

基于孔压静力触探力学分层的 土体边界识别方法研究

林 军^{1,2}, 蔡国军^{1,2}, 刘松玉^{1,2}, 邹海峰^{1,2}

(1. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要: 对于岩土工程设计来说, 准确识别均质土层的边界是极其重要的。孔压静力触探 (CPTU) 测试数据常用于土分类、土层边界识别和岩土工程参数评价等方面。基于 CPTU 测试数据, 利用统计分析方法进行力学分层, 可以有效地识别均质土层边界。采用组内相关系数法和修正的 Bartlett 检验, 对 CPTU 测试数据进行统计分析, 生成相应的组内相关系数指标 R_i 和 Bartlett 统计量。结合 R_i 和修正的 Bartlett 统计量临界值, 检验土体的均质性, 确定均质土层的边界, 从而进行力学分层。利用 3 个场地的 CPTU 数据进行力学分层, 并将其结果与土性分层结果进行对比。结果表明, 力学分层结果不仅能分辨出全部主要的土性分层界面, 而且还显示更多潜在的次级力学分层界面。

关 键 词: 孔压静力触探; 土层边界识别; 力学分层法; 统计分析

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)05-1413-11

Identification of soil layer boundaries using mechanical layered method base on piezocone penetration test data

LIN Jun^{1,2}, CAI Guo-jun^{1,2}, LIU Song-yu^{1,2}, ZOU Hai-feng^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: To identify boundaries of homogeneous soil layers is critical to geotechnical design. The piezocone penetration test (CPTU) data are often used for soil classification, boundaries identification, property evaluation, etc. Statistical methods for soil boundary identification are developed to detect the boundaries of the homogeneous soil layers based on CPTU data. To generate intra-class correlation coefficient index, i.e. R_i statistics and Bartlett statistics, it is necessary to perform statistical analysis on CPTU data with intra-class correlation method and modified Bartlett statistic test respectively. The boundaries of homogeneous soil are identified by mechanical layered method using critical R_i statistic and critical modified Bartlett test statistic for homogeneity test of soil layers. The CPTU data in three construction sites are assessed to identify boundaries of homogeneous soil layers with the proposed methods. The results compared with the results of the soil classification layered method show that the mechanical layered method can discriminate all primary boundaries decided by the soil classification layered method, and reveal potential secondary soil boundaries.

Keywords: piezocone penetration test; soil boundary identification; mechanical layered method; statistical analysis

1 引 言

正确识别均质土层的边界是岩土工程勘察的重要内容。对于岩土工程设计, 在确定地基土的工程性质指标和参数时, 如桩的持力层、地基承载力及抗震液化特性等, 准确地识别均质土层的边界是

极其重要的。而且, 土工参数的统计分析只对于均质土层内的土体来说是有意义的。Baecher 指出^[1], 均质土层的识别是进行岩土工程分析的先决条件, 并推荐采用统计分析方法来对场地勘察的数据分析。

目前, 岩土工程勘察中所采用的土层分界方法

收稿日期: 2015-07-07

基金项目: 国家重点研发计划课题 (No. 2016YFC0800201); 国家自然科学基金项目 (No. 41672294); 江苏省杰出青年基金项目 (No. BK20140027)。This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0800201), the National Natural Science Foundation of China (41672294) and the Jiangsu Province Science Fund for Distinguished Young Scholars (BK20140027).

第一作者简介: 林军, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事现代原位测试技术等方面的工作。E-mail: aslinjun@163.com

主要为土性分层和力学分层。土性分层以钻探和室内试验为基础,根据钻探和室内试验结果进行地基土的土性分层和参数统计分析^[2]。土性分层容易产生漏层,特别是当土层内含有薄夹层时,钻探和室内试验得到的地层分层结果与原位测试得到的地层分层结果容易产生不匹配的现象。尤其当钻探取得的土样恰好是薄层部位时,容易被误认为是厚土层的土样。

力学分层基于统计分析方法,对 CPTU 测试数据进行均质性分析,确定具有相似统计结果的均质土体的边界。不同土层的土工参数是高度可变的,CPTU 原位测试曲线可以准确地反映不同土层的力学物理性质的变化特征,因而也具有高度的变化性。若采用统计分析方法,对 CPTU 测试数据进行方差均质性分析,土体力学性质稳定或相近的地层划分为相同土层,则可以定量地确定相邻土层边界,使场地土层的不均匀性显示得更加清楚、精确。

采用静力触探等原位测试结果,进行力学分层,土层的漏层问题就很容易得到解决。顾宝和^[3]指出,静力触探的优势是用于划分地层,查明土的均匀性等。孟高头等^[4]推荐采用孔压静力触探进行土层划分。刘松玉等^[5-6]认为,CPTU 测试能更加准确地对土进行分类与划分地层。马海鹏等^[7]认为,静力触探试验在不扰动土体原位状态的情况下进行,已成为国内外重要的原位试验手段之一。

采用组内相关系数法和修正的 Bartlett 检验两种统计方法,对锥尖阻力 q_t 、归一化锥尖阻力 Q_t 和土类指数 I_c 等 CPTU 测试数据进行均质性分析,确定均质土体的边界,进行力学分层。基于 CPTU 测试数据,分别对 3 个场地的地层进行力学分层,对比传统的土性分层结果,验证基于 CPTU 测试数据力学分层结果的可靠性。

2 基于 CPT/CPTU 土层边界确定方法

2.1 经验目视法

《岩土工程勘察规范》^[8]规定,利用静力触探贯入曲线划分土层时,可根据锥尖阻力(或比贯入阻力)、摩阻比贯入曲线的线型特征、孔隙水压力或孔压参数比等,参照邻近钻孔的分层资料划分土层边界。

《铁路工程地质原位测试规程》^[9]和《冶金工业岩土勘察原位测试规范》^[10]等规定,土层界面位置的确定应符合:

(1) 孔压静力触探时,应将孔隙水压力和孔压参数比的突变点位置定为土层界面。

(2) 单桥或双桥触探时,应根据超前深度和滞后深度确定,方法如下:

①一般情况下,可将超前、滞后总深度段中点偏向低端阻值(锥尖阻力或比贯入阻力)层(软层)10 cm 处定为土层界面。

②上、下土层的锥尖阻力值相差 1 倍以上,且其中软层的锥尖阻力(或比贯入阻力)平均值小于 2 MPa 时,可将软层的最后 1 个(或第 1 个)锥尖阻力(或比贯入阻力)小值偏向硬层 10 cm 处定为土层界面。

③上、下土层端阻值差别不明显时,则应结合摩阻比、侧壁摩阻力值确定土层界面。

采用目视经验法划分土层边界时,首先根据大量的 CPT/CPTU 测试资料,得出土类的某项分类系数,然后用实测的 CPT/CPTU 数据计算分类系数,并结合工程勘察资料进而划分土层的界限。这种方法人工计算量大,且受经验数据影响大,同时还受钻孔资料的限制。采用目视经验法对某高速公路 CPTU 测试数据确定土层边界结果如图 1 所示:1 层为杂填土,边界深度为 1.45 m;2 层为粉土,边界深度为 6.45 m;3 层为淤泥质粉质黏土,边界深度为 7.95 m;4 层为粉土,边界深度为 17.90 m;5 层粉细砂,未揭穿。可以看出,目视经验法没有完全反映出 CPTU 测试数据的变异性。

