

文章编号:1674-599X(2022)04-0022-06

# 基于孔压静力触探仪探测数据的路基沉降计算

胡富贵<sup>1</sup>, 田小革<sup>2,3</sup>, 胡涛<sup>1</sup>, 李光耀<sup>2,3</sup>, 郭常辉<sup>2,3</sup>

(1. 湖南建工交通建设有限公司, 湖南长沙 410004; 2. 长沙理工大学公路养护技术国家工程实验室, 湖南长沙 410114; 3. 长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:**为分析路基的沉降,利用孔压静力触探仪对湖南省某高速公路地基土进行触探试验,依据触探试验数据与土体性能参数间的关系,获得地基土体修正剑桥模型参数值,建立考虑路基地基土体流固耦合的有限元模型,计算路基在填筑施工过程中的沉降值,并将所得结果与施工期间的实测沉降值进行对比。研究表明:利用孔压静力触探试验参数计算的路堤填筑期沉降值与实测沉降值较为吻合,路基沉降主要发生在路基填筑期,且随着路基填筑深度的增加逐渐减小。路基填筑完工1a后,沉降基本稳定。

**关键词:**地基沉降;孔压静力触探;触探参数;流固耦合

中图分类号:U416

文献标志码:A

## Calculation of foundation settlement based on detection data of piezocone penetration tests

HU Fugui<sup>1</sup>, TIAN Xiaoge<sup>2,3</sup>, HU Tao<sup>1</sup>, LI Guangyao<sup>2,3</sup>, GUO Changhui<sup>2,3</sup>

(1. Hunan Construction Engineering Group Communications Construction Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. State Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** For investigating the subgrade settlement of the foundation, the piezocone penetration test (CPTU) was performed on field penetration at an expressway subgrade in Hunan Province. Based on the relationship between soil parameters and the penetration data, the parameters of the modified Cambridge model of foundation soil was obtained, and the finite element model was then established considering fluid-structure interaction of the foundation soil of subgrade. The settlement of subgrade during filling construction was calculated and compared with the measured value. The results show that the settlement calculated by the CPTU is consistent with the measured settlement, the subgrade settlement mainly occurs in the filling period, and gradually decreases with the increase of the depth. The settlement is basically stable about 1 year after construction.

**Key words:** foundation settlement; CPTU; detecting parameters; fluid-structure interaction

地基沉降太大往往会对路基路面造成较为严重的破坏,甚至影响公路的正常运营和使用寿命<sup>[1]</sup>。准确计算与预测地基沉降有着重要的意义。沉降计算的精度关键在于建立准确的土体变形模型、获得足够准确的土体物理力学参数<sup>[2]</sup>。

孔压静力触探(piezocone penetration test, 简称为CPTU)是在不扰动土样的情况下进行的原位测试,与取样后进行室内试验测定的结果相比,其测量结果更准确、误差更小<sup>[3-4]</sup>。已有许多学者采用CPTU原位试验数据计算土性参数,如压缩模量<sup>[5-6]</sup>、

收稿日期:2021-12-22

基金项目:湖南省交通运输厅科技项目(201905)

作者简介:胡富贵(1970—),男,湖南建工交通建设有限公司高级工程师。

不排水抗剪强度<sup>[7-8]</sup>、固结系数<sup>[9]</sup>、土体识别<sup>[4]</sup>等,但将CPTU用于地基沉降计算应用的研究较少。童立元等人<sup>[10]</sup>以CPTU设备进行现场试验,采用改进的分层总和法对高速公路地基沉降进行了预测,并与实际沉降监测结果进行对比,验证了该方法的有效性。虽然其计算结果较为精确,但分层总和法是建立在一些假定条件的基础上的,而在实际工程中很少有能满足这些假定条件,且土体变形是非线性的,因此,分层总和法在实际工程的应用较少见。有限元法在求解地基沉降等非线性问题中有着显著优势,国内外已有许多学者利用有限元法对地基的沉降进行计算。温青山<sup>[11]</sup>采用有限元法与理论计算分别对某水库土石坝地基沉降进行了计算,计算结果表明:有限元法的计算精度比理论计算精度更高。虽然采用有限元法模拟路基沉降计算的研究较多,但将CPTU实地触探试验数据与有限元法相结合的研究鲜见。因此,作者拟利用CPTU,对湖南省某高速公路地基土进行现场触探试验,根据CPTU探测数据与地基土参数之间的关系,获得地基土修正剑桥模型的参数值,并建立考虑路基地基土体流固耦合的有限元模型,计算分析路基的沉降,预测分析路基完工后的沉降趋势,以期为类似工程路基沉降分析提供参考。

