

基于聚类分析理论的 CPTU 土分类方法研究

蔡国军, 刘松玉, 童立元, 杜广印

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 采用孔压静力触探 (CPTU) 测试资料进行土的工程分类时, 在土成分和力学性状等相关性方面会产生很多不确定性。根据已有的 CPTU 土分类系统划分土类时, 这种不确定性经常会导致不同土类的重叠。聚类分析是一个对相似数据进行分组归类的数学统计方法, 基于 CPTU 测试资料将其应用于地质土层的划分。根据 5 条高速公路场地的现场 CPTU 试验和钻孔柱状图资料, 阐述了已有聚类分析方法在划分土层界面的应用。结果表明: 聚类分析方法不仅能够描绘出土层中主要的变化, 而且能够探测到薄土夹层。因此, 基于聚类分析理论的 CPTU 方法可以可靠有效地提供地质土层的初步划分。

关键词: 场地勘察; 土分类; 孔压静力触探; 统计分析; 聚类分析

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)03-0416-09

作者简介: 蔡国军(1977-), 男, 山东兖州人, 博士研究生, 主要从事岩土工程原位测试技术等方面的研究工作。E-mail: focuscai@163.com。

Soil classification using CPTU data based upon cluster analysis theory

CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, DU Guang-yin

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: A soil engineering classification derived from the piezocone penetration test (CPTU) involves the uncertainty of correlation between soil composition and soil mechanical behavior. This uncertainty results in overlaps of different soil types in currently used CPTU soil classification systems. The cluster analysis is a statistical method for grouping similar mathematical data sets and is used herein for illustrating the soil stratigraphy from CPTU data. Its application to defining stratigraphic interfaces is illustrated using five expressway case studies with layered vertical profiles. It is concluded that the cluster analysis is not only able to delineate major changes within the stratigraphy but also detect thin layers within a sublayer. Therefore, the cluster analysis can provide valid and reliable preliminary soil stratification based upon the CPTU original data.

Key words: site exploration; soil classification; piezocone penetration test; statistical analysis; cluster analysis

0 前 言

土分类是岩土工程勘察的重要工作, 其分类结果是工程分析、设计及施工的基本参考资料, 也是岩土工程成功与否的重要影响因素。土分类工作主要包括划分土层的竖向边界, 确定土层数量和种类, 描述裂隙、擦痕、透镜体、过渡带和其它土特征 (例如: 胶结带、孔隙和内含物) 的存在与位置^[1]。传统的钻孔、取样和土工试验方法通常用于岩土工程的场地勘察, 但这种方法对钻探条件复杂的地方, 如离岸工程及公路铁路等分布广泛的工程是有很大的困难的, 既昂贵又费时, 造成对地基情况了解不充分, 给工程设计带来很大困难^[2]。因此, 孔压静力触探 (CPTU) 作为一种新型的原位测试技术可以提供 3 个连续读数: 锥尖阻力 q_t 、侧壁摩阻力 f_s 和孔隙水压力 u_2 , 具有快速、可靠、经济和连续的优点^[3]。目前, CPTU 已经有效地

用于岩土工程特性的评价^[4-5]。CPTU 沿深度 1~5 cm 提供的 3 个相互独立的测试参数也能用于判别土类和划分土层, 文献[6]对目前基于 CPTU 的土质分类经验图表进行了很好的总结。统一土质分类系统 (Unified soil classification system, USCS) 是岩土工程界最熟悉的土质判别方法, 其分类依据主要为粒径分布与阿太堡界限; 而 CPTU 的土质分类则以土体受力的反应特性 (贯入阻力) 为基础的, 两者之分类方法并不相同, 但两者仍然有若干的相关性。此外, 由于 CPTU 无法取得大量土样进行土质种类的判别, 必须借助经验图表推测土的种类。而 CPTU 与钻探取样的平行试验结

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40702047); 教育部博士点基金项目 (20060286031)

收稿日期: 2008-01-18

果比对,则是修正或建立 CPTU 土质分类图表必需的工作。再者,土质行为受到许多因素如沉积环境、土质材料等的影响,可能会因地域性的影响而有所差异。因此,探讨基于 CPTU 测试的土质分类方法是很有意义的。

由于 CPTU 无法取得土样,使用一个功能强大的统计方法来处理 CPTU 试验中大量的测试数据是很重要的。Zhang 等^[7]基于模糊统计方法,分别提出“区域”评价和“点”评价的两个土分类准则。并根据美国国家岩土工程试验场地(NGES)德州农工大学(Texas A & M University)的 CPTU 测试结果,详细阐述了这种新的土质分类方法。Hegazy 等^[8]采用一元和多元统计方法解译 CPTU 资料,用于描述地质土层的变化。由于土层边界不是连续的,采用一元和多元统计方法还不能客观地划分土层^[9]。Hegazy 等^[1]为了将 CPTU 测试资料用于土层划分,提出了一个新的“聚类分析”统计方法。本文基于 Hegazy(1998, 2002)提出的聚类分析静力触探(CPT)土分类技术,采用室内试验和其它原位测试资料总结了笔者在国内几条高速公路工程中 CPTU 试验的分析和应用结果。

1 聚类分析方法介绍

聚类分析是将具有相似特征的数据进行归类的数学统计方法^[10],已经广泛地应用于医学、生物学和化学领域中^[11]。运用聚类分析方法的前提是存在大量的数据。在本项研究中,用于划分土层的 CPTU 大量数据的聚类分析被研究。数据的每一类将有一个不同的类号码(N_c),类号码代表了不同的土类或具有不同的性质的相同土类。使用已有的 CPTU 土分类图^[12],每一个土类可以被定义。聚类分析相对其他 CPTU 解译技术,在划分土层时是有很多优势的,因为其分类结果几乎不受系统误差或异常数据的影响。

2 聚类分析步骤

针对 CPTU 数据进行聚类分析通常由以下 6 步组成^[1]:①变量的选择;②数据的标准化;③相似性(距离)矩阵;④聚类技术的选择;⑤确定类的数量;⑥聚类结果的解译。

