DOI：10.11779/CJGE2019S2021

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

王 蒙[1]，蔡国军[*1]，刘文亮[1]，吴家铭[2]，刘松玉[1]，林 军[1]，戴济群[3]
（1. 东南大学岩土工程研究所，江苏 南京 210000；2. 中设设计集团股份有限公司，江苏 南京 210000；3. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210029）

摘 要：软土地基上进行高速公路扩建项目面临着极大的挑战，必须对新老地基土体的工程特性进行全面的评价。传统室内试验方法会对土体产生扰动，而且时间长、成本大。孔压静力触探（CPTU）技术作为一种新型的原位测试方法，可以测试锥尖阻力、侧壁摩阻力与孔隙水压力等参数，而且具有多功能、连续性、高精度等优点，在国外得到广泛的应用。采用多功能 CPTU 技术对京沪高速公路扩建工程新老地基土体进行原位测试，基于承载力理论与孔穴扩张理论分别解译了新老地基土体的应力历史、变形与固结特性参数。研究发现：该方法可以更准确地确定软土层的分布、厚度和深度，可为进一步分析新老路基差异沉降的计算提供科学依据，更好地指导路基拼接相互作用与地基处理的设计和施工。

关键词：孔压静力触探；差异沉降；超固结比；压缩模量；固结系数
中图分类号：TU413 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2019)S2－0081－04

作者简介：王 蒙(1993—)，女，硕士研究生，主要从事原位测试 CPTU 技术与软土地基处理等方面的研究。E-mail: wm199320@163.com。

Evaluation of engineering characteristics of new and old soft soil foundation based on advanced CPTU data

WANG Meng[1], CAI Guo-jun[1], LIU Wen-liang[1], WU Jia-ming[2], LIU Song-yu[1], LIN Jun[1], DAI Ji-qun[3]
(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210096, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The widening project of highways on soft soil foundation faces great challenges. It is necessary to evaluate the engineering characteristics of the new and old foundation soils comprehensively. The traditional methods in laboratory cause disturbance to the soils, which is long and costly. As a new in-situ testing technology, CPTU, can be used to obtain parameters precisely and continuously including cone tip resistance, sidewall friction and pore water pressure. The multi-functional CPTU technology is used to test the new and old foundation soils of the Beijing-Shanghai Expressway. Based on the bearing capacity theory and the cavity expansion theory, the parameters of the old and new foundation soils are interpreted, such as the stress history, deformation and consolidation. It's found that the distribution, thickness and depth of soft soil layer can be more determined accurately. In addition, the above-mentioned important engineering parameters can be provided as the scientific evidences for the prediction of differential settlement of old roadbed and the design and construction of subgrade splicing.

Key words: CPTU; differential settlement; over-consolidation ratio; compressive modulus; consolidation coefficient

0 引 言

由于软土具有高孔隙比、高压缩性、高灵敏度，低渗透性等特点，在软土地区进行高速公路扩建工程容易导致新老路基差异沉降。差异沉降的预测除了最终沉降和工后沉降，还需要考虑新老路之间的相互作用[1]。为考虑新路荷载的影响，孙杰等[2]以 Boussinesq 解答为出发点，从附加应力变化规律中寻找内在变化因素来求解沉降量。另外，多位学者[3-4]利用有限元工具对新老路基进行数值模拟，对土体的物理力学特性、应力历史、边界条件、荷载情况及相互作用进行直观模拟分析，从而计算新老路基的差异沉降。

为了准确预测新老路基差异沉降，必须对其工程

基金项目：国家重点研发计划项目课题（2016YFC0800200）；国家自然科学基金项目（41672294，41877231，51578146）
收稿日期：2019－04－30
*通讯作者（E-mail: focuscai@163.com）

