

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.04.001

【原位测试专栏】

基于 CPTU 测试的高速公路改扩建 路基沉降预测方法研究

王才进¹, 史庆锋¹, 刘松玉^{1*}, 何欢¹, 蔡国军^{1,2}, 常建新¹, 王蒙¹

(1. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 211189; 2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 高速公路改扩建工程中, 为保证道路服役性能和车辆行驶安全, 拼宽新路与既有老路的沉降预测尤为重要。土体压缩模量是路基沉降计算的重要参数, 其准确测量对沉降预测精度有重要价值。本研究依托京沪高速公路淮安—江都路段, 通过现场孔压静力触探 (Piezocone penetration testing, CPTU) 测试地基土压缩模量, 利用实测沉降基于分层总和法反演土层压缩模量, 确定不同土层压缩模量与锥尖阻力的相关系数, 并与相关性模型进行对比分析。研究表明, 在对比的相关性模型中, SENNESET 模型预测精度优于其他 3 种相关性模型; 室内试验测量得到的土体压缩模量中, 淤泥质黏土和黏土的实测结果较离散, 误差较大, 粉土和粉质黏土的精度较高, 说明室内试验测量得到的压缩模量受外界因素干扰较大; CPTU 测试得到的压缩模量受外界干扰较小, 测试精度较高; 路基 4 种土体的压缩模量与 CPTU 参数锥尖阻力 q_t 的相关系数分别为: 淤泥质黏土层 $\alpha_1=5.45$, 粉土层 $\alpha_2=4.28$, 黏土层 $\alpha_3=5.92$, 粉质黏土层 $\alpha_4=6.58$; 对比现场监测数据证明, 本文提出的基于 CPTU 测试估算高速公路路基沉降方法具有良好准确性。

关键词: 压缩模量; 沉降计算; 室内试验; 锥尖阻力; 相关性模型

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)04-0271-08

Subgrade settlement prediction method for highway expansion projects based on CPTU test

WANG Cai-jin¹, SHI Qing-feng¹, LIU Song-yu^{1*}, HE Huan¹, CAI Guo-jun^{1,2},
CHANG Jian-xin¹, WANG Meng¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: In the highway reconstruction and expansion projects, in order to ensure the road service performance and vehicle driving safety, the settlement prediction of new road and the existing old road is particularly important. The compressive modulus of soil is an important parameter for subgrade settlement calculation, and its accurate measurement is of great value to the accuracy of settlement prediction. In this study, relying on the section from Huai'an to Jiangdu of the Beijing-Shanghai expressway expansion project, the compression modulus of the foundation soil was tested by on-site piezocone penetration testing (CPTU), and the compression modulus of the soil layer was also evaluated based on the measured settlement by the layered sum method. The results were compared and analyzed. The correlation coefficient was compared with the correlation model. The results shows that the prediction accuracy of the Senneset model is better than that of the other three correlation models. Among the soil compression models measured in the laboratory test, the measured results of silty clay and clay are more scattered and have larger errors. The accuracy of silty and silty clay is higher, indicating that the compressive modulus measured by the indoor test is greatly interfered by external factors. The compression modulus obtained by CPTU test is less affected by the external interference, and the test accuracy is high. For the four soil types of

收稿日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金 (41877231, 42072299, 52008098); 江苏省自然科学基金 (BK20200405); 江苏省交通运输科技项目 (7921004042B)。

作者简介: 王才进 (1995—), 男, 博士研究生, 主要从事路基软土方向研究。E-mail: wangcaijin@seu.edu.cn。

*通信作者: 刘松玉 (1963—), 男, 东南大学首席教授, 博士生导师。长期从事 CPTU 原位测试以及软土地基处理相关研究。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

the foundation, the correlation coefficients between the compression modulus and the CPTU parameter cone tip resistance q_t are: silty clay layer α_1 , 5.45; silt layer α_2 , 4.28; clay layer α_3 , 5.92; silty clay layer α_4 , 6.58. It is proved that the proposed method for estimating highway subgrade settlement based on CPTU test has satisfactory accuracy.

