

文章编号: 1000-4750(2013)02-0118-07

# 强结构性对湛江黏土地区 CPTU 原位测定结果的影响

张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 拓勇飞

(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:** 为了评价土的结构对黏性土地区 CPTU 测试结果的影响。对湛江地区黏土(层)进行室内固结试验和 CPTU 原位试验, 获得孔压静力触探响应特征, 对比分析室内试验与 CPTU 测试结果求取固结系数的差异性。结果表明: 湛江黏土的触探指标较高,  $q_c=(2.5\sim 3.0)$ MPa,  $R_f$  平均值约为 1%; 在强结构性黏土地区利用 CPTU 测定结果划分土层具有较高的准确性; 受强结构性影响, 土的埋深越大, CPTU 的孔压消散时间越短, 土的固结系数越大; 浅层土试验孔压消散初期土体出现剪胀现象; 利用室内试验得到湛江黏土在结构破坏前的固结系数  $C_v$  是重塑土的固结系数  $C_v$  的 10 倍左右; 贯入过程中由于结构的破损会使探头周围土体的渗透性迅速降低出现指标失真, 导致基于 CPTU 测试得到原状土的固结系数远小于室内试验结果; 最后, 考虑结构性, 根据 CPTU 资料提出一个可用于估算结构性黏土固结系数的方法, 该研究为准确获得结构性黏土地基处理设计参数提供了合理的科学依据。

**关键词:** 湛江黏土; 强结构性; 孔压静力触探; 孔隙水压力; 固结系数

中图分类号: TU413 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.07.0447

## EFFECT OF STRONG STRUCTURE ON CPTU TEST RESULTS OF ZHANJIANG CLAY AREA

ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, TUO Yong-fei

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering,

Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Laboratory consolidation test and CPTU test were conducted to test the effect of soil structure on CPTU test results of Zhanjiang clay area. To do that, response characteristic of CPTU was obtained and the difference between consolidation coefficients evaluated from consolidation test and CPTU test was comparatively analyzed. The results showed that penetration indexes of Zhanjiang clay were relatively high, for instance,  $q_c=(2.5\sim 3.0)$ MPa, and the average  $R_f$  was approximately 1%. High accuracy may be achieved in soil horizon division if CPTU test result was used in areas of strong structured clay. Affected by strong structure, the pore water pressure dissipation time decreased and consolidation coefficient increased with the increase of buried depth of soil. Shear dilatation appeared in the initial stage of pore water pressure dissipation during the test. The  $C_v$  evaluated from Zhanjiang clay before structure failure was approximately 10 times the value of the one from remolded soil in laboratory test. Permeability of soil mass around the probe reduced rapidly and index distortion was observed due to the structural damage during the penetration process, consequently, the  $C_v$  of undisturbed soil evaluated from CPTU test was much less than that from laboratory test. Taking structure into consideration, a

收稿日期: 2011-07-17; 修改日期: 2012-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179186, 41102200); 中国科学院岩土力学与工程国家重点实验室前沿探索性项目(SKLQ002)

通讯作者: 张先伟(1982—), 男, 黑龙江龙江人, 助理研究员, 博士, 从事特殊土力学研究(E-mail: zhangxianwei414@163.com).

作者简介: 孔令伟(1967—), 男, 湖北通山人, 研究员, 博士, 博导, 从事特殊土的力学特性与灾害防治技术的研究(E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn); 郭爱国(1969—), 男, 四川遂宁人, 副研究员, 硕士, 硕导, 从事土基本特性与测试技术的科研与工程应用研究(E-mail: agguo@whrsm.ac.cn);

拓勇飞(1976—), 男, 湖北武汉人, 硕士, 从事岩土工程勘察与设计工作(E-mail: yftuo@yahoo.com.cn).

method for estimating  $C_v$  of structured clay was proposed based on the CPTU data. The study provided a reasonable scientific basis for accurately obtaining design parameters of foundation treatment in structured clay.

