation.

Key words: pressuremeter test; strength parameter; pressuremeter modulus E_m ; horizontal coefficient of subgrade reaction K_h

1 引言

我国拥有 1.8×10^4 km的海岸线, 滨海沉积软土广泛分布于沿海各地。滨海沉积软土作为一种不良的地基, 一直以来受到了人们的关注。研究者通过大量的室内试验对这种特殊的岩土工程材料的物理力学性质已经有了深刻的认识, 然而室内试验并不能完全反映土体的工程力学特性, 工程上要求更能反映土体原始应力状态下的物理力学指标。沈珠江^[1]认为, 要取得可靠的土质参数, 只有通过原位测试。原位测试不同于室内简单应力条件下的试验, 不能从试验结果直接求出某一参数, 而是通过反馈分析的办法间接求出参数。

旁压试验是工程地质勘察中的一种原位测试方法, 又称为横向载荷试验。1930年, 德国工程师Kögler发明了早期的旁压仪, 并在工程试验中取得了成功; 随后, 1957年法国道桥工程师Ménard研制的三腔旁压仪, 因其确定特征值概念明确、应用效果良好, 在工程地质评价、地基承载力设计以及桩基计算等方面得到了广泛的应用^[2-7]。

随着上海地铁和高层建筑的建设, 软土地基所涉及的问题已经越来越复杂。旁压试验具有操作简单、便于携带、试验深度深、结果可靠等优点, 但试验结果易受成孔质量的影响, 钻孔时应保证成孔质量以减少试验误差。运用旁压试验可为工程建设设计提供安全可靠的参数。本文将介绍长江入海口

收稿日期: 2010-04-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.50639010); 国家自然科学基金青年基金(No.40902092)。

第一作者简介: 杨超, 男, 1983年生, 博士研究生, 主要从事岩土力学和软基加固处理方面的研究工作。E-mail: yangc_3201@yeah.net

滨海相沉积软土70 m深度范围内的旁压试验成果及土的力学指标特性。

2 场区地质概况

旁压试验场地(见图1)位于上海浦东新区曹路镇五号沟地区,临近长江口,与上海长江隧道工程相邻。试验场地属长江入海口陆域范围,为长江三角洲冲积平原的东南前缘,成陆较晚,跨随塘河。根据上海市地貌类型划分图,试验场地以随塘河为界,以北地貌类型为潮坪相,以南地貌类型为河口、砂嘴、砂岛。



图1 旁压试验场地方位图

Fig.1 The place for pressuremeter testing

试验场地90 m深度范围内均为第四纪松散沉积物,属全新世 Q_4 ~上更新世 Q_3 以来的河口、滨海、浅海、沼泽相沉积层。场地自上而下主要由黏性土、粉性土以及砂性土组成;土层具有高含水率、高饱

和度、高孔隙比等特征,且试验场地具有成层分布特点。具体土层分布及土层物性参数2号沟地区地层柱状表^[8](表1)。

试验场地所在的长江口河段的潮汐为非正规半日潮,属中等强度的潮汐河口,每天两涨两落,日潮不等现象显著。据五号沟潮位站实测资料分析,该河段主要潮位特征值为(以吴淞0点):平均高潮位为3.52 m,实测最高潮位为5.92 m,平均低潮位为0.92 m,实测低潮位为0.05 m,平均潮差为2.57 m,最大潮差为4.60 m。

3 旁压试验原理及方法

3.1 旁压仪构造

本次试验使用法国 APAGEO SEGELM 公司制造的 MENARD (GA 型) 预钻式旁压仪。其结构由读数箱、管路和旁压器三部分组成。具体设备规格如下:旁压器为 BX 型(测量腔外径为 60 mm、固有腔体积 V_0 为 535 cm^3 、测量腔长度为 200 mm),最大工作压力可达 10 MPa,最大测试深度可达 100 m 以上。

3.2 旁压试验原理及方法

旁压试验是将旁压器放入孔内,加压使旁压器扩张,从而给周围土体施加侧向压力,直至土体发生变形破坏,进而得到土体的力学特征。

表1 五号沟地区土层分布及土层物性参数^[8]

