

# 膨胀法处理湿陷性黄土地基的理论及试验

何永强<sup>1,2</sup>, 朱彦鹏<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 西北民族大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:**通过对湿陷性黄土地区地基处理技术的研究,提出了利用生石灰桩膨胀材料处理湿陷性黄土地基的方法。首先阐述了膨胀法处理地基的基本原理。其次利用圆柱形孔扩张理论推导了在处理大厚度湿陷性黄土地基时,生石灰桩膨胀材料使用量的计算方法。最后,将该方法用于工程实践,通过土工试验测试处理后地基土的物理力学性质指标。试验结果表明,用该方法处理后的湿陷性黄土地基,湿陷性完全被消除,各项物理力学指标得到显著改善,土的压缩性及压缩模量均得到提高,体现了该计算理论的正确性,进一步证明了膨胀法在大厚度湿陷性黄土地基处理中的可行性。

**关键词:**圆孔扩张理论;生石灰桩;大厚度;湿陷性黄土;地基处理

**中图分类号:**TU472.32 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)01-0044-05

## Theoretical Analysis and Testing of Ground Treatment Using an Expansive Method in Very Thick Collapsible Loess

HE Yong-qiang<sup>1,2</sup>, ZHU Yan-peng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Northwest University of Nationalities, Lanzhou 730030, P. R. China))

**Abstract:** Through technological research of foundation treatments in the collapsible loess areas, we recommend a method of treating foundations in collapsible loess with quicklime piles. We set forth the basic principle of this expansive method. When a very thick foundation in collapsible loess is treated, the computational formula for the volume of expanding material in a quicklime pile is deduced based on cavity expansion theory. This theory is applied to engineering practice. Physical and mechanical properties of the compacted soil are tested. The result shows that the collapsibility of a foundation in loess has been eliminated, its physico-mechanical indexes have been improved, and the soil compressibility and the modulus of compressibility also increase remarkably, demonstrating the correctness of the computation theory. The feasibility of the expansive method for very thick collapsible loess areas is further established.

**Key words:** cavity expansion theory; quicklime pile; large thickness; collapsible loess; ground treatment

我国的湿陷性黄土分布面积约为 48 万 km<sup>2</sup>, 占世界黄土分布总面积的 4.9%, 其中有很大一部分为大厚度湿陷性黄土。其厚度 10~40 m 不等, 湿陷性强, 且具有自重湿陷性, 给拟建物地基处理带来一定的难度。如何处理大厚度湿陷性黄土地基, 一

直是建筑行业技术人员关注的焦点之一<sup>[1]</sup>。近年来, 随着国家经济的发展和西部大开发战略的实施, 黄土地区的建设项目日益增多, 建筑规模越来越大, 建设用地日趋紧张, 许多大型建设工程项目不得不在大厚度的湿陷性黄土地地上, 因而地基处理的

收稿日期: 2008-07-12

基金项目: 教育部春晖计划资助项目(Z2004-1-62011); 甘肃省科技公关资助项目(ZS011-50-013-G); 甘肃省自然科学基金(Z5032-B25-002)

作者简介: 何永强(1972-), 男, 兰州理工大学博士研究生, 主要从事工程事故分析与处理研究, (E-mail) mdtmhyq@163.com.

深度和难度越来越大,而现有的地基处理方法有其各自的局限性<sup>[2]</sup>。因此,研究和开发行之有效的处理大厚度湿陷性黄土地基的新方法,成为当前工程界研究的热点。

通过对湿陷性黄土地区的地基处理技术进行研究,本文提出了利用生石灰桩膨胀材料处理地基的方法,利用圆柱形孔扩张理论推导了在处理大厚度湿陷性黄土地基时生石灰桩膨胀材料使用量的计算方法,并将该方法用于工程实践。通过土工试验技术,测试处理后地基土的物理力学性质指标,测试结果表明,采用该计算方法的生石灰桩膨胀法在大厚度湿陷性黄土地区处理地基是可行的。

## 1 膨胀法处理地基的原理分析

### 1.1 基本原理

生石灰桩膨胀法是利用生石灰吸收桩周土中的水分发生消化反应时,生石灰吸水后固结崩解,孔隙体积和颗粒的比表面积增大,表面附着物增多,固相颗粒体积也增大,在成桩过程中产生强大的膨胀力,挤压桩周土体,挤密桩间土,从而有效地消除大厚度黄土的湿陷性,提高土的压缩性和压缩模量。一般情况下,1 kg 生石灰水化时吸收的水分为 0.8~0.9 kg,其中 0.312 kg 被水化反应吸收,其他部分被蒸发。同时 1 kg 生石灰水化时放出 4 907 kJ 热量。这种热量可提高地基土的温度,使土产生一定的气化脱水现象。生石灰吸水使地基中含水量下降,孔隙比减小,桩间土抗剪强度提高<sup>[3-5]</sup>。

