

DOI: 10.11779/CJGE2022S1041

# 大厚度自重湿陷性黄土场地桩基负摩阻力计算方法研究

高登辉<sup>1</sup>, 赵宽耀<sup>1</sup>, 金松丽<sup>2</sup>, 邢义川<sup>3</sup>, 楚文书<sup>1</sup>, 樊技飞<sup>4</sup>, 朱琼<sup>5</sup>

(1. 黄淮学院建筑工程学院, 河南 驻马店 463000; 2. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048;  
4. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 5. 中建三局集团有限公司(沪), 上海 200129)

**摘要:** 针对大厚度自重湿陷性黄土场地桩基负摩阻力的计算问题。首先, 根据现场浸水试验沿深度实测沉降量与 Boussinesq 的竖向位移解的相似性, 提出由地基总的自重湿陷量, 计算桩周任意深度土层沉降量的方法; 其次, 考虑土体剪应力-剪应变的非线性和桩-土相对位移沿径向的变化关系, 提出可以同时考虑土的非线性和极限抗剪强度的桩-土荷载传递函数; 根据桩身单元的静力平衡, 建立了桩身荷载传递计算模型, 可计算桩身轴力、桩侧摩阻力、中性点位置和桩顶沉降量。将计算的结果与现场桩基浸水试验实测结果进行对比, 表明了所提计算方法的有效性。研究结果可为湿陷性黄土场地桩基设计提供新方法, 也可为其他场地桩基承载力计算提供参考。

**关键词:** 湿陷性黄土; 负摩阻力; 剪切位移法; 桩-土相互作用

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S1-0231-05

作者简介: 高登辉(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土与特殊土力学及工程的教学和科研工作。E-mail: 1403970876@qq.com。

## Method for calculating negative skin friction of pile foundation in large-thickness self-weight collapsible loess sites

GAO Deng-hui<sup>1</sup>, ZHAO Kuan-yao<sup>1</sup>, JIN Song-li<sup>2</sup>, XING Yi-chuan<sup>3</sup>, CHU Wen-shu<sup>1</sup>, FAN Ji-fei<sup>4</sup>, ZHU Qiong<sup>5</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China; 2. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 4. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 5. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., (Shanghai), Shanghai 200129, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of calculating the negative friction resistance of pile foundations in large-thickness self-weight collapsible loess sites. First, according to the similarity between the stratified settlement and the vertical displacement solution of Boussinesq. A method is proposed to calculate the soil settlement at any depth around the pile from the total self-weight collapse of the foundation. Secondly, the nonlinearity of the soil and the settlement law of the soil along the radial direction of the pile are considered, and a pile-soil load transfer function that can consider both the nonlinearity and the ultimate shear strength of the soil is proposed, which can calculate the negative skin friction, position of neutral point and settlement of pile top. The calculated results are compared with the measured ones of the field immersion tests on pile foundation, which shows the effectiveness of the proposed method. The research results can provide a new method for the design of pile foundations in collapsible loess sites and also references for the calculation of the bearing capacity of pile foundations in other sites.

**Key words:** collapsible loess; negative skin friction; shear displacement method; pile-soil interaction

## 0 引言

在中国西北地区广泛分布着自重湿陷性黄土, 而且很多重点工程建设项目位于自重湿陷性土层超过 15 m 的大厚度自重湿陷性黄土场地。针对此类场地上 的桩基设计, 既要充分考虑土层湿陷产生的桩基负摩阻力, 又要结合桩侧摩阻力沿大厚度湿陷性土层分布的实际规律, 提出经济合理的桩基负摩阻力计算方法。

目前, 针对黄土场地上 的桩基负摩阻力研究, 仍以现场单桩载荷浸水试验为主<sup>[1-2]</sup>, 黄土场地桩基负摩阻力计算方法的研究较为匮乏。实现桩侧负摩阻力的合理计算, 需要确定桩-土相对位移(主要是桩周土体

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102310938, 222102320451); 河南省高等学校重点科研项目(22B560010); 甘肃省自然科学基金项目(22JR5RA255)