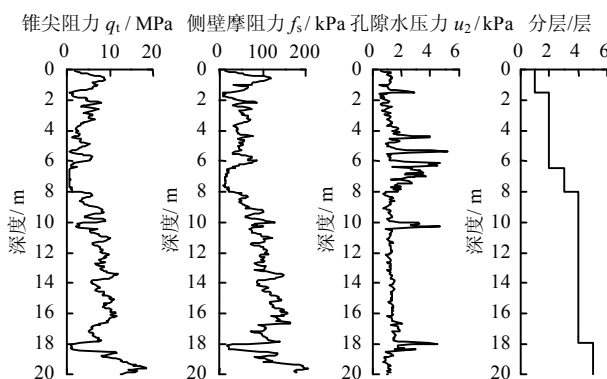


图 1 目视经验法确定土层边界

Fig.1 Identification of soil boundaries using visual inspection method

2.2 统计分析法

在潜在的均质土层分界处,CPT/CPTU 测试数据存在着某种变异性,这种变异性可以通过对 CPT/CPTU 测试数据进行统计分析来评估,从而确定潜在的土层界面。

Webster 等^[11]提出采用组内相关系数指数 R_i (Intra-class correlation coefficient index R_i) 来识别

均质土层边界。Wickremesinghe 等^[12-13]采用移动窗口法,生成窗口内两个样本片段的 R_t 统计量,对静力触探测试曲线进行统计分析,进而确定均质土体的边界。Vessia 等^[14]基于 CPTU 测试数据,采用组内相关系数法对瑞士高原泻湖相黏土进行统计分层,并研究了该黏土的空间变异性。Cherubini 等^[15]采用组内相关系数指数法对静力触探测试数据进行均质性检验,对 Basilicata 地区砂土进行了统计分层,并研究静力触探 (CPT) 参数与动力触探 (SPT) 参数之间的关系。

杨树荣^[16]采用多变量统计分析中的最优分割法理论,对静力触探 3 个力学指标的测试曲线,进行综合分析,聚类分割,划分出地基土的不同层。首先对原始测试曲线进行初步分层,当地基土内砂性土和黏性土共存时,再采用划分亚层的方法进行分层。

Hegazy^[17]、Zhang^[18]、Tumay^[19]等考虑不同土的组成和力学性质的不确定性,采用模糊理论,对静力触探测试数据曲线进行土层分界和分类。首先利用模糊理论中的区域估计和点估计等统计方法计算各类土的概率曲线,根据各点属于某类土的概率大小来判定土的分类和分层,然后采用概率区域评价分类方法,基于土的组成和力学性状的相关关系,给出沿深度不同土类的概率,并将土分类指数 U 和美国统一土质分类系统 (USCS) 给出的土类建立统计相关关系,对每一种 USCS 土类建立 U 的正态分布。由于每一个 U 值对应于具有不同概率的几种土类,故将 U 值进一步划分为 3 类:砂性土 (GP, SP, SM)、粉土 (SC, ML) 和黏性土 (CL 和 CH)^[19]。

该方法需要大量的关于土的经验统计分布函数,因而不宜在工程上直接应用。

Hegazy 等^[20]评价了不同的聚类方法,建议使用最短距离 (最近邻法) 谱系聚类方法对 CPTU 测试数据进行分析,并归纳总结了采用最短距离 (最近邻法) 谱系聚类方法对 CPTU 测试数据进行统计分析划分土层和土类的步骤,提出了基于聚类分析的 CPTU 测试划分土层的准则。蔡国军等^[21]采用上述方法对连云港海相黏土、常州冲湖积相黏土、南京长江低漫滩淤泥质亚黏土、淮盐高速公路泻湖相黏土和申嘉湖高速冲湖积相黏土等 5 个典型场地进行了基于孔压静力触探测试数据的场地土层划分,如图 2 所示。

Phoon 等^[22-23]考虑土体的自相关结构,采用修正的 Bartlett 检验来考察均质土层的边界,从而确定均质土层的边界。该土层分界方法基于修正的 Bartlett 统计检验,将土体的自相关结构、土体参数去趋势化和土层边界识别等内容紧密地联系在一起。在修正的 Bartlett 检验中,采用两个连续、长度相等的片段组成的移动窗口,在静力触探测试曲线上移动,分别计算该窗口中心处的 Bartlett 检验统计量,并以对应的 Bartlett 统计量的临界值作为土层边界的识别点。

Hegazy 等^[20,24]指出,土体的土类及组成与其力学行为并不显示为严格的一一对应关系,故采用不同的统计分析方法,均质土层的分界结果不能始终保持一致性。文中采用组内相关系数法和修正的 Bartlett 检验两种统计方法的共同分层结果作为均质土层的分界。

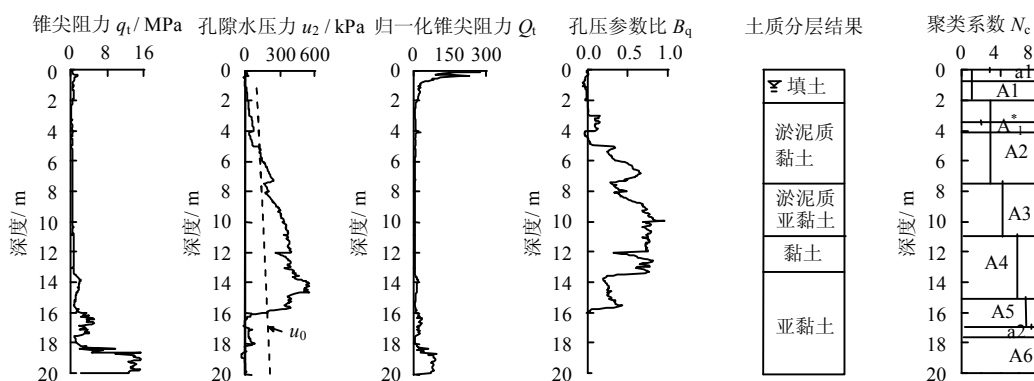


图 2 聚类分析法确定土层边界^[21]

Fig.2 Identification of soil boundaries using cluster analysis theory^[21]

3 基于 CPTU 的力学分层

3.1 力学分层参数

典型的 CPTU 测试数据包括锥尖阻力、侧壁摩

阻力和孔隙水压力。本文利用 q_t 、 Q_t 和 I_c 等 CPTU 测试数据,对土体进行均质性检验,确定均质土体的边界,进行力学分层。

锥尖阻力 q_t 是 CPTU 测试的重要内容, 几乎所有基于 CPTU 测试数据估算的岩土工程参数都与其有关。为考虑上覆应力和有效上覆应力对 q_t 的影响, Robertson^[25] 采用归一化参数建立土分类图时, 提出了归一化锥尖阻力为