2.1 变量的选择

在聚类分析中,重要的变量有助于更好地对分析数据进行分类。CPTU 可以测得 3 个独立的参数: q_t , u_2 和 f_s 。Lunne 等^[13]使用 13 个不同的探头在 3 种场地(软黏土、松砂和硬黏土)研究了 CPTU 测试参数的可重复性。研究发现:在相同深度 q_t 和 u_2 测试对大多数探头

是可重复的,而 f_s 测试值离散性较大。Tanaka 使用 8 个探头在黏土中也得出相似的结论^[14]。在本项研究中, q_t 和 u_2 用于土层划分。锥尖阻力可以判别不同土类和相同土层中强度的改变,诸如松散和密实砂土的不同。孔压可以表明主要土类的不同,例如砂土和黏土。而且,孔压读数也有助于识别土层中的透镜体。

为了考虑土层上覆应力和静止孔压的影响, q_t 和 u_2 采用归一化形式^[15]:

$$Q = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}}, \quad (1)$$

$$B_q = \frac{(u_2 - u_0)}{(q_t - \sigma_{v0})}, \quad (2)$$

式中, σ_{v0} 为竖向总应力, σ'_{v0} 为竖向有效应力, u_0 为静止孔压。这两个归一化参数 Q 和 B_q 是土类和土性状的函数。

2.2 数据的标准化

数据标准化是把数据表示为无量纲形式,以消除量纲对不同变量的影响或减少误差。标准化虽然不对数据造成实质的改变,但确实是聚类分析中合理而必要的一步^[16]。在聚类分析中,常使用平均值和标准差来建立的不同参数相互影响的相关性。CPTU 测试的 Q 和 B_q 的平均值和标准差是不同的, Q 测试具有更大的平均值和标准差^[9]。为了进一步评价 2 个归一化参数对不同数据类的影响,几个标准化方法可以利用,诸如 zscore、最大值、平均值和标准差方法。

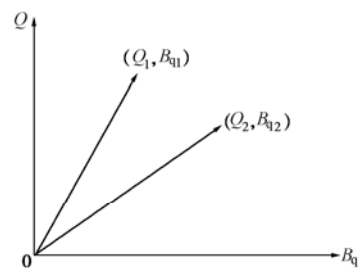


图1 归一化锥尖阻力(Q)和孔压(B_q)的余弦相似性量度^[1]
Fig. 1 Cosine similarity measurement for normalized cone tip resistance (Q) and pore water pressure (B_q)^[1]

2.3 相似性(距离)矩阵

相似性(距离)矩阵是不同数据点之间相似性的一个统计测试。一组数据的聚类分析取决于不同数据记录的相似性。例如,CPTU 数据在 Q 和 B_q 的坐标内可以表示(图1)。在某一深度(i)两个测试参数形成一个向量(Q, B_q)。在相似性矩阵中的每一个单元可以通过距离来测试 2 个不同深度 CPTU 数据的两个向量的相似性。例如, Q 和 B_q 空间内 2 个向量间的余弦相似性测试如图1所示。另一个方法是把 CPTU 数据放入矩阵(D)中:

$$D = \begin{bmatrix} (Q)_{11} & (B_q)_{12} \\ (Q)_{21} & (B_q)_{22} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ (Q)_{n1} & (B_q)_{n2} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, 同一行中的元素为相同深度的数据。相似性距离由不同的深度数据对 (例如, $\{(Q)_{11}, (B_q)_{12}\}$ 和 $\{(Q)_{21}, (B_q)_{22}\}$) 来计算。Hegazy 采用标准化和相似性测试联合方法进行了参数研究^[9], 对位于 Amherst, Mass. 的美国国家岩土试验场地 (NGES) 的 CPTU 数据进行聚类分析。采用 zscore 方法和余弦测试对归一化数据进行统计分析。相似性矩阵定义如下:

$$\text{zscore} = z_{ij} = \frac{x_{ij} - E(X_j)}{S(X_j)}, \quad (4)$$

$$E(X_j) = \text{mean}(X_j) = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n}, \quad (5)$$

$$S(X_j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [x_{ij} - E(X_j)]^2}{n-1}}, \quad (6)$$

$$\cos \theta_{ij} = d_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n x_{ik} x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik})^2 \sum_{k=1}^n (x_{jk})^2}}, \quad (7)$$

式中, n 为数据点的数量, X_j 为 CPTU 测试变量 (例如 Q), d_{ij} 是两个向量 x_{ik} 和 x_{jk} 的相似系数。

2.4 聚类技术的选择

Milligan (1996) 总结了最佳聚类方法选择的一般准则^[16]。Hegazy (1998) 评价了不同的聚类技术, 并且建议使用最短距离 (最近邻法) 谱系聚类方法对 CPTU 数据进行分析^[9]。最短距离聚类方法满足统计学条件, 例如连续性和最小偏差^[17]。Milligan (1996) 发现最短距离法是受异常数据影响最小的方法, 而且最短距离法比其它聚类方法能够探测到更多土层中固有的土类^[16]。

基于上述讨论, 最短距离 (最近邻法) 聚类技术适合于 CPTU 数据的聚类分析。因此, 采用最短距离 (最近邻法) 聚类技术来分析 CPTU 数据, 进一步描绘不同土层分布。而且最短距离聚类方法简单实用, 例如, 有 n 个观察值的一组数据中, 有 n 个独立的类。第一步, 距离最近的两个观察值一起结合, 下一步, 要么第三个观察值加入后面的类, 要么另外两个观察值形成一个新的类。后面的一步导致比前一步的更少的类形成, 直到所有的数据组归为一类。

2.5 类数量的确定

一个聚类分析可以产生很多类, 因此, 必须建立一个标准来评价用于分析类的最小数量。Hegazy (1998) 进行广泛的 CPTU 数据的聚类分析^[9], 采用 25 个 CPTU 试验场地用于评价类的数量。一个类代表一个土层, 类的数量范围为 $N_c=2 \sim 100$ 。然而, 在这 25 个实例中研究发现, 当 $N_c < 15$ 时就可以精确地表示 CPTU 贯入深度范围内实际土层数量, 通常采用 $N_c < 8$ 。当然, 在更加复杂和层状土层沉积物中, 更高的类数量应该考虑。

