



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.05.027

朱雪芳, 王红肖, 王银梅, 等. 土体参数对改良黄土边坡变形的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 167-172. ZHU Xuefang, WANG Hongxiao, WANG Yimeimei, et al. Effects of soil parameters on deformation of improved loess slope[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 167-172. (in Chinese)

# 土体参数对改良黄土边坡变形的影响

朱雪芳<sup>1</sup>, 王红肖<sup>1,2</sup>, 王银梅<sup>1</sup>, 苗世超<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 水利科学与工程学院, 太原 030024; 2. 石家庄市水利水电勘测设计研究院, 石家庄 050011)

**摘要:** 为了探讨固化剂SH改良黄土边坡的物理力学参数对边坡变形的影响, 以山西太原的湿陷性黄土为研究对象, 进行了直剪试验, 测得了不同含水率下改良黄土的内摩擦角和黏聚力; 并以此试验数据为依据, 基于有限元ABAQUS软件分析了不同含水率、弹性模量和泊松比对边坡变形的影响。研究结论显示: 固化剂SH能明显提高黄土的抗剪强度; 含水率对改良黄土边坡变形的影响较大, 但泊松比对改良黄土边坡变形几乎没有影响。研究结论为固化剂SH在黄土地区的推广使用提供了一定的参考价值, 并对实际边坡工程的设计、治理提供了理论依据。

**关键词:** 改良黄土; 内摩擦角; 黏聚力; 变形

**中图分类号:** TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0167-06

## Effects of soil parameters on deformation of improved loess slope

ZHU Xuefang<sup>1</sup>, WANG Hongxiao<sup>1,2</sup>, WANG Yimeimei<sup>1</sup>, MIAO Shichao<sup>1</sup>

(1. College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. Water conservancy and hydropower survey design institute, Shijiazhuang City, Shijiazhuang 050011, China)

**Abstract:** This work aimed to study the physical and mechanical parameters which influence the deformation of improved Loess slope. Using the collapsible loess taken from Shanxi Taiyuan as the object of study, direct shear test was carried out, cohesion and the internal friction angle of improved loess were obtained under different water contents; and then based on the testing data, the finite element software ABAQUS was used to discuss the effect of different moisture content, elastic modulus and Poisson's ratio on slope deformation. The result of the study showed that: The solidified agent SH could improve the shear strength of loess; The water content had great effect on deformation of improved loess slope, Poisson ratio had almost no effect on deformation of improved loess slope. The research results provide certain reference value for the promotion of solidified agent SH in the loess area, and also give theoretical references for the design and management of the actual slope engineering.

**Key words:** loess improvement; internal friction angle; cohesion; deformation

近年来,随着西部大开发战略的实施,我国经济发展和基础设施的建设正在向甘肃、陕西、宁夏、西藏等地区进军。而山西、甘肃、宁夏、陕西等地黄土分布较广,且发育完整、厚度较大。黄土的特点是强度高、孔隙大、压缩性小、遇水后极易崩解且强度明

显降低。由于黄土特有的水敏性的存在,黄土地区边坡在水和荷载的作用下极易出现崩塌、滑坡、错落等现象,给人民的生产、生活埋下了隐患。因此,在黄土地区边坡、路基等基础设施建设过程中,应首先进行黄土改良,使其能够满足工程建设的要求。王

收稿日期: 2015-12-10 修回日期: 2016-04-15 网络出版时间: 2016-08-19  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160819.1511.014.html>  
基金项目: 山西省自然科学基金项目(2010011029-2)

**Fund:** Natural Science Fund Project in Shanxi Province(2010011029-2)

**作者简介:** 朱雪芳(1991-),女,河南郑州人,主要从事水利工程水工结构方面的研究。E-mail: zhuxuefangyui@163.com

**通讯作者:** 王银梅(1965-),女,山西太原人,副教授,主要从事岩土工程、工程地质等方面研究。Email: wangym65@163.com

银梅等<sup>[12]</sup>研究发现固化剂 SH 掺入到黄土中,其无侧限抗压强度增加,湿陷性消失,抗冻性、抗渗性、抗老化性及水稳定性较好,本文采用固化剂 SH 对边坡进行改良。

目前,边坡问题研究的重点是求解安全系数<sup>[3-5]</sup>、边坡稳定的敏感性分析<sup>[6-8]</sup>、搜索滑裂面<sup>[9-10]</sup>等。一些学者还对物理、力学参数对边坡变形的影响进行了研究。李靖等<sup>[11]</sup>通过改进 Bishop 法得到了黄土边坡稳定性分析图表,在工程领域得到了广泛的应用。刘志伟<sup>[12]</sup>研究发现土体力学参数是影响边坡可靠性的主要因素,且随着黏聚力和内摩擦角增加,边坡的最大隆起位移和最大下滑位移均有所减小。杜太亮<sup>[13]</sup>等基于有限差分软件 FLAC,进行了物理参数、力学参数、边坡形状对边坡水平位移和竖向位移的影响,研究发现,黏聚力和内摩擦角对边坡位移的影响是相互依存的。李春忠和陈国兴等<sup>[14]</sup>用 ABAQUS 软件分析边坡的稳定性,并定义了最小稳定安全系数。但是国内外对改良土体的变形的研究比较匮乏,因此,对改良黄土的水平位移、竖向位移的研究具有一定的学术价值和实际意义。本文对取自山西太原湿陷性黄土进行了直接剪切试验,得到了不同含水率下改良黄土的内摩擦角和黏聚力,并以此为基础,基于大型数值分析软件 ABAQUS 进行了改良黄土边坡变形研究,并且分析了弹性模量、泊松比、含水率对变形的影响。研究结论为固化剂 SH 在黄土地区的推广使用提供了一定的参考价值,并对实际边坡工程的设计、治理提供了理论依据。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 黄土的物理力学性质