表 1 CPTU 测试孔号及测试深度

Table 1 Number and depths of CPTU holes

孔号	里程编号	上下高差/m	位置	老路测试深度			新路测试深度	
				编号	测试深度/m	预钻孔深度/m	编号	修正深度/m
CPTU1-1	K923+100	4.44	高邮	O1	23.2	6.5	N1	28.11
CPTU2-2	K922+950	4.67	高邮	O2	21.0	6.4	N2	28.72
CPTU3-3	K876+800	4.52	宝应	O3	13.6	5.5	N3	14.23
CPTU4-4	K923+280	3.94	高邮	O4	19.5	7	N4	28.01

参数进行精确判断。目前获得上述参数主要通过室内试验和现场原位测试两种方式，现场试验突破了室内试验的限制，无需取样，对土体扰动小。尤其是多功能孔压静力触探（CPTU）技术，不仅快速经济，而且可连续获得可靠的土体参数：锥尖阻力 q_c、侧壁摩阻力 f_s、孔隙水压力 u 等，对正确认识新老路地基的土体分层分类、应力历史、变形特性以及固结特性具有重要意义[5]。

基于上述背景，本文采用 CPTU 测试设备对京沪高速扩建工程扬州段的新老路地基土体进行了现场试验，基于 CPTU 测试参数评价并比较新老路地基土体的超固结比、压缩模量以及固结系数等工程参数，以揭示新老路地基土体的工程特性演变规律。

1 工程概况与现场试验

1.1 场地描述

京沪高速公路扬州路段位于里下河浅洼平原区（K842+716—K958+500），地势较平坦，沿线软土发育，浅部黏性土多具有弱—中膨胀性，工程地质条件较差。分别对新老路基各 4 个孔位对应位置进行 CPTU 测试，其中老路地基孔位记为 O1、O2、O3、O4，新建地基记为 N1、N2、N3、N4，具体测试深度见表 1。

1.2 仪器设备

老路试验设备采用美国 Hogentogler 原装多功能数字化车载式 CPTU 系统，测试系统化，高精度化，反力足，但车载形式更适用于高速公路；待建新路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 CPTU 系统，设备轻巧、方便灵活，适用各种复杂的地形环境，如图 1。探头规格符合国际标准，贯入速度为 20 mm/s，系统每 5 cm 采集一次数据。经大量试验验证，两种设备所测量数据随土层深度变化趋势一致，因此二者数据误差可忽略，可分别用于新老路土体探测。

1.3 土体分层分类

根据 CPTU 测试参数，利用 Robertion 的 SBT 分类方法[6]确定土体分层分类。本次场地典型 CPTU 测试结果如图 2 所示，该场地内填土层之下覆盖层中上部主要为粉土、黏土或粉质黏土，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 12 m 以上的土层 q_t 普遍较大，当深度超过 12 m 后，锥尖阻力明显减小至 1 MPa 左右，孔隙水压力明显增大，根据 SBT 分类图，推断 12 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 q_t 较小，u_2 较大。