2.6 聚类结果的解译

聚类分析的目的是划分主要土层和探测地质特征: 裂痕, 透镜体, 异常带和不同土层间过渡区。异常带包括土天然的内含物, 诸如胶结层、结核、礞石和孔隙。异常带还包括与测试有关的系统误差, 例如电子噪音、增加探杆、孔压消散影响和其他随机事件。对过渡区、异常带与透镜体相关的最小层厚度需要定义。文献[1]选择一个最小层厚度 (t) = 0.5 m。土层定义如下: 主要层 (A) 满足 $t \geq 1$ m, 次要层 (a) 满足 $0.5 \text{ m} \leq t < 1 \text{ m}$ 。土混合物和过渡区表示为 a^* 和 A^* , 表明在层 a 和 A 满足 $t \geq 0.5 \text{ m}$ 或 $t \geq 1 \text{ m}$ 。值得注意的是, a^* 和 A^* 分别为 $0.5 \text{ m} \leq t < 1 \text{ m}$ 和 $t \geq 1 \text{ m}$ 。基于聚类分析的 CPTU 资料土分类的准则如图 2。采用 CPTU 资料用于土层描述的聚类分析流程图如图 3。选择 zscore、余弦测试和最短距离法进行数据标准化和相似性测试, 进一步对 CPTU 资料进行分组归类。本项研究中使用的聚类分析方法称为 single-cosine-zscore 法。

3 聚类分析用于 CPTU 资料的解译

本文采用现代多功能 CPTU 测试系统, 选择 5 个典型场地进行了试验研究。试验场地土层分别为连云港海相黏土、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。试验采用东南大学岩土工程研究所引进的美国 Vertek-Hogentogler 多功能数字式车载 CPTU 系统, 配备了最新的功能测试探头, 由钻探卡车、静力触探系统两部分组成, 具有常规 CPT、孔压、倾斜、地震波和电阻率功能模块、E4FCS 实时数据采集计算机系统、CONEPLOT 及 CLEANUP 数据处理软件。探头规格符合国际标准: 锥角 60° , 锥底截面积为 10 cm^2 , 侧壁摩擦筒表面积 150 cm^2 , 孔压透水元件厚度 5 mm, 位于锥肩位置 (u_2 位置), 探头的有效面积比 $a=0.8$ 。贯入速率为 20 mm/s, 沿深度每 5 cm 测试一组读数。贯入设备采用重型卡车, 利用螺旋地锚提供反力, 具有自动调平装置能够满足大多数的地形条件。

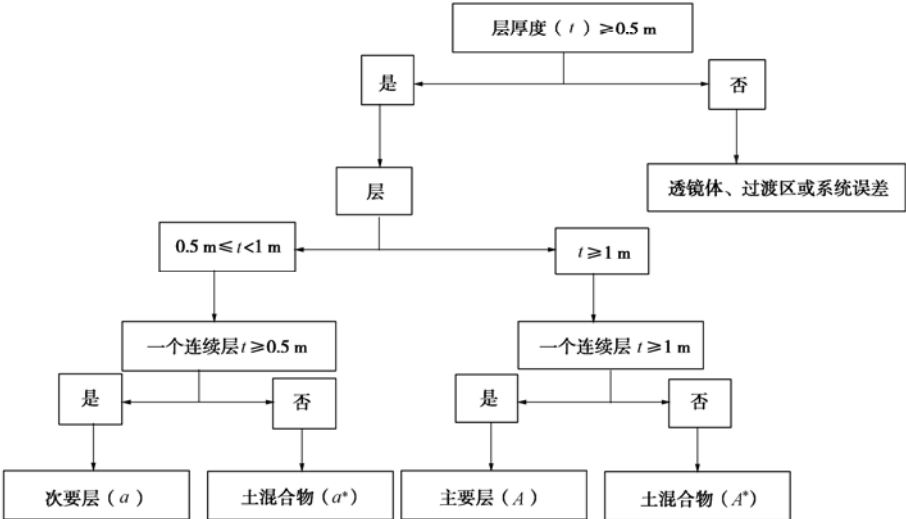


图 2 基于聚类分析的 CPTU 资料用于土分类的准则^[1]

Fig. 2 Proposed criteria for evaluating soil stratigraphy from cluster analysis of piezocone data^[1]

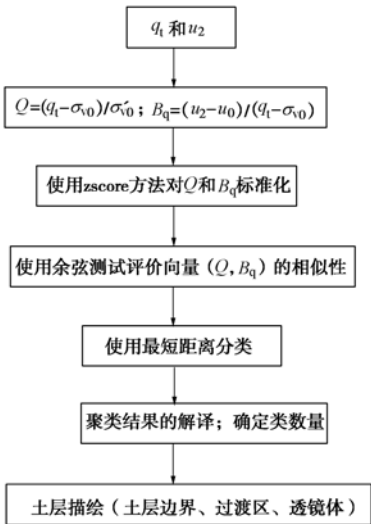


图 3 基于 CPTU 资料的聚类分析流程图^[1]

Fig. 3 Steps in cluster analysis of piezocone data^[1]

基于上述关于聚类分析理论的介绍, 采用 single-cosine-zscore 聚类方法在 5 个具有层状竖向剖面的场地上评价土类。常州场地数据资料表明聚类分析可应用于不同土层的划分, 尤其对细粒和粗粒土。另外几个场地资料表明: 聚类分析在 q_t 和 u_2 变化不明显时, 可以探测到土层的明显变化。两个归一化参数 Q 和 B_q 被用作聚类分析的输入参数。在这 5 个试验场地上, 具有诸如液限 w_l 、塑限 w_p 、含水率 w 、超固结比 OCR、灵敏度 S_l 等室内试验资料, 以及其它诸如地震波静力触探和十字板等原位测试结果。

3.1 在连盐高速场地 CPTU 资料的聚类分析

连云港海相黏土 CPTU 试验场地位于连盐高速公路连云港灌云三标 K14+140 断面, 所在区域主要为海陆交互沉积的滨海平原区, 西高东低呈微倾斜状, 地势低平, 水系发育, 浅部新近沉积的海相软土分布较