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / \sigma'_{v0} \quad (1)$$

式中: σ_{v0} 、 σ'_{v0} 分别为总上覆应力和有效上覆应力。

综合考虑应力水平的归一化锥尖阻力 Q_m 和归一化摩擦比 F_r 后, Robertson^[26] 提出土类指数 I_c :

$$I_c = \sqrt{\left[(3.47 - \lg Q_m)^2 + (\lg F_r + 1.22)^2 \right]} \quad (2)$$

$$Q_m = \left[(q_t - \sigma_{v0}) / p_a \right] \left[p_a / (\sigma'_{v0}) \right]^n \quad (3)$$

$$n = 0.381 I_c + 0.05 (\sigma'_{v0} / p_a) - 0.15 \quad (4)$$

$$F_r = f_s / (q_t - \sigma_{v0}) \times 100\% \quad (5)$$

式中: n 为应力指数, $n \leq 1$; p_a 为大气压力, $p_a = 100 \text{ kPa} = 0.1 \text{ MPa}$; q_t 为经孔压修正的总锥尖阻力; f_s 为侧壁摩擦阻力; u_0 为静水压力; q_t 、 σ_{v0} 、 p_a 和 σ'_{v0} 单位相同。

土类指数 I_c 计算是一个迭代过程。通常假定 $n = 1.0$, 代入式 (3) 计算得到 Q_m , 根据式 (2) 重新计算 I_c , 再将新的 I_c 值代入式 (4) 重新计算获得 n 值, 如此往复迭代, 直到数据精确满足要求为止。图 3 所示为 CPTU 测试数据的 q_t 、 Q_t 和 I_c 曲线。

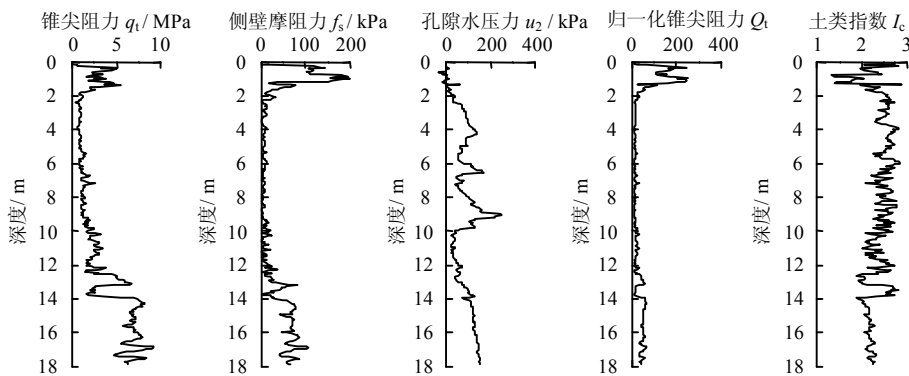


图3 场地的 q_t 、 Q_t 和 I_c 测试值
Fig.3 q_t , Q_t and I_c profiles of in-situ soil

3.2 移动窗口法

基于 CPTU 测试数据进行力学分层时, 若对测试数据进行整体分析以确定潜在的土层边界是不现实的, 故只能选取测试数据的部分样本逐一进行统计分析。但对于土层样本数据的选取也不是任意的^[12, 27]。为了保证统计分析结果的可靠性, 避免土层 CPTU 测试数据样本选取的任意性, 需采用一个可移动的、固定宽度的窗口在测试数据曲线上进行移动, 对窗口内样本片段 1 和片段 2 (图 4 所示) 的测试数据进行统计分析, 比较两个样本片段测试数据的均质性。若窗口内两个样本片段的测试数据表现方差非均质时, 则该窗口两个样本片段的交界处即为一个潜在的土层边界。当检验窗口在整个测试数据曲线上游历完毕后, 即对整个测试曲线的数据进行了均质性检验, 其中不满足均质性检验的位置即为潜在的土层边界。

Johnson 等^[28]指出, 如果移动窗口宽度过大, 有可能丢失潜在的土层界面; 如果移动窗口宽度过

小, 样本片段 1 和片段 2 内数据的统计量受到随机因素影响强烈。对于采样间隔为 0.05 m 的国际标准探头, Wickremesinghe^[12]推荐的移动窗口宽度不应小于 1 m, 以消除随机因素的影响。计算中, 移动窗口的移动步长应与 CPTU 探头采样间隔保持一致, 才能保证对全部测试数据逐一地进行均质性检

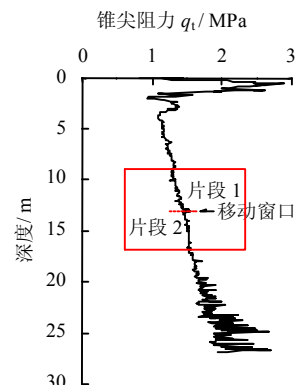


图4 移动窗口法
Fig.4 Moving window method

验。若移动步长大于采样间隔,则不能对全部测试数据逐一进行均质性检验,会产生错误统计结果。文中 CPTU 测试探头采样间隔为 0.05 m,移动窗口宽度为 1 m,移动窗口的移动步长为 0.05 m。

3.3 组内相关系数

统计学中,组内相关系数常用于评价具有某种相关关系的样本间的相似程度,也可应用于评价不同测定方法或评定同一定量测量结果的一致性或可靠性。对于 CPTU 测试数据来说,相同土层内的土体是均质的,测试数据必然存在某种相似程度。若对 CPTU 测试数据进行组内相关系数分析,则可以利用测试数据的 R_I 统计量来确定不同均质土层间的边界。处于不同土层的交界处,量测数据相似性变化越大,则 R_I 也就越大;当 R_I 超过一定临界值时,该处即为潜在的土层分界处。

固定宽度的移动窗口可以分为两个样本片段 Ω_1 和 Ω_2 ,设 $\bar{Q}_1$ 和 $\bar{Q}_2$ 、 σ_1^2 和 σ_2^2 分别为对应样本片段的均值和方差,则有^[18, 29]

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{n_1 - 1} \sum_{i=1}^{n_1} (Q_i - \bar{Q}_1)^2 \quad (6)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_2} (Q_i - \bar{Q}_2)^2 \quad (7)$$

式中: n_1 和 n_2 分别为样本片段 Ω_1 和 Ω_2 的样本容量。

在固定宽度的移动窗口中心 d_0 处,样本片段 Ω_1 和 Ω_2 的样本容量相等,有 $n_1 = n_2 = n$,则窗口内测试数据的合并方差 γ_ω^2 为

$$\gamma_\omega^2 = \frac{n}{2n-1} \sigma_1^2 + \frac{n}{2n-1} \sigma_2^2 \quad (8)$$

对于两个样本片段的组间变异方差 γ_b^2 ,有

$$\gamma_b^2 = \frac{1}{n_1 + n_2 - 1} \sum_{i=1}^{n_1+n_2} (Q_i - \bar{Q})^2 \quad (9)$$

当 $n_1 = n_2 = n$ 时,有

$$\gamma_b^2 = \frac{1}{2n-1} \sum_{i=1}^{2n} (Q_i - \bar{Q})^2 \quad (10)$$

则组内相关系数指数 R_I 为

$$R_I = \frac{\gamma_b^2}{\gamma_b^2 + \gamma_\omega^2} \quad (11)$$

当移动窗口在 CPTU 测试数据曲线上全部游历结束后,则可以生成测试数据的 R_I ,图 5 所示为 CPTU 测试数据的 q_t 、 Q_t 和 I_c 的 R_I 。

