

利用 CPTU 对淤泥质黏土工程性质的评价

周海祚 张富有 安彦勇 何毅

(1. 河海大学教育部岩土与堤坝重点实验室, 江苏 南京 210098 ; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 : 针对某场地河滩沉积淤泥质黏土, 利用 CPTU (孔压静力触探) 对该场地不同深度的淤泥质黏土进行原位孔压消散试验, 得出其固结系数。将该固结系数与室内试验所得的固结系数进行比较, 得到现场测得的固结系数比室内试验测得的固结系数约大 1 ~ 2 个数量级的结论。介绍了 CPTU 估算不排水抗剪强度的方法, 对比十字板剪切试验结果, 对各种估算方法在该种土质中的适用性作出评价, 确定了各种方法经验系数的取值范围。

关键词 : 孔压静力触探 ; 淤泥质黏土 ; 固结系数 ; 不排水抗剪强度

中图分类号 : TU411.2 ; TU411.7 文献标识码 : B 文章编号 : 1006-7647(2011)01-0066-04

Evaluation of engineering characteristics of mucky clay using static cone penetration tests // ZHOU Hai-zuo, ZHANG Fu-you, AN Yan-yong, HE Yi (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Taking the mucky clay on a river beach as an example, the in-situ tests on pore-pressure dissipation of the mucky clay at different depths were performed by use of the static cone penetration (CPTU) tests, and the consolidation coefficient was obtained. It was compared with that from the laboratory tests, indicating that the consolidation coefficient determined by the CPTU tests was 10 to 100 times higher than that measured in the laboratory. The method for estimating the undrained shear strength by means of the CPTU tests was introduced. Its results were compared with those from the vane shear tests. The applicability of those methods for the mucky soil was evaluated, and the scope of their empirical coefficients was determined.

Key words : pore-pressure static cone penetration test ; mucky clay ; consolidation coefficient ; undrained shear strength

我国沿江沿海地区分布有广泛的淤泥土, 该土含水率大、液限高、孔隙比大、强度低, 并且还具有高灵敏度、高压缩系数和低固结系数的特点。正确评价淤泥土的工程性质是合理选择地基处理方案的关键, 也是评价软基处理效果的重要依据。淤泥土的固结系数是地基沉降变形计算分析的一个关键参数, 而其抗剪强度指标则是稳定分析中的重要参数, 这些参数一般通过室内试验获得。由于室内试验的土样不可避免地会受到钻孔取样、存储运输扰动以及室内试验边界条件等影响, 与实际情况存在差异, 其固结系数及其他重要参数与原位实际测得的参数有时会出现一定的偏差。通过孔压静力触探 CPTU 原位试验, 可以有效克服对土体的扰动以及某些情况下不易取样的缺陷, 进而真实地反映地基土的性质^[1]。因此, 采用原位(CPTU)试验, 对正确评价淤泥土的工程性质具有重要意义。

笔者采用河海大学岩土工程研究所引进的美国

Hogentogler 多功能数字式车载 CPTU 系统, 配备了最新的功能测试探头和数据处理系统, 包括 E4FCS 实时数据采集计算机系统、CPTU 探头、温度探头、电阻率探头、地震波探头、视频探头、取水探头、取土探头, 可以快速、准确地获取包括土层影像、锥尖阻力、摩擦力、孔隙水压力、电阻率、污染性状、温度、地震动力参数等地基土体的相关基本特性。探头锥底面积为 10 cm², 沿深度每 1 cm 测试 1 组读数。与传统静力触探相比, 该 CPTU 主要优点有 : 利用孔压测量的高灵敏度来修正所测参数, 分辨薄土层, 对固结特性进行评估以及能够求得动力参数等。笔者利用测得的参数计算原位固结系数和不排水抗剪强度, 对比室内固结系数和十字板抗剪强度值, 对河滩相淤泥土工程性质作出评价。

