

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2017.02.013

# 结构性黄土地基中挤密桩扩孔效应研究与评价

王治军<sup>1</sup>, 宋焱勋<sup>2</sup>, 骆建文<sup>1</sup>, 谈永光<sup>3</sup>, 孙萍<sup>4</sup>, 李荣建<sup>3</sup>

(1. 西安长庆科技工程有限责任公司, 陕西 西安 710021; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;  
3. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 4. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 挤密桩扩孔效应对黄土的结构性弱化产生重要影响, 并可能影响和改变桩-土之间的相互作用。针对结构性黄土地区的挤密桩, 本文首先基于小孔扩张理论分析了单桩扩孔条件下桩周土体的广义剪应变、广义剪应力的关系。然后, 本文通过三轴试验得到了不同应力水平条件下的广义剪应力和应变关系。最后, 将黄土结构性参数引入到单桩扩孔的分析中, 研究了扩孔效应导致的黄土结构性参数的衰减变化规律。研究表明: 在单桩扩孔效应作用下, 距离桩轴越近, 黄土的结构性参数衰减越剧烈, 桩周黄土的结构性参数衰减到 1.0; 距离桩轴越远, 黄土的结构性参数衰减越小, 且在无限远处黄土的结构性参数接近原状黄土的初始结构性参数。

**关键词:** 单桩; 扩孔效应; 结构性黄土; 结构性参数; 衰减

**中图分类号:** TU 443

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2017)02-0199-05

## Effect of compaction pile's cavity expansion on structural loess subgrade

WANG Zhijun<sup>1</sup>, SONG Yanxun<sup>2</sup>, LUO Jianwen<sup>1</sup>, TAN Yongguang<sup>3</sup>, SUN Ping<sup>4</sup>, LI Rongjian<sup>3</sup>

(1. Company limited of Chang-qing Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The cavity expansion of compaction pile should be of an important impact on the structural weakening of loess, and may affect the interaction between pile and soil. Firstly, aimed at the compaction pile in the area of structural loess, the relationship between generalized shear strain and shear stress of soil around the pile under the condition of single pile cavity expansion is analyzed based on the theory of cavity expansion, with the stress and strain of structural loess under different stress levels obtained by the triaxial tests. The structural parameter of loess is introduced into the analyses of a single pile's cavity expansion, with the attenuation change of structural parameter of loess caused by cavity expansion effect studied. The research results show that the attenuation of structural parameter of the loess is more obvious in the cavity expansion when loess is closer to pile shaft and the structural parameter is equal to 1.0 when loess is adjacent to pile shaft; when the attenuation of structural parameter of the loess is smaller and when it was further from pile shaft, the structural parameter at infinity is close to the initial structural parameters of intact loess.

**Key words:** single pile; cavity expansion; structural loess; structural parameter; attenuation

黄土地区桩基工程在建筑工程、高速公路和铁路应用中十分广泛, 其型式主要为挤密桩复合地基

和预制桩。而黄土的结构性直接影响着黄土力学性质以及桩-土之间的相互关系。因此, 由于扩孔效应

**收稿日期:** 2016-07-09

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41472296, 11072193); 西安长庆科技工程有限责任公司资助项目(CTEC(2014)Z-KY-013); 陕西省黄土力学与工程重点实验室资助项目(14JS064)

**作者简介:** 王治军, 男, 高级工程师, 研究方向为工程地质及岩土工程勘察与研究。E-mail: 1879878040@qq.com

**通讯作者:** 李荣建, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为黄土力学、岩土工程抗震与边坡工程。E-mail: lirongjian@xaut.edu.cn

导致黄土地基中黄土的结构性衰减规律是一个亟待解决的工程问题。

针对黄土结构性的研究,比较有代表性的成果有应变结构性参数<sup>[1]</sup>,原状黄土结构性定量化参数<sup>[2]</sup>、初始结构性参数  $m_{is}$ <sup>[3]</sup> 以及应力比结构性参数  $m_\eta$ <sup>[4]</sup>。基于应力比结构性参数,李荣建<sup>[5]</sup>等提出了初始结构性参数和加载结构性参数,并将其引入到结构性黄土边坡的稳定性分析中,研究了结构性参数分布与边坡失稳之间的规律。然而,至今还没有开展打桩扩孔效应对黄土结构性影响的研究。因此,有必要将黄土结构性参数引入到预制桩沉桩过程并对黄土地基进行合理地评价。