**Key words:** Zhanjiang clay; strong structure; pore pressure static cone penetration; pore water pressure; consolidation coefficient

土的结构性是指土颗粒和孔隙的性状和排列形式及颗粒之间的相互作用。天然沉积的土普遍具有一定的结构性，土的结构性对其土工特性有非常大的影响。近年来，研究者发现结构性黏土在固结特性、孔隙水压力特性、应力-应变特性以及蠕变特性等方面有特殊的表现，但多是根据室内试验得到的结果<sup>[1-3]</sup>。Burland<sup>[1]</sup>、沈珠江<sup>[4]</sup>研究了结构性土的现场原位土工特性，发现原位侧向变位曲线常常呈“凸”型，而且侧向变形随时间的发展十分明显，一旦颗粒间发生大量滑移，骨架蠕变对剪切变形的影响是不可忽视的。张诚厚根据孔压静力触探试验结果，认为原位测试结果有可能定性地确定土的结构性<sup>[5]</sup>。这也说明结构性土具有特殊的原位特性，但目前对该方向研究并不多见。

孔压静力触探(CPTU)作为一种简捷、连续、灵敏和可靠的新型原位测试技术广泛应用于黏土地区。CPTU 试验结果的解释分析方法是建立在经验的基础上，用于解释的经验关系有其地区局限性，只有不断地对测试数据的解释方法进行探讨和研究，结合钻探资料使解释方法进一步得以验证并不断改进，才能总结得出适合我国不同土质特性的地区经验值。对于 CPTU 的许多理论和应用已有一些有意义的研究成果<sup>[6]</sup>，如 Cortellazzo 利用 CPTU 试验对 Italian 软黏土的固结和渗透特性<sup>[7]</sup>、RICCERI 对 Venice Lagoon 的土层分布进行了研究<sup>[8]</sup>。国内的

蔡国军、刘松玉根据室内试验和 CPTU 测试，分析了连云港海相黏土的固结和渗透特性，并具体提出了确定先期固结压力的新方法<sup>[9-10]</sup>。CPTU 原位测试结果的影响因素主要有贯入速率、孔压消散过程、土的扰动程度等，由于探头压入过程中，四周的黏土内会产生挤压和重塑作用，对于结构性黏土来说，随着结构强度的丧失，土性会发生较大变化。因此，有必要考虑结构性对 CPTU 试验的影响，这对准确提供黏土地基处理设计参数具有重要意义。

本文选取具有强结构性的湛江黏土地层，开展室内固结试验和 CPTU 原位测试，以获得孔压静力触探响应特征，对比室内试验和 CPTU 测试结果求取固结系数的差异性，进而分析黏土结构性对 CPTU 原位测定结果的影响。

## 1 工程地质条件与试验方法

### 1.1 试验场地的工程地质条件

勘探取样场地为湛江市霞山区滨海大道中国人民解放军第 4804 厂生活区幼儿园西院。地貌单元为第四系海蚀阶地，揭露地层特征见表 1。取土采用快速静力连续压入法实施，所用取土器为敞口薄壁取土器，待取土器从钻孔中提出后，在地面上立即进行封蜡保存。在取样、运输和试验过程中尽量避免对土样的扰动。湛江黏土的基本物理性质指标见表 2，从物理性质来看，该土含水率为 50%，

表 1 湛江地区地层特征  
Table 1 Stratum characteristics of Zhanjiang area

地层编号	岩土名称	层顶埋深/m	层厚/m	地层描述
①	中粗砂	0~0.5	4.00~5.0	灰黄色，松散，以中粒石英砂为主，部分细砂粒，少量黏粒组成，部分地段过度为黏土夹砂
②	淤泥质黏土	4.5~5.0	13.0~15.0	灰色，局部杂色，饱和，可塑~软塑，以黏粒为主，偶见石英砂及腐殖质组成
③	中粗砂	18.5~19.0	1.5~3.0	灰黄色，稍密~中密，以粗粒石英砂为主，局部为黏土夹砂
④	灰色黏土	20.0~21.0	5.0~8.0	灰色，白灰色，饱和，可塑~软塑，以黏粒为主，部分石英砂及腐殖质组成，下部过度为淤泥质粗砂

表 2 湛江黏土物理力学性质指标平均值  
Table 2 Physical and mechanical average parameters of Zhanjiang soft clay

深度 $h/m$	含水率 $\omega/(%)$	重度 $\gamma/(kN \cdot cm^{-3})$	孔隙比 $e$	液限 $\omega_L/(%)$	塑限 $\omega_p/(%)$	塑性指数 $I_p/(%)$	渗透系数 $k/(\times 10^{-8} cm/s)$
5.70	47.28	17.3	1.299	61.5	22.2	39.3	—
6.20	49.64	17.4	1.322	64.1	26.0	38.1	—
6.80	49.08	17.3	1.327	60.3	23.0	37.3	—
7.50	52.86	17.0	1.428	63.8	24.0	39.8	1.64
7.70	50.74	17.0	1.394	60.6	26.4	34.2	—
9.50	52.33	17.3	1.377	57.6	23.4	34.2	—