Key words: compression modulus; settlement calculation; laboratory test; cone tip resistance; correlation model

0 引言

随着我国城市化进程加快和经济的发展,人们对出行的需求增加,高速公路建设实现从无到有的跨越式发展。截至2020年末,高速公路总里程16.1万千米,位列世界第一。但是由于建设初期社会经济水平、技术水平和可持续思想的制约,已建成的高速公路等级较低,大多数是双向四车道,目前已不能适应交通需求的增长,迫切需要扩大道路通行能力。由于新建公路占地较大且易形成路网不均,为了解决这一问题,现阶段我国高速公路通常采用拓宽拼接的方法。我国东部近海区域,高速公路沿线广泛分布深厚软弱土地基,软弱土地基建(构)筑物的沉降变形控制一直是工程建设的难题。高速公路改扩建工程中,拼宽段道路与既有道路的沉降预测尤为重要。由于地基土应力历史差异,原道路下部地基土已固结沉降多年,而拼宽段地基土几乎为原状软土,其沉降特性差异较大,可影响路面服役性能,降低行车舒适度,甚至引起交通安全风险^[1]。

一般采用弹性理论根据土体的压缩模量和固结系数来预测沉降,这两个参数可以从室内试验测试得出。然而,软土受自身特性的影响,在取样和运输过程中受外界因素干扰较大,测试结果难以准确得出原土体的压缩模量^[2-4]。孔压静力触探(Piezcone penetration testing, CPTU)原位测试则规避了原位测试取样扰动问题,在软土特性评价中尤为重要,同时该测试可以提供连续的土体参数测试和原位力学特性的精确评估^[5-7]。

在土体沉降计算中,土体的变形特性参数是直接关系到计算结果的重要参数,CPTU测试结果评价变形特性参数主要指土体的压缩模量。对于压缩模量 E_s 的评价,国内外专家经过大量的研究和现场试验,发现锥尖阻力与压缩模量呈现良好的线性关系^[8-14]。SENNESET等^[9]建议采用修正的锥尖阻力 q_t 评价压缩模量;SANGLERAT^[10]建议使用实测的锥尖阻力 q_c 来评价压缩模量;KULHAWY和MAYNE^[11]则使用净锥尖阻力 q_n 评价压缩模量。杨溢军等^[14]统计了长江河漫滩地区上层黏土和国外参考文献,对比室内试验获得的压缩模量与地震波

孔压静力触探SCPTU测试得到的剪切波速 V_s 结果,通过关系式和剪切波速结果获得压缩模量。童立元等^[15]根据对比验证了实测锥尖阻力 q_c ,修正的锥尖阻力 q_t 和净锥尖阻力 q_n 与室内试验获得的压缩模量值 E_s 之间均具有良好的线性关系,但相关系数 α 的选择具有区域性,需要针对不同地区进一步确定。上述方法虽然简单快捷,但仍依赖于室内试验测试的结果,若取样质量较差或实验过程中精度控制不足,所得相关系数仍具有一定的误差。实测沉降反演法通过实测沉降数据确定压缩模量与锥尖阻力之间的相关关系,从而得到更具有区域代表性且不依赖于室内试验的相关系数 α ,并将其用于土体变形特性评价和沉降预测。综上,目前对于土体压缩模量和锥尖阻力建立的相关性模型,通过室内试验测量得到压缩模量进行对比分析,受外界因素干扰较大,难以准确评价锥尖阻力和压缩模量之间的相关关系模型。

本文依托京沪高速公路扩建工程,对4个路基断面进行CPTU测试,提出了压缩模量计算模型以及锥尖阻力与不同土层压缩模量之间的相关性系数,并结合实测沉降数据,验证了本文所提方法的准确性。

1 现场试验

京沪高速公路扩建工程淮安—江都路段主要位于里下河浅洼平原区(K842+716~K958+500),全线于2000年12月建成通车,已运营近22年。随着沿线社会经济的快速发展,京沪高速公路的交通量也增长迅猛,高峰时段的服务水平已明显降低,其中淮安以南路段,特别是高邮段道路通行状况已基本接近饱和,通行条件及行车安全已不能适应目前以至将来交通发展的需求,亟需进行改扩建。路基扩建示意图如图1所示。沿线软土和可液化砂土发育,浅层黏土多具有弱-中等膨胀性,分布范围广,工程地质条件差。试验场地位于里下河平原区,主要由泻湖相沉积组成,表层多为0~3m厚的硬壳层,软土层分布广泛,厚度从3~30m不等,埋藏深度深且分散,地表以下30m处仍有零星分布,局部地段呈透镜状,工程性质较差。由于扩建

路段地基地质条件较差, 新老路地基差异沉降控制是扩建工程的难点问题, 尤其是老路地基的固结沉降和附加沉降对老路地基沉降的影响, 为研究老路地基的沉降规律, 在老路地基和新路地基分别开展 CPTU 测试, 依据 CPTU 测试参数来评价老路地基的沉降规律。