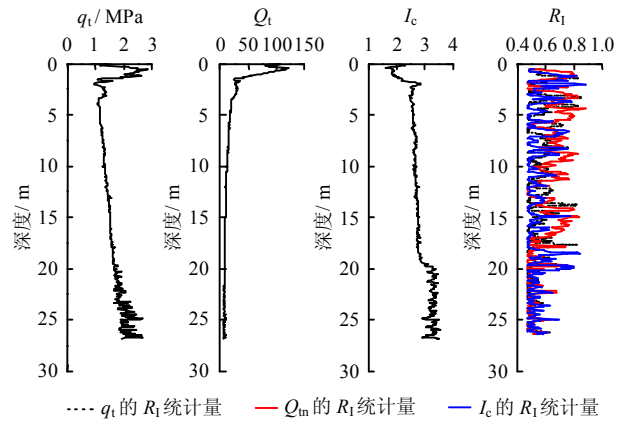


图 5 q_t 、 Q_t 和 I_c 的 R_I 统计量
Fig.5 R_I statistics for q_t , Q_t and I_c data

对 CPTU 测试数据进行组内相关系数分析,生成 R_I 统计量后,则希望建立某种标准来对 R_I 统计量的均质性进行判断,了解测试数据均质性的变化。当 CPTU 测试数据变化剧烈时, R_I 统计量显示较大值;若 R_I 统计量超过某临界值时,表明两个片段内的样本数据均质性差异较大,则在该峰值点处为潜在的土层分界,如图 6 所示。反之,表明两个片段内的样本数据均质性差异较小,为同一均质土层。通过大量的数据分析和场地调查,对于符合国际标准的 CPTU 探头测试数据,诸多学者提出了 R_I 统计量临界值标准,总结于表 1 中。

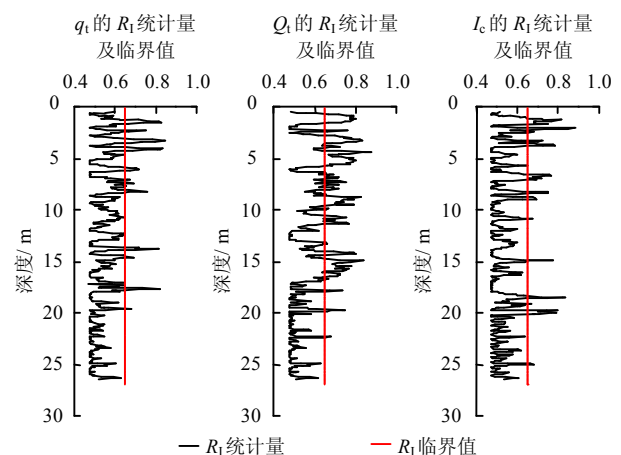


图 6 q_t 、 Q_t 和 I_c 的 R_I 统计量和临界值
Fig.6 R_I statistics and critical values for q_t , Q_t and I_c

表 1 R_I 统计量临界值
Table 1 Critical R_I statistics

提出者	R_I 临界值
Wickremesinghe ^[12-13]	粗略分界: 0.8 精细分界: 0.65
Hegazy ^[17]	窗口片段数据平均值+1.65×标准差
Zhang 等 ^[18]	0.7

3.4 修正的 Bartlett 检验

Bartlett 检验可用来检验多总体方差差异的显著性,其判断依据是不同样本分布的“拖尾”大小^[1]。因此, Bartlett 检验法对样本数据分布的非正态性较为敏感。一般的,若总体方差有显著差别或者总体分布的偏斜程度有所不同, Bartlett 检验的结果都可能显著不同。采用移动窗口法生成 Bartlett 统计量时,若窗口两个片段内的样本存在显著的方差差异性,即土层显示不均质性时,则会产生明显的峰值点。当移动窗口在 CPTU 测试曲线上滑动生成 Bartlett 统计量时, Bartlett 统计量的峰值点即为潜在的土层界面。

对于来自于总体(样本群体数量为 K)的第 j 个样本,样本容量为 n_j , s_j^2 为第 j 个样本的方差,则总体的方差 s^2 为^[22-23, 30]

$$s^2 = \frac{\sum_{j=1}^K (n_j - 1) s_j^2}{\sum_{j=1}^K (n_j - 1)} \quad (12)$$

则第 j 个样本的 Bartlett 统计量为

$$B_{\text{stat}} = \frac{2.302}{C} \frac{59}{9} \left[\sum_{j=1}^K (n_j - 1) \lg s^2 - \sum_{j=1}^K (n_j - 1) \lg s_j^2 \right] \quad (13)$$

其中:

$$C = 1 + \frac{1}{3(K+1)} \left\{ \sum_{j=1}^K \frac{1}{(n_j - 1)} - \frac{1}{\sum_{j=1}^K (n_j - 1)} \right\} \quad (14)$$

在固定宽度的移动窗口中心 d_0 处,样本片段 Ω_1 和 Ω_2 的样本容量相等,窗口中心 d_0 处的 Bartlett 检验统计量为

$$B_{\text{stat}} = \frac{2.302}{C} \frac{59(m-1)}{9} \left[2 \lg s^2 - (\lg s_1^2 + \lg s_2^2) \right] \quad (15)$$

式中: m 为用于计算每个片段样本方差 s_1^2 或 s_2^2 的数据点数量; s^2 为窗口范围内样本的总方差,定义为 $s^2 = (s_1^2 + s_2^2)/2$; C 为常量, $C = 1 + 1/(2m - 2)$ 。

图 7 所示为 CPTU 测试数据的 q_t 、 Q_t 和 I_c 的 Bartlett 统计量。

在土层边界处,由于测试数据存在突变,因此, Bartlett 统计量曲线上出现峰值等突变点,土体表现出不均质性。若所计算的 Bartlett 统计量 B_{stat} 在某一位位置处大于 Bartlett 检验的临界值 B_{crit} ,表明窗口范围内的测试数据表现为不均质性,则该峰值点处为潜在的土层分界。Phoon 等^[22-23]指出,为保证 Bartlett

检验计算的可靠性,需要对测试参数和窗口参数进行限定,提出了适用于岩土工程的修正 Bartlett 检验。修正 Bartlett 检验 3 个归一化指标为

$$k = \delta / (\Delta z) \quad (16)$$

$$I_1 = T / \delta = n / k \quad (17)$$

$$I_2 = W / \delta = m / k \quad (18)$$

式中: δ 为窗口宽度(波动范围); Δz 为采样间距; k 为单个相关距离范围内所包含的采样点数量; I_1 为归一化剖面长度; T 为波动分量的剖面总长度; n 为波动分量剖面所包含的数据点总数量; I_2 为归一化片段长度; W 为片段的长度(窗口的 1/2)。