### 1 原位触探

湖南省某高速公路工程K52+450桩号处的地基土体为粉质黏土,呈褐色~褐红色。经测试,其天然含水率26.2%,天然密度2.02 g/cm<sup>3</sup>,液限38.9%,塑限24.9%。

采用科尔仪器有限公司生产的KE-2103型CPTU设备进行原位探测和孔压消散试验。探头规格符合标准<sup>[12]</sup>(其锥角为60°,锥底截面积为10 cm<sup>2</sup>,探头的有效面积比 $a=0.8$ )。为保证探测试验数据的准确性,在触探过程中探头匀速贯入,贯入速率为20 mm/s,系统每隔10 cm采集一次数据。地基土的锥尖阻力 $q_c$ 、修正锥尖阻力 $q_t$ 随贯入深度的变化如图1所示。孔压消散度 $U$ 随时间的自然对数变化如图2所示。其中, $q_t=q_c+u_2(1-a)$ , $u_2$ 为隙水压力, $a$ 为探头有效面积比。

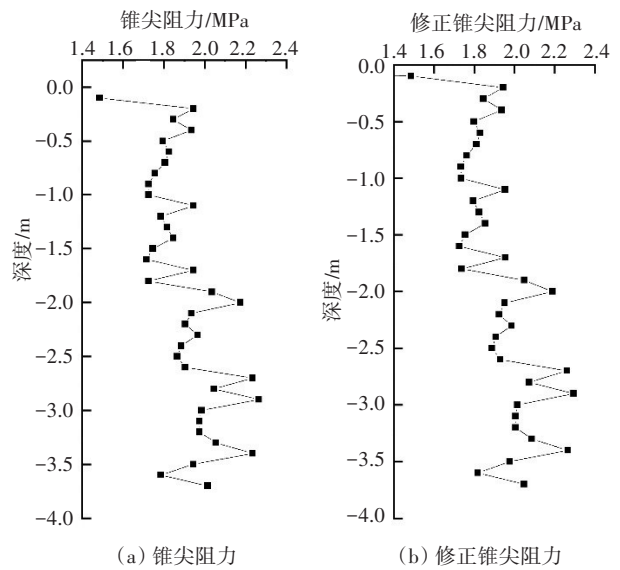


图1 地基土体触探参数值

Fig. 1 The penetration parameter value of foundation soil

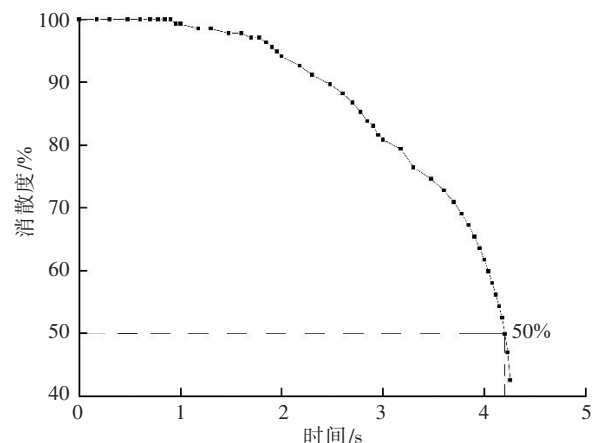


图2 地基土体的归一化超孔压消散曲线

Fig. 2 Normalized excess pore pressure dissipation curve of foundation soil

根据CPTU探测数据及地质钻探资料分析,该处地基土为4.0 m深的硬塑状粉质黏土,下伏强风化钙泥质粉砂岩,可作为路基持力层。从图2可以看出,该土层中超孔压消散到50%的时间 $t_{50}$ 约为4.20 s。