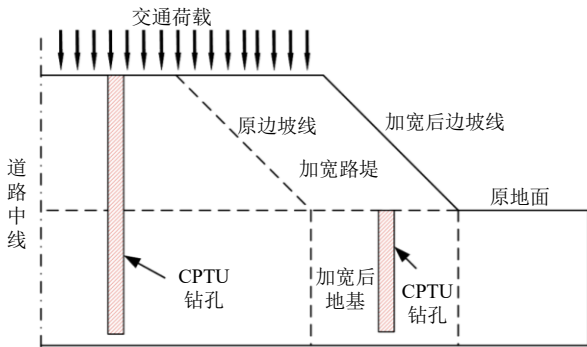


图 1 公路路基扩建示意图

Fig. 1 Schematic diagram of highway subgrade expansion

公路地基土体 CPTU 试验设备采用东南大学自主研发的新一代 CPTU 系统, 即 SEU@CPTU-1 型多功能数字式孔压静力触探系统, 此系统能够提供更多的反力, 测试系统化, 高精度化, 如图 2 所示。探头规格符合国际标准: 锥角 60°, 探头底直径 35.7 mm, 探头底截面积为 10 cm², 侧壁摩擦筒表面积 150 cm², 孔压测试元件厚度 5 mm, 位于锥肩位置, 探头贯入速度为 20 mm/s, 测试时系统每隔

5 cm 采集一次数据。

根据施工设计需要, 结合前期的工程地质勘察情况, 选取软弱土层广泛分布且厚度较厚的典型路段进行了测试。在高速公路选取了 4 个测试断面, 4 个断面分别为 CPTU1-1、CPTU2-2、CPTU3-3、CPTU4-4, 每个测试断面分别在既有地基和加宽后地基进行两次测试, 既有地基测试点位于应急车道与车行道的交界处, 总共进行了 8 个孔位的 CPTU 试验, 最大测试深度达到了 28.72 m。另外, 由于高速公路上下的高差, 对于路上的 CPTU 测试孔在公路路面进行了预钻孔, 孔深约 5~7 m, 具体测试细节见表 1。



图 2 车载式 CPTU 贯入设备

Fig. 2 Vehicle mounted CPTU penetration equipment

表 1 CPTU 测试孔信息

Table 1 CPTU test hole information

测试断面	里程编号	路堤高度/m	位置	老路路基			新建路基	
				编号	探测深度/m	预钻孔深度/m	编号	探测深度/m
CPTU1-1	K869+800	4.44	高邮	O ₁	23.2	6.5	N ₁	28.11
CPTU2-2	K922+950	4.67	高邮	O ₂	21.0	6.4	N ₂	28.72
CPTU3-3	K876+800	4.52	宝应	O ₃	13.6	5.5	N ₃	14.23
CPTU4-4	K923+280	3.94	高邮	O ₄	19.5	7.0	N ₄	28.01

2 CPTU 测试结果分析

根据 CPTU 测试获得的净锥尖阻力、侧壁摩阻力和孔隙水压力等参数, 对土体基本性质进行了分析, 采用 ROBERTSON 的 Soil Behavior Type (SBT) 土分类方法^[6] 对土体进行了分类。该场地典型 CPTU 测试结果如图 3 所示, 新老路 CPTU 测试曲线对比的起点为原地面, 试验场地从上到下的土体分类为淤泥质黏土、粉土、黏土、粉质黏土。从图

3 中可以看出, 该场地内淤泥质黏土层之下覆盖层中上部主要为粉土、黏土和粉质黏土, 中间局部地段分布有透镜体状的软弱黏性土, 覆盖层中下部为饱和软弱黏性土。在 8 m 以上的土层锥尖阻力普遍较大, 当深度超过 8 m 后, 锥尖阻力明显减小, 同时孔隙水压力增大, 根据 SBT 分类图, 推断 8 m 以下存在较深厚的淤泥质黏土层。这是由于淤泥质黏土含水量高、孔隙比大, 因此导致测试过程中锥尖阻力较小, 孔隙水压力较大。