实际工程中,若采用 10% 的置换率进行地基处理,桩间土的平均失水量为 8%~9%;在桩体置换率为 9%、桩间距为 3d 的软基上实测的失水量约 5%。5%~9% 含水量的降低值,可使土的承载力得到 15%~20% 的增长。大量室内实验表明,在 50~100 kPa 的围压下,生石灰消化后桩体体积的胀发量为 1.2~1.5,相当于桩径胀发量 1.1~1.2 倍。随着桩体的吸水胀发,桩周边土层得以挤密压实。

### 1.2 生石灰桩周土体的应力分析

假设地基土体是各向均匀、各向同性的理性弹塑性材料,土体屈服满足 Mohr-Coulomb 强度准则,生石灰桩吸水膨胀前,土体具有二向等压的等效应力,随着生石灰桩吸水膨胀,产生膨胀力  $p$ ,圆形孔周围一定区域内的土体将由弹性状态进入塑性状态,塑性区随着  $p$  的增大而不断扩大,塑性区以外的土体仍保持弹性状态<sup>[6-12]</sup>,如图 1 所示。

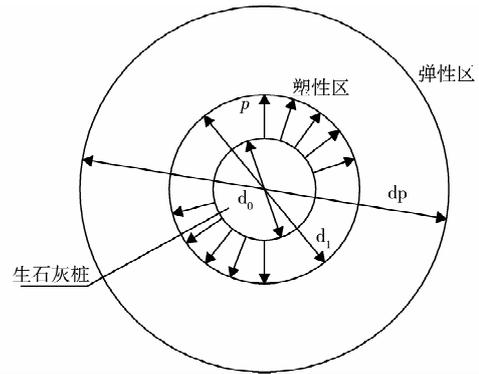


图 1 桩周土体变形状态

生石灰桩吸水膨胀过程中,假定是在半无限空间中,由桩的膨胀力  $p$  将一个孔径为  $d_0$  的圆柱形孔扩张到  $d_1$  的圆柱形孔。圆孔扩张是平面应变轴对称问题,扩张挤密后土体的应力是轴对称的,因此可以采用极坐标进行分析,如图 2 所示。

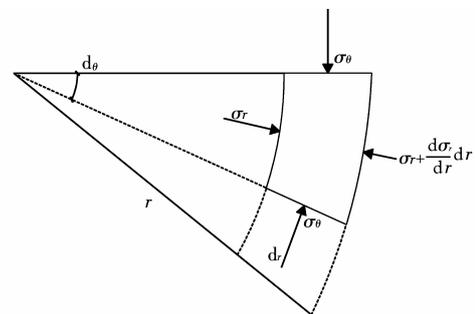


图 2 桩周土应力分析示意图

考虑单元力系的平衡,可得到平面应变轴对称问题的平衡微分方程<sup>[6-13]</sup>为:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = 0 \quad (1)$$

式中  $\sigma_r$  为径向应力,  $\sigma_\theta$  为环向应力,  $r$  为单元处的半径。

几何方程为

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{du_r}{dr} \\ \epsilon_\theta = \frac{u_r}{r} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\epsilon_r$  为径向应变,  $\epsilon_\theta$  为环向应变,  $u_r$  为径向位移。

弹性阶段的本构方程为

$$\begin{cases} \epsilon_r = [(\sigma_r - \mu\sigma_\theta)/(1 - \mu)](1 - \mu^2)/E \\ \epsilon_\theta = [(\sigma_\theta - \mu\sigma_r)/(1 - \mu)](1 - \mu^2)/E \end{cases} \quad (3)$$

式中  $E$  为弹性模量,  $\mu$  为泊松比。

屈服条件为 Mohr-Coulomb 条件

$$(\sigma_r - \sigma_\theta) = (\sigma_r + \sigma_\theta) \sin\varphi + 2C \cos\varphi \quad (4)$$

式中:  $C$  为黄土的粘聚力;  $\varphi$  为黄土的内摩擦角。

在生石灰桩膨胀扩张的过程中,根据弹性理论,可求得土体处于弹性阶段时的土体应力分布为

$$\begin{cases} \sigma_r = D_0^2/4r \\ \sigma_\theta = -D_0^2 p/4r = -\sigma_r \end{cases} \quad (5)$$