### 2 地基土体的参数

根据对不同固结压力下土体孔压触探参数变化规律及孔压消散规律的研究<sup>[13]</sup>,建立修正锥尖阻力 $q_t$ 与土体压缩指数 $C_c$ 、回弹指数 $C_s$ 之间的关系式,具体表达式为:

$$C_c = 0.17543 - 0.05507 \times q_t, R^2 = 0.84046 \quad (1)$$

$$C_s = 0.10114 - 0.04326 \times q_t, R^2 = 0.79885 \quad (2)$$

塑性体积模量对数 $\lambda$ 、弹性体积模量对数 $\kappa$ 等

参数与  $C_c$ 、 $C_s$  值之间的关系式为:

$$\lambda = \frac{C_c}{\ln(10)} \approx \frac{C_c}{2.303} \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{C_s}{\ln(10)} \approx \frac{C_s}{2.303} \quad (4)$$

土体的渗透系数  $K$  可按式(5)进行计算:

$$K = \frac{C_h \gamma_w}{E_s} \quad (5)$$

其中,固结系数  $C_h$  可按 Houlsby 基于孔隙水压力消散的表达式进行计算:

$$C_h = \frac{T_{50}^* r_0^2 \sqrt{I_r}}{t_{50}} \quad (6)$$

土体的应力比  $M$  的计算式为:

$$M = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (7)$$

式中: $r_0$  为孔压探头半径,取值为 1.785 cm; $t_{50}$  为超孔压消散到 50% 时所用时间,可根据图 2 孔压消散曲线查找; $T_{50}^*$  为修正时间因数,本研究取值为 1.11; $I_r$  为土体刚度指数,本次试验取值为 250; $\varphi$  为内摩擦角,取值为  $25^\circ$ 。

计算得到该路基土体的修正剑桥模型的参数见表 1。

表 1 地基土体的修正剑桥模型参数计算结果

Table 1 Calculation results of M-C-C model parameters

$q/\text{MPa}$	$C_c$	$\lambda$	$C_s$	$\kappa$	$M$	$K/(10^{-4} \text{ m} \cdot \text{d}^{-1})$
1.923	0.069 53	0.030 19	0.017 95	0.007 795	1.2	4.85

### 3 路基沉降的有限元模型

ABAQUS 有限元模型中含有多种土的本构模型,如弹性模型、莫尔-库仑模型、剑桥模型等,既可模拟孔隙水压力的单元,也可考虑流固耦合作用进行计算。ABAQUS 有限元模型中的单元生死转换功能可用于模拟荷载的逐级递增,分析步功能模拟路基填筑的步骤<sup>[14-15]</sup>。因此,ABAQUS 可用于路堤填筑过程中,路基的沉降及路面修筑完成后的工后沉降的计算。

#### 3.1 有限元模型

该实例路堤填土高度为 19.3 m, 10 m 以上填土边坡坡率为 1:1.5, 10 m 以下坡率为 1:1.75, 变坡点处设 2.0 m 宽的护坡道,地基为硬塑状粉质黏土,厚

度为 4 m;路基持力层为强风化钙泥质粉砂岩。因其是对称结构,所以只需取半幅路基进行分析。为了消除边界条件影响,地基水平方向计算宽度取 100 m,厚度取 20 m。路面荷载简化为 1 m 高填土,所以填筑高度为 20.3 m,断面模型计算尺寸如图 3 所示。