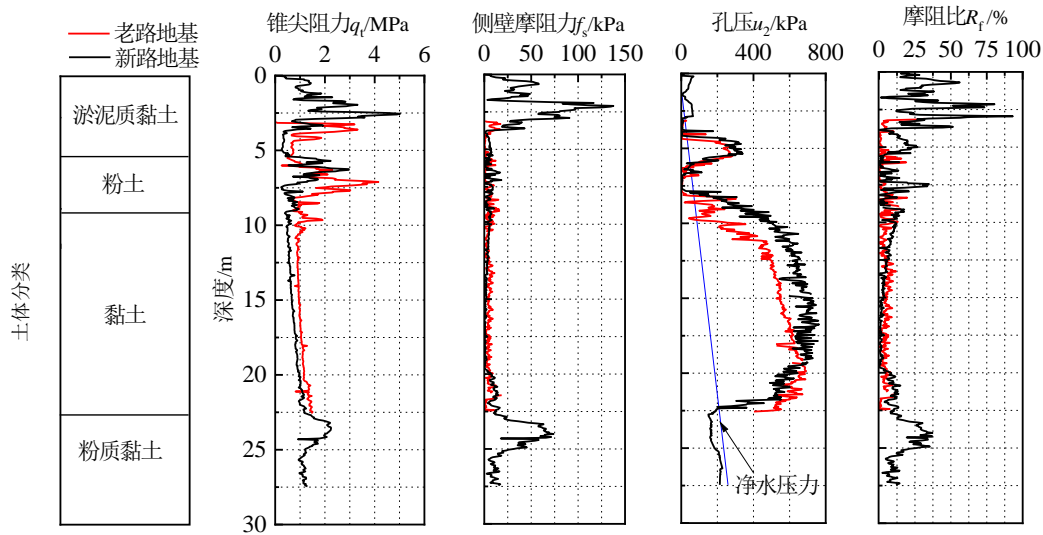


图3 京沪高速公路路基现场CPTU测试结果

Fig. 3 Field CPTU test results of subgrade of Beijing-Shanghai expressway

3 基于CPTU测试数据预测压缩模量

在CPTU测试参数中，基于锥尖阻力与压缩模量建立相关性模型来预测土体的压缩模量。LIU等^[17]通过参数反分析和地基沉降数据，建立了压缩模量和锥尖阻力的经验系数，姬付全等^[18]使用超定方程的最小二乘法进行计算，但他们忽略了瞬时沉降、次固结沉降、软土层侧向变形引起的沉降和施工因素的影响。随着荷载的施加，软土层发生塑性挤压，产生水平侧向位移，瞬时沉降增加，总沉降也增加。荷载施加方式、路堤填筑率和高度不同，沉降也不同。在路基荷载作用下，路基软土的土颗粒随时间缓慢蠕变，使软土产生次固结沉降。不同的地基处理方法对软土地基的改善有不同的影响，也会对最终的总沉降产生一定的影响。因此，在使用沉降公式进行参数反分析时，必须考虑瞬时沉降、次固结沉降和施工因素。

在京津塘高速公路项目中，程丽荣等^[19]根据实测沉降数据，采用统计方法，结合岩土试验数据，得出沉降系数与相关因素之间的经验公式：

$$m_s = 0.616\gamma^{0.7}(\theta H^{0.2} + VH) + Y \quad (1)$$

式中： H 、 γ 分别为路堤填土的高度及重度； Y 为地质因素修正系数； θ 为地基处理类型修正系数； V 为填筑加载速率修正系数。

沉降计算中，沉降系数 m_s 与多种因素相关，主要与地质条件、路基荷载、地基加固类型和施工方法有关，一般路基的沉降计算，沉降系数 m_s 取值

范围为1.1~1.7。公路地基最终沉降可以通过分层总和法计算的主固结沉降与沉降系数修正得出，提高了路基沉降计算的准确性。

$$S_c = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i}{E_{si}} \Delta h_i \quad (2)$$

$$S = m_s S_c \quad (3)$$

式中： S_c 是按分层总和法计算沉降量； Δp_i 是第 i 层土平均附加应力，kPa； Δh_i 是第 i 层土厚度，分层厚度不大于2m； E_{si} 是第 i 层土压缩模量，取新路压缩模量计算； m_s 是沉降计算经验系数，根据规范取值。

近年来，很多学者^[15-17,19-21]对CPTU测试参数预测土体的压缩模量进行了大量研究，经过现场试验和数据统计，得出土体压缩模量与CPTU测试参数存在线性关系，关系式为：

$$E_s = \alpha q_n \quad (4)$$

式中： q_n 是净锥尖阻力。则上述沉降公式(3)可表示为：

$$S = m_s S_c = m_s \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i \Delta h_i}{E_{si}} = m_s \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i \Delta h_i}{\alpha_i q_i} = \frac{m_s}{\alpha_i} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i \Delta h_i}{q_i} \quad (5)$$

式中： q_i 是第 i 层土的净锥尖阻力； α_i 为第 i 层压缩模量与净锥尖阻力的相关系数，令 $\eta_i = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta p_i \Delta h_i}{q_i}$ ，