轴对称条件下径向位移为

$$u = (1 + \mu) r \sigma_r / E \quad (6)$$

对 Mohr-Coulomb 材料,由式(1)(4)解得在膨胀力  $p_u$ ,及相应的孔径  $d_u$  时的塑性区径向应力值为

$$\sigma_r = (p_u + C \operatorname{ctg} \varphi) (D_u/2r)^{2 \sin \varphi / (1 + \sin \varphi)} - C \operatorname{ctg} \varphi \quad (7)$$

## 2 生石灰桩复合材料需用量的计算方法

### 2.1 生石灰桩膨胀后的桩径

生石灰桩膨胀压力通常与生石灰掺量有关,大致范围为 0.5~10 MPa,土体的弹性模量通常在 2~10 MPa,泊松比  $\mu$  的取值范围通常为 0.3~0.45。若能从生石灰掺量估算出石灰桩膨胀压力,即可得出石灰桩的膨胀桩径。工程实践中,石灰桩的膨胀量在 1.2~1.5 倍,桩径膨胀量一般为设计桩径的 1.1~1.3 倍。而桩体膨胀后的直径为:

$$d_0 = d_1 [1 + p(1 + \mu)/E] \quad (8)$$

### 2.2 桩周土体孔隙比变化

膨胀法处理湿陷性黄土地基的思路是用由生石灰、黄土和砂子等按一定比例形成的膨胀材料成桩,利用生石灰吸收桩周土体中的水分而熟化时的体积膨胀力挤密桩周土体,使得土体的孔隙比由天然状态  $e_0$  降到最小孔隙比  $e_{\min}$ ,达到挤密地基土的目的。挤密过程中,生石灰桩周围土体的孔隙比变化规律<sup>[14-15]</sup>如图 3 所示:

$$e = e(x, y, z) \quad (9)$$

式中:当  $x = 0$  时,  $e = e_{\min}$ ,  $e_{\min}$  为土体最小孔隙比;当  $x = \pm l_0/2$  时,  $e = e_0$ ,  $e_0$  为原地基土体的孔隙比,  $l_0$  为膨胀挤压影响范围。如假定原基础下土体孔隙比相等,膨胀挤压完成后孔隙比在单位长度范围内沿  $x$  方向呈二次抛物线分布,则孔隙比的分布方程为

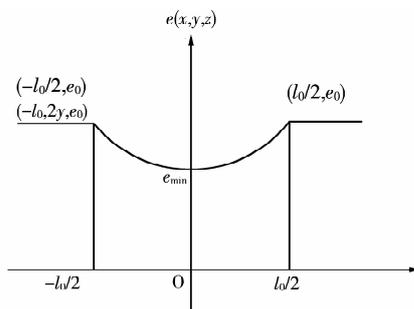


图 3 桩周土体孔隙比变化规律

$$e = e(x, y, z) = 4(e_0 - e_{\min})x/l_0^2 + e_{\min} \quad (10)$$

### 2.3 加固地基时生石灰桩复合材料的体积计算

设  $V_0, V_1$  分别为处理前后土的体积,  $e_0, e_{\min}$  分别为处理前后土的孔隙比;  $V_s$  为固体颗粒体积,处理前后不变;  $V_p$  为桩膨胀后占有的体积;  $A$  为生石灰桩复合地基的处理面积;  $h$  为桩的长度;  $\xi$  为生石灰桩的面积和加固面积之比,则

$$\begin{aligned} V_p &= V_1 - V_0 = \pi(D_1^2 - D_0^2)/4 = \\ &\{ \pi[(D_p - 4u_p)^2 + (D_p^2 - D_u^2)\Delta] \} / 4 = \\ &V_0 \cdot (e_0 - e_{\min}) / (1 + e_0) \end{aligned} \quad (11)$$