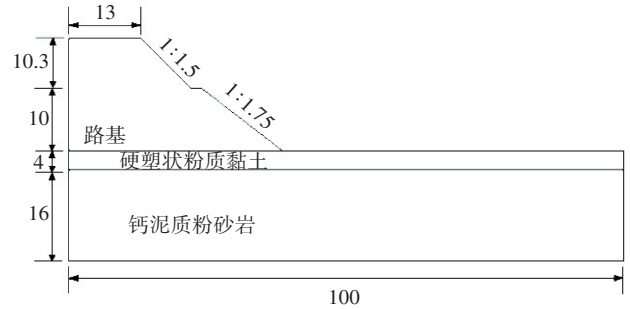


图 3 K52+450 断面模型计算尺寸(单位:m)

Fig. 3 Calculation dimension of the K52 + 450 section (Unit:m)

上部路堤填土采用 CPE4(四结点双线性平面应变四边形单元)划分单元;下部地基采用 CPE4P(四结点平面应变四边形单元,双线性位移,双线性孔压)划分单元。全局网格尺寸 0.3 m×0.3 m。网格划分如图 4 所示。

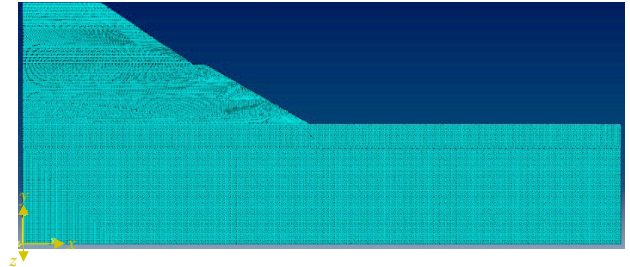


图 4 网格划分示意

Fig. 4 Diagram of grid division

边界条件:约束模型左侧水平位移与转角位移( $U_1$ 与 $UR_3$ 设置为 0),右侧只约束水平位移,固定模型底边所有位移( $U_1$ 、 $U_2$ 与 $UR_3$ 均设置为 0)。假定地下水位位于地基表面,地应力分析步开始之前将地基表面孔压边界设为 0,路堤填土荷载以体力形式施加,边界及荷载示意图如图 5 所示。

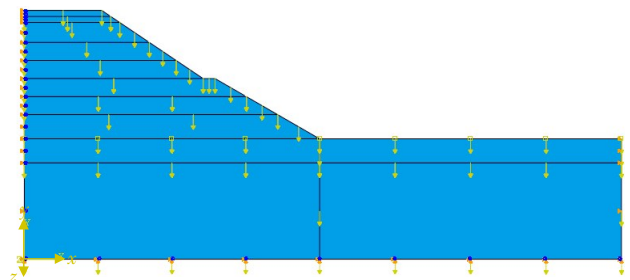


图 5 边界和荷载施加示意

Fig. 5 Schematic diagram of boundary and load

### 3.2 路堤分级填筑过程的实现

在ABAQUS中,路堤的分层填筑过程可以通过瞬态分析步和生死单元法实现。即先建立填筑完成后的整个完整的地基—路基—路面模型,然后根据施工进度,对未填筑土层的单元施加“Remove”命令,进行计算;当填筑到某层时,再施加“Add”命令对该土层的单元进行计算。填土高度依次为4.0、3.0、3.0、3.0、3.0、3.3和1.0 m。各层级填土荷载分别加载25 d后再固结25 d。

### 3.3 路堤填土和持力层的参数值

路堤填土选用摩尔库伦模型,经取样测试,其物理力学参数见表2。

表2 路堤填土的M-C模型参数

Table 2 The M-C model parameters of embankment filling

容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/ MPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	泊松比
20.11	26	25	40	0.3