则对 n 层土体的压缩模量系数, 有下列方程组:

$$\begin{cases} S_1 = m_{s1} \sum_{i=1}^n \frac{\eta_{1i}}{\alpha_i} = m_{s1} \left(\frac{\eta_{11}}{\alpha_1} + \frac{\eta_{12}}{\alpha_2} + \dots + \frac{\eta_{1n}}{\alpha_n} \right) \\ S_2 = m_{s2} \sum_{i=1}^n \frac{\eta_{2i}}{\alpha_i} = m_{s2} \left(\frac{\eta_{21}}{\alpha_1} + \frac{\eta_{22}}{\alpha_2} + \dots + \frac{\eta_{2n}}{\alpha_n} \right) \\ \vdots \\ S_j = m_{sj} \sum_{i=1}^n \frac{\eta_{ji}}{\alpha_i} = m_{sj} \left(\frac{\eta_{j1}}{\alpha_1} + \frac{\eta_{j2}}{\alpha_2} + \dots + \frac{\eta_{jn}}{\alpha_n} \right) \\ \vdots \\ S_m = m_{sm} \sum_{i=1}^n \frac{\eta_{mi}}{\alpha_i} = m_{sm} \left(\frac{\eta_{m1}}{\alpha_1} + \frac{\eta_{m2}}{\alpha_2} + \dots + \frac{\eta_{mn}}{\alpha_n} \right) \end{cases} \quad (6)$$

可简记为: $\Lambda\alpha = S_c$, 其中:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} m_{s1}\eta_{11} & m_{s1}\eta_{12} & \dots & m_{s1}\eta_{1n} \\ m_{s2}\eta_{21} & m_{s2}\eta_{22} & \dots & m_{s2}\eta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{sm}\eta_{m1} & m_{sm}\eta_{m2} & \dots & m_{sm}\eta_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} \frac{1}{\alpha_1} & \frac{1}{\alpha_2} & \dots & \frac{1}{\alpha_n} \end{pmatrix}^T \quad (8)$$

$$S_c = \begin{pmatrix} S_1 & S_2 & \dots & S_m \end{pmatrix}^T \quad (9)$$

$$S = (S_1 \ S_2 \ \dots \ S_m)^T \quad (10)$$

当 $m=n$ 时, 公式 (6) 为恰定方程, 可求得 α 的精确解;

当 $m>n$ 时, 公式 (6) 为超定方程, 要求其最小二乘解, 其最小二乘为:

$$e = \sum_{j=1}^m \left(S_{cj} - \sum_{i=1}^n \frac{\eta_{ji}}{\alpha_i} \right)^2 = (\Lambda\alpha - S_c)^T (\Lambda\alpha - S_c) \quad (11)$$

$$e = \sum_{j=1}^m \left(S_j - \sum_{i=1}^n \frac{m_{sj}\eta_{ji}}{\alpha_i} \right)^2 = (\Lambda\alpha - S)^T (\Lambda\alpha - S) \quad (12)$$

求导得:

$$\frac{\delta e}{\delta \alpha} = \Lambda^T (\Lambda\alpha - S_c) + (\Lambda\alpha - S_c)^T \Lambda = 2(\Lambda^T \Lambda\alpha - \Lambda^T S_c) \quad (13)$$

$$\frac{\delta e}{\delta \alpha} = \Lambda^T (\Lambda\alpha - S) + (\Lambda\alpha - S)^T \Lambda = 2(\Lambda^T \Lambda\alpha - \Lambda^T S) \quad (14)$$

令上式为 0, 得:

$$\Lambda^T \Lambda\alpha = \Lambda^T S_c \quad (15)$$

$$\Lambda^T \Lambda\alpha = \Lambda^T S \quad (16)$$

取至少 $n+1$ 个类似地质剖面的超定方程, 求解最小二乘解, 得到各土层的压缩模量系数。

实际上, 由于每层土层的工程特性不同, 其沉降系数不应相同, 但为了简化计算方法, 更适合工程计算, 每段仅取一个平均沉降系数 m_s 。根据路堤填筑率和 CPTU 土层分类, 取两个位置的 m_s 值和实测沉降, 如表 2 所示。

表 2 各断面 m_s 取值和实测沉降

Table 2 m_s value and measured settlement of each section

序号	填土重度/(kN/m ³)	填土高度/m	软土厚度/m	软土孔隙比	处理方式	m_s	实测最终沉降/mm
1	18.3	4.5	0.2	1.012	天然地基	0.980	175.2
2	18.3	4.5	0.3	1.004	天然地基	1.010	162.3

4 预测结果对比分析

高速公路扩建后新建路堤对老路地基产生的附件沉降是老路沉降计算的重点, 准确计算老路地基沉降是高速公路扩建工程新老路地基差异沉降控制的关键, 基于 CPTU 测试计算老路地基沉降, 测试结果受外界因素干扰较小, 测试精度高。目前, 基于 CPTU 预测土体压缩模量, 主要是通过锥尖阻力与压缩模量建立相关性模型, 本文选择 4 种相关性模型与本文反算的压缩模量进行对比分析, 并与

