

DOI: 10.11779/CJGE2021S2057

基于孔压静力触探的江苏地区软土分类研究应用

林 军^{1,2}, 刘松玉^{1,2}, 程月红^{1,2}, 蔡国军², 范钦建¹, 李 翠¹

(1. 中亿丰建设集团股份有限公司, 江苏 苏州 215131; 2. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要: 基于江苏地区典型软土的孔压静力触探(CPTU)测试数据, 对江苏地区软土分类进行研究。分析对比国际上常用的CPTU土分类方法, 分别采用SBT(soil behavior type)分类方法和 I_c (土类指数)分类方法, 对江苏地区的苏北滨海相, 里下河泻湖相, 长江三角洲冲积相和太湖冲积相等软土进行土分类。分类结果表明, CPTU原位测试可以有效识别江苏地区典型软土进行土分类, SBT土分类结果与 I_c 土分类结果具有良好的一致性, I_c 土分类图中不同土类之间的分界线更为明显。

关键词: 孔压静力触探; 软土分类; 土分类图; 土类指数

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0241-04

作者简介: 林 军(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事原位测试方面教学和科研工作。E-mail: aslinjun@163.com。

Classification of soft clay in Jiangsu Province based on piezocone penetration tests

LIN Jun^{1,2}, LIU Song-yu^{1,2}, CHENG Yue-hong¹, CAI Guo-jun², FAN Qin-jian¹, LI Cui¹

(1. Zhongyifeng Construction Group Co., LTD, Suzhou 215131, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University,

Nanjing 210009, China)

Abstract: The classification results of soft soils in Jiangsu Province are derived through the CPTU data. The soil classification methods based on the CPTU data are reviewed, then the SBT (soil behavior type) method and the I_c (soil index) method are chosen to identify the soft soils in Jiangsu province, including Northern Jiangsu marine clay, Lixiahe lagoon clay, Yangtze Delta alluvial clay and Taihu alluvial clay. The soil classification results show that the CPTU data can be used to effectively recognize the typical soft soils in Jiangsu province, and the SBT results are consistent with I_c results. Moreover, the boundary between different soil types is more obvious in I_c soil classification chart.

Key words: piezocone penetration test; classification of soft clay; soil behavior type chart; soil index

0 引言

大量工程实践显示, 高速公路出现的软土问题, 主要原因就是对不同地区软土层缺乏深入了解。这些软土多为淤泥或淤泥质土, 通常表现为含水率大、强度低、压缩性大、透水性差、土质不均匀、地区之间土性存在较大差异等特点^[1]。孔压静力触探(CPTU)原位测试技术, 测试过程中能够同时测量锥尖阻力 q_t 、侧壁摩阻力 f_s 和孔隙水压力 u_2 等参数, 直观准确地反映土类的变化, 因此土分类是CPTU测试的重要应用内容^[2]。

本文分析对比国际上常用的CPTU土分类方法, 基于江苏地区软土(苏北滨海相, 里下河泻湖相, 长江三角洲冲积相和太湖冲积相)的CPTU测试结果, 结合现场钻孔资料, 进行基于CPTU测试的江苏地区软土分类研究。

1 基于CPTU测试的土分类方法

基于CPTU测试的土分类, 诸多学者进行了大量

研究。中国岩土工程中广泛采用《岩土工程勘察规范》^[3]的土类名称和分类方法。美国土分类方法和名称主要采用统一土质分类方法(USCS), 该系统将土体分为粗粒土和细粒土两大类^[4]。

Jones等^[5]基于南非场地土的多功能CPTU试验资料, 建立了基于超静孔隙水压力 Δu 和净锥尖阻力 q_{net} ($q_{net} = q_t - \sigma'_{v0}$)的土分类图。

Senneset等^[6]对超静孔隙水压力 Δu 进行归一化处理, 采用了孔压参数比 B_q 的概念绘制了土分类图, B_q 定义如下:

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma'_{v0}} \quad . \quad (1)$$

式中 u_2 为位于探头锥肩的孔隙水压力; u_0 为静水压

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908250); 江苏省“双创博士”计划项目(202030537); 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB560011)

收稿日期: 2021-08-15

力; σ_{v0} 为上覆应力; q_t 为修正的锥尖阻力; q_c 为锥尖阻力; a 为探头面积比。

Robertson 等^[7]提出基于 CPTU 的土分类应当采用经过孔压 u_2 修正后的锥尖阻力 q_t , 并建立了 $q_t - R_f$ 和 $q_t - B_q$ 的 12 区域土分类图, 又称 SBT 图, 如图 1 所示。其中, 1 为灵敏细粒土, 2 为有机质土、泥炭, 3 为黏土-粉质黏土, 4 为粉质黏土-黏质粉土, 5 为砂质粉土-粉砂, 6 为粉质砂土-纯砂, 7 为砂-砾质砂, 8 黏质砂-极硬砂, 9 为极硬细砂。