为普遍。海相软土层主要为淤泥及淤泥质土, 该两层分布厚度大, 含水率高 (最高达 88.3%)、欠固结~轻微超固结 ($0.8 \leq OCR \leq 2.6$)、压缩性大、强度低等特征。典型的 CPTU 试验结果见图 4, 地下水位线也在图中进行了标明。值得指出的是, 图中的锥尖阻力均为经孔压修正后的锥尖阻力 $q_t^{[18]}$ 。由图 4 可以看出, 连云港场地土层表面存在一层 2.0 m 厚的硬壳层 (粉质黏土填土、耕植土), 锥尖阻力在 1.0 MPa 左右, 在 1.0 m 处随深度均匀减小。硬壳层以下为两层软土: 第一层淤泥相对较厚 (8.0 m), 锥尖阻力很小, 随深度轻微增加, 孔压很高, 平均含水率为 79.6%; 第二层淤泥质土厚度较薄 (2.0 m), 孔压随深度减小, 平均含水率为 55.8 %。软土层以下为正常固结亚黏土层一直到达底部 15.0 m, 孔压为负值, 平均含水率为 41.3 %。

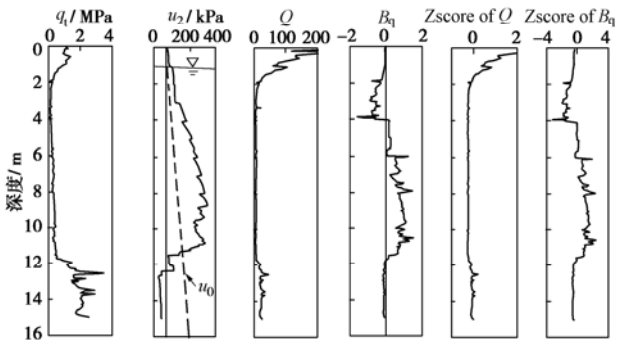


图 4 连盐高速场地 CPTU 测试资料

Fig. 4 Piezocone data at Lianyungang-Yancheng Expressway site

仅由图 4 中 q_t 测试曲线土层可分为 4 层, 近似界面深度分别为 2.0, 10.0 和 12.0 m。孔压 u_2 , 仅有深度 4.0 和 12.0 m 处的边界是明显的。这主要由于在地下水位以上干燥区域的引起孔压单元的不饱和造成的。因此, 这种不饱和导致在下面深度处, 贯入孔压

完全反应的轻微滞后。对连盐高速 CPTU 资料, 将 single-cosine-zscore 方法应用于归一化参数 Q 和 B_q (图 4)。使用 zscore 方法对 Q 和 B_q 进行标准化 (图 4), 聚类数量 $N_c=2\sim 6$ 之间的统计分类结果如图 5。

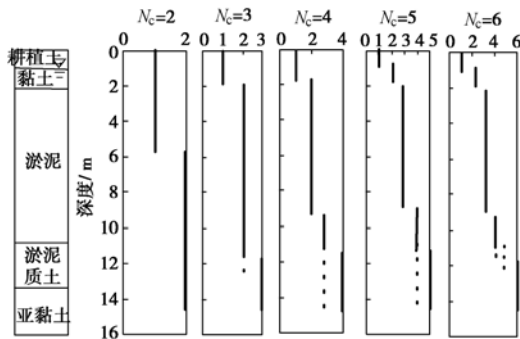


图 5 连盐高速场地 CPTU 资料聚类分析结果

Fig. 5 Cluster analysis results at Lianyungang-Yancheng Expressway site

在 $N_c=2$ 时, 场地土层分为 2 个主要土层, 深度边界近似为 6.0 m。在 $N_c=3$ 时, $t \geq 1.0$ m 的第三个主层 (A) 从上、下土层中分离出来, 各层的边界深度分别为 2.0 m 和 11.8 m。在 $N_c=5$ 时, 在 1.0 m 和 10.0 m 处分别分出另外一个主层。当 N_c 继续增加时, 在更多的聚类分析计算中, 也没有更多的主要层 (A) 的显示出来。然而, 通过 $N_c=6$ 计算可知 (图 5), 出现了更多的点表明了次要土层 (a) 的存在。尤其在深度 12.5 m 左右, 同时也出现了很多透镜体和土层的过渡区域, 继续对这 5 层土类进行细化。因此, $N_c=5$ 聚类分析足够可以划分出连盐高速 CPTU 试验场地的土层界线。

连盐高速 CPTU 试验场地的土层包括 4 个主要土层 (A1, A2, A3 和 A4) 和二次要土层 (a1 和 a2)。由聚类分析得到的土层边界和钻孔取样划分的土层完全一致 (图 6)。这个结果可由现场十字板的不排水抗剪强度 S_u 资料得到证实。

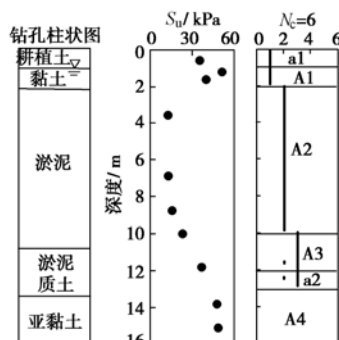


图 6 连盐高速场地基于 CPTU 资料聚类分析和土层划分结果

Fig. 6 Cluster analysis and stratification from piezocone data at Lianyungang-Yancheng Expressway site

3.2 在宁常高速场地 CPTU 资料的聚类分析

常州冲湖积相黏土 CPTU 试验场地位于宁常高速金坛四标 K62+401 断面, 区域为长荡湖 (及钱荡湖) 至鬲湖之间的宽广平原地区, 属于长江三角洲太湖堆积平原区, 次级地貌单元为冲湖积平原分区。第四纪覆盖层厚度较大, 为冲湖积相成因。黏土层具有厚度较大, 分布稳定, 中偏低压缩性、中等强度等特征。常州场地 (见图 7) 地下水位为 3.0 m, 根据锥尖阻力和孔压可清楚分为 3 层: 表层为 4.0 m 厚的硬壳层, 由填土和亚黏土组成, 锥尖阻力较小, 孔压沿深度具有增大的趋势。深度 4.0~11.3 m 为粉砂层, 锥尖阻力较大, 沿深度变化幅度大, 呈锯齿状, 孔压值很小, 超孔压接近于零或呈负值。以下黏土层, 锥尖阻力变化平稳, 孔压很高且随深度增加, 平均含水率为 23.5%。代表性 CPTU 试验如图 7 所示, 包括归一化参数 Q 和 B_q 。