室内试验得到的压缩模量进行对比。4 种关系模型如下:

(1) SENNESET 模型^[8] 是由 SENNESET 等对黏性土的压缩模量与净锥尖阻力联系起来, 得出的关系式为:

对于超固结黏土:

$$E_s = \alpha_o \times q_n = \alpha_o \times (q_t - \sigma_{v0}) \quad (17)$$

对于正常固结黏土:

$$E_s = \alpha_n \times q_n = \alpha_n \times (q_t - \sigma_{v0}) \quad (18)$$

式中： q_n 是净锥尖阻力； α_0 和 α_n 为相关系数， $\alpha_0=10\pm 5$ ， $\alpha_n=6\pm 2$ ； σ_{v0} 为上覆盖土层总应力。 q_t 的表达式为：

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad (19)$$

式中： q_c 是锥尖阻力； u_2 是孔隙水压力； a 是 CPTU 探头圆锥面积比。

(2) KULHAWY 模型^[11] 得出压缩模量与净锥尖阻力的关系式为：

$$E_s = 8.25 \times q_n = 8.25 \times (q_t - \sigma_{v0}) \quad (20)$$

(3) JONES 模型^[12] 得出了南非冲积黏土压缩模量与锥尖阻力的关系式为：

$$E_s = 2.75 \times q_c \quad (21)$$

(4) LIU 模型^[17] 通过 CPTU 测试得出了连云港海相黏土压缩模量与锥尖阻力的关系为：

$$E_s = 3.72 \times q_n \quad (22)$$

将 4 种关系模型计算得到的压缩模量和室内测试得到的压缩模量与实测沉降反算的压缩模量对

比如图 4 所示。从图 4 中可以看出，在 4 种土体中，本文方法预测精度最好，其次是 SENNESET 模型，预测精度最差的是 KULHAWY 模型；对于黏土和淤泥质黏土，室内测试的压缩模量较离散，误差较大，因为黏土和粉质黏土在取样和运输过程中受外界因素影响较大，所以室内测试结果误差较大；对于粉质黏土和粉土，室内测试的压缩模量预测精度较好，因为粉质黏土和粉土相对于黏土和淤泥质黏土在取样和运输过程中受外界因素的影响相对较小。综上所述，本文方法得到的压缩模量精度最好，童立元等^[15] 和 LIU 等^[17] 学者也得出在预测土体压缩模量方面 SENNESET 模型表现最好，本文方法的预测结果优于 SENNESET 模型，验证了本文方法的准确性。

为了验证本文方法的准确性，分别采用了各种方法的压缩模量，并根据分层总和法计算了应急车道与车行道交界处地基的最终沉降量。利用双曲线拟合法计算了既有地基沉降实测数据的最终沉降量。通过几种方法的比较，得出各种压缩模量的最终沉降比较，如图 5 所示。从图 5 中可以看出，