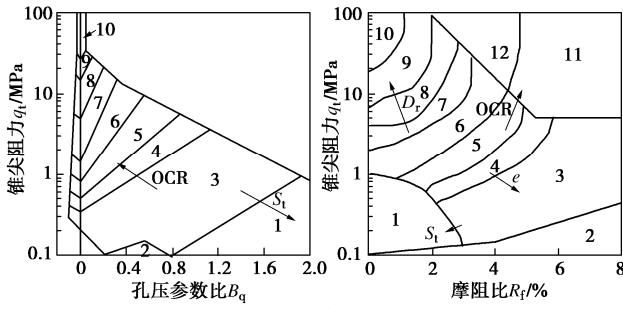


图 1 Robertson 等^[7]土分类图

Fig. 1 Soil classification chart proposed by Robertson et al^[7]

Wroth^[8-9]提出 CPT/CPTU 参数的解译应当基于无量纲变量, 以利用连续介质力学中的比例法则, 建议贯入阻力的归一化采用下式进行:

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} , \quad (2)$$

$$F_r = f_s / (q_t - \sigma_{v0}) \times 100\% . \quad (3)$$

式中 Q_t 为归一化锥尖阻力; F_r 为归一化摩阻比。若可同时测量 u_2 和 u_3 , 则 f_s 建议采用经过孔压修正的侧壁摩阻力 f_t :

$$f_t = f_s + \frac{(u_3 A_{st} - u_2 A_{sb})}{A_s} . \quad (4)$$

式中 f_t 为经孔压修正后的侧壁摩阻力; f_s 为实测的侧壁摩阻力; A_s 为侧壁摩擦筒表面积; A_{st} , A_{sb} 分别为套筒顶部与底部的横截面积; u_3 为在摩擦套筒尾部位置量测的孔压。

Robertson^[10]采用归一化指标 Q_t 、 F_r 以及 B_q 重新提出了土分类图 (SBTn 图), 如图 2 (a) 和 2 (b) 所示。Lunne 等^[11]进行了补充与修正, 如图 2 (c)。表 3 为 SBTn 图中土代号与 USCS 的土名对应关系。

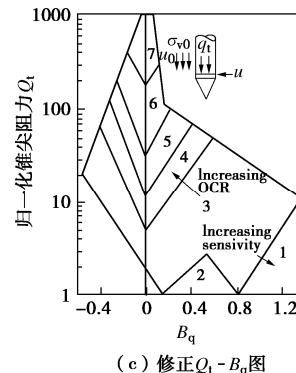
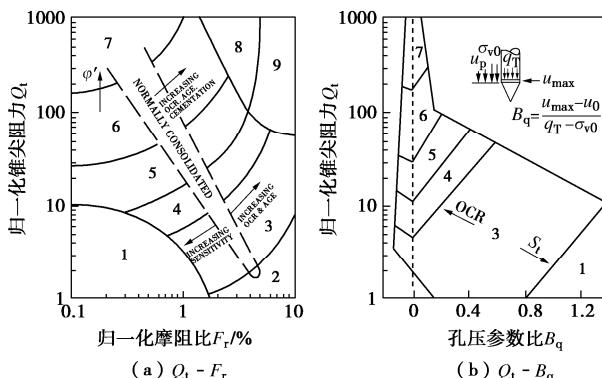


图 2 Robertson 归一化土分类图^[11]

Fig. 2 Soil behavior type classification chart based on normalized CPTU data by Lunne et al^[11]

Jefferies 等^[12-13]将 Robertson 的 $Q_t - F_r$ 和 $Q_t - B_q$ 土分类图整合为修正的土分类图, 以 $Q_t(1-B_q) - F_r$ 表示。其后 Jefferies 等^[13]提出, 综合考虑 Q_t , B_q 和 F_r 之后的土性分类图曲线簇可以采用一系列同心圆近似估算, 并将同心圆半径定义为土类指数 I_c , 记为 $I_{c(JD)}$, 具体表达式如下:

$$I_{c(JD)} = \sqrt{[3 - \lg(Q_t(1-B_q))]^2 + [1.5 + 1.3 \lg(F_r)]^2} . \quad (5)$$