孔隙比高达 1.4, 液限为 60%, 塑性指数达 38%, 黏粒含量高达 49%, 应属于软土的范畴, 但异于其他地区软土的是界限含水率较高, 这也说明该区黏土具有特殊的土性。原状土的无侧限抗压强度高达 150kPa, 灵敏度多为 5~7, 结构屈服压力  $\sigma_k$  高达 400kPa~600kPa, 压缩变形呈典型结构性黏土特征, 说明湛江黏土是一种高灵敏的结构性软土。

## 1.2 室内试验与原位测试试验

为了验证原位测试结果的准确性, 采用标准固结仪进行常规固结压缩试验测量原状土与相应重塑土的垂直固结系数  $C_v$ , 试样高 2cm, 直径为 6.18cm。

在 20m×20m 场地范围内, 采用“SJT 型静力触探-电测十字板试验两用仪”进行双桥孔压静力触探。仪器配以应变式静力触探传感器及触探杆位移检测装置和自动数据采集系统。探头规格符合国际标准: 锥底截面积为 10cm<sup>2</sup>, 直径 35.7mm, 锥角 60°, 孔压透水元件位于锥底。为了获得准确的孔压消散规律, 孔压过滤元件和探头都进行严格的排气饱和, 测试前孔压系统需标定与校准。贯入速率控制在 2cm/s, 待到达消散深度时, 停止贯入, 同时采集器进入工作状态, 按照一定时间间隔记录孔压随时间消散过程, 直到孔压接近静水压力位置。此后, 贯入下一试验深度, 进行另一次消散试验。在取原状样钻孔附近布置双桥孔压静力触探孔 3 个, 触探深度达 15m 左右, 孔压消散深度为 6.90m、8.20m、11.00m。CPTU 的试验操作方法与试验资料整理方法详见文献[11]。

## 2 CPTU 消散试验结果分析

### 2.1 土层的判别与分类

测出锥尖阻力  $q_c$ , 侧摩阻力  $f_s$ , 摩阻比  $R_f$ , 静孔隙水压力  $u_c$  及超孔隙水压力  $\Delta u$  等参数随贯入深度的响应规律。其典型试验成果如图 1 所示。

根据图 1 可见, 触探深度均介于①层、②层土体内。与一般软土相比, ②层黏土的触探指标均较高, 其中  $q_c$  值为 2.5MPa~3.0MPa,  $R_f$  平均值约为 1%,  $u$  值也很大, 而被充分扰动的饱和黏土却表现出软塑状态, 这从强度上反映出原状湛江黏土的高灵敏度与强胶结特性。曲线形态方面,  $q_c$ - $h$ 、 $f_s$ - $h$ 、 $R_f$ - $h$  曲线形状较平滑, 变化幅度小, 常有缓慢的波形起伏, 这说明②层黏土具较均匀的力学特性, 因此, 该层内所取室内土样具代表性。 $u_0$ - $h$  与  $\Delta u$ - $h$  曲

线具有随深度增大而呈线性增加的趋势, 由于孔隙水压力变化比静探阻值变化灵敏得多, 孔压响应曲线可分辨出更细的土层变化, 从孔压突变规律可以看出, 该黏土层表现有多韵律与层理发育的沉积特点。