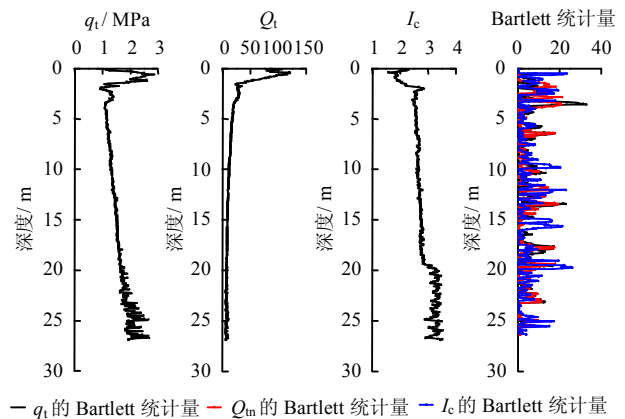


图 7 q_t 、 Q_t 和 I_c 的 Bartlett 统计量

Fig.7 Bartlett statistics for q_t , Q_t and I_c data

根据数值模拟随机场资料,岩土工程中 5 种自相关模型(表 2 所示)的修正 Bartlett 检验临界值 B_{crit} 的计算公式如表 3 所示^[22-23]。岩土工程实践中以单指数型自相关模型最为常用^[23],因此,在实际工程中,利用单指数模型进行土层均质性检验是足够的。对于符合国际标准的 CPTU 探头,采样间隔为 0.05 m,当 $I_2 = 1$ 时,窗口宽度为 1 m。图 8 所示为 q_t 、 Q_t 和 I_c 的 Bartlett 统计量和对应的临界值。

表 2 常用自相关模型及相关距离^[22-23]

Table 2 Autocorrelation models and corresponding scale of fluctuation^[22-23]

自相关模型	表达式	相关距离 δ
单指数型	$R(\tau) = \exp(-\lambda \tau)$	$2/\lambda$
二阶噪声型	$R(\tau) = 1 - c \tau $ $ \tau < 1/c$ 0 otherwise	$1/c$
指数余弦型	$R(\tau) = \exp(-b \tau) \cos(br)$	$1/b$
二阶 Markov 型	$R(\tau) = (1 + d \tau) \exp(-d \tau)$	$4/d$
指数平方型	$R(\tau) = \exp[-(a\tau)^2]$	$\sqrt{\pi}/a$

表 3 修正 Bartlett 检验临界值 B_{crit} 取值^[22-23]
Table 3 Critical modified Bartlett test statistics^[22-23]

自相关模型	临界值 B_{crit}	归一化片段长度 I_2
单指数型	$(0.23k + 0.71)\ln I_1 + 0.91k + 0.23$	1
二阶噪声型	$(0.36k + 0.66)\ln I_1 + 1.31k - 1.77$	2
指数余弦型	$(0.30k + 0.29)\ln I_1 + 1.15k - 0.52$	1
二阶 Markov 型	$(0.28k + 0.43)\ln I_1 + 1.29k - 0.40$	1
指数平方型	$(0.42k - 0.07)\ln I_1 + 2.04k - 3.32$	1
	$(0.73k - 0.98)\ln I_1 + 2.35k - 2.45$	1

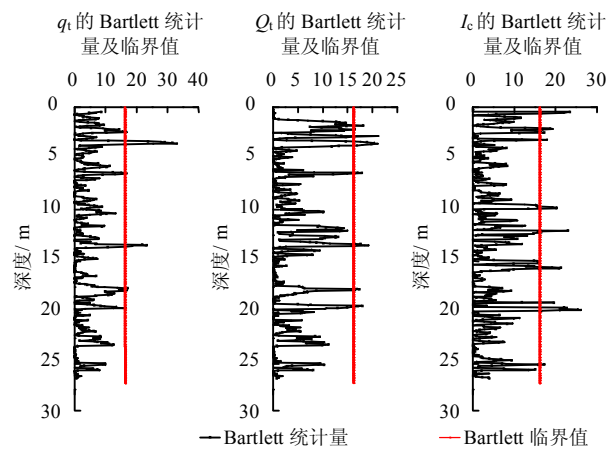


图 8 q_t 、 Q_t 和 I_c 的 Bartlett 统计量和临界值
Fig.8 Bartlett statistics and critical values for q_t , Q_t and I_c

4 基于 CPTU 测试的土层边界识别

基于 3 个场地的 CPTU 测试数据，采用组内相关系数法和修正的 Bartlett 检验 2 种方法共同的力学分层结果作为均质土层潜在的边界，并与土性分层结果相对比，验证力学分层的可靠性。CPTU 现场试验采用多功能数字式车载 CPTU 系统，探头规格符合国际标准，贯入速率为 2 cm/s，采样间隔为 5 cm。

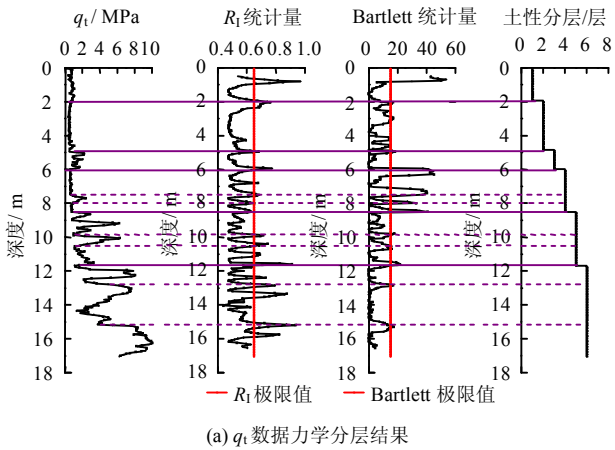
4.1 南京某经济适用房建设场地

测试场地位于南京市内，属长江漫滩地貌单元，主要覆盖第四纪全新世松散冲淤积土，地势较平坦。地下水类型主要为孔隙潜水，平均水位在地面以下 5.0 m 左右，最高水位为 10.22 m，最低水位为 1.54 m。根据野外钻孔揭示及室内土工试验成果综合分析进行土性分层，场地土层在 18 m 以浅深度范围内自上而下可分为 6 层（如图 9 所示）：1 层素填土、2 层淤泥质粉质黏土、3 层粉土、4 层淤泥质粉质黏土、5 层粉土夹粉砂、6 层粉细砂。

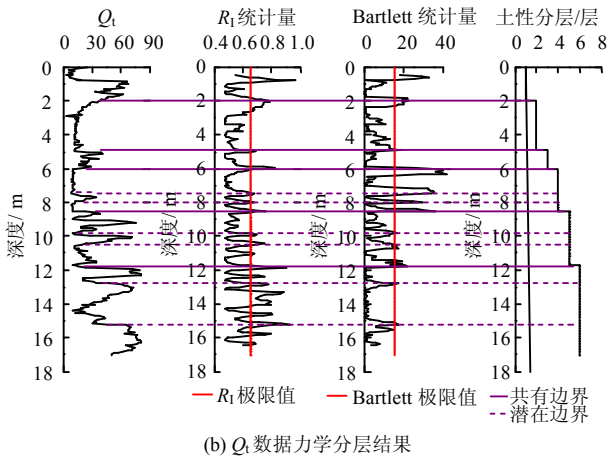
基于 q_t 测试数据的力学分层结果如图 9(a)所示。对于土性分层界面，力学分层结果均全部检出。此外，对于力学分层检测出更多的次级土层界面。在 4 层土中，力学分层结果显示有两个潜在的土层

界面，深度分别为 7.35、7.95 m；在 5 层土中，力学分层结果显示有两个潜在的土层界面，深度分别为 9.75、10.55 m；在 6 层土中，力学分层结果显示有两个潜在的土层界面，深度分别为 12.70、15.35 m。