在桩基础中预制桩打桩的研究方面,小孔扩张理论作为一种理论分析方法起着重要的作用<sup>[6]</sup>。Ladanyi<sup>[7]</sup>研究了饱和粘土地基中小孔扩张的理论解析解。Collins 和 Yu<sup>[8]</sup>研究了地基中土体达到临界状态时小孔扩张的解析解。Davis<sup>[9]</sup>等研究了速率效应的小孔扩张的问题。周月健<sup>[10]</sup>研究了土体内小孔扩张及挤土桩沉桩机理。周炳勤研究了小孔扩张理论及其工程应用<sup>[11]</sup>。这些研究推进了预制桩沉桩扩孔的相关研究,但以上研究尚未涉及沉桩过程中结构性黄土地基因打桩而受到扰动及其影响效应评价。

本文主要对预制桩沉桩扩孔效应进行研究,将黄土结构性参数引入到单桩扩孔的分析中,开展研究扩孔效应导致黄土结构性参数的衰减变化规律。

### 1 单桩扩孔中土体的广义剪应力、应变

将桩基础沉桩的过程可以看成是在不排水条件下,在无限土体中,扩张成一个与桩径相同的圆柱型小孔的过程,如图 1 所示。

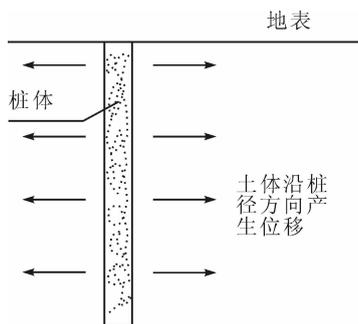


图 1 柱形小孔扩张剖面  
Fig. 1 Section of the cylindrical hole after cavity expansion

为研究此类沉桩问题,需做出如下假定:

- 1) 小孔扩张前,土体具有各向同性性质;
- 2) 土是均匀的、各向同性的理想弹塑性体;

3) 土体破坏满足摩尔-库伦强度准则。

所以研究在无限土体中扩张出一个桩径为  $a$  的小孔时,在小孔的周围必然会形成一个应力影响区,如图 2 所示。图中符号:  $R$  为应力影响范围,  $a$  为小孔的扩张半径(即桩径)。

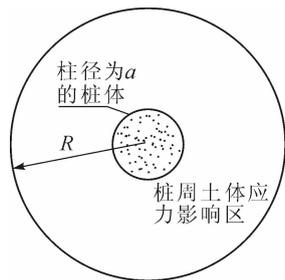


图 2 柱形小孔扩张的平面图  
Fig. 2 Cylindrical hole after cavity expansion

由于无限长小孔扩张是轴对称课题,所以竖向、切向和径向应力都是主应力,现在距桩轴距离  $r$  的位置,取一个单元体进行分析,如图 3 所示。图中  $\sigma_z$  为土单元的竖向应力,  $\sigma_r$  为土单元的径向应力,  $\sigma_\theta$  为土单元的切向应力,  $dz$  为土单元的高度,  $r$  为土单元距桩轴的距离。

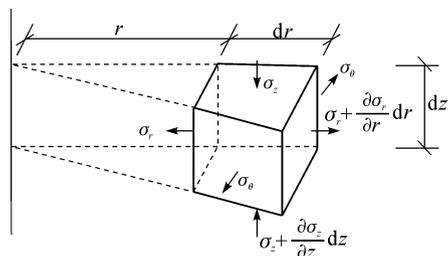


图 3 轴对称条件下土单元的应力状态  
Fig. 3 Stress state of soil under axisymmetric condition

在小孔扩张这一轴对称条件下,存在广义剪应力与广义剪应变的如下关系:

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\epsilon_s = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_r - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_\theta)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_z)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中:  $q$  为广义剪应力,  $\epsilon_s$  为广义剪应变,  $\epsilon_z$  为竖向应变,  $\epsilon_r$  为径向应变,  $\epsilon_\theta$  为切向应变。

同时,假定不排水三轴试验广义剪应力-广义剪应变可由下列方程近似表示:

$$q = \frac{\epsilon_s}{D + \epsilon_s} q_{ult} \quad (3)$$

其中,  $D$  为曲线拟合参数,  $q_{ult}$  为极限剪应力。

基于以上条件和假设,Collions 和 Yu<sup>[7]</sup>推导了从零半径开始单桩扩孔的问题,同时认为广义剪应力和广义剪应变都为  $a/r$  的函数,得到了广义剪应

变可以表示为:

$$\epsilon_s = -\ln\left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2\right] \quad (4)$$

将上式(4)代入公式(3),可以来确定单桩扩孔后桩周土体的广义剪应力场分布:

$$q = \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2\right]}{D - \ln\left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2\right]} q_{ult} \quad (5)$$

由此单桩扩孔中桩周土体的广义剪应力、剪应变为引入黄土结构性参数奠定了理论基础。

## 2 单桩扩孔中黄土结构性参数的引入

为了分析单桩扩孔中黄土结构性的变化规律,针对陕北地区某试桩工程,场地为  $Q_3$  黄土地层,本研究通过常规三轴试验得到原状黄土的广义剪应力  $q$  与广义剪应变  $\epsilon_s$  关系曲线(图4),可以从曲线上确定的极限剪应力  $q_{ult}$ ,结合公式(3)进行拟合,从而得到不同围压条件下的曲线拟合参数  $D$ 。

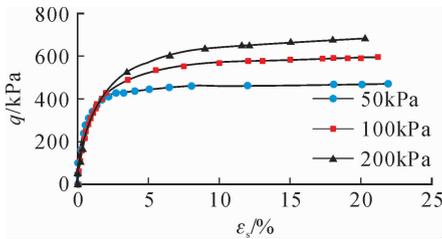


图4 在15%含水量下原状黄土广义剪应力与剪应变  
Fig. 4 Curve of generalized shear stress and strain of intact soil with water content of 15%

根据常规三轴试验结果,可以得出 50 kPa、100 kPa、200 kPa 围压下  $q_{ult}$  分别为 480 kPa、622 kPa、730 kPa,各围压条件下相应的拟合参数  $D$  分别为 0.383 6、0.922 5、1.342 5。不同围压条件下的广义剪应力公式(3)即可表达为:

在 50 kPa 围压下

$$q = 480 \times \frac{\epsilon_s}{0.383\ 6 + \epsilon_s} \quad (6)$$

在 100 kPa 围压下

$$q = 622 \times \frac{\epsilon_s}{0.922\ 5 + \epsilon_s} \quad (7)$$

在 200 kPa 围压下

$$q = 730 \times \frac{\epsilon_s}{1.342\ 5 + \epsilon_s} \quad (8)$$

目前,针对已经提出的结构性参数有应力比结构性参数  $m_\eta$ ,并分为指数形式的应力比结构性参数和对数形式的应力比结构性参数<sup>[4]</sup>。但是将这两种结构性参数描述方法作为客观规律应用于有限元分

析时会给计算带来许多困难。因此,李荣建等将结构性参数的描述方法进行了改进<sup>[5]</sup>,得到初始结构性参数的公式(9)和加载扰动结构性参数的公式(10),其中  $Q_3$  黄土试验拟合参数  $H$  为 2.0:

$$m_{\eta 0} = 12.525 - 0.334\ 67\omega - 0.013\ 37\sigma_2 \quad (9)$$

$$m_\eta = \frac{m_{\eta 0} + H\epsilon_s}{H\epsilon_s + 1.0} \quad (10)$$

式中: $m_\eta$  为加载过程结构性参数, $m_{\eta 0}$  为加载初始结构性参数, $\omega$  为初始含水率, $\sigma_2$  为初始围压, $\epsilon_s$  为广义剪应变。