收稿日期: 2022-09-28

的分层沉降量)和桩-土间的荷载传递函数。黄土的湿陷变形主要是利用湿陷性系数,采用分层总和法进行计算,《湿陷性黄土地区建筑标准》<sup>[3]</sup>(以后,简称《黄土标准》)和陈正汉等<sup>[4]</sup>分别给出侧限条件和三轴应力状态下湿陷性系数的确定方法,但由于土层中水气运移规律的复杂性<sup>[5]</sup>和未湿陷土层所产生的约束作用<sup>[6]</sup>,作用在土层上的压力并非是上覆土体饱和自重的叠加。对于大厚度自重湿陷性黄土场地,浸水湿陷过程中土体湿度和应力状态的变化更为复杂,虽然基于室内试验构建了较多原状黄土增湿变形本构模型,但在推广应用过程中仍存在一定的困难。

桩-土间的荷载传递函数,通常可以通过土-结构材料的接触面剪切试验来确定,但现有文献关于黄土-结构材料的接触面剪切试验较少,且研究的土体均为重塑黄土<sup>[7]</sup>。因此,利用接触面剪切试验确定桩-黄土间的荷载传递函数,试验数据积累尚显不足。Cooke 等<sup>[8]</sup>认为桩基荷载是以桩周土体产生剪切位移的形式传递到土层当中,并基于弹性理论提出了荷载传递函数的剪切位移法。考虑到土体的非线性,Wong 等<sup>[9]</sup>提出采用双曲线模型描述桩-土间的非线性荷载传递规律。这些成果可为桩-黄土间荷载传递函数的研究提供参考。

根据黄土场地沿深度土层自重湿陷量的变化规律,基于弹性力学解,提出桩周任意深度土层沉降量的计算方法;考虑土体剪应力-剪应变的非线性和桩侧摩阻力在较大相对位移下趋于极值,基于剪切位移法,提出可以同时兼顾土体非线性和极限抗剪强度的荷载传递函数表达式;基于荷载传递法,建立桩身荷载传递计算模型;通过将计算结果与现场桩基浸水实测值对比,验证该方法的有效性。

## 1 桩周任意深度土层沉降量计算

### 1.1 地基总的自重湿陷量计算

《黄土标准》给出了相对简易的自重湿陷量计算方法,通过乘以地区修正系数能够获取与实测相符的地表总的自重湿陷量。本文首先采用《黄土标准》的方法计算出地基总的自重湿陷量  $s_0$ :

$$s_0 = \beta_0 \sum_{i=1}^n \delta_{zsi} h_i \quad , \quad (1)$$

式中,  $\delta_{zsi}$  为第  $i$  层土的自重湿陷系数,  $h_i$  为第  $i$  层土的厚度,  $\beta_0$  为不同地区土质修正系数。

### 1.2 基于弹性理论分层沉降量的计算方法

从现有文献<sup>[2]</sup>实测分层沉降量的变化曲线可以看出,其变化规律和 Boussinesq 的竖向位移解相似。因此,采用集中力  $F$  作用在弹性半空间体上 Boussinesq 解的竖向位移表达式,求解任意深度处的沉降量。对于自重湿陷性黄土,当饱和自重压力小于湿陷起始压力时,可认为不产生湿陷变形<sup>[6]</sup>。假定自

重湿陷性系数  $\delta_{zs}$  等于 0.015 时,为起始自重湿陷深度  $h_0$ ,在此深度以上范围的自重湿陷量为 0,其沉降量均为地基总的自重湿陷量  $s_0$ ,集中力  $F$  作用的弹性半空间体从此处开始算起。自重湿陷计算的下限深度  $h_e$  按《黄土标准》确定,该处及其以下深度的沉降量均为 0。

因此,集中力  $F$  作用下,任意点的 Boussinesq 竖向位移表达式可改写为

$$s(z)' = \frac{F(1+\nu)}{2\pi E} \left[ \frac{(z-h_0)^2}{\left( \sqrt{(z-h_0)^2 + R^2} \right)^3} + \frac{2(1-\nu)}{\sqrt{(z-h_0)^2 + R^2}} \right] \quad , \quad (2)$$

式中,  $\nu$  为土的泊松比,  $E$  为土体弹性模量,两参数将在后续推导中约去。为避免  $s(z)'$  值趋于无穷大,式中计算点与集中力作用点的水平距离  $R$ ,本文取桩的直径值为 0.8 m。

已知  $z = h_0$  处的竖向位移为  $s_0$ ,即可反推出集中力  $F$  为

$$F = \frac{s_0 \pi E R}{(1-\nu)(1+\nu)} \quad . \quad (3)$$

把式(3)代入式(2),可得由地基总沉降量计算任意深度竖向位移的表达式:

$$s(z)' = \frac{s_0 R}{2(1-\nu)} \left[ \frac{(z-h_0)^2}{\left( \sqrt{(z-h_0)^2 + R^2} \right)^3} + \frac{2(1-\nu)}{\sqrt{(z-h_0)^2 + R^2}} \right] \quad . \quad (4)$$