1 场地条件和淤泥土物理性质

某工程场地地形较为平坦, 地面高程一般在

0.50~4.30 m 之间。场地内灌溉沟、渠较多,水系发育。地貌单元主要属河漫滩。淤泥质粉质黏土分布广泛(0.95~10.30 m),针对场地特点进行室内物理力学试验(不固结不排水三轴压缩试验、渗透试验等)。对试验及测试数据进行检查,舍弃失真的数据,然后采用 Grubbs 检验法进行粗差数据的剔除,剔除粗差数据时遵循有利于安全的原则,采用单侧检验法。该场地淤泥质黏土物理力学性质指标见表 1。淤泥土平均含水量 $W=41.5\%$,天然含水量很大,平均密度 $\rho=1760\text{ kg/m}^3$,平均孔隙比 $e=1.142$,呈流塑状态;塑性指数 $I_p=12.7$,液性指数 $I_L=1.36$,压缩系数 $a_v=0.75\text{ MPa}^{-1}$,压缩模量 $E_s=2.8\text{ MPa}$ 。

表 1 淤泥质黏土主要物理力学性质指标

统计指标	W	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	e	I_p	I_L	a_{v1-2}/MPa^{-1}
最小值	30.40	1700	0.82	7.60	0.78	0.18
最大值	52.20	1840	1.39	16.60	2.05	1.41
平均值	41.50	1760	1.14	12.70	1.36	0.75

统计指标	E_{s1-2}/MPa	a_{v1-3}/MPa^{-1}	E_{s1-3}/MPa	C_u/MPa	$\varphi_u/(\text{^\circ})$
最小值	1.70	0.15	2.10	11.00	0.80
最大值	4.10	1.16	5.00	30.00	4.60
平均值	2.80	0.60	3.50	23.00	2.50

2 淤泥质黏土固结系数的确定

2.1 固结系数的确定方法

在过去几十年间,采用原位静力触探方法计算固结系数,提出了许多理论和经验方法,其中主要的经验方法有如下几种:

a. Torstensson^[2]认为固结系数取决于孔穴的类型(球穴或圆柱穴),空半径及刚度指数 I_r ,提出用式(1)推算水平固结系数:

$$C_h = \frac{T_{50}}{t_{50}} r_0^2 \tag{1}$$

式中: C_h 为水平固结系数; T_{50} 为理论解中的时间因数; t_{50} 为孔压消散 50% 时所对应的时间; r_0 为圆锥探头半径(圆柱形模型)或等价探头半径(球形模型)。

b. Baligh^[3]提出用应变路径法估算正常固结土层的水平固结系数:

$$(C_h)_{NC} = \frac{RR}{CR} (C_h)_{OC} \tag{2}$$

式中: RR 为再压缩指数; CR 为初次压缩指数; $(C_h)_{OC}$ 为超固结土的水平固结系数。此方法的缺点是适用范围小。

c. Teh 等^[4]考虑到土的刚度指数 I_r 的影响,提出用式(3)计算水平固结系数:

$$C_h = \frac{T_{50} R^2 \sqrt{I_r}}{t_{50}} \tag{3}$$

式中: $I_r = G/G_u$,其中 G 为土的剪切模量, G_u 为土的不排水抗剪强度。

d. 张诚厚^[5]认为初始孔隙水压力分布取决于 I_r ,提出确定水平固结系数的方法:

$$C_h = \frac{Tr_0^2}{t\sqrt{\frac{200}{I_r}}} \tag{4}$$

式中: t 为孔压消散所需时间; T 为时间因数,200 为参考刚度指数。

e. TB 10018—2003《铁路工程地质原位测试规程》^[6]建议的估算饱和软黏土竖向固结系数的关系式为

$$C_h = \zeta \frac{T_{50} r_0^2}{t_{50}} \tag{5}$$

式中: ζ 为经验修正系数,一般为 0.25~0.80。

2.2 试验方法及结果

采用 CPTU 多功能静力触探车在现场典型位置进行试验,对现场实测的孔压消散曲线进行归一化处理,再与理论曲线拟合,归一化公式如下:

$$\bar{U} = \frac{u_t - u_w}{u_0 - u_w} \tag{6}$$

式中: $\bar{U}$ 为归一化超孔压比(消散度); u_0 为修正后孔压消散试验的初始值; u_t 为消散至时刻 t 的孔压值; u_w 为静止孔隙水压力。