Table 1 Soil distribution and physical parameters in Wuhaogou

土层层号	土层名称	层底深度 / m	层底标高 / m	厚度 / m	特性指标				成因类型
					含水率 w / %	孔隙比 e	饱和度 / %	液限 / %	
①	填土	0.80	3.14	0.80					
②	粉质黏土夹黏质粉土	2.50	1.44	1.70	31.1	96	0.890	33.3	滨海—河口
③	砂质粉土	5.50	-1.56	3.00	29.8	96	0.843		滨海—河口
③	淤泥质粉质黏土	8.90	-4.96	3.40	40.4	97	1.130	34.4	滨海—浅海
③	黏质粉土	12.00	-8.06	3.10	29.3	95	0.836		滨海—浅海
④	淤泥质黏土	17.90	-13.96	5.90	49.8	97	1.410	45.8	滨海—浅海
⑤	黏土	27.30	-23.36	9.40	42.5	96	1.210	44.6	滨海—沼泽
⑤	黏质粉土夹粉质黏土	37.00	-33.06	9.70	32.6	94	0.939		潮谷
⑦	粉砂	56.60	-52.66	19.60	27.7	94	0.791		河口—滨海
⑧	粉质黏土	64.80	-60.86	8.20	32.0	95	0.92	34.7	滨海—浅海
⑨	粉砂	87.70	-83.76	22.90	24.6	95	0.697		滨海—河口
⑩	粉质黏土	未揭穿			27.4	96	0.78	32.7	河口—湖泽

由于试验场中淤泥质黏土和黏性土处于软塑或流塑状态,强度较低,容易缩孔,试验时使用钻机在土层中钻成 62 mm 直径孔至试验深度以下大约 1 m 处后,立即将旁压器置于试验位置开始试验,减少缩孔造成的试验误差。加压使旁压器膨胀给土

体施加侧向压力,并通过压力表和体积测量管读出相应的压力和体积变形值。绘制 $P-V$ 曲线求取初始压力 P_0 、临塑压力 P_L 、极限压力 P_L 、旁压模量 E_m 以及侧向基床反力系数 K_b 等指标参数,对土层的工程性质作出评价。

试验前对旁压仪的弹性膜约束力和仪器综合变形进行率定，并校正试验中读数箱与地下水之间引起静水压力。试验时，加载等级一般为预估土的极限压力的1/8~1/12^[9]，各级压力在15 s^[10]内完成加载，试验加载稳定时间采用2 min，读数时间采用30、60、120 s^[10-11]。

此次试验稳定标准为不固结、不排水快剪模式，在无法预估的情况下，可根据预估土层类别按照不同土类加荷等级表^[10-11]进行试验加载。

表2 旁压试验加载等级建议值表^[10-11]
Table 2 The load rating values of pressuremeter test

土的特性	加载等级/kPa		
	SD48-86		JGJ69-90
	临塑压力前	临塑压力后	
淤泥、淤泥质土、流塑黏性土和粉砂土、饱和松散粉细砂	≤15	≤30	≤15
软塑黏性土和粉砂土、稍密很湿粉细砂、稍密中粗砂	15~25	30~50	15~25
可塑-硬塑粘性土和粉砂土、中密-密实很湿粉细砂、稍密-中密中粗砂	25~50	50~100	25~50
坚硬黏性土和粉砂土、密实中粗砂	50~100	100~200	50~100

4 旁压试验成果分析

通过忽略旁压试验中应力释放的影响，可获取初始压力 P_0 、临塑压力 P_f 、极限压力 P_l 、旁压模量 E_m 和侧向基床反力系数 K_h 等工程力学参数。

4.1 旁压试验参数的确定

典型的旁压试验曲线由初始阶段、似弹性阶段和塑性阶段3个阶段组成，可分别表示土体受力变形的3种应力-应变状态；其中初始阶段和似弹性阶段的界限压力为初始压力 P_0 ，似弹性阶段和塑性阶段的界限压力为临塑压力 P_f ，塑性阶段末端渐近线压力为极限压力 P_l ，如图2所示。

旁压试验为轴对称平面问题，由轴对称问题的Lame解可得旁压模量 E_m ：

$$E_m = 2(1+\nu)(V_c + \frac{V_0 + V_f}{2}) \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (1)$$

式中： ν 为泊松比； V_c 为旁压器固有体积； V_0 为 P_0 对应的体积变形量； V_f 为 P_f 对应的体积变形量； $\Delta P / \Delta V$ 为旁压曲线似弹性阶段直线段斜率的倒数，可间接反映侧向基床反力系数的大小。