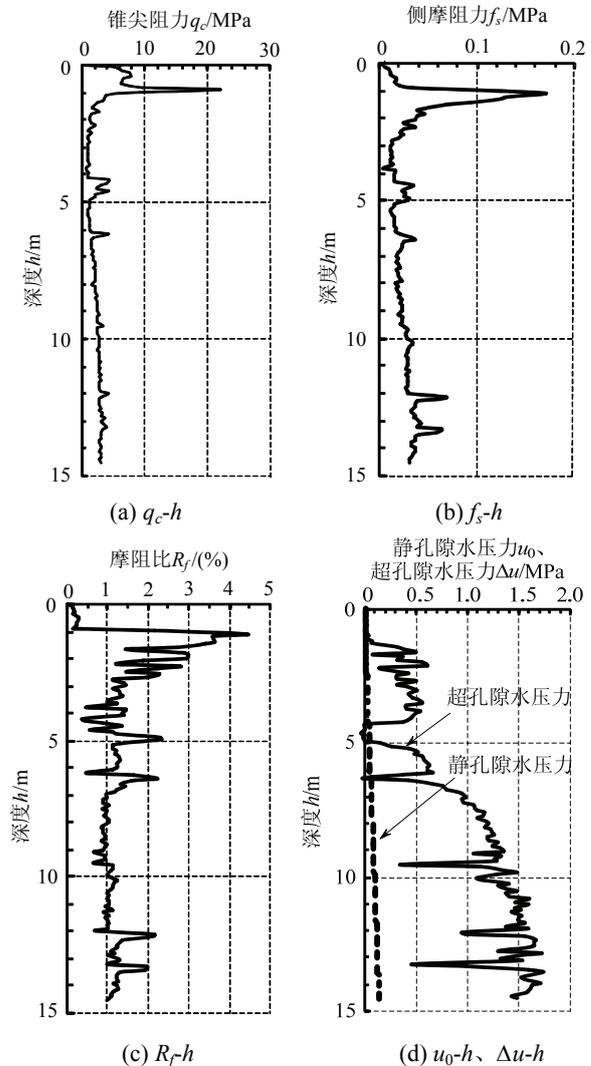


图 1 湛江场地 CPTU 测试结果示例

Fig.1 Results of CPTU test in Zhanjiang site

相对于单桥静力触探试验, CPTU 在划分土层的精度具有较大优势, 特别是在区分砂(层)和黏土(层)方面精度极高, 这是因为孔压探头测触探贯入时产生超孔隙水压力值的大小直接和土类密切相关<sup>[12]</sup>。依据静力触探技术规则(TBJ 37-93)<sup>[13]</sup>, 通过锥尖阻力  $q_c$  判断②层土性为砂质黏土或粉土, 但根据表 3 可知, 该层土中富含黏粒, 粉粒含量并不大, 不可能是砂质黏土或粉土。产生这种现象主要是因为强结构特性增大了探头的贯入阻力, 使将黏性土误认为强度较高的粉砂土。通过试验中孔压消散情

况进一步分析判定②层土性应为黏性土。这说明在强结构性软土地区用单一的单桥静力触探测试可能得到错误的结果，而利用 CPTU 测试在土层的划分方面所得结果有较高可靠性。

表 3 湛江黏土的颗粒组成

Table 3 Grain size distribution of Zhanjiang soft clay

颗粒组成/mm	>0.05	0.005~0.05	0.002~0.005	<0.002
百分含量/(%)	15	36	23	26

### 2.2 孔压消散试验曲线

将孔隙水压力随时间消散数据得到孔隙水压力消散曲线 $\Delta u-T$ ，如图 2 所示。将孔压消散数据归一化为孔隙水压力水平 $\Delta u_n$ ，定义为：