由于假定计算的下限深度  $h_e$  处沉降量为 0。因此,  $z \in [h_0, h_e]$  范围内任意深度处的沉降量可修正为

$$s(z)' = s(z)' - s(h_e)' \quad . \quad (5)$$

综上,可知  $z \leq h_0$  范围内土层沉降量为  $s_0$ ,按式(1)来计算;  $z > h_e$  范围内土层沉降量为 0,在两者之间的沉降量按式(5)计算。至此,可计算出桩周任意深度处土层沉降量。

## 2 桩-黄土荷载传递函数

### 2.1 剪切位移法原理及存在问题

Cooke 等<sup>[8]</sup>提出的剪切位移法,假定荷载以桩侧一定范围内土体剪切变形的形式传递到桩周土体中。

利用微单元竖向受力平衡,建立微分方程求解,得出桩侧摩阻力和桩周土体剪应力的关系式:

$$\tau = \frac{\tau_0 r_0}{r} \quad . \quad (6)$$

式中  $\tau_0$ ,  $r_0$  分别为桩侧摩阻力和桩的半径;  $\tau$ ,  $r$  分别为桩周土中的剪应力和离桩轴心的距离。

由弹性理论的几何方程,略去径向方向的变形,给出剪应变的表达式:

$$\gamma = \frac{\partial \Delta s}{\partial r} \quad , \quad (7)$$

式中,  $\Delta s$  为离桩轴  $r$  处, 桩土的竖向相对位移。

剪应力与剪应变的物理本构方程为

$$\tau = \frac{\gamma}{G_s} \quad . \quad (8)$$

联立式 (6) ~ (8), 即可得出由桩土相对位移求取的桩侧摩阻力表达式:

$$\tau_0 = \frac{G_s \Delta s}{r_0 \ln \frac{r_m}{r_0}} \quad , \quad (9)$$

式中,  $G_s$  为土的剪切模量,  $r_m$  为桩侧摩阻力对桩周土的最大影响半径, 本文取  $r_m = 10r_0$ 。

由于剪切位移法是在弹性理论的基础上推得的, 从式 (9) 中可以看出, 桩-土间的荷载传递呈线性函数。桩土相对位移越大, 桩侧摩阻力越大, 这显然不符合实际桩-土间荷载传递的非线性关系。究其原因是理论的推导中, 没有充分考虑桩周土体的非线性, 不同剪应变下, 土的剪切模量不同, 并非是一个定值。

## 2.2 基于修正剪切位移法的荷载传递函数

对于黄土的剪应力 - 剪应变关系曲线, 最常见的形式为双曲线, 如图 1 (a) 所示, 其表达式为

$$\tau = \frac{\gamma}{a + b\gamma} \quad . \quad (10)$$

物理本构方程式 (8), 表达式可转变为

$$\frac{\tau}{\gamma} = G_s = \frac{1}{a + b\gamma} \quad , \quad (11)$$

式中,  $a, b$  为试验常数, 其物理意义分别为起始剪切模量  $G_{s0}$  的倒数和极限剪切应力  $\tau_u$  的倒数, 在  $\gamma/\tau - \gamma$  坐标下, 可线性拟合其对应关系如图 1 (b)。

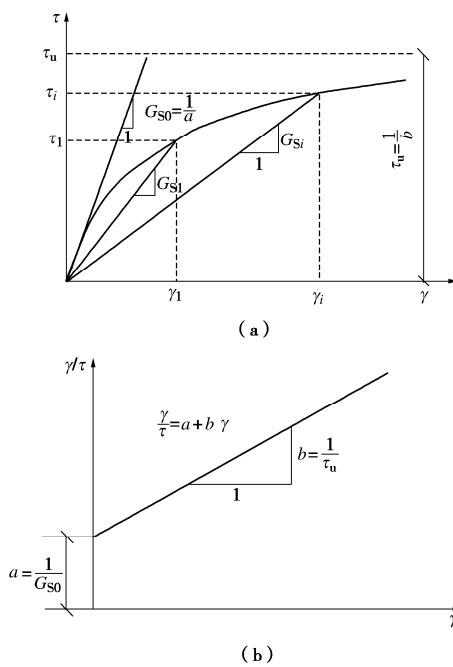


图 1 土的剪应力 - 剪应变对应关系

Fig. 1 Shear stress-shear strain correspondence of soil

土体参数  $a, b$  随深度变化, 参数  $a$  可根据文献 [10] 中的计算方法:

$$G_{s0} = \frac{1}{a} = K p_{\text{atm}} \left( \frac{\sigma_3}{p_{\text{atm}}} \right)^n \quad , \quad (12)$$