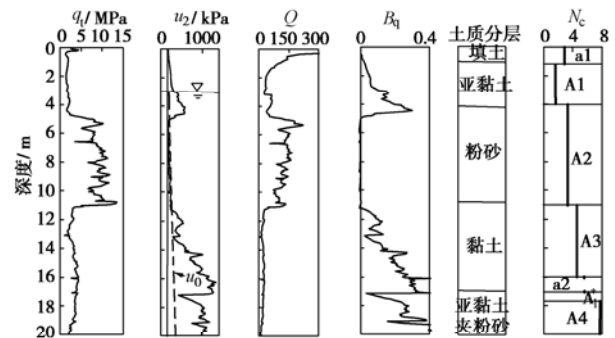


图 7 宁常高速场地基于 CPTU 资料聚类分析和土层划分结果

Fig. 7 Cluster analysis and stratification from piezocone data at Nanjing-Changzhou Expressway site

使用 single-cosine-zscore 方法对归一化参数 Q 和 B_q 进行聚类分析, 一直计算到 $N_c=8$ 。在 $N_c=4$ 时, 沿深度可以分为 3 个主要土层, 近似的土层界限分别为 3.7, 11.2 和 16.0 m。然而, 随着聚类数量 N_c 的增多, 在第一层出现了一个次要土层 (填土 a_1 层)。而且, 一个过渡层 (粉砂 A_1^*) 和次要土层 (粉质黏土 a_2 层) 在第三层中划分出来, 由孔压 u_2 曲线可以清楚地分辨出这一薄的粉砂夹层; 由这些数据点从两个主要土层中分出来可以表明土层的非均质。当 N_c 继续增多进行计算时, 也没有发现厚度 $t > 1$ m 的土层。因此, $N_c=8$ 被选择用来划分土剖面, 并且由钻孔柱状图验证如图 7。土层中的 A_1^* 代表一个土的混合物或粉砂透镜体。4 个主要土层 A1 (粉质黏土)、A2 (粉砂)、A3 (黏土) 和 A4 (粉质黏土) 分别由聚类分析计算分辨出来, 并且可以更加细致地找出薄土夹层或不同土层的过渡区域。

3.3 在南京沿江开发高等级公路 CPTU 试验场地的

聚类分析结果

南京长江低漫滩淤泥质亚黏土 CPTU 试验场地位于沿江开发高等级公路南京化工园区, 所在区域地貌类型属长江漫滩相, 地势平坦开阔, 地形微向长江倾斜, 地表岩性为第四纪全新统黏性土。人工改造的沟、渠纵横交错。该场地表层分布 0.5~4.5 m 厚的硬壳层, 淤泥质亚黏土层具有厚度较大, 分布稳定, 具水平层理, 含水率高, 高压缩性、低强度等特征。南京场地 (图 8) 地下水位为 1.0 m, 并且随长江水位的升降而在 0.5 m 范围内波动。填土和亚黏土层锥尖阻力较高, 孔压很小, 随深度轻微增加。淤泥质亚黏土层锥尖阻力很小, 孔压很高, 变化不稳定, 可能由于该层局部粉质含量较高, 薄的亚砂土和粉砂夹层造成。粉砂层和砂土层, 锥尖阻力较大, 具水平层理。

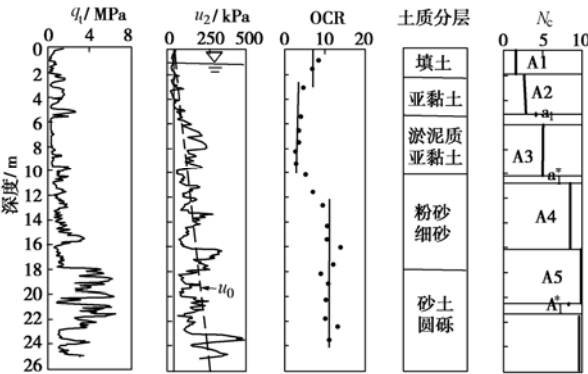


图 8 南京场地基于 CPTU 资料的聚类分析和土层划分结果
Fig. 8 Cluster analysis and stratification from piezocone data at Nanjing site

一个代表性的 CPTU 曲线 (q_t 和 u_2) 如图 8 所示。资料提供了 6~10 m 深度范围内土由淤泥质软黏土组成。根据 u_2 和归一化孔压参数 B_q 数据, 可以在 4.2~6.0 m 范围内分辨出一个次要土层 (a1 粉砂夹层)。在 10.0, 15.5, 20.3 和 24.0 m 探测到黏土或砂土的透镜体。在深度 20.3 m 处的透镜体也由原始数据 q_t 和归一化数据 Q 读数探测到了。一个 SCZ 聚类方法应用于 Q 和 B_q 数据; 聚类分析结果在 $N_c=2\sim10$ 间被计算检验。在 $N_c=2$, 在深度 15.6 m 划分出 2 个主层, 在 21.9 和 22.4 m 发现一个土透镜体。对更多的聚类分析数量, 没有更多的主要土层 ($t>1\text{ m}$) 划分出来, 直到 $N_c=10$, 然而过渡层和透镜体被探测到, 表明在主要土层间过渡区域的非均质如图 9。因此, 类号码 $N_c=10$ 被选择划分场地的土层。

孔压在深度 23.95 和 24.25 m 明显上升, 表明砂土层中含有一个黏土透镜体, 厚度约为 30 cm。5 个主层, A1~A5, 次要土层 a1 和过渡区域、透镜体如图 8 所示。聚类结果表明: 主要土层间贯入阻力和孔压

有很大的差别。聚类分析进行土质分类的结果也由室内 OCR 测试结果得到证实。上部 0.5~4.5 m 的硬壳层 OCR 较大随后进入淤泥质亚黏土, OCR 减小。在粉砂层和细砂层中 OCR 测试值又进一步增大。