该处地基的持力层为钙泥质粉砂岩,计算时假定其为弹性体,取弹性模量  $E_0=42$  MPa,泊松比  $\mu=0.2$ 。

### 3.4 路堤填筑期沉降计算结果

路堤填筑期实测沉降值<sup>[16]</sup>与有限元模拟沉降值对比,如图6所示。

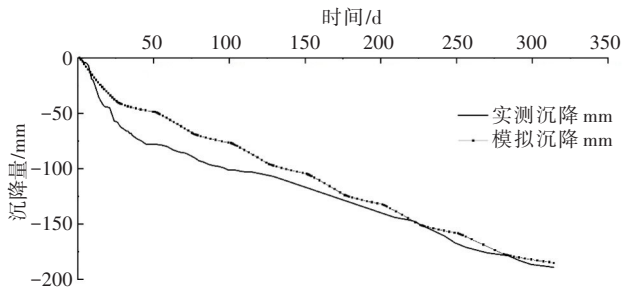


图6 地基实测沉降与计算沉降随时间的变化

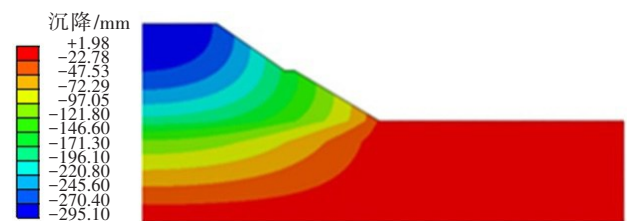
Fig. 6 Measured and simulated settlement curves of foundation

从图6可以看出,有限元模拟沉降曲线与实测沉降曲线大致吻合。表明:有限元模型计算出的沉降是准确的。填筑完成时地基实测沉降189.3 mm,模拟沉降185.3 mm,绝对误差为4 mm。从图6还可以看出,在路基填筑初期,地基沉降较快。在填筑中期,沉降曲线逐渐趋缓,填筑完成后,沉降曲线进一步趋缓。其原因是在填筑初期,地基土压缩性较大,在荷载作用下压缩变形较快;填筑中期,地基土的不断压密使得土体的沉降变缓;在路堤填筑完成后,地基土体所受压力不再增加,当主固结

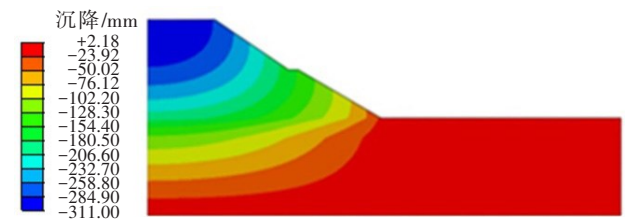
沉降完成之后,土颗粒的蠕变效应使得地基土产生一定变形,但变形速率较小。有限元计算的沉降曲线比实测沉降曲线更平滑平稳,且填筑开始阶段实测沉降均远大于模拟沉降。其原因是有限元模型分析的是较为理想的情况,而在实际施工过程中,路基表面存在着较多重型施工机械,机械的自重及压路机的振动压实对沉降影响较大。

### 3.5 路堤沉降预测

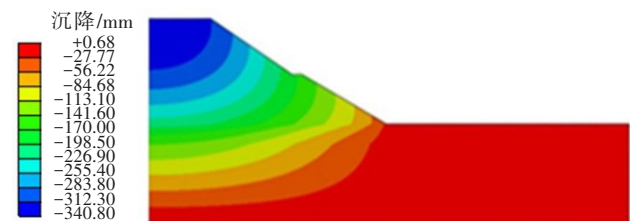
利用建立的有限元模型及参数,计算路堤填筑完成至工后15 a的沉降变化规律,如图7所示。图8为地基中心沉降值随深度变化曲线图。