式中,  $K, n$  分别为  $K-G$  模型参数,  $p_{\text{atm}}$  为标准大气压; 根据土体剪切的方向, 围压可取土中的自重应力, 即  $\sigma_3 = \gamma_{\text{sat}} z$ 。

参数  $b$  的倒数为土体的极限抗剪强度:

$$\tau_u = \frac{1}{b} = c + K_0 \sigma_z \tan \varphi \quad , \quad (13)$$

式中  $c, \varphi$  分别为饱和土体的黏聚力和摩擦角, 对于各向异性明显的土质, 应取剪切方位与水平方向垂直时的土体强度参数;  $\sigma_z$  为土体的自重应力; 静止土压力系数取  $K_0 = 1 - \sin \varphi$ 。

文献 [11] 的研究表明, 任意深度  $z$  处, 桩-土间的相对竖向位移  $\Delta s(z)$  与距桩轴心距离  $r$  的对应关系呈非线性关系, 如图 2 所示。

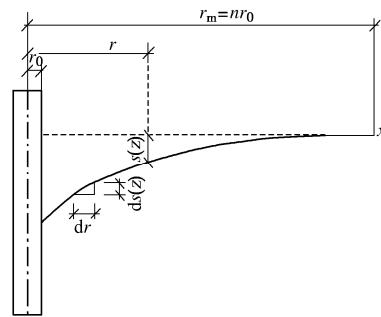


图 2 桩-土相对位移

Fig. 2 Relative displacements of pile-soil

本文设其关系表达式为

$$\Delta s(z) = \frac{\alpha}{r} + \beta \quad , \quad (14)$$

式中,  $r$  的值域为  $[r_0, r_m]$ ,  $\Delta s(z)$  的值域为  $[0, \Delta S(z)]$ ,  $\Delta s(z)$  为深度  $z$  处最大桩-土的相对位移,  $\alpha, \beta$  为曲线参数。

已知边界条件为

$$0 = \frac{\alpha}{r_m} + \beta \quad , \quad (15)$$

$$\Delta S(z) = \frac{\alpha}{r_0} + \beta \quad . \quad (16)$$

将式 (15), (16) 代入到式 (14) 中, 可求得参数:

$$\alpha = S(z) \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_m} \right) \quad , \quad (17)$$

$$\beta = S(z) \left( 1 - \frac{r_m}{r_0} \right) \quad . \quad (18)$$

将式 (17), (18), 代入式 (14), 求导可得出离桩轴心距  $r$  处, 桩周土体剪应变的表达式:

$$\frac{\partial \Delta s(z)}{\partial r} = -\frac{\alpha}{r^2} = -\frac{\Delta S(z)}{r^2 \left( \frac{1}{r_m} - \frac{1}{r_0} \right)} = -\gamma \quad . \quad (19)$$

将式(19)代入式(11), 可得出桩-土产生相对位移时, 影响距离  $r$  处, 桩周土体剪切模量  $G_s$  的表达式:

$$G_s = \frac{1}{a + \frac{b\alpha}{r^2}} \quad (20)$$

将式(20)代入物理本构方程式(8)得

$$\gamma = \frac{\tau}{G_s} = \frac{\tau_0 r_0}{r} \left( a + \frac{b\alpha}{r^2} \right) \quad (21)$$

将式(21)代入式(7), 进行积分可得

$$\tau_0 = \frac{\Delta S(z)}{r_0 \left[ a \ln \left( \frac{r_m}{r_0} \right) + \frac{b \Delta S(z)}{2} \left( \frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_m} \right) \right]} \quad (22)$$