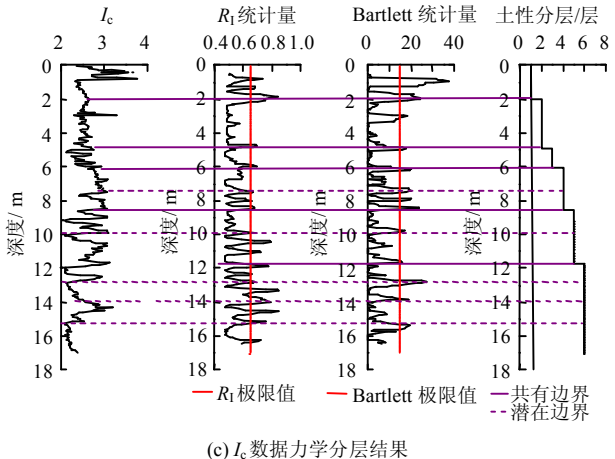
基于 Q_t 测试数据的力学分层结果如图 9(b)所示。对于土性分层界面，力学分层结果均全部检出。此外，对于力学分层检测出更多的潜在的土层界面。



(a) q_t 数据力学分层结果



(b) Q_t 数据力学分层结果



(c) I_c 数据力学分层结果

图 9 南京某经济适用房场地 CPTU 力学分层结果
Fig.9 Mechanical layering results in Nanjing comfortable housing site based on CPTU data

在4层土中,力学分层结果显示有两个潜在的土层界面,深度分别为7.35、7.95 m;在5层土中,力学分层结果显示有两个潜在的土层界面,深度分别为9.75、10.55 m;在6层土中,力学分层结果显示有两个潜在的土层界面,深度分别为12.70、15.30 m。

基于 I_c 测试数据的力学分层结果如图9(c)所示。对于土性分层界面,力学分层结果均全部检出。此外,对于力学分层检测出更多的潜在的土层界面。在4层土中,力学分层结果显示有一个潜在的土层界面,深度为7.40 m;在5层土中,力学分层结果显示有一个潜在的土层界面,深度为10.00 m;在6层土中,力学分层结果显示有3个潜在的土层界面,深度分别为12.75、13.85、15.35 m。

4.2 阜宁—建湖高速公路某互通段建设场地

测试场地位于盐城市阜宁县境内,属于海陆交互,受海相沉积和冲积双重作用。地下水类型为松散岩类孔隙水,地下水埋深在1.4~2.6 m之间。根据野外钻孔揭示、原位测试及室内土工试验成果综合分析进行土性分层,地基土层在28 m以浅深度范围内自上而下可分为4层,如图10所示:1层杂填土、2层粉质黏土、3层淤泥质粉质黏土、4层粉质黏土夹粉砂。

基于 q_t 测试数据的力学分层结果如图10(a)所示。对于土性分层界面,力学分层结果均全部检出。此外,对于力学分层检测出更多的潜在的土层界面。在3层土中,力学分层结果显示有3个潜在的土层界面,深度分别为6.25、13.60、17.60 m。

基于 Q_t 测试数据的力学分层结果如图10(b)所示。对于土性分层界面,力学分层结果均全部检出。此外,对于力学分层检测出更多的潜在的土层界面。在3层土中,力学分层结果显示有3个潜在的土层界面,深度分别为6.30、13.55、17.60 m。

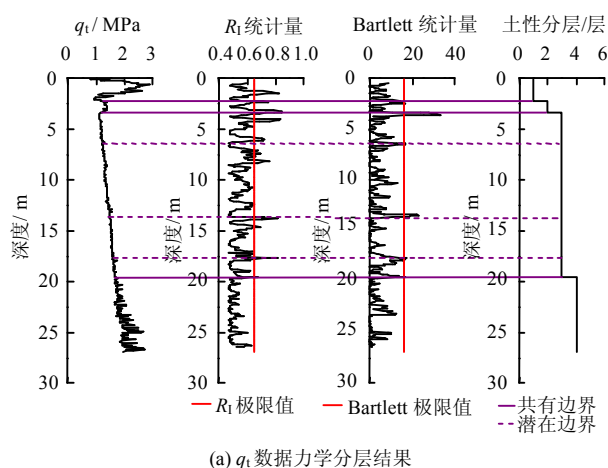
基于 I_c 测试数据的力学分层结果如图10(c)所示。对于土性分层界面,力学分层结果均全部检出。此外,对于力学分层检测出更多的潜在的土层界面。在3层土中,力学分层结果显示有一个潜在的土层界面,深度为15.05 m;在4层土中,力学分层结果显示有一个潜在的土层界面,深度为24.85 m。

4.3 南京某商品房建设场地

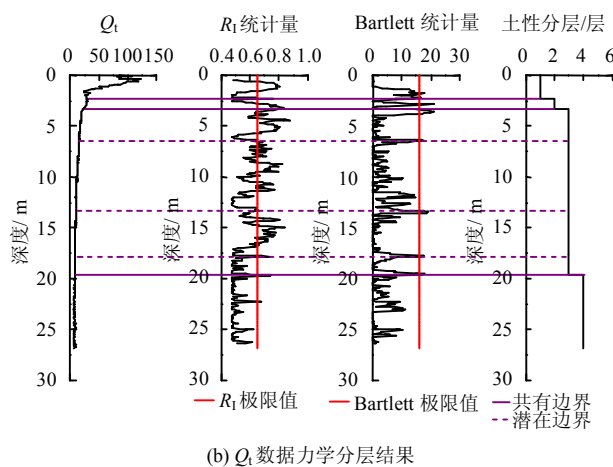
测试场地位于南京市内,为长江漫滩地貌单元。场地由于近年填土堆积,地势起伏较大,地表最大高差6 m。地下水类型主要为孔隙潜水,平均水位在4.3 m左右,埋深在1.00~8.30 m之间。根据野外钻孔揭示、原位测试及室内土工试验成果综合分析进行土性分层,地基土在18 m以浅深度范

围内自上而下可分为4层,如图11所示:1层杂填土、2层淤泥质粉质黏土、3层粉土夹粉砂、4层粉细砂。

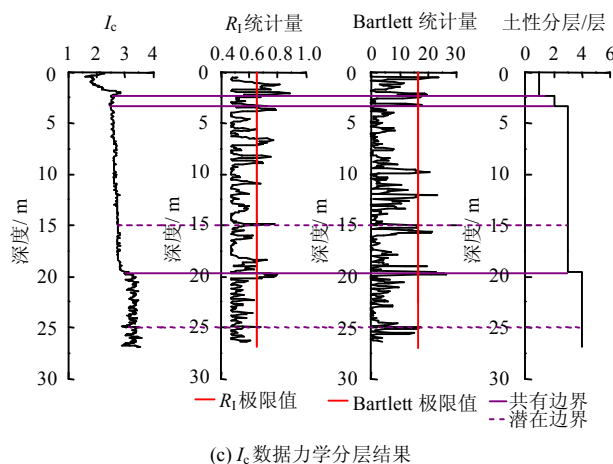
基于 q_t 测试数据的力学分层结果如图11(a)所示。对于土性分层界面,力学分层结果均全部检出。此外,对于力学分层检测出更多的潜在的土层界面。在2层土中,力学分层结果显示有两个潜在的土层