分别利用 2.1 节中介绍的 Torstensson 等方法逐一进行计算,除 TB 10018—2003《铁路工程地质原位测试规程》^[6]中的方法结果趋于保守外,其他方法求出的固结系数结果基本相近。由于篇幅有限,仅列举张诚厚法。考虑 I_r 的取值对 C_h 的影响不是很敏感^[7],试验时取 200 进行计算; T , t 值时与某一消散水平相对应,选 50% 的消散水平作为设计值; r_0 为 17.85 mm。试验结果见表 2,表中 C_h 在 $19.62 \times 10^{-3} \sim 34.12 \times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$ 范围内,室内试验测定的竖向固结系数 C_v 在 $0.64 \times 10^{-3} \sim 2.07 \times 10^{-3}\text{ cm}^2/\text{s}$ 范围内。

表 2 淤泥质粉质黏土固结系数

CPTU 孔号	深度/ m	$C_h/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$C_v/(\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1})$	C_h/C_v
1	2	23.80×10^{-3}	1.06×10^{-3}	22.5
2	3	22.69×10^{-3}	0.64×10^{-3}	35.5
3	5	34.12×10^{-3}	0.91×10^{-3}	37.4
4	7	19.62×10^{-3}	2.07×10^{-3}	9.48

从表 2 可以看出,由于室内试验时取土、运输等环节对土造成了扰动,所以其结果的离散度比 CPTU 测定的大; C_h 比 C_v 大 1~2 个数量级,这与其他学者的研究成果一致^[1,8-9]。另外,有学者通过对类似

土质的研究得出结论^[9-10] :由 CPTU 消散试验估算的固结系数与实测沉降资料反算值较为接近 ,它们在同一数量级上。若以孔压消散过程值为准确定固结系数 ,可以将 CPTU 试验值除以 2 ~ 3 作为设计值^[11]。

从以上室内试验和原位试验的比较可以看出 ,由于室内试验测定固结系数时使用的固结压力比该土样实际的应力大且试验土样在取样和运输过程中受到扰动 ,所以其值偏小 ;CPTU 测试为原位试验 ,边界条件与实际较为一致 ,室内试验时有人为边界约束的影响 ,故 CPTU 测试具有优越性 ;CPTU 在淤泥质黏土中测试时消散路径较短 ,所以会比实测沉降反算值略大 ,但和实测沉降资料反算值在同一数量级上 ,具有很高的工程应用价值。

3 不排水抗剪强度的确定

3.1 不排水抗剪强度的确定方法

原位测定的不排水强度 S_u 取决于破坏模式、土体的非均匀性、应变速率和应力历史。CPTU 资料计算不排水抗剪强度的方法主要分为 2 种 :理论法和经验公式法^[12]。

理论法可概括为以下 5 种 :①经典承载力理论 ;②孔穴扩张理论 ;③能量守恒和孔穴扩张理论 ;④用线性和非线性应力应变关系分析和数据处理方法 ;⑤应变路径理论。由此得出一个关于总锥尖阻力 q_c 和 S_u 的理论关系式 :

$$q_c = N_c S_u + \sigma_0 \tag{7}$$

式中 : N_c 为理论圆锥系数 ; σ_0 为原位总的上覆土压力。

经验公式估算 S_u 可分为以下 3 类 :

a. 利用总锥尖阻力估算 S_u 。对于 CPTU 资料 ,由于测得的孔压对锥尖阻力进行了修正 ,用 q_t 代替了 q_c ,圆锥系数与 S_u 的关系为

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \tag{8}$$

式中 : N_{kt} 为经验系数。

Aas 等^[13]提出了 N_{kt} 与 I_p 之间的校正结果 , N_{kt} 的变化范围为 8 ~ 16 , I_p 的变化范围为 3% ~ 15%。

b. 利用有效锥尖阻力估算 S_u 。Campanella 等^[14]定义了有效锥尖阻力 q_e ,并且给出它与 S_u 之间的关系 :

$$S_u = \frac{q_e}{N_{ke}} = \frac{q_t - u}{N_{ke}} \tag{9}$$

式中 : u 为孔压 ; N_{ke} 为经验系数 (Senneset 等^[15]建议 $N_{ke} = 6 \sim 12$,Lunne 等^[16]建议 $N_{ke} = 1 \sim 13$)。

c. 利用超孔压估算 S_u 。Campanella 等^[14]利用经验、半经验的洞穴扩张理论方法 ,提出用超孔压 Δu 估算 S_u :

$$S_u = \frac{\Delta u}{N_{\Delta u}} \tag{10}$$

式中 : $\Delta u = u - u_w$; $N_{\Delta u}$ 为经验系数 ; $N_{\Delta u} = 2 \sim 20$ (Lunne 等^[16]建议 $N_{\Delta u} = 4 \sim 40$)。