至此, 便得出考虑桩周土体非线性变形的荷载传递函数。相较式(9)当桩土相对位移较大时, 桩侧负摩阻力趋于极值, 而不是一直增大, 这显然更符合实际情况。

### 3 桩身荷载传递计算方法

沿用 Seed 等<sup>[12]</sup>提出的桩身荷载传递假定。本文利用桩身单元的静力平衡, 建立桩身荷载传递的计算方法。

#### 3.1 桩身变形及沉降量计算

首先, 将桩身划分  $n$  段。地表下任意深度  $z$  处的桩身沉降量  $s_p(z)$  为: 该点以下各分段桩身压缩变形  $ds_i$  的累计值和桩端沉降量  $S_b$  之和, 任意桩身沉降量即为

$$s_p(z_i) = S_b + ds_n + ds_{n-1} + \cdots + ds_{i+1} + ds_i \quad (23)$$

桩身可视为弹性材料, 各分段桩身的受力其压缩变形的表达式为

$$ds_i = \frac{P_i + P_{i+1}}{2 A_p E_p} dz \quad , \quad (24)$$

式中,  $A_p$  为桩身截面面积,  $E_p$  为桩身材料的弹性模量。

桩端沉降量可按 Randolph 等<sup>[11]</sup>提出的计算公式:

$$S_b = \frac{P_n(1-\nu_s)}{4r_0 G_s} \quad , \quad (25)$$

式中,  $P_n$  为桩端轴力,  $\nu_s$  和  $G_s$  分别为持力层土体的泊松比和剪切模量。

其中持力层土体剪切模量  $G_s$ , 可根据其与压缩模量  $E_s$  的关系推得

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)} \left( 1 - \frac{2\mu_s^2}{1-\nu_s} \right) \quad . \quad (26)$$

#### 3.2 任意位置桩身轴力计算

对每一小段桩身的受力分析, 可知:

$$P_i = P_{i+1} + \tau_0(z_i) \times 2\pi r_0 \times dz \quad . \quad (27)$$

$\tau_0(z_i)$  为该小段桩侧摩阻力, 可利用式(22)进行计算。其中, 桩-土相对位移  $\Delta S(z_i)$ , 可通过桩身沉降量式(23)和桩周土体沉降量式(5)两式求出桩

土相对位移的计算公式:

$$\Delta S(z_i) = s_p(z_i) - s(z_i) \quad . \quad (28)$$

将式(25)和式(27)联立即可得出任意位置处桩身轴力的表达式:

$$P_{i-1} = \frac{4r_0 G_s S_b}{1 - \mu_s} + 2\pi r_0 \times \sum_{i=1}^n \tau_0(z_i) \times dz \quad . \quad (29)$$

当  $i=1$  时, 即可求出桩顶作用的载荷  $P_0$ 。利用式(29), 通过调整  $S_b$  的数值进行迭代, 当求得的  $P_0$  和实际作用在桩顶的载荷相等时为止。

#### 3.3 桩侧摩阻力及中性点位置的计算

利用 3.2 节迭代调整结束时的  $S_b$  值, 在式(28)中  $\Delta S(z_i)=0$  时, 对应的深度  $z$  即为中性点的位置。利用式(28)求得桩土相对位移, 通过式(22)给出的荷载传递函数, 即求得任意深度处的桩侧摩阻力。

至此, 通过该计算方法可以计算出桩侧摩阻力、桩身轴力、桩顶沉降量和中性点的位置。

### 4 工程实例验证

为验证该计算方法的合理性, 选用文献[2]在自重湿陷性黄土地开展的现场桩基浸水实测资料进行验证分析。选用未加载编号为 S5 的试验桩进行分析, 该桩长 60 m, 桩径 0.8 m, 桩身混凝土强度等级为 C35。桩端持力层为砂质黄土, 孔隙比  $e_0$  为 0.83; 压缩系数  $a_{1-2}$  为 0.14, 其他计算参数文献中未知。通过文献[2]和[10], 确定该区域土体的计算参数, 列于表 1。

表 1 土体计算参数

Table 1 Soil calculation parameters

饱和重度 $\rho_{\text{sat}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c / \text{kPa}$	摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	参数 $k$	参数 $n$
18.9	0.4	25.4	23.5	19.3	0.733

通过计算得出中性点的深度为 24.5 m, 实测的深度为 22 m, 比实测值偏大, 相对误差为 11.4%。计算得出桩顶沉降量为 7.5 mm, 实测沉降量为 8.2 mm, 比实测值偏小, 相对误差为 8.5%。计算的桩侧摩阻力和实测摩阻力对比, 如图 3 所示。