式中

$$V_0 = hA \quad (12)$$

生石灰桩的面积和处理面积之比  $\xi$  为

$$\xi = V_p/V_0 = (e_0 - e_{\min}) / (1 + e_0) \quad (13)$$

式中  $e_0$  为土体的天然孔隙比,可由实验测得,  $e_{\min}$  为土体的最小孔隙比,可根据设计要求取得,故根据求得的  $\xi$ ,可以计算出加固区所需的生石灰桩数:

$$N = \frac{4\xi A}{\pi D_1^2} \quad (14)$$

所以,加固区所需的生石灰桩的总体积为:

$$V = \xi Ah (D_0/D_1)^2 = \xi AE / [E + p(1 + \mu)] \quad (15)$$

## 3 工程实例

某科技有限公司生产线地基处理工程,根据岩土工程勘察报告,该场地位于兰州地区,地貌特征属于第四系上更新统、全新统砂砾卵石夹亚砂土构成的山前倾斜冲积—洪积平原,场地原为果园,地势西南高东北低,经人工平田整地后呈阶地状,最大高差约为 5 m,场地地层层序如下:

1) 耕土 ( $Q_1^{\text{ml}}$ ), 层厚 0.5~0.8 m, 黄褐色,以粉土为主,偶加个别碎石子,植物根系发育,分布连续,土质均匀,场地原为果园,层厚较均匀;干燥~稍湿,松散;

2) 黄土 ( $Q_3^{\text{col}}$ ), 层厚 37.7~42.7 m, 浅黄色、黄褐色、褐黄色,以黄土状粉土、粉质粘土组成,浅部可见植物根系,偶见虫孔、螺壳,垂直节理发育,呈大孔隙状,切面稍有光泽,摇震反应慢,手感有粘着感。

3) 卵石 ( $Q_3^{\text{pl}}$ ), 揭露度厚大于 5.7 m, 层顶埋深 37.7~42.7 m, 青灰色,粒径以 2~8 cm 为主,偶见漂石,漂石粒径 25~30 cm, 粒间充填物为含土混砂,分选性较差;颗粒呈亚圆~次圆形,磨圆度较好;其母岩成分为花岗岩、玄武岩、灰岩等,以灰岩居多。稍湿,中密~密实。

黄土层的物理力学性质指标见表 1。

表 1 黄土层的物理力学性质

| 统计指标 | 液限 $W_L/\%$ | 塑限 $W_p/\%$ | 含水率 $W/\%$ | 密度/ $(g \cdot m^{-3})$ |            | 比重 $G_s/(g \cdot m^{-3})$ | 孔隙比 $e$ | $E_s/MPa$ |
|------|-------------|-------------|------------|------------------------|------------|---------------------------|---------|-----------|
|      |             |             |            | $\gamma$               | $\gamma_d$ |                           |         |           |
| 平均值  | 27.6        | 19.8        | 15.3       | 1.39                   | 1.57       | 2.71                      | 1.02    | 9.9       |
| 最大值  | 32.1        | 21.6        | 20.1       | 1.69                   | 1.92       | 2.73                      | 1.31    | 17.6      |
| 最小值  | 23.1        | 18.0        | 10.5       | 1.09                   | 1.22       | 2.70                      | 0.73    | 2.2       |

本场地黄土计算湿陷量: $\Delta s=197.4 \sim 257.1$  cm;  
 $\Delta \varepsilon s=123.4 \sim 164.5$  cm。根据《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ50025-2004)中湿陷性黄土地基的湿陷性等级标准,该场地属于 IV 级自重湿陷性(很严重)场地。湿陷深度 29.5~38.5 m,其下自重湿陷性黄土与非湿陷性黄土互层。

该场地采用生石灰桩膨胀法进行处理,根据地质资料及黄土室内试验得出的物理力学指标最小孔

隙比为 0.68,据公式(13)可计算得  $\xi$  为 0.168,设计桩径为 400 mm,正三角形布桩,根据公式(15)可计算出所需生石灰桩复合料的体积为 3 360  $m^3$ ,加固后对地基土进行试验,结果如下:

1)桩间土物理力学指标。在三桩间开挖探井,自上而下每米取原状土样一组,进行了室内土工试验。桩间土探井分层取土分析结果,详见表 2。

表 2 桩间土的主要物理力学性质

| 探井编号 | 取土深度/m   | 天然含水量 $\omega/\%$ | 天然重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$ | 天然孔隙比 $e$ | 湿陷系数 $\delta_s/MPa$ |
|------|----------|-------------------|---------------------------------|-----------|---------------------|
| 1    | 1.0~11.5 | 10.5              | 16.5                            | 0.68      | 0.005               |
| 2    | 1.0~11.5 | 11.4              | 16.9                            | 0.69      | 0.002               |
| 3    | 1.0~11.5 | 14.2              | 17.3                            | 0.71      | 0.001               |
| 4    | 1.0~11.5 | 11.7              | 15.4                            | 0.70      | 0.003               |