3.2 CPTU 试验结果

选取某段 0.95 ~ 9.5 m 深度处淤泥质黏土作为研究对象 ,对该土层的原位土和扰动土进行十字板试验 ,原位土的平均抗剪强度为 20.9 kPa ,灵敏度为 3.4 (图 1 ~ 3)。

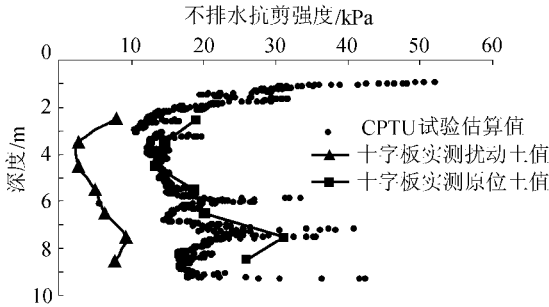


图 1 总锥尖阻力估算结果 ($N_{kt} = 15$)

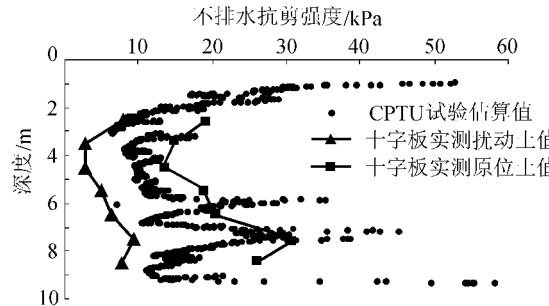


图 2 有效锥尖阻力估算结果 ($N_{ke} = 14$)

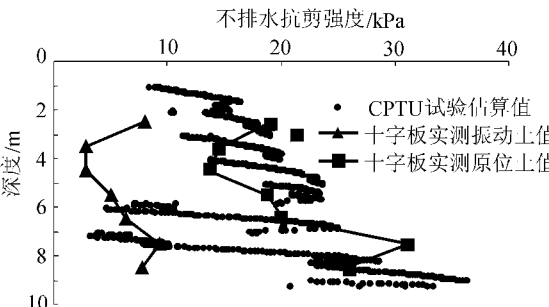


图 3 超孔压估算结果 ($N_{\Delta u} = 5$)

根据 CPTU 试验成果 ,确定 3 种经验估算方法在淤泥质黏土中经验系数的取值范围。结果表明 ,当 $N_{kt} = 14 \sim 18$, $N_{ke} = 13 \sim 15$, $N_{\Delta u} = 4 \sim 6$ 时 3 种方法的估算结果较理想。

由图 1 可见 ,利用总锥尖阻力法估算时 ,计算结果最稳定 ,与十字板测试结果拟合性较好 ,估算得出

的平均抗剪强度为 20.3 kPa ,为室内不固结不排水试验结果的 88.3% ,为十字板剪切结果的 97.1% ,结果十分接近。对比图 2、图 3 ,利用有效锥尖阻力和超孔压估算该场地的淤泥质黏土时 ,由于有效锥尖阻力值较小 ,探头精度高 ,对孔压变化敏感 ,淤泥质黏土中 u 变化较大 ,使结果不稳定 ,与十字板测试结果相比相关性差 ,估算得出的平均抗剪强度分别为 18.4 kPa ,18.2 kPa ,是室内不固结不排水试验结果的 80.0% 和 79.1% ,是十字板剪切结果的 88.0% 和 87.1% ,结果偏差大。因此 ,对于该场地淤泥质黏土 ,总锥尖阻力估算法的适用性较强。

4 结 语

采用 CPTU 消散试验、室内试验和十字板剪切试验综合评价了该场地河漫滩淤泥质黏土的固结性质和不排水抗剪强度 ,得到以下结论 :

- a. 经过试验结果对比 , C_h 比 C_v 大 1 ~ 2 个数量级 ,室内试验由于试验条件和土样扰动 ,精确性受到影响 ,CPTU 显示出优越性。
- b. 有效锥尖阻力法和超孔压法 ,由于有效锥尖阻力值较小 ,淤泥质黏土中 u 变化较大 ,估算的 S_u 精度差 ,2 种方法在淤泥质土中的适用性不强。
- c. 利用总锥尖阻力估算 S_u ,当 $N_{kt} = 14 \sim 18$ 时所得结果能与十字板实测原位结果拟合较好 ,在实际工程中为了保守起见 ,对于该灵敏度的淤泥土 , N_{kt} 可取 18。

参考文献 :

[1] 黄康理 ,张诚厚 .利用孔压静力触探 (CPTU) 测定宁波软黏土的固结系数 [J]. 水利水运科学研究 ,1997 (4) :358-365.