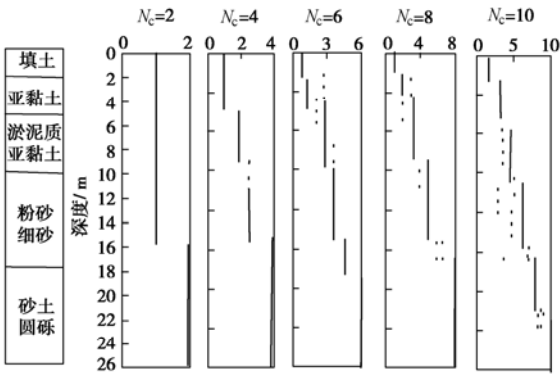


图 9 南京场地 CPTU 资料聚类分析结果

Fig. 9 Cluster analysis results at Nanjing site

3.4 在淮盐高速场地 CPTU 资料的聚类分析

试验场地位于江苏苏北里下河古泻湖相软土沉积地区, 沉积层厚度一般在 200~250 m, 在第四纪形成。根据地质资料, 埋深 150 m 以下主要为粗砂砾石层, 150 m 以上为黏土、砂土和粉质黏土交互沉积物组成的复杂系统。这些土层形成于不同时期, 属于海侵海退复合型砂坝-泻湖沉积体系, 并受黄河南侵泛滥的影响。由于复杂的地质历史, 沉积物表现了很大的非均质性。场地土类常为粉砂、黏土等组成, 土中矿物多碳酸盐、石英、方解石、氧化硅等沉积, 并具有较高的含盐量, 有机质含量高, 粒径分布变化明显。地层浅层总体上以泻湖相软土为主, 淤泥或淤泥质黏土分布较为普遍。图 10 为 CPTU 试验场地的土层剖面和主要物理力学指标。泻湖相软土 e 典型值在 0.675~2.802 之间变化。从室内固结试验和 CPTU 确定的超固结比 OCR 可以清楚地看到: 浅部土层中 OCR 值较高 (大于 4), 在深度 1~4 m 之间 OCR 随着深度明显地减小。3~6 m 之间为轻微超固结土, $OCR>1.5$ 。7~8 m 之间为正常固结土, 9~13 m 之间主要为欠固结土, 13 m 以下为超固结土。说明了场地土在沉积后大多经历了上覆荷载压密、次固结、干燥应力以及一系列物理化学的变化过程。淤泥、淤泥质土的不排水剪切强度 S_u 值在 15~25 kPa 范围内。淤泥、淤泥质土层以下为黏土、亚黏土层, S_u 值在 35~80 kPa 范围内变化。

代表性的 CPTU 试验曲线 (q_t 和 u_2) 如图 11, 地下水位 1.2 m 左右。由图 11 钻孔柱状图可知, 土层表面存在一层 2.0 m 厚的硬壳层, 锥尖阻力在 0.65 MPa 左右, 在 1.0 m 处随深度均匀减小。硬壳层以下为两层软土: 第一层淤泥质黏土相对较厚 (8.0~10.0 m),

锥尖阻力很小,随深度轻微增加,孔压较高,平均含水率为 57.1%; 第二层淤泥、淤泥质亚黏土厚度较薄 (4.0~6.0 m), 孔压最高, 然后随深度逐渐减小, 平均含水率为 46.3%。软土层以下为黏土和亚黏土层, 孔压变化很大, 小于静水压力值, 甚至为负值, 平均含水率为 26.8%。

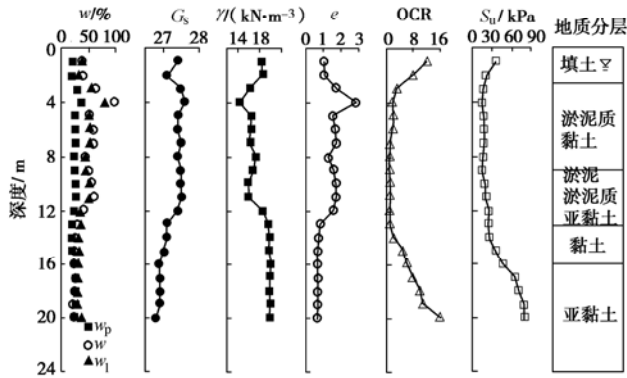


图 10 淮盐高速场地土性随深度变化

Fig. 10 Soil characteristics at Huai'an-Yancheng Expressway site

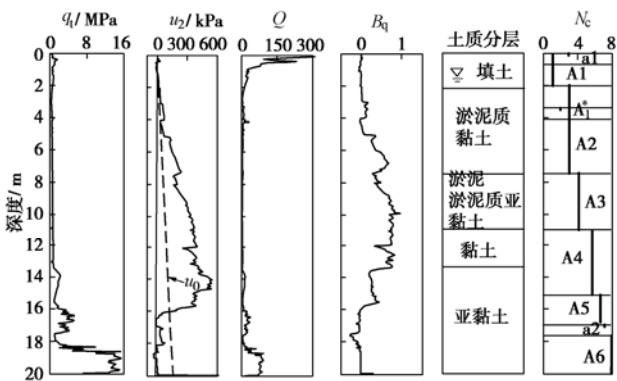


图 11 淮盐高速场地基于 CPTU 资料聚类分析和土层划分结果

Fig. 11 Cluster analysis and stratification from piezocone data at Huai'an-Yancheng Expressway site

对上部干燥硬壳层进行 CPTU 试验时进行预钻孔, 以确保孔压元件的饱和。基于原始的 q_t 曲线, 将土层仅仅可以粗略分为 3 层, 土层边界可以近似在 2.0 和 16.0 m 深度。采用归一化参数 Q 和 B_q 相似的边界可以确定出。然而通过观察原始的孔压数据, 土边界可以在深度 2.5, 14.5 和 17.0 m。仅仅通过观察原始的 CPTU 数据, 无法给出更加细致的土层剖面。对归一化参数 Q 和 B_q 进行 SCZ 聚类分析, 一直计算到 $N_c = 8$, 测试数据可分为 6 个主类、2 个次类和一个过渡区域, 边界的划分很明确 (图 11)。然而, 随着计算步骤的增多, 有些点 (和主类不强烈相关联的) 变得明显了, 表明土层中不同土类过渡区域或透镜体的存在。但是随着 N_c 的增多, 并未发现更多土层的出现。因此, $N_c = 6$ 足可以来识别本场地的土层。通过聚类