为了研究桩基础的扩孔效应对黄土的结构性弱化产生的影响,本研究将从零半径开始单桩扩孔的问题中广义剪应变表示式(公式(4))代入公式(10)中,同时将公式(9)亦代入公式(10)中,可以得到单桩扩孔后桩周黄土的结构性参数的计算公式为:

$$m_\eta = \frac{12.525 - 0.334\ 67\omega - 0.013\ 37\sigma_2 - 2 \times \ln\left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2\right]}{-2 \times \ln\left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2\right] + 1.0} \quad (11)$$

## 3 扩孔中结构性参数的衰减分析

### 3.1 黄土地基试桩工程概况

针对陕北地区某试桩工程,场地  $Q_3$  黄土层厚约 23 m 左右,工程试桩采用预应力管桩,试桩桩长为 18 m,管桩直径为 500 mm。本研究取土深度约 3.5~4.5 m,经过室内常规实验测定,该黄土的天然含水率为 15%,天然密度为 1.78 g/cm<sup>3</sup>,干密度为 1.54 g/cm<sup>3</sup>。

本研究选择埋深为 3.7 m(A 点)、7.3 m(B 点)及 14.7 m(C 点)的黄土体(见图5),以便分析剪应力场和结构性参数场的变化规律。

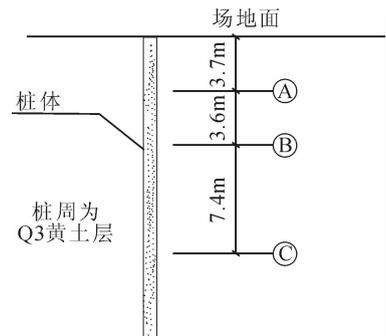


图5 单桩扩孔试桩剖面

Fig. 5 Section of the single pile cavity expansion

### 3.2 不同埋深下黄土的广义剪应力分布

本试桩工程的工程桩的桩径为 500 mm,即桩

半径为 250 mm, 根据小孔扩张后的广义剪应变公式(4), 广义剪应变可以表示为:

$$\epsilon_s = -\ln\left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2\right] = -\ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right] \quad (12)$$

另一方面, 该试验测得黄土静止土压力系数  $K_0 = 0.53$ , 在 3.7 m、7.3 m 和 14.7 m 埋深处自重应力分别为 65.3 kPa、130.7 kPa 以及 261.4 kPa, 据此可以得出相应深度的平均应力分别为 50 kPa、100 kPa 以及 200 kPa。结合本研究中试验确定的土体广义剪应力、广义剪应变拟合参数  $D$ , 将广义剪应变公式(12)代入公式(6)、(7)和(8), 可以确定不同深度处的土体广义剪应力为:

$$q_{50} = -480 \times \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right]}{0.3836 - \ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right]} \quad (13)$$

$$q_{100} = -622 \times \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right]}{0.9225 - \ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right]} \quad (14)$$

$$q_{200} = -730 \times \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right]}{1.3425 - \ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right]} \quad (15)$$

在桩周土体广义剪应力的表达式中, 广义剪应力  $q$  为距桩轴距离  $r$  的函数式, 为研究其变化规律, 可以取不同桩轴距离  $r$  值进行计算, 根据计算结果可以得到广义剪应力随桩轴距离  $r$  的分布曲线(见图 6)。