通过旁压试验可以来预估桩受到的侧向荷载性状。Menard^[10]建议，在临界深度以下，桩的土压力 P 与侧向位移 y 关系曲线，可以由旁压试验曲线导出，

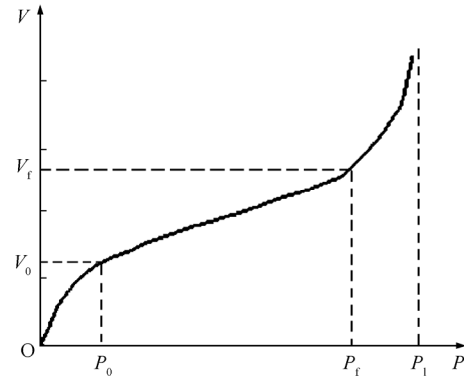


图2 典型的旁压试验曲线
Fig.2 Typical curve of pressuremeter test

并假设由3段直线组成。第1段直线为弹性阶段，其斜率为侧向基床反力系数 K_h ：

$$K_h = \frac{18E_m}{4B_0 \left(2.65 \frac{B}{B_0} \right)^\alpha + 3\alpha B} \quad (2)$$

式中： B 为旁压器直径； B_0 为参考桩基础宽度，取0.6 m； α 为结构系数，与土类和固结历史有关。

4.2 试验成果分析

图3是旁压试验参数随试验深度的变化关系图。试验表明，在试验深度范围内，初始压力 P_0 随土层深度呈线性增加，线性相关系数 $R^2 = 0.918$ ；临塑压力 P_f 和极限压力 P_l 也随土层深度增大，但没有明显的线性关系，而是表现出与土的类别密切相关。在黏土、黏质粉土和粉质黏土中 P_f 和 P_l 明显较粉砂中小，其大小变化为：淤泥质黏土<黏土<粉质黏土<黏质粉土<粉砂。但在同一土层中3个强度参数都随土层深度存在一定的线性相关性，各土层中3个强度参数在各土层中随深度的线性相关性见表3。在黏土和粉砂中，强度参数与深度之间的线性相关性较好，与通常的认识一致；但黏质粉土中强度参数与深度的相关性较差，该土层不均匀，其中含有部分粉质黏土夹层，强度较低，且土层较薄，测点较少，仅3个测点，导致在进行线性拟合时线性相关性较差。

同一土层中旁压模量 E_m 也表现出随深度增大而增大的变化关系，但土的类别对 E_m 的影响更大，砂质土层中 E_m 较黏性土中大得多。各土层中 E_m 的大小依次为：淤泥质黏土<黏土<粉质黏土<黏质粉土<粉砂。在70 m的试验深度范围内 E_m 与 P_f 和 P_l 的变化基本一致，在较高强度的土层中， E_m 也较大。

图4为不同深度处黏土的旁压试验曲线成果图，曲线能够反映出土体的受力变形到土体破坏的初始阶段、似弹性阶段和塑性阶段等3个典型阶段，曲线相似，直线段都较短，受压后土体很快发生塑性变

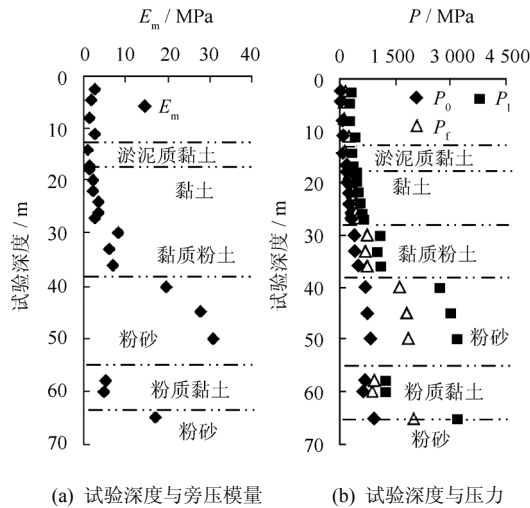


图3 旁压试验参数随深度变化图

Fig.3 Relationships between pressuremeter test parameters and depths

表3 各土层中强度参数与深度的线性相关性
Table 3 Linear correlations of intensity parameters and depth

土类	各参数与深度的线性相关系数 R^2		
	P_0	P_f	P_1
黏土	0.99	0.910	0.810
黏质粉土	0.75	0.013	0.036
粉砂	0.88	0.950	0.980