分析得到土层和图 10 中物理力学性质的变化相一致。软土有 2 个主要土类, A2 和 A3 如图 11 所示, 在土的归一化参数性质上有着重要不同。在深度 2.0 和 7.8 m 之间的 Q 和 B_q 的变异系数分别是 0.16 和 0.15, 在 7.8~11.0 m 之间分别等于 0.37 和 0.35。上部淤泥质黏土数据的离散性近似为下部软土层的一半。通过不同层数据的相似性水平进行分组, 可以把两层软土层划分开来。

3.5 在申嘉湖高速场地 CPTU 资料的聚类分析

2007 年 5 月 22 日至 26 日, 在申嘉湖高速公路穿越场地上进行了 CPTU 试验, 现场共钻孔 3 个。场地区域为嘉杭湖平原, 地形开阔平坦, 地面标高一般在 1.4~4.1 m 之间, 多为耕地。地貌类型属于冲湖积平原区, 自西向东微微倾斜。多河塘分布, 河港沟塘纵横连涌, 系典型的水网化平原区。场地全为第四纪地层覆盖, 前第四纪地层区内没有出露。据有关地质资料表明, 下卧中生代白垩纪砂、泥岩地层。本段区域新构造运动以间歇性整体下沉为主, 且下沉运动受水动性海绵变化影响。第四纪沉积厚度达 200 余米。根据勘察资料, 土层包括 1.5 m 厚耕植土硬壳层, 17.5~18.5 m 厚的淤泥质软黏土, 下面为一层 5.0~8.0 m 厚粉质黏土, 下覆为正常固结粉质黏土沉积物, 局部夹砂一直到底部 30.0 m。

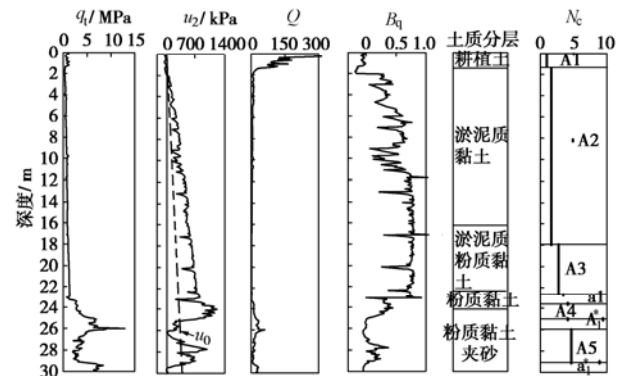


图 12 申嘉湖高速场地基于 CPTU 资料的聚类分析和土层划分结果

Fig. 12 Cluster analysis and stratification from piezocone data at Shanghai-Jiaxing-Huzhou Expressway site

典型的 CPTU 试验曲线 (q_t 和 u_2) 如图 12 所示, 地下水位比较浅, 大约 0.5 m。基于 CPTU 数据进行 SCZ 聚类分析, 使用归一化参数 Q 和 B_q 。 $N_c=10$ 的聚类分析土类评价结果如图 12。在 $N_c=2$ 时, 仅有 2 个主要土类被划分出来, 分界线为 17.8 m, 上部为黏土, 下部为粉质黏土。而且数据表明两种土类在性质上有明显的不同。随着 N_c 数量的增多, 有更多的土层划分出来。在 $N_c=10$ 时, 很清楚地把场地土层分为 5 个主要土层和一个次要土层。并且, 在主要土层 A4

和 A5 之间出现了不连续的土混合物夹层。对更高的聚类数量,没有新的主要土层 ($t \geq 1$ m) 显现出来。因此,类号码 10 被选择来表明场地的土层剖面。

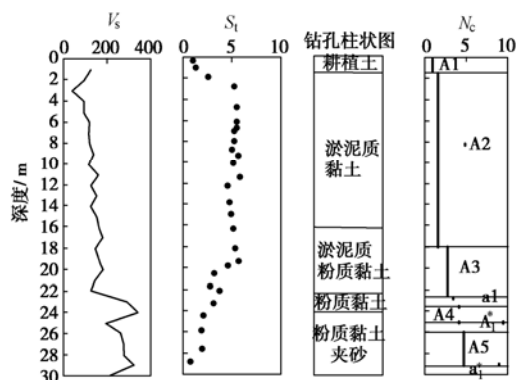


图 13 申嘉湖高速 CPTU 场地剪切波速和灵敏度测试与聚类分析土层划分结果

Fig. 13 Shear wave velocity, sensitivity measurements and stratification from piezocone data at Shanghai-Jiaxing-Huzhou Expressway site

聚类分析土类划分结果由剪切波速和灵敏度测试进一步证实(如图 13)。由图 13 很清楚地发现场地中存在一层深厚淤泥质软黏土,在高速公路工程建设时要尤其注意。在边界 17.8 m 处测试数据被分为两个主要土类。在上部软土层(0~17.8 m)剪切波速平均值为 145 m/s,在下部粉质黏土层(17.8~30.0 m)为 230 m/s。采用现场十字板测试的 S_t 完全证实了图 13 表明的由聚类分析获得的土层,平均灵敏度由上部土层的平均值 5.28 降低到下部土层的 2.42。

4 结 语

基于现场 CPTU 测试资料,使用聚类分析可以更加细致客观地划分场地土层。在场地初步勘察时,聚类分析技术可以用于解译 CPTU 资料,尤其可以用于划分土层、确定土类或评价土层之间相对关系。聚类分析时,就其物理和力学性质而言,每一个类能代表一个不同的土层或不同的土性。在可利用的土分类图上,然后通过绘制定义类的 CPTU 资料进行初步的土类评价。这些信息可以对土层划分作出客观性评价,评价结果需要层(类)的性质进行检验。例如,对淮盐高速公路 CPTU 场地,聚类分析划分的地层主类,可以充分地由取样和室内试验进行验证,因此,可以更加有效地用于岩土工程设计。