$$\Delta u_n = \frac{u_t - u_0}{u_i - u_0} \quad (1)$$

式中， $u_t$ /kPa、 $u_i$ /kPa、 $u_0$ /kPa 为某时刻的实测孔隙水压力、初始孔隙水压力和静力孔隙水压力。

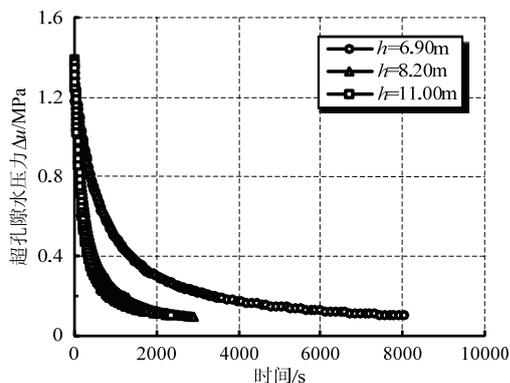


图 2 孔隙水压力消散过程曲线

Fig.2 Pore water pressure dissipation curves

绘出归一化的孔压与时间对数关系曲线，见图 3。分析图 2 与图 3 发现一个特殊的现象，理想的孔压消散应该是孔隙水压力随着时间逐渐降低。然而，埋深相对较浅的地层中进行孔压消散试验时，初期孔压有上升趋势，经过一段短时间后才会逐渐消散下降(如图 2 所示的 $h=6.90m$ 的孔压消散曲线)。一般认为可能是由于孔压探头未达到完全饱和<sup>[11]</sup>，但本试验的孔压探头经过严格的排气饱和，这种影响较小。对于结构性黏土来说，在低围压时的变形会具有剪胀性<sup>[14]</sup>。CPTU 试验中，与探头接触的土体结构性会有所丧失而屈服，使探头周围土体受到剪切而卸荷，导致这部分土体内部的超孔隙水压力较探头下方的土体而言，处于低压或负压状态。当探头停止贯入进行孔压消散时，根据变形协调原理，土体内部应力初始阶段会进行自行的调整平衡，出现上述特殊现象。

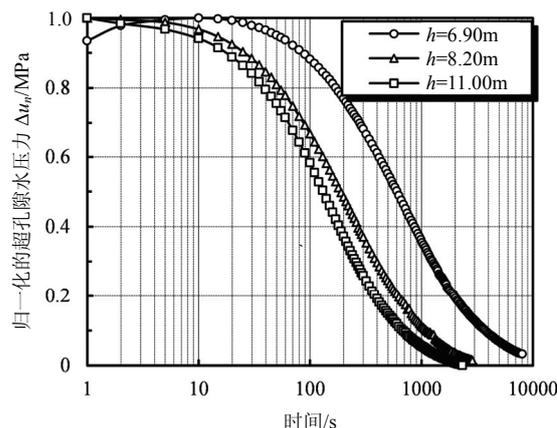


图 3 归一化的孔压消散过程曲线

Fig.3 Normalized pore water pressure dissipation curves

## 3 用 CPTU 测试数据与室内试验求取土的固结系数的对比分析

固结系数是分析黏性土地基变形的重要参数，也是地基加固设计中的关键数据。为了验证在结构性软土地区利用 CPTU 测试结果估算固结系数的准确性，下面对比分析根据室内试验和 CPTU 试验得到的固结系数的差异性。

### 3.1 根据室内试验结果求取固结系数

室内试验采用时间平方根法求取竖向固结系数 $C_v$ ，公式为：

$$C_v = \frac{T_{90}}{t_{90}} h^2 \quad (2)$$

式中： $T_{90}$  为固结度为 90% 的理论时间因数，一般取  $T_{90}=0.848$ ； $t_{90}$  /min 为固结度达到 90% 时的时间； $h$ /cm 为本级荷载下试样的平均排水距离，等于试样起始厚度和终了厚度平均值的一半。

对  $h=7.5m$  的原状土及相应重塑土用该法求的  $C_v$ ，在不同固结压力下的变化规律如图 4 所示。

从图 4 可以看出，湛江黏土的  $C_v-P$  曲线呈现明显分段特性。当  $P < \sigma_k$  时，原状土的结构尚未破坏，孔隙连通性好，孔隙水在土中流动时遇到的阻力较小， $C_v$  值较大；当  $P > \sigma_k$  时，土的原状结构被破坏，土骨架产生塌陷，大孔隙数量迅速减少，导致  $C_v$  亦变小。而重塑土不受结构性影响，基本为一定值。

分析图 4 可知，湛江天然黏土在结构破坏以前的  $C_v$  是重塑土  $C_v$  的 10 倍左右。研究表明，这种倍数关系受结构性强弱影响，结构性越强，倍数越大，有的具有较高结构强度的黏土，倍数关系可能达到几十倍<sup>[4]</sup>。

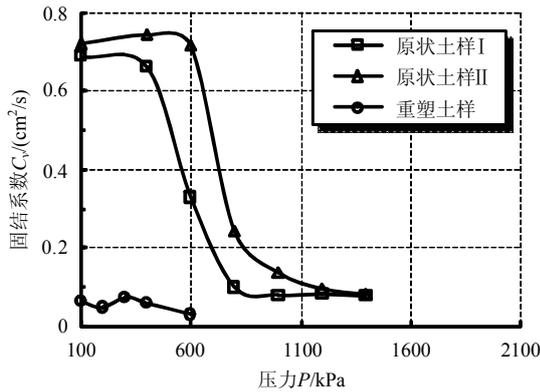


图 4 竖向固结系数随压力的变化

Fig.4 Changes of vertical consolidation coefficient with stress

3.2 根据 CPTU 测试结果求取固结系数

探头贯入土体是一个复杂的应力-应变过程,要精确分析探头四周孔隙水压力消散问题,就要精确考虑稳定贯入的边界条件。考虑高应力大应变条件下土的非线性特征、孔隙水压力及总应力的空间分布求解很困难,目前一般对此简化,应用太沙基固结理论求解。