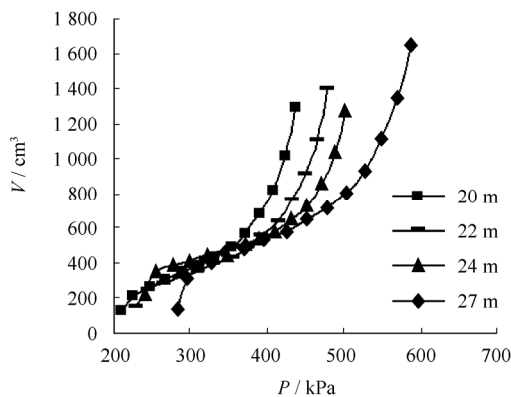


图4 不同深度黏土旁压试验曲线图
Fig.4 Curves of pressuremeter test in clay in different depths

形; P_0 和 P_f 随深度增加而增大, 图中表现为曲线拐点向后推延。

在不同土层的旁压试验成果曲线(图5)中, 各土层中旁压试验曲线均比较完整, 但曲线差别较大, 不同的土性对曲线的影响十分明显, 各个土层中测得的曲线的直线段斜率 $\Delta P / \Delta V$ 相差很大。在淤泥质黏土、黏土和粉质黏土中 $P-V$ 曲线斜率 $\Delta P / \Delta V$ 较黏质粉土和粉砂中的大, 直线段较短, 抵抗变形的能力较差, 土体受压后很快进入塑性阶段而丧失了承载能力; 而在黏质粉土和粉砂层中, $P-V$ 曲线的直

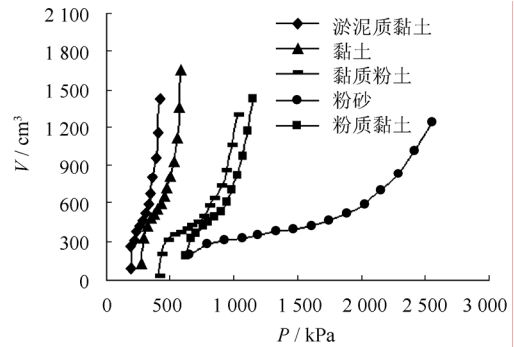


图5 不同土层旁压试验成果曲线
Fig.5 Curves of pressuremeter test in different soils

线段较长, 土体在较大的载荷下还能保持一定的稳定性, 强度较高; 相对淤泥质黏土、黏土和粉质黏土而言, 黏质粉土层和粉砂层更适合做持力层。比较整个试验深度的土层, 粉砂层强度最高, 旁压试验结果与静力触探试验^[8]锥尖阻力 q_c 保持了一致性(图6)。

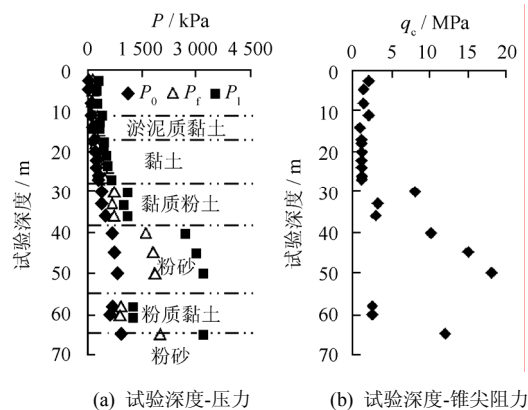


图6 旁压试验成果及静力触探试验^[8]锥尖阻力成果图
Fig.6 Results of pressuremeter test and tip resistance of cone penetration test

表4 旁压试验侧向基床反力系数 K_h 与规范参考值
Table 4 K_h of pressuremeter test and standard

土层名称	$K_h / (\text{kN/m}^3)$	
	上海地基基础设计规范	旁压试验
粉质黏土夹黏质粉土	1.5~3.0	40 148
砂质粉土	1.5~3.0	28 319
淤泥质粉质黏土	0.3~1.5	19 441
黏质粉土	3.0~15.0	38 921
淤泥质黏土	0.3~1.5	16 842
黏土	1.5~3.0	36 927
黏质粉土夹粉质黏土	3.0~15.0	102 015
粉砂	3.0~10.0	380 961

表4为旁压试验的侧向基床反力系数 K_h 计算值与上海市地基基础设计规范中 K_h 参考值的对照表。表4表明, 砂质粉土、黏质粉土和黏质粉土夹粉质黏土中旁压试验计算的 K_h 值与规范参考值较吻合; 粉质黏土夹黏质粉土、淤泥质粉质黏土、淤泥质黏