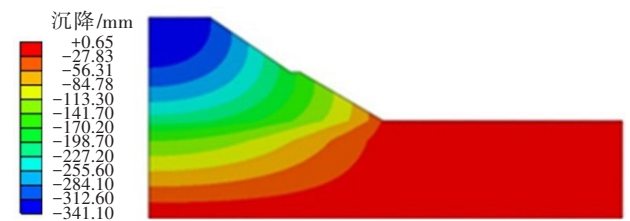
(a) 路基填筑完成



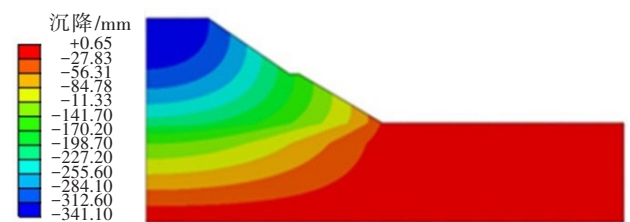
(b) 路面施工完成



(c) 工后1 a



(d) 工后5 a



(e) 工后15 a

图7 路基沉降云图

Fig. 7 The image of subgrade settlement

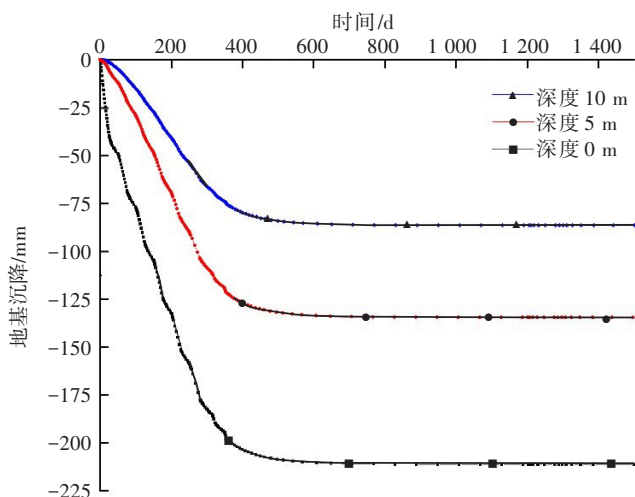


图8 地基中心不同深度处的沉降曲线

Fig. 8 Settlement curves of foundation center with different depth

从图7~8可以看出,地基沉降大部分在发生路堤填筑期,最大沉降发生于地基表面中心外,两侧沉降逐渐减小,与实际监测沉降相符,即中心沉降最大,两侧沉较小,近似为“沉降盆”形;施工完成后地基沉降量为190.2 mm,工后1 a地基沉降量为210.9 mm,工后5 a地基沉降量为211.3 mm,工后15 a地基沉降量为211.6 mm,工后至工后15 a的沉降量相差为21.4 mm,这些都表明:施工完成1 a后沉降基本不再增加,趋于稳定。

## 4 结论

利用CPTU设备对湖南省某高速公路地基土进行现场触探,并根据触探参数与地基土参数之间的关系,获得了路基土体的修正剑桥模型的参数值,考虑地基土体流固耦合作用建立路基沉降ABAQUS有限元模型,进行了计算与对比分析,得到的结论为:

1) 通过对地基现场的CPTU探测,得到了该土体的修正剑桥模型的参数;