(a) q_t 数据力学分层结果



(b) Q_t 数据力学分层结果



(c) I_c 数据力学分层结果

图10 阜宁—建湖高速某场地CPTU力学分层结果
Fig.10 Mechanical layering results in Funing-Jianhu expressway site based on CPTU data

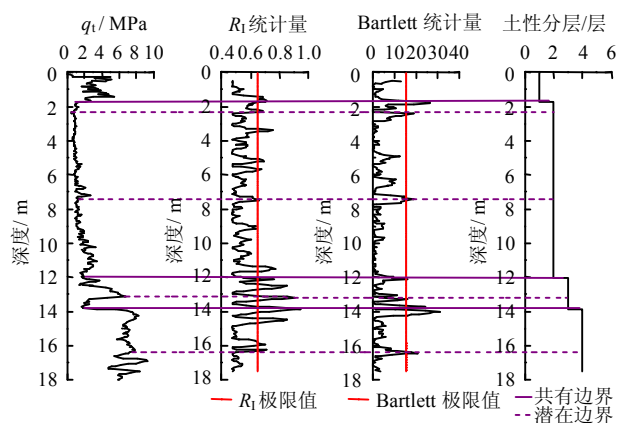
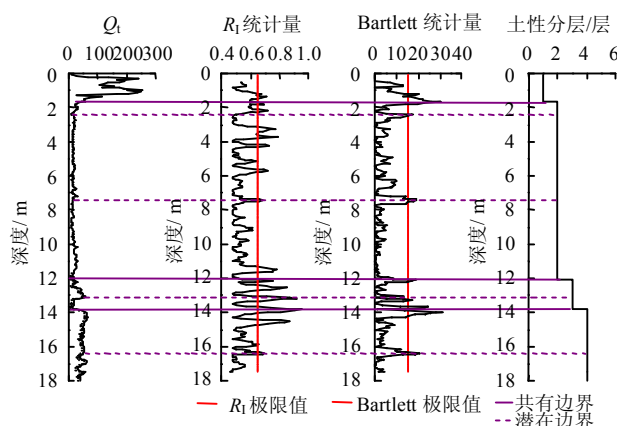
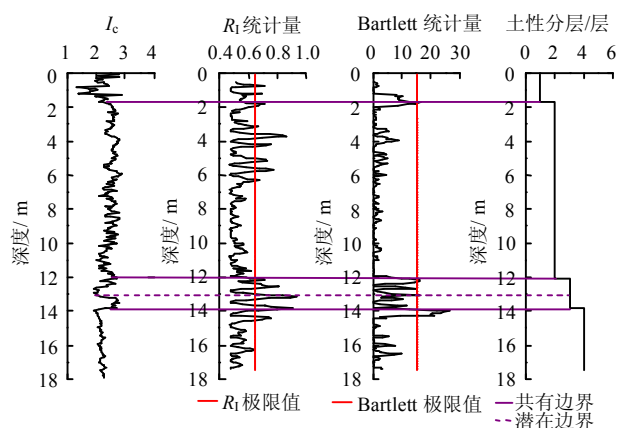
(a) q_t 数据力学分层结果(b) Q_t 数据力学分层结果(c) I_c 数据力学分层结果

图 11 南京某商品房场地 CPTU 力学分层结果

Fig.11 Mechanical layering results in Nanjing commercial housing site based on CPTU data

界面, 深度分别为 2.35、7.35 m; 在 3 层土中, 力学分层结果显示有一个潜在的土层界面, 深度为 13.15 m; 在 4 层土中, 力学分层结果显示有一个潜在的土层界面, 深度为 16.40 m。

基于 Q_t 测试数据的力学分层结果如图 11(b)所示。对于土性分层界面, 力学分层结果均全部检出。此外, 对于力学分层检测出更多的潜在的土层界面。

在 2 层土中, 力学分层结果显示有两个潜在土层界面, 深度分别为 2.40、7.35 m; 在 3 层土中, 力学分层结果显示有一个潜在的土层界面, 深度为 13.15 m; 在 4 层土中, 力学分层结果显示有一个潜在的土层界面, 深度为 16.40 m。

基于 I_c 测试数据的力学分层结果如图 11(c)所示。对于土性分层界面, 力学分层结果均全部检出。此外, 对于力学分层检测出更多的潜在土层界面。在 3 层土中, 力学分层结果显示有一个潜在的土层界面, 深度为 13.10 m。

4.4 基于 CPTU 土层识别的稳健性分析

对基于 CPTU 测试数据的力学分层结果进行稳健性检验, 目的是验证力学分层结果是否随着力学分层参数的改变而发生变化。如果改变力学分层参数以后, 力学分层结果发生了显著的改变, 说明不是稳健的, 需要寻找问题的所在。

对 3 个场地的力学分层结果分析可知, 基于 q_t 和 Q_t 测试数据的力学分层结果相一致, 基于 I_c 测试数据的力学分层结果变化较大。基于 q_t 和 Q_t 测试数据的力学分层结果较 I_c 测试数据的力学分层结果显示出更多的潜在土层界面。基于 q_t 和 Q_t 测试数据的力学分层结果显示相同数量和相近深度的潜在土层界面。基于 I_c 测试数据的力学分层结果显示的潜在土层界面数量要小于基于 q_t 和 Q_t 测试数据的力学分层结果显示的潜在土层界面。对于相同土性分层内潜在的力学分层界面深度, 基于 I_c 测试数据的力学分层结果也不同于基于 q_t 和 Q_t 测试数据的力学分层结果。

观察 q_t 、 Q_t 和 I_c 的曲线和相应的 R_t 统计量及 Bartlett 统计量曲线可发现, 土性分层的土层分界面和力学分层的土层分界面均为测试数据变化较大处, 力学分层结果与测试数据变异性变化相一致。在土层交界处, 通常伴有测试数据变化较大的薄夹层, 这表明测试数据在土层交界处并不是突然跃变的, 而是近似于连续变化的。基于 CPTU 测试数据进行力学分层的土层识别精度与采样间距有关, 通常情况下土层识别精度与采样间距相同。需要指出, 文中确认力学分层界面时, 考虑的是组内相关系数法和修正的 Bartlett 检验共有的力学分层界面。

潜在的次级力学分层界面是从土体对 CPTU 测试的力学响应角度说的, 具体指的是土体物理特征在测试数据上的反映。测试数据的方差均质性代表土体物理特征的一致性。土体的均质性应从土体的力学响应方面来评价, 前述分析也表明, 相同的土类可能对应着 CPTU 测试不同的力学响应。

在CPTU测试中,锥尖相对于侧壁摩擦筒来说,几何尺寸要小许多。锥尖阻力可以认为是土体“点”的物理力学特征反映,侧壁摩擦阻力可以认为是土体在侧壁摩擦筒上的“平均”物理力学反映^[12-13, 31]。在土层分界面处,锥尖阻力可以很好地反映出界面上、下土层的力学特征,而侧壁摩擦筒由于其对土层分界面处力学特征的平均效应,难以准确地反映出土层分界面处力学特征的变化。此外, I_c 数据是经过多次迭代计算而得到的。在多次迭代过程中,CPTU测试数据经过反复计算,有可能失去其初始的力学信息,其变异性降低,不能很好地表现出土层界面处的变异性,使其统计量对土层界面分辨率降低。