在软黏土中, 超静孔隙水压力很大, 而锥尖阻力很小, 因此可能出现 $(1-B_q) < 0$ 的情况, Been 等^[14]对式 (5) 进行了修正, 采用无量纲参数 $(Q_t(1-B_q)+1)$ 进行计算, 表达式如下:

$$I_{c(BJ)} = \sqrt{[3 - \lg(Q_t(1-B_q)+1)]^2 + [1.5 + 1.3 \lg(F_r)]^2} . \quad (6)$$

Robertson 等^[15]建议仍然采用 $Q_t - F_r$ 分类图中, 但新的土类指数 ($I_{c(RW)}$) 定义如下:

$$I_{c(RW)} = [(3.47 - \lg Q_{tn})^2 + (\lg F_r + 1.22)^2]^{0.5} , \quad (7)$$

式中, Q_{tn} 为考虑应力水平的归一化锥尖阻力,

$$Q_{tn} = [(q_t - \sigma_{v0}) / p_a] \times [p_a / (\sigma'_{v0})]^n , \quad (8)$$

式中, $n \leq 1$ 为应力指数, q_t 、 σ_{v0} 、 p_a 及 σ'_{v0} 的单位均相同, p_a 为参考压力, p_a 取 100 kPa。

研究表明, 在 SBTn 图上的纯净砂土区域, 应力指数通常宜采用 0.5 进行应力归一化; 而在黏土区域, 宜采用线性归一化, 也即 $n=1.0$ 。

Zhang 等^[16]建议应力指数 n 通过土类指数 I_c 进行估算, 且与有效上覆应力有关。Robertson^[17]建议

$$n = 0.381 \times I_{c(RW)} + 0.05 \times (\sigma'_{v0} / p_a) - 0.15 , \quad (9)$$

采用计算应力指数 n , 并提出了基于土类指数 $I_{c(RW)}$ 的土类划分图, 见图 3。

2 基于 CPTU 测试的江苏软土分类研究

基于 CPTU 原位测试数据, 对比分析 SBT 和 $I_{c(RW)}$

土分类结果, 结合钻孔和室内试验结果, 研究江苏地区典型软土地场土分类特征。

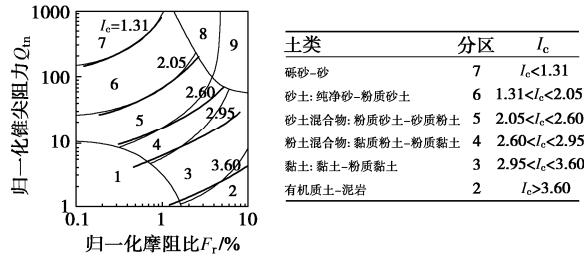


图 3 Robertson 土类指数分类图^[17]

Fig. 3 Soil behavior type index by Robertson^[17]

苏北滨海相软土 CPTU 测试数据主要来源于沿海高等级公路试验段。分别采用 SBT 土分类图和 $I_{c(RW)}$ 土分类图对苏北滨海相黏土地场多功能 CPTU 资料进行解译, 如图 4。根据 q_t/R_f 图表, 数据点主要位于区域 3 (黏土), 根据 I_c 土分类图, 数据点主要集中在区域 3 (黏土: 黏土-粉质黏土)。根据钻孔资料, 苏北滨海相黏土地场在 6.0~11.5 m 为均质的软黏土, 这也说明了在软黏土中侧壁摩阻力 f_s 很难测准。

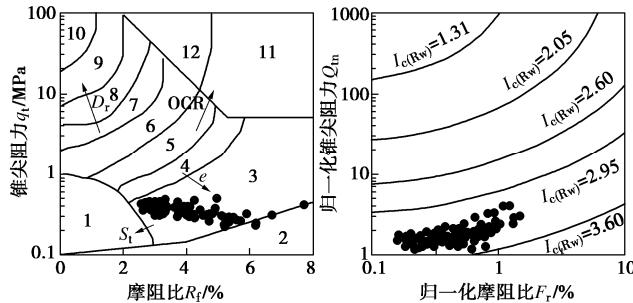


图 4 基于 CPTU 测试的苏北滨海相软土分类结果

Fig. 4 Soil classification of Northern Jiangsu marine clay based on CPTU data

里下河泻湖相软土 CPTU 测试数据来自于淮盐高速公路盐城段。分别采用 SBT 土分类图和 $I_{c(RW)}$ 土分类图对里下河泻湖相软土地场多功能 CPTU 资料进行解译, 如图 5。根据 q_t/R_f 图表, 数据点主要位于区域 3 (黏土) 和 2 (有机质土、泥炭), 根据 I_c 土分类图, 数据点主要集中在区域 3 (黏土: 黏土-粉质黏土), 少部分散落区域 2 (粉土混合物: 黏质粉土-粉质黏土)。根据钻孔资料, 里下河泻湖相软土地场在 8.0~14.5 m 为均质的软黏土, 并且有机质含量显著。