Levadoux 和 Baligh(1986)用数值模拟研究了各向异性对探头四周土体固结的影响,结果表明孔隙水压力的消散主要取决于水平渗透性。故可采用二维轴对称固结微分方程分析:

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \cdot C_h = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

式中:  $C_h/(\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s})$  为水平向固结系数;  $r/\text{cm}$  为任一点距探头中心的距离(塑性区内);  $u/\text{kPa}$  为孔隙水压力。

已知孔压消散问题的固结微分方程,还需给出起始超孔隙水压力分布规律,方可使问题得到解答。目前,其分布规律主要有两种看法:一是 Henkel 提出的对数规律;二是 Roy、Gupta 等提出负指数规律<sup>[11]</sup>。上述可以认为利用 CPTU 消散试验求取  $C_h$  的基本原理,但这种求取方法非常复杂,且超孔压的分布规律认识并不统一。因此,在工程上广泛采用的是经验对比的方法,但必须在理论分析的基础上建立统计的经验关系,即半理论半经验方法是正确的分析途径。主要有以下几种方法。

孟高头法,也是静力触探试验规程(SL237-1999)<sup>[15]</sup>中采用的方法,表达式如下:

$$C_h = \frac{R^2}{t_{50}} T_{50} \quad (4)$$

式中:  $R/\text{cm}$  为探头圆锥底半径;  $t_{50}$  为孔压消散达

50%所需时间;  $T_{50}$  为孔压消散达 50%的时间因数,对锥角  $60^\circ$ ,锥底截面积为  $10\text{cm}^2$ ,孔压透水元件位于锥底的孔压探头,相应的  $T_{50}=5.6$ <sup>[15]</sup>。

Houlsby 和 Teh 发现如果时间因数定义为  $T_n = C_{ht} / R^2 \sqrt{I_r}$ , 其中  $I_r$  为土体刚度的变化范围在 50~500 范围内,理论消散曲线是唯一的<sup>[16]</sup>。张诚厚根据这一结论,提出  $C_h$  的另一种考虑土体刚度的方法<sup>[5]</sup>:

$$C_h = \frac{R^2 T_{50}}{t_{50} \sqrt{\frac{G}{I_r}}} \quad (5)$$

式中,  $G$  为参考刚度指数,  $G/I_r$  称为刚度指数。张诚厚对昆山和南京软土进行计算选取  $G=200$ 。唐寻对南方机场软土选取  $G=250$  计算得到的  $C_h$  较合理<sup>[17]</sup>。

天然软黏土的  $I_r$  一般为 50~300,可根据其他参数经验得到,见表 4<sup>[11]</sup>。结合前人研究成果<sup>[5,9-10,16]</sup>,设湛江黏土  $I_r=200$ 。基于 CPTU 测试结果采用以上几种方法得到湛江黏土  $C_h$  汇于表 5。分析可知,孟高头法与张诚厚法得到  $C_h$  相同,唐寻法得到  $C_h$  略小。

表 4 天然黏土的  $I_r$ <sup>[11]</sup>

塑性指数 $I_p(\%)$	灵敏度 $S$	超固结比 OCR	刚度 $I_r$
30	3~5	1	206
22	2~3	1	290
17	5~6	1.5	365

表 5 采用不同方法得到的  $C_h$

采用方法	$C_h/(\text{cm}^2/\text{s})$		
	$h=6.9\text{m}$	$h=8.2\text{m}$	$h=11\text{m}$
孟高头法	0.127	0.099	0.036
张诚厚法	0.127	0.099	0.036
唐寻法	0.114	0.089	0.032

由于室内试验与 CPTU 试验得到的固结系数是竖向与水平向的。两者数值关系可通过下式得到:

$$\frac{C_v}{C_h} = \frac{k_v}{k_h} \quad (6)$$

式中,  $k_v$  和  $k_h$  分别是土的竖向与水平向渗透系数。不考虑各向异性,作为均质黏土,  $k_v/k_h$  一般在 0.66~1 范围内<sup>[12]</sup>。