土、黏土和粉砂中旁压试验计算的 K_h 值较规范参考值偏大。这是因为旁压试验得到的侧向基床系数是在土体处于似弹性阶段时计算所得, 土体水平变形约 5~8 mm。根据土力学分析可知, 土体变形介于似弹性阶段和弹塑性阶段之间, 且旁压试验一般属于快速加载过程。在黏性土中, 旁压试验通常为不固结、不排水试验, 导致一般得到的 K_h 值大于工程实际使用的 K_h 值; 而粉性土中, 排水条件较好, 得到的 K_h 值与工程实际使用的 K_h 值基本一致; 在砂性土中, 原状土样较难获取, 要准确获得砂土的物性参数比较困难, 进行粉砂密实度的判别时也会出现一些误差, 导致确定规范参考值时会出现一定的偏差; 因此, 在使用中应根据实际情况对旁压试验获得的 K_h 值作适当修正。

5 结 论

(1) 在软土中进行旁压试验, 土的高含水率和低强度在成孔时容易产生缩孔现象, 因此, 成孔后应立即将旁压器置于试验位置进行试验, 以减少由于缩孔等造成的试验误差。

(2) 旁压试验参数中, P_0 与土层深度线性关系明显; 而 P_f 、 P_1 和 E_m 等旁压试验参数受到土层性质影响十分显著, 各参数变化趋势基本相同, 总体趋势为: 淤泥质黏土 < 黏土 < 粉质黏土 < 黏质粉土 < 粉砂。但同一土层中 P_f 、 P_1 也存在一定的线性变化关系。旁压试验很好地反映了土体的强度变化规律, 试验结果可靠, 与静力触探试验结果保持了一致。

(3) 旁压试验属于快速加载过程, 不同的排水条件对旁压试验确定侧向基床反力系数 K_h 影响很大。在黏性土为不固结不排水条件, 在计算 K_h 时常较规范参考值偏大; 排水条件较好的粉性土中最符合规范参考值; 砂性土中物性指标的判别误差导致确定规范推荐值时存在一定的偏差。因此, 在使用过程中应根据土层的实际情况对旁压试验获得的 K_h 值作适当修正。

参 考 文 献

[1] 沈珠江. 原状取土还是原位测试——土质参数测试技术发展方向的刍议[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 90—91.
[2] 孙勇. 利用旁压试验确定抗滑桩地基系数的研究[J].

岩土力学, 2009, 30(3): 699—702.

SUN Yong. Research on determining horizontal foundation coefficient of anti-slide pile with pressuremeter test[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 699—702.

[3] 石祥锋, 蔡美峰. 地铁工程地基的旁压试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2007, 26(1): 69—72.

SHI Xiang-feng, CAI Mei-feng. Study on pressuremeter test to subway ground[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2007, 26(1): 69—72.

[4] 孟庆山, 汪稔, 胡建华, 等. 水下旁压试验在桥基原位测试中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(1): 35—38.

MENG Qing-shan, WANG Ren, HU Jian-hua, et al. The application of underwater pressuremeter test to in-situ testing of bridge foundation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2005, 31(1): 35—38.

[5] FRANK R. Design of foundations in France with the use of Menard pressuremeter tests(MPM)[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2009, 46(6): 219—231.

[6] COSENTINO P J, KALAJIAN E, MESSAOUD F. Correlations between PENCEL pressuremeter, cone penetrometer, and dilatometer parameters[J]. *Transportation Research Record*, 2008, 2053: 65—71.

[7] CHANG M F, ZHU H. Pressuremeter test for evaluating load transfer characteristics along bored piles in residual soil[J]. *Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, 2004, 1—3: 1431—1437.

[8] 陈琛. 上海青草沙水源地建设五号沟泵站勘察报告[R]. 上海: 上海岩土工程勘察研究院有限公司, 2008.

[9] 南京水利科学研究院土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 295—304.

[10] 中国有色金属工业长沙勘察设计院. YS 5224—2000《旁压试验规程》[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.

[11] 《岩土工程手册》编写委员会. 岩土工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.

[12] 上海现代建筑设计(集团)有限公司. DGJ08—11—1999 上海市建设规范地基基础设计规范[S]. 上海: 上海市工程建设标准化办公室, 1999.