根据表中数据,湿陷系数最大为 0.005,最小为 0.001,均小于 0.015,可以看出,1 至 4 号探井土样湿陷性已完全消除。说明经生石灰桩膨胀法挤密处理后,桩间土已不具湿陷性,场地土层挤密效果良好。

2)静载试验。分别在桩心和桩间做静载试验各 3 个,试验采用慢速维持荷载法,标准测力计测定荷

载,百分表侧度沉降,加荷分级、沉降观测时间及稳定标准等均按《建筑地基基础设计规范》(GBJ5007-2002)执行。试验点 Ja1、Ja2、Ja3 位于三桩间, Jb1、Jb2、Jb3 位于桩心,承压板尺寸为 0.25  $m^2$ 。各试验点垂直加荷  $Q$  及相应沉降  $S$  的试验结果见图 4、图 5。

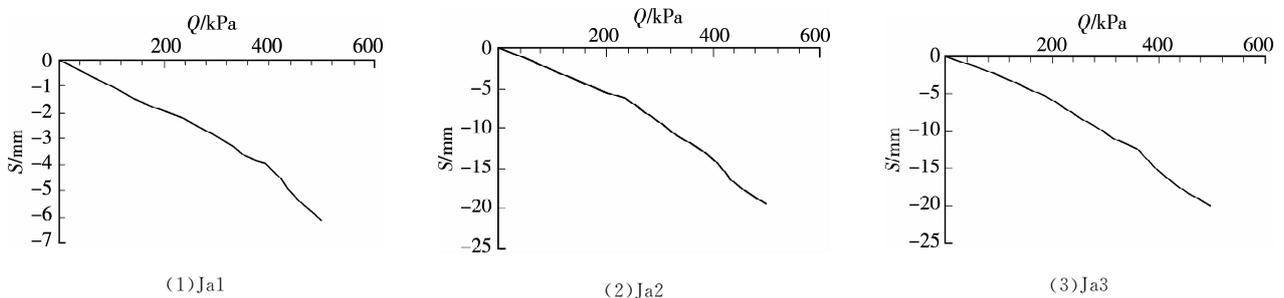


图 4 三桩间土的  $Q \sim S$  关系曲线

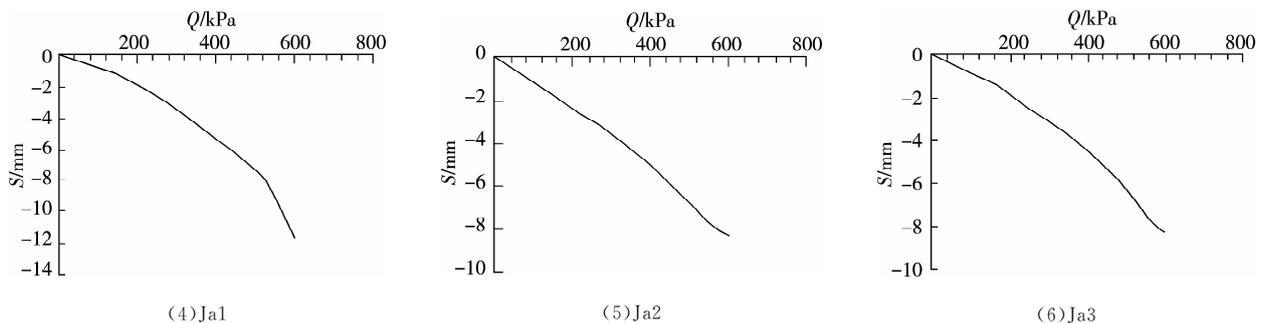


图 5 桩心的  $Q \sim S$  关系曲线

可见各试验点的  $Q-S$  曲线均呈缓慢变形或近似直线变化,无明显的拐点。取用  $S/b=0.012$  对应

荷载,三桩间承载力基本值可取用 207 kPa,桩心承载力基本值可取用 443 kPa。复合地基承载力标准值为 240 kPa。

## 4 结 语

本文针对生石灰桩吸收桩周土体中水分发生消化反应,使得桩身体积膨胀,挤密桩间土,从而有效地消除大厚度黄土的湿陷性的特性,提出了利用混合膨胀材料处理大厚度湿陷性黄土地基的方法,通过圆形孔扩张理论推导了该技术的计算方法,并应用于实际工程中,成功地消除了黄土的湿陷性,通过理论研究和工程实践可以得出以下结论。