据此,可根据 CPTU 测试结果得到  $C_v$  值,孟高头法和张诚厚法得到  $h=6.9\text{m}$  黏土的  $C_v=0.084\text{cm}^2/\text{s} \sim 0.127\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $h=8.2\text{m}$  黏土的  $C_v=$

$0.066\text{cm}^2/\text{s}\sim 0.099\text{cm}^2/\text{s}$ , 唐寻法得到  $h=6.9\text{m}$  黏土的  $C_v=0.075\text{cm}^2/\text{s}\sim 0.114\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $h=8.2\text{m}$  黏土的  $C_v=0.059\text{cm}^2/\text{s}\sim 0.089\text{cm}^2/\text{s}$ 。其结果明显小于据室内试验得到在结构为破坏前的  $C_v\approx 0.7\text{cm}^2/\text{s}$ 。

土体孔隙水压力消散的过程受土的刚度  $I_r$  的影响, 一般认为  $I_r$  与土的  $I_p$ , OCR 以及灵敏度有关, 但这没有考虑结构性的影响, 较强的结构强度势必导致土具有较大的刚度。因此, 对式(5)进行改进, 将  $G_s$  称为结构性折减参考刚度指数,  $G_s / I_r$  称为结构性折减刚度指数, 得到:

$$C_h = \frac{R^2 T_{50}}{t_{50} \sqrt{\frac{G_s}{I_r}}} \quad (7)$$

这样就可利用 CPTU 测试结果得到结构性原状软土的固结系数。  $G_s$  值的大小可根据不同结构性软土地区的大量 CPTU 试验结果采用经验值的形式获得。黏土的结构性越强,  $G_s$  越小。根据本次测试结果, 得到湛江黏土  $G_s=3.3\sim 6.7$ 。

### 3.3 结构性对 CPTU 测试结果求取固结系数的影响

对湛江黏土采用不同试验数据得到的固结系数表明, 二者存在较大的偏差。在一般软土地区, 由于考虑应力条件及排水条件的影响, 由原位测试所得软土固结系数常常大于室内测试结果, 这与本次试验结果恰好相反。

土的固结快慢取决于孔隙水向外排出的速率, 用固结系数来衡量, 固结系数越大, 固结越快。一般来说, 固结系数随着土体埋深的增大而减小, 但随着埋深增大, 湛江软土的固结系数是逐渐增大的, 如从图 2 和图 3 可以看到埋深越大孔压消散时间越短, 如  $h=6.9\text{m}$  的土层孔压消散需 8000s, 而  $h=11.0\text{m}$  的土层孔压消散需 2500s, 这是因为黏土持有的结构强度随埋深的增大而增强, 说明强结构性对土体的固结系数及孔压规律有较大影响。此外, 通过孔压消散过程中土体出现剪胀现象也说明强结构性对 CPTU 测试结果的一定影响。

考虑土体高灵敏度、强结构性的影响, 可以认为: 当探头在静压力作用下匀速压入土中, 在探头附近的一定范围内的土体结构受到挤压作用, 产生剪切破坏, 探头四周的黏土产生重塑作用, 距探头越近扰动越大。对于结构性较强的高灵敏的湛江黏土来说, 由于触探引起的结构损伤更为显著, 结构的破坏会使探头周围局部土体的渗透性迅速降低而出现指标“失真”。原位测试结果是特定土体在

某一应力条件与边界条件的综合反映, 利用 CPTU 试验结果评价强结构性的固结特性时, 其固结系数的原位测试结果与室内试验结果相比较, 前者会呈现低值。

## 4 结论

(1) 湛江黏土的触探指标较高,  $q_c=2.5\text{MPa}\sim 3.0\text{MPa}$ ,  $R_f$  平均值约为 1%,  $u$  较大。相对于普通的静力触探试验, 利用 CPTU 原位测试试验划分强结构性黏土地区土层具有较高的准确性。

(2) 受强结构性影响, 土体埋深越大, CPTU 孔压消散时间越短, 土体的固结系数越大。孔压消散的初期土体可能出现剪胀现象。湛江黏土在结构破坏以前的  $C_v$  是重塑土的  $C_v$  的 10 倍左右。评价原状黏土固结特性时, 固结系数的原位测试结果明显低于室内试验结果。

(3) 考虑结构性, 提出一个基于 CPTU 测试结果估算土固结系数的方法。根据测试结果得到湛江软土的结构性折减参考刚度指数  $G_s=3.3\sim 6.7$ 。