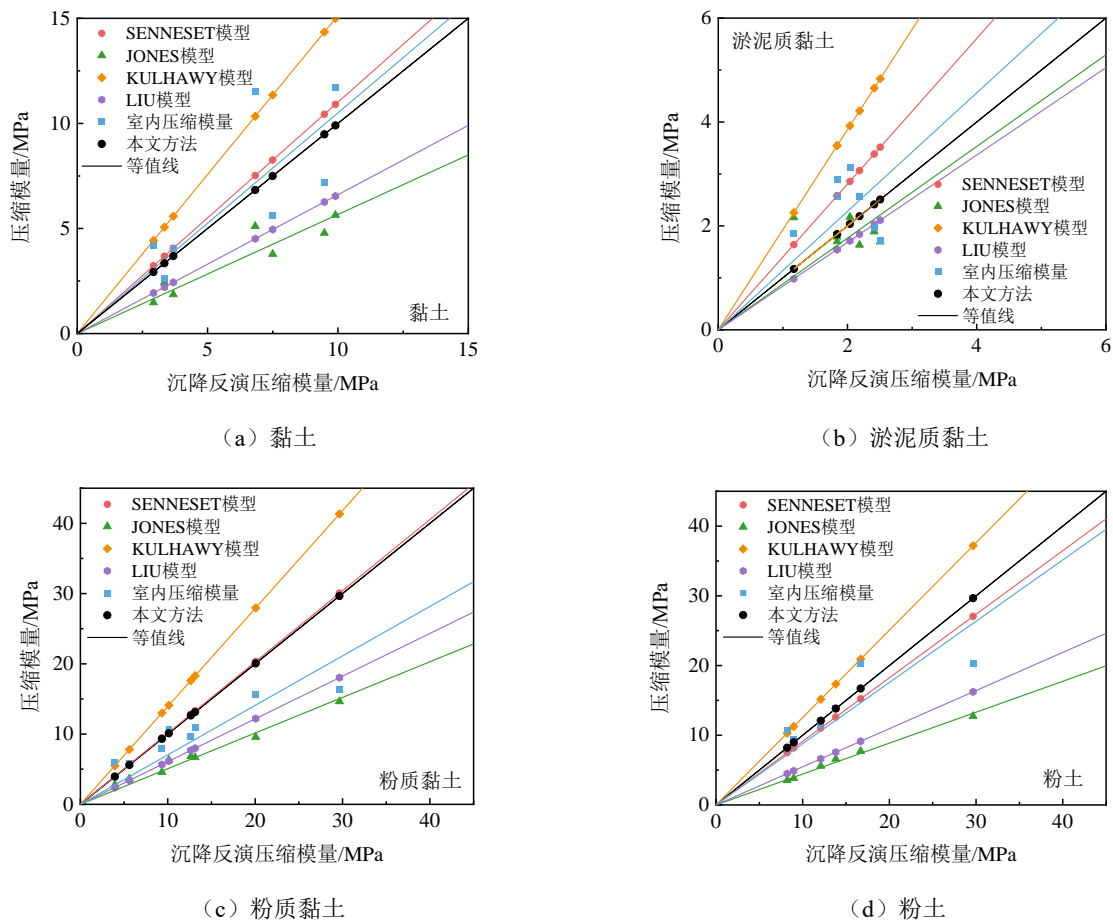


图 4 各种模型预测的压缩模量对比

Fig. 4 Comparison of compression modulus predicted by various models

KULHAWY 模型计算的沉降值明显小于实测最终沉降值, 这很容易导致实际沉降超出路基设计所能承受的范围, 造成极大的危害。JONES 模型得到的沉降值明显大于实测最终沉降值, 易造成工程投资的浪费和经济效益的损失。其他方法计算的沉降值与实测最终沉降值接近。特别是本文方法与实测最终沉降值之间的差异小于 5 mm。用该方法计算的中线路基的最终沉降值为 178 mm, 实测值计算的总沉降量为 175.5 mm。因此, 该方法对于计算区域的压缩模量是非常有效的, 在实际工程中可以通过该方法得到区域的相关系数值, 计算压缩模量并预测最终沉降量。

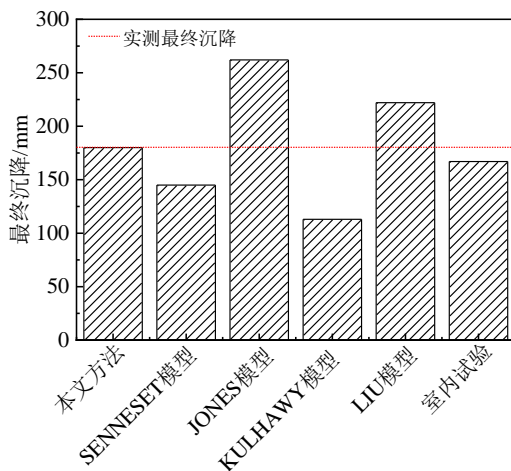


图 5 各种模型沉降计算对比

Fig. 5 Comparison of settlement calculation of various models

5 结论

本文通过 CPTU 测试数据计算土体压缩模量的研究以及与实测沉降的对比分析, 主要得到以下结论:

(1) 将 4 种基于 CPTU 参数计算土体压缩模量的相关性模型和一维固结室内试验测量得到的压缩模量与实测最终沉降反演得到的压缩模量进行对比分析, SENNESET 模型预测精度优于其他 3 种相关性模型。

(2) 室内试验测量得到的土体压缩模量中, 淤泥质黏土和黏土的实测结果较离散, 误差较大, 粉土和粉质黏土的精度较高, 淤泥质黏土和黏土在取样和试验过程中受外界因素干扰较大; CPTU 测试得到的压缩模量, 受外界干扰较小, 测试精度较高。

(3) 通过实测沉降反分析得到路基 4 种土体的压缩模量与 CPTU 参数锥尖阻力 q_t 的相关系数分

别为: 淤泥质黏土层 $\alpha_1=5.45$, 粉土层 $\alpha_2=4.28$, 黏土层 $\alpha_3=5.92$, 粉质黏土层 $\alpha_4=6.58$ 。经与沉降监测结果对比验证、分析, 本文所提基于 CPTU 测试结果预测高速公路地基沉降方法准确可行。