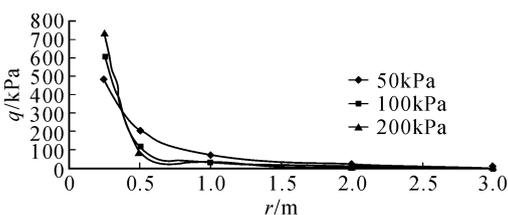


图 6 广义剪应力  $q$  沿桩径方向的衰减

Fig. 6 Attenuation of generalized shear stress in the direction of pile diameter

从图 6 可看出, 当埋深一定时, 由于单桩扩孔引起的广义剪应力  $q$  随着距桩轴距离  $r$  的增大而呈现衰减趋势, 最终趋近于零; 当  $r$  值一定时, 单桩扩孔引起的广义剪应力  $q$  随深度的增大也呈现衰减趋势。

### 3.3 不同埋深下黄土结构性参数变化规律

通过室内试验得到结构性黄土的天然含水量  $\omega$ 、不同埋深下初始应力  $\sigma_2$  代入公式(9)可以得出初始结构性参数  $m_{\gamma_0}$  的值, 在 3.7 m、7.3 m 以及 14.7 m 埋深处初始结构性参数  $m_{\gamma_0}$  分别为 11.806 3、

11.137 8 和 9.800 8。通过初始结构性参数分布可知, 地基顶部土体的初始结构性参数最大, 初始结构性参数从地基顶部向下逐渐减小, 主要原因是地基深部应力值大于地基上部的应力值。

通过公式(12)计算得出广义剪应变  $\epsilon_s$ , 然后将广义剪应变  $\epsilon_s$  代入公式(11), 可以得到不同埋深下的加载结构性参数  $m_{\gamma}$  的值:

当埋深为 3.7 m 时:

$$m_{\gamma} = \frac{11.8063 - 2 \times \ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right]}{-2 \times \ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right] + 1.0} \quad (16)$$

当埋深为 7.3 m 时:

$$m_{\gamma} = \frac{11.1378 - 2 \times \ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right]}{-2 \times \ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right] + 1.0} \quad (17)$$

当埋深为 14.7 m 时:

$$m_{\gamma} = \frac{9.8008 - 2 \times \ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right]}{-2 \times \ln\left[1 - \left(\frac{0.25}{r}\right)^2\right] + 1.0} \quad (18)$$

由式(16)、(17)、(18)可以看出, 结构性参数  $m_{\gamma}$  随着  $r$  的减小而呈现非线性的衰减, 衰减到最小值为 1.0。当  $r$  接近于无穷远处, 通过式(16)、(17)、(18)计算得出的结构性参数  $m_{\gamma}$ , 与式(9)计算得到的初始结构性参数完全一致。不同地基深度下黄土结构性参数  $m_{\gamma}$  与距桩轴距离  $r$  的关系(见图 7)。

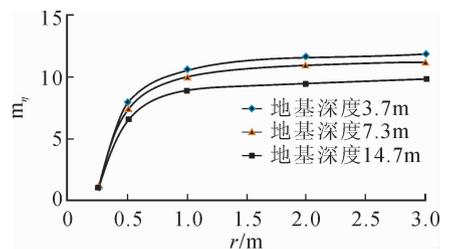


图 7 不同深度下结构性参数的衰减规律

Fig. 7 Attenuation of structural parameter in different depths

根据计算得到的在不同埋深时黄土体的结构性参数表达式中, 取  $r = 0.5$  m, 可以得到距桩轴相同距离条件下结构性参数  $m_{\gamma}$  随地基深度  $z$  的变化规律(见图 8)。由图 8 可知, 当  $r = 0.5$  m 时, 结构性参数  $m_{\gamma}$  随地基深度  $z$  大致呈非线性衰减。

通过对比分析表明: ①当地基深度一定时, 结构性参数  $m_{\gamma}$  随着  $r$  的减小而呈现非线性的衰减; 距离桩轴越近, 黄土的结构性参数衰减越剧烈; 距离桩轴越远, 黄土的结构性参数衰减越小; 无限远处的结构性参数接近原状黄土的初始结构性参数。②距桩轴