(4) 研究强结构性对 CPTU 原位测定结果的影响尚属探索阶段, 要进一步深入分析探头贯入过程中微观结构破损机理, 对本文提出的  $G_s$  值还需根据大量 CPTU 试验结果综合统计得出, 以提高精度和实用性。此外, 利用 CPTU 试验结果还可以估算土的抗剪强度、超固结比、桩的承载力等工程指标, 强结构性对其有何影响也是作者下一步研究的重点。

### 参考文献:

- [1] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clays [J]. *Geotechnique*, 1990, 40(3): 329—378.
- [2] Chai J C. Linear  $\ln(e+e_c)-\ln(p')$  relation of structured natural clay [C]// Balkema, Rotterdam, The Netherlands. Balkema Publisher, Proceedings of the Fifteenth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Istanbul, 2001, 1: 59—62.
- [3] 张先伟, 王常明, 李军霞, 等. 蠕变条件下软土微观孔隙变化特性[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1060—1067. Zhang Xianwei, Wang Changming, Li Junxia, et al. Variation characteristics of soft clay micro-pore in the creep condition [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1060—1067. (in Chinese)
- [4] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(1): 100—111. Shen Zhujiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 100—111. (in Chinese)

- Chinese)
- [5] 张诚厚, 施健, 戴济群. 孔压静力触探试验的应用[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 50—57.  
Zhang Chenghou, Shi Jian, Dai Jiqun. The application of piezocone tests in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1): 50—57. (in Chinese)
- [6] 刘松玉, 吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 553—556.  
Liu Songyu, Wu Yankai. On the state-of-art and development of CPT in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 553—556. (in Chinese)
- [7] Cortellazzo G, Simonini P. Permeability evaluation and its implications for consolidation analysis of an Italian soft clay deposit [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(6): 1166—1176.
- [8] Ricceri G, Simonini P, Cola S. Applicability of piezocone and dilatometer to characterize the soils of the Venice Lagoon [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2002, 20: 89—121.
- [9] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于孔压静力触探的连云港海相黏土的固结和渗透特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 846—852.  
Cai Guojun, Liu Songyu, Tong Liyuan, et al. Study on consolidation and permeability properties of Lianyungang marine clay based on piezocone penetration test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 846—852. (in Chinese)
- [10] 刘松玉, 蔡国军, 童立元, 等. 基于 CPTU 测试的先期固结压力确定方法试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 490—495.  
Liu Songyu, Cai Guojun, Tong Liyuan, et al. On preconsolidation pressure of clays from piezocone tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 490—495. (in Chinese)
- [11] 孟高头. 土体原位测试机理、方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 45—53.  
Meng Gaotou. In-situ test on soils mechanism, method and its engineering application [M]. Beijing: Geological Press, 1997: 45—53. (in Chinese)
- [12] 唐唯一, 唐瞻浩. 影响 CPTU 原位测试结果的主要因素分析[J]. 岩土工程界, 2007, 10(8): 69—72.  
Tang Weiyi, Tang Zhanhao. Affect the CPTU test results of the main factors in situ analysis [J]. Geotechnical Engineering World, 2007, 10(8): 69—72. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国行业标准. TBJ 37-93, 静力触探技术规则[S]. 北京: 铁道部建设司标准科情所组织出版发行, 1993.  
Standard of People's Republic of China. TBJ 37-93, Technical specifications for cone penetration [S]. Beijing: The Ministry of Railways Construction Division, 1993. (in Chinese)
- [14] Mesri G, Roskhsar A, Bohor B F. Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay [J]. Geotechnique, 1995, 25(3): 527—554.
- [15] 南京水利科学研究院. SL237-1999, 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.  
Nanjing Hydraulic Research Institute. SL 237-1999, Standard for soil test method [S]. Beijing: China Plane Press, 1999. (in Chinese)
- [16] Houlsby G T, Teh C I. Analysis of piezocone in clay [C]// Balkema Publisher, Rotterdam, Netherlands. AA, editor. Proceeding of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando. 1988: 777—783.
- [17] 唐寻. 利用孔压静力触探技术对机场软土的沉降计算[J]. 路基工程, 2008, 15(2): 55—56.  
Tang Xun. The computing of settlement for airport soft soil by CPTU test [J]. Subgrade Engineering, 2008, 15(2): 55—56. (in Chinese)