长江三角洲冲积相软土 CPTU 测试地点位于崇启大桥试验段, 分别采用 SBT 土分类图和 $I_{c(RW)}$ 土分类图对 CPTU 地场资料进行解译, 如图 6。根据 q_t/R_f 图表, 数据点除了主要位于区域 3 (黏土) 和 4 (粉质黏土-黏土) 以外, 还有部分数据点位于区域 5 和 6, 随着深度增加, OCR 递减和灵敏度逐渐增加, 这个现象和室内土工试验指标一致。根据 I_c 土分类图, 数据点主要分为两部分, 区域 3 和区域 2。根据勘察钻孔资

料, 该地区浅部的为淤泥质粉质黏土层或粉质黏土层, 局部含有粉砂透镜体。

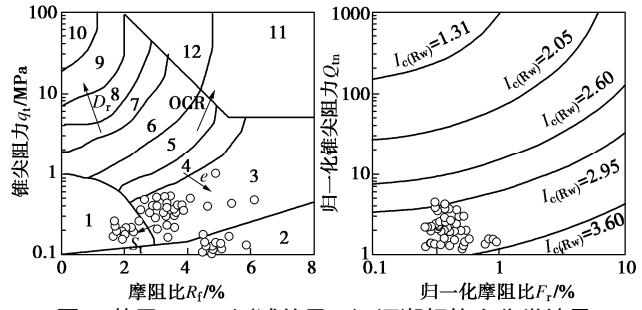


图 5 基于 CPTU 测试的里下河泻湖相软土分类结果

Fig. 5 Soil classification of Lixia lagoon clay based on CPTU data

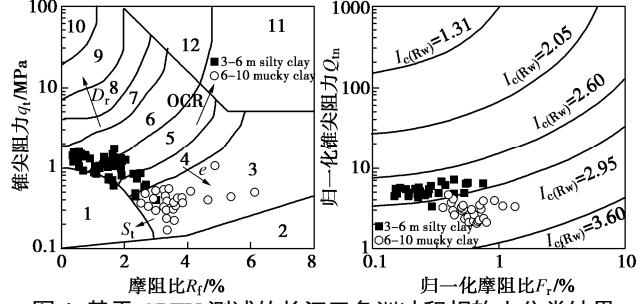


图 6 基于 CPTU 测试的长江三角洲冲积相软土分类结果

Fig. 6 Soil classification of Yangtze Delta alluvial clay based on CPTU data

太湖冲积湖积相软土 CPTU 测试数据来自于沪苏浙高速公路试验段, 分别采用 SBT 土分类图和 $I_{c(RW)}$ 土分类图对 CPTU 场地资料进行解译, 如图 7。根据 q_t/R_f 图表, 数据点除了主要位于区域 3 和 4 以外, 还有部分数据点位于区域 5 和 6。根据 I_c 土分类图, 数据点大部分集中于区域 4, 少部分位于区域 3。根据钻孔资料, 该地区浅部为黏土, 软—硬塑状态; 中等压缩性土; 下部为淤泥质粉质黏土, 局部夹有薄层粉砂, 压缩性高, 强度低, 高触变性。

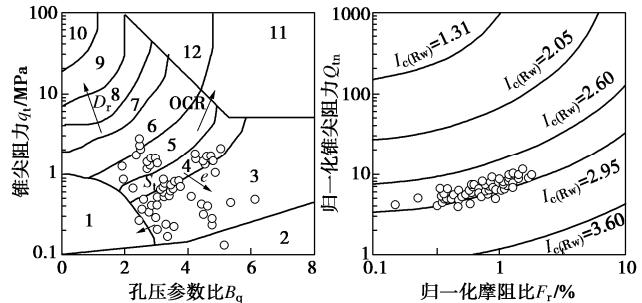


图 7 基于 CPTU 测试的太湖冲积湖积相软土分类结果

Fig. 7 Soil classification of Taihu alluvial clay based on CPTU data

3 基于 CPTU 测试的江苏地区软土分类结果讨论

根据江苏地区典型软土的 CPTU 测试数据, 对土

类指数 I_c 进行汇总研究, 江苏地区典型软土 I_c 值范围如表 1 所示。 I_c 土分类图与 SBT 土分类图相比, 不同土类之间的分界线更为明显, 因所采用的归一化锥尖阻力考虑了黏性土和无黏性土归一化算法不同。但是, 测试数据经过归一化处理后, I_c 土分类图包含的信息相对于 SBT 土分类图较少, 如在图 7 中, I_c 土分类图丢失了 OCR 递减和灵敏度逐渐增加的信息。