2) 通过ABAQUS有限元模型计算的沉降值与实测沉降值较为吻合,表明根据CPTU的现场探测数据推算土体模型参数的方法是可行的。

3) 根据路堤填筑期的沉降监测结果,沉降曲线随时间变化可分为三个阶段:填筑初期沉降迅速增长、填筑中期沉降平稳增长、填筑完成后沉降变化趋于平缓。

## 参考文献(References):

- [1] 胡习阳,曾志雄,符梁,等.张桑高速公路路基沉降预测方法研究[J].公路工程,2018,43(4):278-282.(HU Xiyang, ZENG Zhixiong, FU Liang, et al. Study on prediction method of subgrade settlement of zhangsang expressway[J].Highway Engineering,2018,43(4):278-282.(in Chinese))
- [2] 时兴隆.黄土地区某高速铁路路基沉降控制技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.(SHI Xinglong. Research on the settlement control technology of a high speed railway subgrade in loess area [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University,2018.(in Chinese))
- [3] 蔡国军,刘松玉,童立元,等.多功能孔压静力触探CPTU试验研究[J].工程勘察,2007(3):12-17,75.(CAI Guojun, LIU Songyu, TONG Liyuan, et al. Research on the versatile piezocone penetration test (CPTU) [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2007(3):12-17,75.(in Chinese))
- [4] 柏国龙.基于CPTU土层分类与桩承载特性的工程应用研究[D].镇江:江苏大学,2017.(BAI Guolong. Study on engineering application of soil classification and pile bearing characteristics based on CPTU [D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2017.(in Chinese))
- [5] 李鹏,许再良,李国和.基于静力触探的不同压力段土体压缩模量确定方法研究[J].工程勘察,2013,41(11):5-9,20.(LI Peng, XU Zailiang, LI Guohe. Estimation of soil compression modulus under different stress states based on cone penetration tests [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(11):5-9,20.(in Chinese))
- [6] 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(S2):588-591.(TONG Liyuan, TU Qizhu, DU Guangyin, et al. Determination of confined compression modulus of soft clay using piezocone penetration tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2):588-591.(in Chinese))
- [7] 董淑海,郑华文.澳门近海软土孔压静力触探CPTU推算不排水强度 $S_u$ 方法[J].中国港湾建设,2018,38(7):43-47.(DONG Shuhai, ZHENG Huawen. Method for calculating undrained strength  $S_u$  by CPTU for soft soil in Macao Offshore[J].China Harbour Engineering, 2018, 38(7):43-47.(in Chinese))
- [8] 安彦勇,郭燕沫,李向凤.孔压静力触探确定软黏土地基强度方法分析[J].勘察科学技术,2009(3):8-12.

- (AN Yanyong, GUO Yanmo, LI Xiangfeng. Analysis of pore pressure static cone penetration test to determine soft clay strength [J]. Site Investigation Science and Technology, 2009 (3): 8 - 12. (in Chinese))
- [9] 刘鑫,王晨涛.基于孔压静力触探的大连湾海相软土固结系数研究[J].路基工程,2019(1):113-116.(LIU Xin, WANG Chentao. Study on consolidation coefficient of marine soft soil in Dalian Bay based on pore pressure static cone penetration test [J]. Subgrade Engineering, 2019 (1): 113 - 116. (in Chinese))
- [10] 童立元,涂启柱,刘松玉,等.基于孔压静力触探测试的改进分层总和法在软基沉降预测中的应用研究[J].岩土力学,2011,32(S2):687-690.(TONG Liyuan, TU Qizhu, LIU Songyu, et al. Settlement prediction of soft ground by modified layerwise summation method based on piezocone tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (S2): 687 - 690. (in Chinese))
- [11] 温青山.基于ANSYS的某水库土石坝段地基沉降及处理分析研究[J].水利科学与寒区工程,2020,3(3):37-41.(WEN Qingshan. Study on settlement and treatment of earth-rock dam section of a reservoir based on ANSYS [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2020, 3 (3): 37 - 41. (in Chinese))
- [12] 中国土木工程学会.孔压静力触探测试技术规程:T/CCES 1—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.(China Civil Engineering Society. Piezocone penetration test (CPTU) technical regulations: T/CCES 1—2017[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2017. (in Chinese))
- [13] 王晓飞.基于孔压静力触探技术的地基沉降计算[D].长沙:长沙理工大学,2021.(WANG Xiaofei. Calculation of foundation settlement based on pore pressure static cone penetration technology [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2021. (in Chinese))
- [14] 沈卓恒,阮世强.软土地层路基工后沉降预测及控制研究[J].交通科学与工程,2020,36(4):17-21.(SHEN Zhuoheng, RUAN Shiqiang. Study on prediction and control of post-construction settlement of subgrade in the soft soil layer [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 17-21. (in Chinese))
- [15] 张军辉,周剑坤,周平.软土地区高速公路路基沉降监测及预测分析[J].公路与汽运,2020,(3):64-68.(ZHANG Junhui, ZHOU Jiankun, ZHOU Ping. Monitoring and prediction analysis of subgrade settlement of expressway in soft soil area [J]. Highways & Automotive Applications, 2020 (3): 64-68. (in Chinese))
- [16] 湖南宏特试验检测有限公司.平益高速公路路基沉降观测报告[R].2020.(Hunan Hongte Limited Test Co., Ltd.. Observation report on subgrade settlement of Pingyi Expressway [R]. 2020. (in Chinese))
- (责任编辑:欧兆虎;校对:罗容 李脉;英文编辑:陈璐)