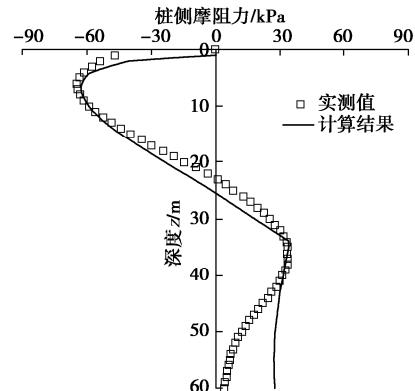


图 3 桩侧摩阻力的计算值与实测值的比较

Fig. 3 Comparison between calculated and measured results

从图 3 可以看出, 本文计算的桩侧负摩阻力与实测值较为接近; 计算的桩侧正摩阻力比实测值偏大, 主要原因在于假定计算下限深度  $h_0$  以下土层的沉降量为零, 导致计算的桩土相对位移比实际偏大, 另外桩周土体的剪切模量和极限抗剪强度随深度增加, 较小的相对位移偏差即可导致计算值和实测值存在较大的偏离。综上, 本文提出的计算方法, 在桩侧负摩阻力和中性点位置计算方面具有一定的合理性。

## 5 结 论

本文充分考虑桩-土相互作用的非线性, 从桩-土相对位移的计算和荷载传递函数的构建出发, 通过理论分析给出桩身荷载传递的计算思路, 并将计算结果与现场实测值进行对比, 得出 4 点结论。

(1) 根据自重湿陷性黄土沿深度分层沉降规律, 提出从起始自重湿陷土层至计算下限深度范围内, 可基于 Boussinesq 竖向位移解, 利用地基总的沉降量, 进行桩周任意深度土层沉降量的计算方法。

(2) 通过假定桩-土相对位移沿径向的变化函数和土体剪应力-剪应变的双曲线关系, 在剪切位移法的基础上, 提出了考虑土的非线性变形和极限抗剪强度的荷载传递函数。

(3) 根据荷载传递的思路, 建立了桩身荷载传递的计算方法, 可以计算出桩侧摩阻力和桩身轴力、桩顶沉降量和中性点位置。

(4) 通过与现场桩基浸水试验的实测值进行对比, 本文计算的结果与实测值接近, 比较符合实际的变化规律。

## 参考文献:

- [1] 武小鹏. 基于试坑浸水试验的大厚度黄土湿陷及渗透特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. (WU Xiao-peng. Study on the Characteristics of Collapse and Permeability of Large Thickness Loess Ground Based on Water Immersion Test[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese))
- [2] 刘争宏. 浸水条件下湿陷性黄土场地桩基特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008. (LIU Zheng-hong. Study on Characteristics of Piles in Collapsible Loess Sites Under Water Immersion Condition[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [3] 湿陷性黄土地区建筑标准: GB50025—2018[S]. 北京: 北京中国建筑工业出版社, 2018. (Construction Standards for Collapsible Loess Areas: GB50025—2018[S]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 2018. (in Chinese))
- [4] 陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2): 1-12. (CHEN Zheng-han, LIU Zu-dian. Mechanism of collapsible deformation of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(2): 1-12. (in Chinese))
- [5] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 兰州地区大厚度自重湿陷性黄土场地浸水试验综合观测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 65-74. (YAO Zhi-hua, HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, et al. Comprehensive soaking tests on self-weight collapse loess with heavy section in Lanzhou region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65-74. (in Chinese))
- [6] 钱鸿缙. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 90-101. (QIAN Hong-jin. Collapsible Loess Foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985: 90-101. (in Chinese))
- [7] 高登辉, 邢义川, 郭敏霞, 等. 非饱和重塑黄土-混凝土接触面修正双曲线模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(1): 156-164. (GAO Deng-hui, XING Yi-chuan, GUO Min-xia, et al. Modified hyperbola model of interface between unsaturated remolded loess and concrete[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(1): 156-164. (in Chinese))
- [8] COOKE R W, PRICE G, TARR K. Jacked piles in London Clay: a study of load transfer and settlement under working conditions[J]. Géotechnique, 1979, 29(2): 113-147.
- [9] WONG K S, TEH C I. Negative skin friction on piles in layered soil deposits[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 121(6): 457-465.
- [10] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997: 147-152. (LIU Zu-dian. Loess Mechanics and Engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1997: 147-152. (in Chinese))
- [11] ALONSO E E, JOSA A, LEDESMA A. Negative skin friction on piles: a simplified analysis and prediction procedure[J]. Géotechnique, 1984, 34(3): 341-357.
- [12] SEED H B, REESE L C. The action of soft clay along friction piles[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1957, 122(1): 731-754.

(编校: 黄贤沙)