相同距离条件下,结构性参数  $m_\gamma$  随地基深度  $z$  大致呈非线性衰减。

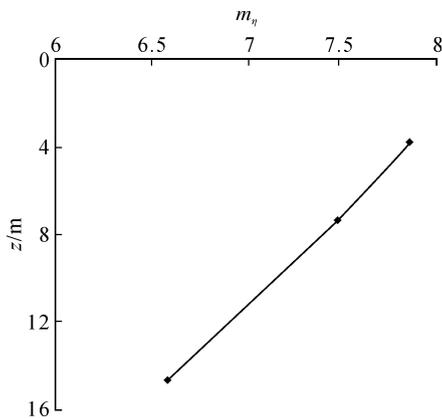


图8 土体结构性参数随深度的变化规律

Fig. 8 Attenuation of structural parameter with depth

总之,研究分析表明,单桩扩孔效应会导致地基黄土的结构性产生一定程度的弱化和衰减。

## 4 结论

1) 基于小孔扩张理论基本解引入了黄土的结构性参数,为单孔扩张后桩周黄土体结构性参数变化分析奠定了理论分析基础。

2) 通过单桩扩孔计算分析,当埋置深度一定时,桩周土体的广义剪应力随着距桩轴距离的增大而呈现衰减趋势;当距桩轴距离一定时,广义剪应力随埋置深度增加而大致呈现非线性衰减趋势。

3) 随着距桩轴距离的减小,地基黄土的结构性参数而呈现非线性的衰减:距离桩轴越近,黄土的结构性参数衰减越剧烈,衰减到最小值为 1.0;距离桩轴越远,黄土的结构性参数衰减越小。

4) 单桩扩孔效应作用下,距桩轴相同距离时,地基黄土的结构性参数随地基深度增大大致呈非线性衰减。

### 参考文献:

- [1] 谢定义, 齐吉林. 土的结构性及其定量化参数研究的新途径 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.  
XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 651-656.
- [2] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量化参数研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(7): 531-536.  
SHAO Shengjun, ZHOU Feifei, LONG Jiyong. Struc-

tural properties of loess and its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(7): 531-536.

- [3] 秦鹏成, 邵生俊, 安中秋, 等. 土初始状态结构性定量化的研究与验证 [J]. 西安理工大学学报, 2015, 31(4): 448-453.  
QIN Pengcheng, SHAO Shengjun, AN Zhongqiu, et al. The initial state of the soil structural quantitative research and verification [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(4): 448-453.
- [4] 邓国华, 邵生俊, 陈昌禄, 等. 一个可考虑球应力和剪应力共同作用的结构性参数 [J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2310-2314.  
DENG Guohua, SHAO Shengjun, CHEN Changlu, et al. A structural parameter reflecting coupling action between shear stress and spherical stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2310-2314.
- [5] 李荣建, 郑文, 刘军定, 等. 考虑初始结构性参数的结构性黄土边坡稳定性评价 [J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 143-150.  
LI Rongjian, ZHENG Wen, LIU Junding, et al. Evaluation of stability of structural loess slope considering initial structural parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 143-150.
- [6] 余海岁. 岩土介质小孔扩张理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 26-69.
- [7] LADANYI, B. Expansion of a cavity in a saturated clay medium [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(4): 127-161.
- [8] COLLINS, I F, YU H S. Undrained cavity expansions in critical state soils [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1996, 20(7): 489-516.
- [9] DAVIS, R O, SCOTT, R F, MULLENGER G. Rapid expansion of a cylindrical cavity in a rate-type soil [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(2): 125-140.
- [10] 周月健. 体内小孔扩张及挤土桩沉桩机理研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2001.  
ZHOU Yuejian. A Study on spheric cavity expansion and static piling in soils [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2001.
- [11] 周炳勤. 小孔扩张理论及其应用 [D]. 南京: 东南大学, 2005.  
ZHOU Bingqin. The theory of spherical cavity expansion and its application [D]. Nanjing: Southeast University, 2005.