[2] TORSTENSSON B A. Pore pressure sounding instrument [C]//Proceedings of the ASCE Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties ISMOSP. Raleigh :1975 :48-54.

[3] BALIGH M M. Strain path method [J]. Journal of Geotechnical Engineering ,ASCE ,1985 ,111 (9) :1108-1136.

[4] TEH C I ,HOULSBY G T. An analytical study of the cone penetration test in clay [J]. Geotechnique ,1991 ,41 (1) :17-34.

[5] 张诚厚 .由孔压圆锥消散试验测定固结系数的方法 [J]. 岩土工程学报 ,1991 ,13 (2) :51-62.

[6] TB 10018—2003 铁路工程地质原位测试规程 [S].

[7] 张诚厚 .孔压静力触探应用 [M]. 北京 :中国建筑工业出版社 ,1999.

[8] 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.

[9] 孟高头 ,张德波 ,刘事莲 ,等 .推广孔压静力触探技术的意义 [J]. 岩土工程学报 ,2000 ,22 (3) :314-318.

[10] 蔡国军 ,童立元 ,刘松玉 ,等 .孔压静力触探 (CPTU) 探求高速公路软基固结系数研究 [J]. 公路交通科技 ,2007 ,24 (3) :30-34.

[11] 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

[12] LUNNE T ,ROBERTSON P K ,POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice [M]. London :Blackie Academic and Professional and Chapman and Hall ,1997.

[13] AAS G ,LACASSE S ,LUNNE T ,et al. Use of in-situ tests for foundation design on clays [C]//Proceedings of the ASCE Speciality Conference In Situ86. Blacksburg :American Society of Engineering (ASCE) ,1986.

[14] CAMPANELLA R G ,GILLESPIE D ,ROBERTSON P K. Pore pressure during cone penetration testing [C]//Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam :Balkema Press ,1982.

[15] SENNESET K ,JANBU N ,SVANO G. Strength deformation parameters from cone penetration tests [C]//Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing. Amsterdam :Balkema Press ,1982.

[16] LUNNE T ,LACASSE S. Use of in-situ tests in north sea soil investigations [C]//Proceedings of the Symposium :From Theory to Practice in Deep Foundations. Porto Allegre :Norwegian Geotechnical Institute ,Oslo ,1985.

(收稿日期 2010-05-21 编辑 :方宇彤)

· 简讯 ·

河海大学 2010 年获部省级以上科技成果奖 56 项

2010 年 ,河海大学紧紧围绕国家和地方经济建设需求 ,积极组织多学科专家开展科技攻关 ,取得了丰硕的成果。在目前已经公布或公示的省部级以上科技成果奖评选结果中 ,学校主持或作为主要完成单位的科研项目已获奖 56 项 ,比上年增加 18 项 ,与以往相比是获奖最多的一年。共获国家科技进步奖 4 项 ,教育部高等学校科学技术优秀成果奖 5 项 ,水利部大禹水利科技奖 6 项 ,其他部省级科技进步奖 41 项。

4 项国家科技进步奖中 “ 千米级斜拉桥结构体系、设计及施工控制关键技术 ” 获一等奖 ; “ 复杂环境下水力射流新理论关键技术及应用 ”、“ 200 m 级高碾压混凝土重力坝关键技术 ” 和 “ 高混凝土坝整体稳定安全控制新理论及工程应用 ” 均获二等奖。

5 项教育部高等学校科学技术优秀成果奖首次囊括自然科学奖、技术发明奖、科技进步奖三大奖项 ,其中自然科学奖二等奖 1 项 ,技术发明奖一等奖 1 项 ,科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 2 项。

(本刊编辑部供稿)