（a）车载式CPTU （b）SEU@CPTU-1型

图 1 CPTU 试验设备

Fig. 1 CPTU test equipment

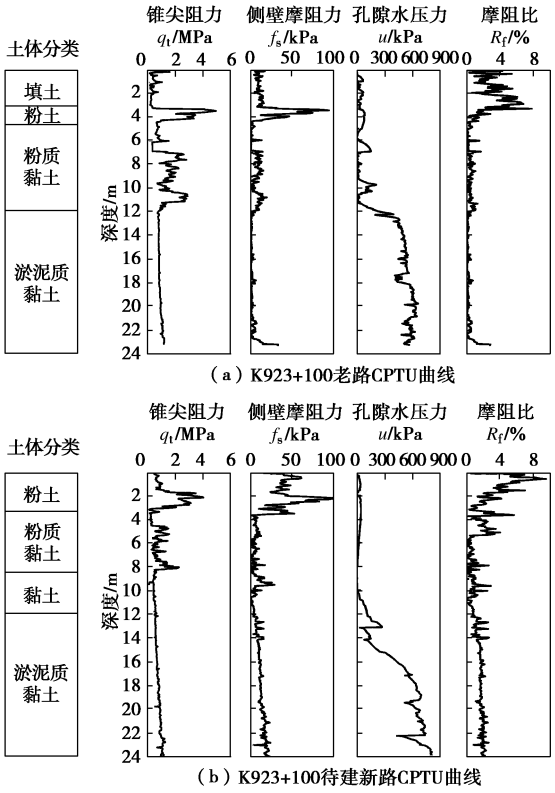


图 2 京沪高速扬州段典型软土地基 CPTU 测试结果

Fig. 2 CPTU test results of typical soft soil foundation in Yangzhou section of Beijing-Shanghai Expressway

2　基于 CPTU 的工程特性解译方法

2.1　应力历史

土体应力历史是衡量土体稳定性、变形特性的重要指标，常采用超固结比（OCR）表示。结合孔穴扩张理论和临界状态土力学，Mayne[7]提出：

$$\mathrm{OCR}=2\left[\frac{1}{1.95M+1}\left(\frac{q_{\mathrm{t}}-u_2}{\sigma'_{\mathrm{v0}}}\right)\right]^{\frac{1}{\Lambda}} \quad , \tag{1}$$

$$M=\frac{6\sin\phi'}{3-\sin\phi'} \quad , \tag{2}$$

其中 $\Lambda=(1-c_{\mathrm{s}}/c_{\mathrm{c}})$ 是塑性体积应变比，其中 c_{s} 和 c_{c} 分别是膨胀指数和压缩指数，M 是临界状态线斜率，ϕ' 是土体有效内摩擦角。

2.2　变形特性

压缩模量 E_{s} 对于判断土体压缩性和计算地基沉降量十分重要。对于黏土，Senneset 等[8]提出：

$$E_{\mathrm{s}}=\alpha_{\mathrm{n}}q_{\mathrm{n}}=\alpha_{\mathrm{n}}q_{\mathrm{t}}-\sigma_{\mathrm{v0}} \quad , \tag{3}$$

其中，α_{n} 为正常固结土压缩模量系数，建议取值 8.25。超固结土系数为 α_{i}，建议在 5～15 之间取值。

2.3　固结特性

土的固结特性常用固结系数 c_{h} 表示，是地基沉降计算中的关键参数。蔡国军等[9]针对连云港海相黏土进行了室内试验和 CPTU 测试，并通过现场监测资料进行反分析，比较了固结渗透参数的差异性。

The 等[10]在考虑土体刚度指数的基础上，通过对消散孔压的数值分析，提出了无量纲时间因子 T^* 与固结系数 c_{h} 之间的关系：

$$T^*=\frac{c_{\mathrm{h}}t}{r^2(I_{\mathrm{r}})^{0.5}} \quad , \tag{4}$$

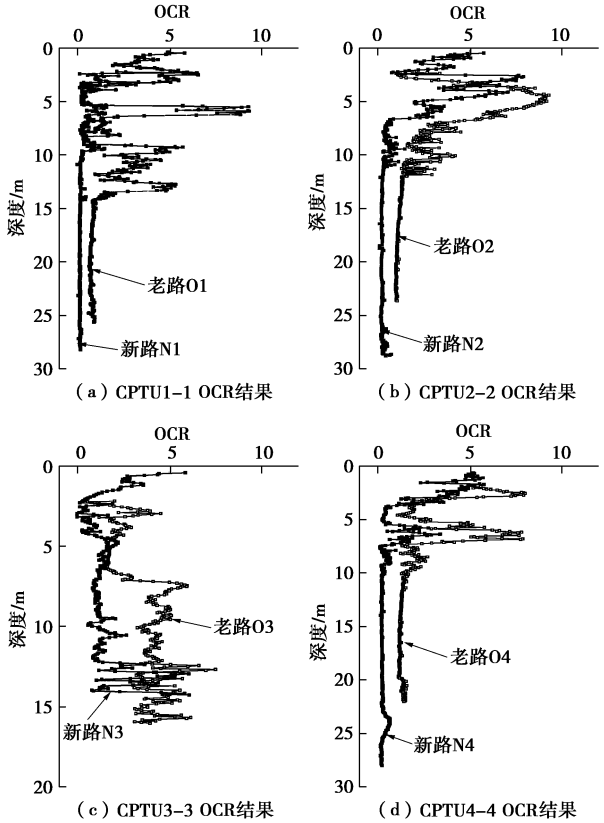
$$c_{\mathrm{h}}=\frac{T_{50}}{t_{50}}r^2 \quad , \tag{5}$$