表 1 江苏区域典型软土的 I_c 值

Table 1 Typical values of I_c of soft soils in Jiangsu province

软土区域	I_c 值范围
苏北滨海相软土	$3.12 < I_c < 3.42$
里下河泻湖相软土	$2.92 < I_c < 3.32$
长江三角洲冲积相软土	$2.84 < I_c < 3.12$
太湖冲积相软土	$2.74 < I_c < 2.98$

4 结 论

通过选取江苏地区典型软土场地, 基于 CPTU 原位测试数据, 对江苏地区软土分类进行研究, 并与钻孔和室内试验结果相互验证, 主要结论如下:

(1) CPTU 原位测试可以有效准确对江苏地区典型软土进行土分类。 I_c 土分类图中不同土类之间的分界线更为明显。

(2) 对于江苏地区典型软土, SBT 土分类结果与 I_c 土分类结果具有良好的一致性。SBT 土分类图中可保留软土原位状态信息。

(3) 苏北滨海相软土的 I_c 值范围为 $3.12 \sim 3.42$; 里下河泻湖相软土的 I_c 值范围为 $2.92 \sim 3.32$; 长江三角洲冲积相软土的 I_c 值范围为 $2.84 \sim 3.12$; 太湖冲积相软土 I_c 值范围为 $2.74 \sim 2.98$ 。

参考文献:

- [1] 邓永峰, 吴燕开, 刘松玉, 等. 连云港浅层海相软土沉积环境及物理力学性质研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 29 - 33. (DENG Yong-feng, WU Yan-kai, LIU Song-yu, et al. Sediment environment of shallow marine clays deposited in Lianyungang area and their physical and mechanical properties[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1): 29 - 33. (in Chinese))
- [2] 刘松玉, 蔡国军, 邹海峰. 基于 CPTU 的中国实用土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1765 - 1776. (LIU Song-yu, CAI Guo-jun, ZOU Hai-feng. Practical soil classification methods in China based on piezocone penetration tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1765 - 1776. (in Chinese))
- [3] 岩土工程勘察规范: GB50021—2001[S]. 2009. (Code for Investigation of Geotechnical Engineering: GB 50021—2001 [S]. 2009. (in Chinese))
- [4] ASTM. Standard practice for classification of soils for engineering purpose (USCS)[S]. ASTM Standard D2487. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [5] JONES G A, RUST E. Piezometer penetration testing CPTU[C]// Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-II. Amsterdam, 1982.
- [6] SENNESET K, JANBU N. Shear strength parameters obtained from static cone penetration tests[C]// Proceedings of Strength Testing of Marine sediments; Laboratory and In situ Measurement. San Diego, 1985
- [7] ROBERTSON P K, CAMPANELLA R G, GILLESPIE D, et al. Use of piezometer cone data[C]// Proceedings of the ASCE Specialty Conference In Situ'86 Blacksburg, 1986.
- [8] WROTH C P. The interpretation of in situ soil tests[J]. Géotechnique, 1984, 34(4): 449 - 489.
- [9] WROTH C P. Penetration testing: a more rigorous approach to interpretation[C]// Proceedings of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1. Orlando, 1988.
- [10] ROBERTSON P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(1): 151 - 158.
- [11] LUNNE T, POWELL J J M, ROBERTSON P K. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. London: Blackie Academic and Professional, 1997.
- [12] JEFFERIES M G, DAVIES M P. Soil classification by the cone penetration test: Discussion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(1): 173 - 176.
- [13] PINCUS H J, JEFFERIES M G, DAVIES M P. Use of CPTu to estimate equivalent SPT N60[J]. Geotechnical Testing Journal, 1993, 16(4): 458.
- [14] BEEN K, JEFFERIES M G. Towards Systematic CPT Interpretation[C]// Proceedings of Wroth Memorial Symposium, Thomas Telford, London, 1992.
- [15] ROBERTSON P K, WRIDE C F. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 442 - 459.
- [16] ZHANG G, ROBERTSON P K, BRACHMAN R W I. Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(5): 1168 - 1180.
- [17] ROBERTSON P K. Interpretation of cone penetration tests—a unified approach[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(11): 1337 - 1355.