1)经过大量的工程实践,采用生石灰膨胀材料加固湿陷性黄土地基,处理效果良好,说明在湿陷性黄土地区采用生石灰桩这种膨胀材料处理地基是可行的。

2)推导的计算公式对湿陷性黄土地基的加固具有借鉴意义,计算结果准确可靠,施工中仅需根据工程实际情况进行适当调整即可。

3)生石灰桩膨胀法处理大厚度湿陷性黄土地基,只能部分消除基础下黄土层的湿陷性。因此地基处理和上部建筑物完成后,应严格防止地面渗水。

4)生石灰桩膨胀法处理湿陷性黄土地基有其适用范围,对于不适宜的情况建议采用其他处理方法。

### 参考文献:

- [1] 李香德,许天戟. 大厚度湿陷性黄土地基处理的研究与应用[J]. 甘肃工业大学学报,1993,19(2):109-113.  
LI XIANG-DE, XU TIAN-JI. A study of the ground treatment for self-weight collapsible loess with large thickness and its application[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 1993,19(2):109-113.
- [2] 黄雪峰. 大厚度自重湿陷性黄土的湿陷性特征、地基处理方法和桩基承载力性状研究[D]. 重庆:解放军后勤工程学院,2007.
- [3] 朱彦鹏,王秀丽,周勇. 湿陷性黄土地区倾斜建筑物的膨胀法纠偏加固理论分析与实践[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(2):2786-2794.  
ZHU YAN-PENG, WANG XIU-LI, ZHOU YONG. Theoretical analysis and rectifying reinforcement using expansive method for incline building on collapsible loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(2):2786-2794.
- [4] 刘祖德. 某危房的地基应力解除法纠偏工程实例[J]. 土工基础,2000,14(4):29-31.  
LIU ZU-DE. The rectification of a building by stress relief method [J]. Soil Engineering and Foundation, 2000,14(4):29-31.
- [5] 朱彦鹏,王秀丽. 湿陷性黄土地区倾斜建筑物的沉降法纠偏技术及其应用[J]. 甘肃工业大学学报,2003,29(2):101-103.  
ZHU YAN-PENG, WANG XIU-LI. Deviation rectification of inclined buildings on collapsible loess with settlement method and its application. [J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003,29(2):101-103.
- [6] 王幼青. 挤土桩水平向挤土位移分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(4):472-475.  
WANG YOU-QIN. Horizontal soil compaction displacement of driven compaction pile[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003,35(4):472-475.
- [7] 王延斌,范文,徐栓强. 基于统一强度理论的柱形孔扩张问题研究[J]. 岩土力学,2003,23(10):125-132.  
WANG YAN-BIN, FAN WEN, XU SHUAN-QIANG. Solution to expansion of cylindrical cavity based on the unified strength theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003,23(10):125-132.
- [8] 韩晓雷,黄义. 灰土挤密桩成孔过程中孔周土体的应力分析[J]. 西安建筑科技大学学报,1999,31(3):256-259.  
HAN XIAO-LEI, HUANG YI. Analysis on the stress of the soil around the hole in hole-formation with lime soil compaction pile[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 1999, 31(3): 256-259.
- [9] SGAASETA, C.. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. Geotechnique, 1987,37(3): 301-320.
- [10] SAGASETA, C. WHITTLE, A. J.. Deformation analysis of shallow penetration in clays [J]. Int. J. Numer and Analytical Methods in Geomech,1997, 21: 687-719.
- [11] CARTER, J. P., RVANDOLPH, M. F. Stress and pore Pressure changes in clay during and after expansion of cylindrical cavity[J]. Intenrational Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,1979,3:305-322.
- [12] RNADOLPH, M. F, CARTER, et al. Driven piles in clay-the effects of installation and subsequent consolidation[J]. Geotechnique,1979,29(4),361-393.
- [13] 龚晓南. 土塑性力学[M]. 杭州:浙江大学出版社,1999.
- [14] 何永强,朱彦鹏. 基于孔隙挤密原理的生石灰桩地基加固研究及其应用[J]. 工程勘察,2007(9):22-25.  
HE YONG-QIANG, ZHU YAN-PENG. Research and application of ground consolidation of quicklime pile based on pore extruding principle [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2007(9): 22-25.
- [15] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等. 大厚度自重湿陷性黄土场地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(3): 383-389.  
HUANG XUE-FENG, CHEN ZHENG-HAN, HA SHUANG, et al. Large area field immersion tests on characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 383-389.

(编辑 陈蓉)