其中，c_{h} 为水平向固结系数，r 为探头半径。时间因子 T_{50} 与孔压元件的位置和探头尺寸有关；t_{50} 是消散达到 50%所需的时间。

3　预测结果与对比分析

3.1　超固结比 OCR

典型 OCR 剖面图见图 3，新路地基深度 5 m 以下土体 OCR 基本在 1 左右，属于欠固结土至正常固结土。由于上层土体所受先期固结压力较大，5 m 以上土体 OCR 较大。大部分老路地基土体 OCR>2，属于超固结土，甚至部分土层 OCR>5。老路在路基荷载和行车荷载作用下，所受先期固结压力远远大于当前所受固结压力，因此处于超固结状态。



（a）CPTU1-1 OCR结果　（b）CPTU2-2 OCR结果

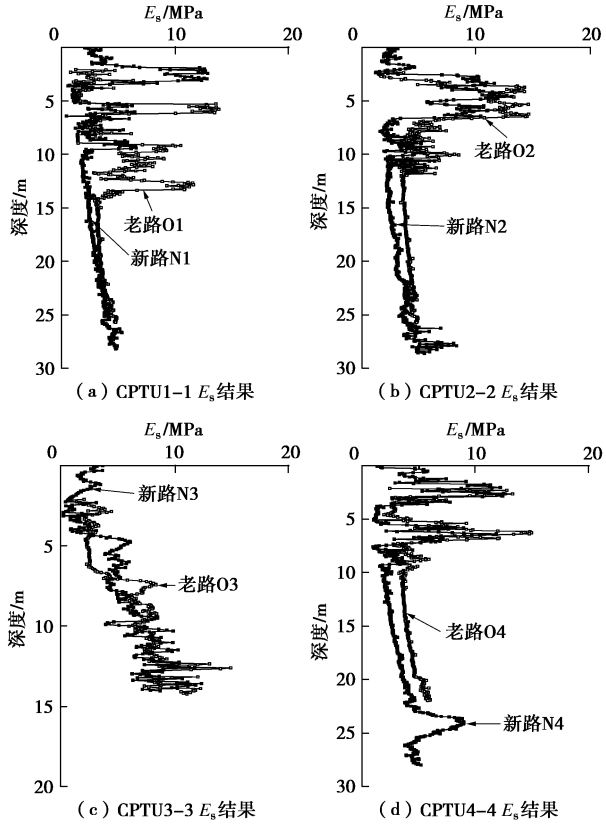
（c）CPTU3-3 OCR结果　（d）CPTU4-4 OCR结果

图 3　OCR 结果比较

Fig. 3 Comparison of OCR results

3.2　压缩模量 E_{s}

图 4 为压缩模量沿深度剖面图，老路 E_{s} 相对较大，而新路地基土体 E_{s} 较小，尤其在软土层，易产生严重



（a）CPTU1-1 E_{s}结果　（b）CPTU2-2 E_{s}结果

（c）CPTU3-3 E_{s}结果　（d）CPTU4-4 E_{s}结果

图 4　E_{s} 结果比较

Fig. 4 Comparison of results of E_{s}

变形。由于老路地基经过长期压缩，土体被压实，故压缩模量较大。

3.3 固结系数 c_h

图 5 分别绘制了 c_h 曲线，c_h 值基本位于 10^{-2}～10^{-3} cm^2/s 之间。由于老路经长期运营，孔隙水被排出，固结基本趋于稳定，故 c_h 相对较小。而待建新路地基尚未固结，属于天然土体，孔隙水含量高，在荷载作用下易排出，因此固结速度快，c_h 较大，建设初期沉降较大。新老路基下部软土层 c_h 均急剧减小，这是由软土特性决定的，渗透性低使孔隙水难以排出，达到相同的固结度或沉降量较一般路基时间长。

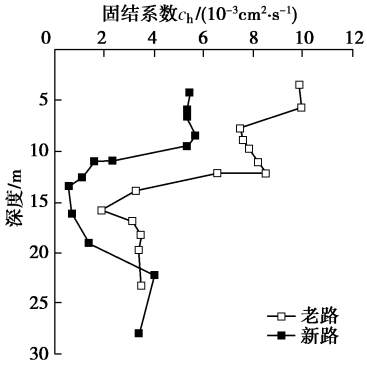


图 5 c_h 结果比较

Fig. 5 Comparison of results of c_h

4 结 论

（1）京沪高速公路扬州段大部分路段具有深厚软土层，由于 12 m 以下土层锥尖阻力明显减小，孔隙水压力相对较大，故可判断软土层分布于深度 12 m 以下，对高速公路扩建工程差异沉降产生较大影响。

（2）老路地基土体基本为超固结土，OCR>2，甚至部分土层 OCR>5。与老路相比，新路地基土体 OCR 较小，基本在 1 左右，多为欠固结土至正常固结土。

（3）对于压缩模量，老路地基土体经长期压密效果，压缩模量大。相反，新路地基土体压缩模量很小，尤其是软土地基易被压缩，变形量很大，产生较大的差异沉降，需要进行软土地基处理。老路地基的压缩模量比新路增大 1～2 MPa 左右。

（4）老路地基在长期荷载作用下，固结基本趋于稳定，因此固结系数较小。新路地基尚未固结，瞬间加载易产生较大沉降，固结系数较大。软土地区由于孔隙水含量高，渗透性低，故固结系数与其他土层相比很小。

参考文献：

[1] 高 翔, 高速公路新老路基相互作用分析与处理技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2006. (GAO Xiang. Research on the interaction between new and existing embankments and treatment techniques in highway widening engineering[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese))