参考文献

- [1] 王蒙, 蔡国军, 刘文亮, 等. 基于 CPTU 测试的高速公路改扩建新老地基土工程特性评价研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 81-84.
WANG Meng, CAI Guo-jun, LIU Wen-liang, et al. Evaluation of engineering characteristics of new and old soft soil foundation based on advanced CPTU data[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S2): 81-84.
- [2] HIGHT D W, BOESE R, BUTCHER A P, et al. Disturbance of the bothkennar clay prior to laboratory testing[J]. Géotechnique, 1992, 42(2): 199-217.
- [3] NASH D F T, POWELL J J M, LLOYD I M. Initial investigations of the soft clay test site at Bothkennar[J]. Géotechnique, 1992, 42(2):163-181
- [4] 张诚厚. 孔压静力触探应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
ZHANG Cheng-hou. The Application of Piezocone Penetration Test[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.
- [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 strategy and development of CPT in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 553-556.
- [6] CAI G J, LIU S Y, TONG L Y, et al. Field evaluation of undrained shear strength from piezocone penetration tests in soft marine clay[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2010, 28(2): 143-153.
- [7] 王蒙. 基于 CPTU 测试的高速公路扩建工程新老地基工程特性与差异沉降控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
WANG Meng. Soil properties evaluation of new and old foundations and differential settlement of expressway extension based on CPTU data[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [8] SANDVEN R, SENNESET K, JANBU N. Interpretation of piezocone tests in cohesive soils[C]//Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing. Orlando, 1988, 2: 939-953.

- [9] SENNESET K, SANDVEN R, JANBU N. The evaluation of soil parameters from piezocone tests[J]. Transportation Research Record, 1989: 24-37.
- [10] SANGLERAT G. The Penetrometer and Soil Exploration[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Publishing Company, 1972.
- [11] KULHAWY F H, MAYNE P W. Manual on estimating soil properties for foundation design[R]. New York: Electric Power Research Institute, 1990.
- [12] JONES G A, RUST E. Piezometer probe (CPTU) for subsoil identification[C]//International Symposium Soil and Rock Investigation by In-situ Testing, 1983, 1-19.
- [13] MITCHELL J K, GARDNER W S. In-situ measurement of volume change characteristics[J]. In-Situ Measurement of Soil Properties, 1975, 2: 279-345.
- [14] 杨溢军, 童立元, 朱宁, 等. 基于 SCPTU 测试确定软土压缩模量方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(增刊 1): 1606-1611.
YANG Yi-jun, TONG Li-yuan, ZHU Ning, et al. Evaluation of maximum shear modulus of soft clay from seismic piezocone tests (SCPTU)[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(S1): 1606-1611.
- [15] 童立元, 涂启柱, 杜广印, 等. 应用孔压静力触探 (CPTU) 确定软土压缩模量的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 569-572.
TONG Li-yuan, TU Qi-zhu, DU Guang-yin, et al. Determination of confined compression modulus of soft clay using piezocone penetration tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 569-572.
- [16] ROBERTSON P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(1): 151-158.
- [17] LIU S, CAI G, PUPPALA A J, et al. Prediction of embankment settlements over marine clay using piezocone penetration tests[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2011, 70(3): 401-409.
- [18] 姬付全, 经纬, 刘志彬, 等. 孔压静力触探(CPTU)确定地基土压缩模量方法研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 882-886.
JI Fu-quan, JING Fei, LIU Zhi-bin, et al. Determination of compressive modulus for foundation soils from the piezocone penetration test (CPTU)[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6): 882-886.
- [19] 程丽荣, 杨春霞, 王家琦, 等. 基于改进压缩模量法的公路路基沉降计算方法研究[J]. 太原科技大学学报, 2020, 41(1): 20-25.
CHEN Li-rong, YANG Chun-xia, WANG Jia-qi, et al. Study on settlement calculation method of highway subgrade based on improved compression modulus method[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2020, 41(1): 20-25.
- [20] MAYNE P W. Integrated ground behavior: In-situ and lab tests[J]. Deformation Characteristics of Geomaterials, 2005, 2: 155-177.
- [21] 陈孝培, 甘德福. 论软土地基压缩模量 E_s 的定值问题[J]. 工程勘察, 1999(6): 16-18.
CHEN Xiao-pei, GAN De-fu. On the determination of compressibility modulus E_s of soft soil foundation[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1999(6): 16-18.

组稿专家 刘松玉



东南大学首席教授、博士、博士生导师；全国创新争先奖获得者、国家级人才计划入选者；现任东南大学岩土工程学科首席科学家，东南大学城市地下空间研究中心主任，江苏省城市地下空间与环境安全重点实验室主任。长期致力于软弱地基原位测试与加固技术研究。