本文基于 CPTU 资料解译场地土层的目的,介绍了一个新的聚类统计分析方法。使用归一化的 CPTU 参数(Q 和 B_q),将聚类分析采用 Hegazy(1998, 2002)提出的 single-cosine-zscore 方法表示,并且给出了土

层划分的评价标准和流程图。根据现场 CPTU 测试资料,采用 5 个不同场地信息阐述了聚类分析的适用性。研究发现:聚类分析方法能够客观的划分土层剖面,描绘不同的层边界和过渡层,鉴别出透镜体和异常区(在一个次层中)。而且,本方法不依赖于由于试验设备和操作程序等产生的系统误差。总之,基于聚类分析的土类辨别方法可以作为已有 CPT/CPTU 分类图表的有效补充,客观地用于地质土层的初步划分。

参考文献:

- [1] HEGAZY Y A, MAYNE P W. Objective site characterization using clustering of piezocone data[J]. Geotechnical Engineering Division, ASCE, 2002, 128(12): 986 - 996.
- [2] 张诚厚. 孔压静力触探应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 15 - 26. (ZHANG Cheng-hou. The application of piezocone penetration test[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999: 15 - 26. (in Chinese))
- [3] 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. (in Chinese))
- [4] 刘松玉, 蔡国军, 童立元, 杜广印. 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 Song-yu, CAI Guo-jun, TONG Li-yuan, DU Guang-yin. On preconsolidation pressure of clays from piezocone tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 490 - 495. (in Chinese))
- [5] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 杜广印. 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 Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, DU Guang-yin. 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))
- [6] LUNNE T, ROBERTSON P K, POWELL J J M. Cone penetration testing in geotechnical practice[M]. UK: Blackie Academic & Professional, 1997: 50 - 56.
- [7] ZHANG Z, TUMAY M T. Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification[J]. Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1999, 125(3): 179 - 186.
- [8] HEGAZY Y A, MAYNE P W, ROUHANI S. Three-dimensional geostatistical evaluation of seismic piezocone

- data[C]// Proceedings of XIVth Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, 1997: 683 - 686.
- [9] HEGAZY Y A. Delineating geostratigraphy by cluster analysis of piezocone data[D]. Atlanta: Georgia Inst of Tech, 1998.
- [10] EVERITT B. Cluster analysis[M]. New York: Halsted-Wiley, 1974.
- [11] 马萨特 D L, 考夫曼 L. 聚类分析法解析分析化学数据[M]. 刘昆元, 译. 北京: 化学工业出版社, 1986. (MASSART D L, KAUFAMN L. The interpretation of analytical chemical data by the use of cluster analysis[M]. LIU Kun-yuan, trans. Beijing: Chemical Industry Press, 1986. (in Chinese))
- [12] ROBERTSON P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. Can Geotech J, 1990, 27(1): 151 - 158.
- [13] LUNNE T, EIDSMOEN T, GILLESPIE D, HOWLAND J D. Laboratory and field evaluation of cone penetrometers: use of in situ tests in geotechnical engineering[C]// Proceedings of In Situ'86, Geotech Spec Publ, ASCE, New York, 1986: 714 - 729.
- [14] TANAKA H. National report: the current state of CPT in Japan[C]// Proceedings of Int Symp on Cone Penetration Testing, CPT '95, Swedish Geotechnical Society, Linköping, Sweden, 1995, 1: 115 - 124.
- [15] WROTH C P. The interpretation of in-situ soil tests[J]. Geotechnique, 1984, 34(4): 449 - 489.
- [16] MILLIGAN G W. Clustering validation: results and implications for applied analysis[M]. N J: World Scientific, 1996.
- [17] SIBSON R. Order invariant methods for data analysis[J]. J R Stat Soc, Ser B Methodol, 1972, 34(1): 311 - 349.
- [18] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 杜广印. 孔压静力触探(CPTU)测试成果影响因素及原始数据修正方法探讨[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 632 - 636. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, DU Guang-yin. General factors affecting interpretation and corrections of primary data for the piezocone penetration test (CPTU) data[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(5): 632 - 636. (in Chinese))

读新书《岩土工程学》有感

1948年K.太沙基(Terzaghi)在一次国际土力学与基础工程学术大会上说:“现在是时候了,我们可以将工程地质学、土力学、岩石力学以及基础工程等结合起来,统称之为岩土工程学”。太沙基的这一观点当时就被各国与会者普遍接受。从此,岩土工程学有了自己的学科地位和学术内涵,成为一门以岩土与环境为对象,研究其工程利用、整治与改造的综合性技术科学。

自那时迄今,半个多世纪过去了。岩土工程学的研究开发和工程应用,从陆域到深海,从相对艰难到极端(extreme)环境条件都有了很大的发展,成就非常巨大。在这些成绩面前,若要说还有什么或缺或希望的东西,那就是一本综合了已有成果,内涵丰富,框架、层次与线索清晰,与相邻学科相关协调,前进方向明确的书。该书应名为岩土工程学(geotechnoloy 或 geotechnical engineering)。现在我们有了这样的一本书,它是由谢定义、林本海与邵生俊教授编著的,由高等教育出版社出版的《岩土工程学》。

经初读该书有如下特点:①岩土工程学定义明确;②内涵丰富,理论论述与工程经验互补,结合较好;③如已指出,全书框架、层次与线索清晰。这种清晰性贯于全书;④该书融纳了岩土环境工程作为重要组成部分,是完全切合当今与今后全球社会发展的需要;⑤全书的内容印证了岩土工程是土木工程的一个分支的学科性质,同时又反映了与作为地学的一个分支的工程地质学的互促互补。

关于上述的“⑤,”应该顺便再强调一下:分属地学的工程地质和土木工程的岩土工程是各有侧重又相互补充的。国内国际的大量工程实践,特别是重大、复杂的工程项目的实践一再证明二者既不能相互取代,也不能没有对方。应该是二者各自发挥所长,互相补充,共同建树,新书《岩土工程学》的内容正确反映了这一应有认识。

预祝《岩土工程学》在教学、科研与工程实践中,在国际交流、合作中,发挥应有的作用。

(林在贯 供稿)