[2] 孙 杰. 软土地基高速公路拼宽工程变形特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (SUN Jie. Study on the deformation features of widening of expressway on soft groundwork[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))

[3] JIANG Xin, JIANG Yi, LIANG Xue-jiao, et al. Numerical simulation on deformation behaviors for widened expressway embankment over soft ground[J]. Journal of Rail Way Science and Engineering, 2015, **12**(5): 1039－1046.

[4] WANG Hao, HUANG Xiao-ming. Stress and deformation due to embankment widening with different treatment techniques[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, **18**(4): 1304－1310.

[5] 蔡国军, 现代数字式多功能 CPTU 技术理论与工程应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2010. (CAI Guo-jun. Study on theory and engineering application of digital multifunctional piezocone penetration test (CPTU)[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese))

[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. Practical soil classification methods in China based on piezocone penetration tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1765－1776. (in Chinese))

[7] MAYNE P W. Determination of OCR in clays by piezocone tests using cavity expansion and critical state concepts[J]. Soils and Foundations, 1991, **31**(2): 65－76.

[8] SENNESET K, SANDVEN R, JANBU N. Evaluation of soil parameters from piezocone tests[J]. Transportation Research Record, 1989: 1235.

[9] 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. (CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. 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))

[10] TEH C I, HOULSBY G T. Analytical study of the cone penetration test in clay[J]. Géotechnique, 1991, **41**(1): 17－34.

（责编：黄贤沙）