5 结 论

采用组内相关系数法和修正的 Bartlett 检验,对CPTU测试的 q_t 、 Q_t 和 I_c 这3个参数数据的均质性进行分析,从而进行力学分层,确定潜在的次级土层界面。对比分析3个建设场地的力学和土性分层结果,得出如下结论:

(1) 土性分层的土层分界面和力学分层的土层分界面均为测试数据变异性较大处,力学分层结果与测试数据变异性变化相一致。

(2) 基于 q_t 、 Q_t 和 I_c 的测试数据的力学分层过程均能检出基于钻孔和室内试验的土性分层界面,且力学分层结果较土性分层结果显示更多潜在的次级土层界面。

(3) 基于 q_t 和 Q_t 测试数据的力学分层结果相一致,基于 I_c 测试数据的次级力学分层结果离散性较大。基于 q_t 和 Q_t 测试数据的力学分层结果较基于 I_c 测试数据的力学分层结果显示更多潜在的次级土层界面。

(4) 基于CPTU测试数据进行力学上分层时,应优先选择反映土体“点”力学特征的测试参数,避免采用反映土体“平均”力学特征的测试参数。同时,也应尽量避免采用失去初始力学信息的参数数据。

参 考 文 献

- [1] BAECHER G B. Statistical methods in site characterization[C]//Proceedings of the Engineering Foundation Conference on Updating Subsurface Sampling and Testing for Engineering Purpose. New York: Santa Barbara, 1983: 463—491.
- [2] 徐筠波. 关于工程勘察中地层分层的探讨[J]. 建设监理, 2014, (3): 55—57.
XU Jun-bo. Discussion on stratigraphic classification in site exploration[J]. *Project Management*, 2014, (3): 55—57.
- [3] 顾宝和. 《岩土工程勘察规范》中的静力触探问题[J]. 工程勘察, 2008(10): 4—5.
GU Bao-he. Problems on CPT in code for investigation of geotechnical engineering[J]. *Geotechnical Engineering Investigation and Survey*, 2008, (10): 4—5.
- [4] 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.
MENG Gao-tou, ZHANG De-bo, LIU Shi-lian, et al. The significance of piezocone penetration test[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 314—318.
- [5] 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 Song-yu, WU Yan-kai. On the state-of-art and development of CPT in China[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004, 26(4): 553—556.
- [6] 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. China standard soil classification method based on piezocone penetration testing[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(10): 1765—1776.
- [7] 马海鹏, 陈祖煜, 于沐. 上海地区土体抗剪强度与静力触探比贯入阻力相关关系研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 536—542.
MA Hai-peng, CHEN Zu-yu, YU Shu. Correlations of soil shear strength with specific penetration resistance of CPT in Shanghai area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(2): 536—542.
- [8] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑业出版社, 2001.
The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50021-2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.
- [9] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10041-2003 铁路工程地质原位测试规程[S]. 北京:中国铁道出版社, 2003.
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10041-2003 Code for in-situ measurement of railway engineering geology[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003.
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. GBT 50480-2008 冶金工业岩土勘察原位测试规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2009.
The Professional Standards Compilation Group of

- People's Republic of China. GBT 50480-2008 Code for insitu tests of geotechnical engineering investigation of metallurgical industry[S]. Beijing: Chinese Planning Press, 2009.
- [11] WEBSTER R, BECKETT P. Quality and usefulness of soil maps[J]. *Nature*, 1968, 219: 680—682.
- [12] WICKREMESINGHE D S. Statistical characterization of soil profiles using in situ tests[D]. Vancouver: University of British Columbia, 1989.
- [13] WICKREMESINGHE D, CAMPANELLA R G. Statistical methods for soil layer boundary location using the cone penetration test[C]//Proceedings of 6th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering. [S. l.]: New York Press, 1991, 2: 636—643.
- [14] VESSIA G, CASINI F, SPRINGMAN S. Mechanical characterisation of lacustrine clay by interpreting spatial variability in CPTU measurements[C]//Proceedings of the 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering. [S. l.]: New York Press, 2011: 2965—2973.
- [15] CHERUBINI C, LUPO M. Geomechanical properties of sandy soil near Scanzano Jonico (Basilicata, Italy)[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2002, 20(4): 371—392.
- [16] 杨树荣. 利用微机对静力触探资料进行力学分层[J]. 电力勘测, 1996, (2): 6—10.
- YANG Shu-Rong. The mechanics layered method based on CPT data by microcomputer[J]. *Electric Power Survey*, 1996, (2): 6—10.
- [17] HEGAZY Y A, MAYNE P W, ROUHANI S. Geostatistical assessment of spatial variability in piezocone tests[C]//Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice. New York: [s. n.], 1996: 254—268.
- [18] ZHANG Z, TUMAY M T. Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(3): 179—186.
- [19] TUMAY M T, ABU-FARSAKH M Y, ZHANG Z. From theory to implementation of a CPT-based probabilistic and fuzzy soil classification[C]//From Research to Practice in Geotechnical Engineering. New York: [s. n.], 2008: 259—276.
- [20] HEGAZY Y A, MAYNE P W. Objective site characterization using clustering of piezocone data[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128(12): 986—996.
- [21] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 基于聚类分析理论的 CPTU 土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 416—424.
- CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Soil classification using CPTU data based upon cluster analysis theory[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(3): 416—424.
- [22] PHOON K K, QUEK S T, AN P. Assessment of spatial variability using modified Barlett test[C]//Geotechnical Engineering-Meeting Society Needs. Hong Kong: [s. n.], 2001, 1: 167—172.
- [23] PHOON K, QUEK S, AN P. Identification of statistically homogeneous soil layers using modified Bartlett statistics[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(7): 649—659.
- [24] HEGAZY Y A, MAYNE P W. Delineating geostratigraphy by cluster analysis of piezocone data[C]//Geotechnical Site Characterization. [S. l.]: A. A. Balkema, 1998, 2: 1069—1074.
- [25] ROBERTSON P K. Interpretation of cone penetration tests—a unified approach[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(11): 1337—1355.
- [26] ROBERTSON P K. Interpretation of cone penetration tests—a unified approach[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(11): 1337—1355.
- [27] WEBSTER R. Automatic soil-boundary location from transect data[J]. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1973, 5(1): 27—37.
- [28] JOHNSON R A, WICHERN D W, EDUCATION P. Applied multivariate statistical analysis[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2014: 246—252.
- [29] 杨奇明, 林坚. 组内相关系数: 定义辨析、估计方法与实际应用[J]. 浙江大学学报(理学版), 2013, 40(5): 509—515.
- YANG Qi-ming, LIN Jian. The intra-class correlation coefficient: Definition estimation method and application[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2013, 40(5): 509—515.
- [30] KANJI G K. 100 statistical tests[M]. London: Sage Ltd., 1993: 71—72.
- [31] UZIELLI M, VANNUCCHI G, PHOON K K. Random field characterisation of stress-normalised cone penetration testing parameters[J]. *Geotechnique*, 2005, 55(1): 3—20.