黄土取自山西省太原市汾河二库,属于低液限粉质黏土。按照土工试验规程(SL237-1999)<sup>[15]</sup>该黄土的颗粒组成成分:2~0.05 mm 颗粒占 22.8%,0.05~0.005 mm 颗粒占 64.8%,小于 0.005 mm 颗粒占 22.8%,不均匀系数为 8.75,曲率系数 2.31。物理性质指标是:含水率为 8.9%,密度 1.45 g/cm<sup>3</sup>,最优含水率 18.2%,液限 30.1%,塑限 19.2%,黏聚力 15.64 kPa,内摩擦角 10.9°。

### 1.2 固化剂的改良机理

固化剂 SH 主要成分为聚乙烯醇,质量分数为 5%,密度为 1.27~1.31 g/cm<sup>3</sup>,可无限稀释;无毒无刺激性;常温下即可加固,具有高效性、持久性。SH 对沙、土颗粒有包裹、填充和胶结的作用,其大

分子链上含有的 -COOH、-OH 会与土颗粒发生吸附、络合、离子交换等物理化学反应,使土体变成坚固且富有弹性的网状凝胶体,主链 C-C 具有憎水性,且反应具有不可逆性,故可广泛用于固土、治沙<sup>[16]</sup>。

### 1.3 试验方法

通过直接剪切试验可以获得试样的两个重要指标:内摩擦角和黏聚力,可为后面边坡的稳定性分析提供试验数据。试验前首先应将取回来的黄土进行粉碎,并过 2 mm 筛,按照试验设计取量。继而将固化剂 SH 掺量(溶质含量 5%)掺入到定量的黄土中,最后加入一定量的水,使得土样的含水量(固化剂 SH 的溶剂水含量与最后加入的水量之和)达到设计含水率。拌合均匀,并用黑色塑料袋密封,静置 12 h,分三次将土料装入  $\phi 6 \times 4$  cm 环刀中制样,其中前两次要对土样的接触面进行刮毛,以使得后加入的土料与前面压实的土料充分接触,最后将制成的土样脱模,放置与室内自然风干到一定的时间。每组 4 个试样,取平行样 4~5 个。最后采用的是 EDJ-1 型电动等应变直剪仪,对直剪盒内的土样分别施加 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 的法向应力,然后记录量力环的读数,最后计算出抗剪强度的内摩擦角和黏聚力。

### 1.4 试验结果

本文选取 10% 掺量 SH 来探究含水率对改良黄土抗剪强度的影响,图 1、图 2 给出了不同含水率对改良黄土内摩擦角和黏聚力的关系曲线。

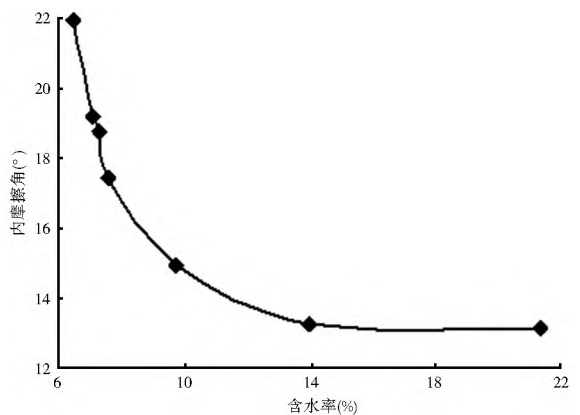


图 1 改良黄土的内摩擦角与含水率的关系

Fig. 1 Curve of internal friction angle versus water content of improved loess

从图 1 可以看出,随着含水率的增加,内摩擦角随着含水率的增加先是迅速减小,当含水率大于 14% 时,基本呈平稳趋势;当含水率由 6.48%~21.34% 时,内摩擦角由 21.96°~13.11°,6.48% 含

水率的内摩擦角是 21.34% 的 2 倍,变化较大,可见含水率对改良黄土的内摩擦角的影响不容忽视。

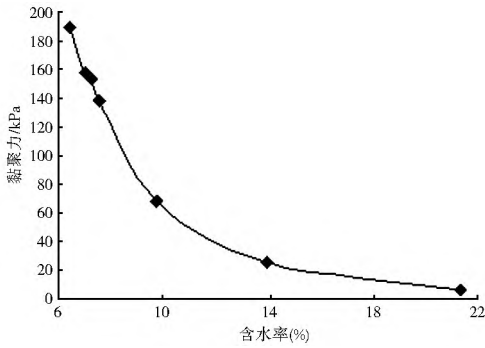


图2 改良黄土的黏聚力与含水率的关系曲线

Fig. 2 Curve of cohesion versus water content of improved loess

由图2可知,随着含水率的增加,黏聚力呈急剧减小的趋势;相对于内摩擦角,含水率对黏聚力的影响较大;当含水率为 21.34% 时,黏聚力为 6.78,较 6.48% 含水率的改良黄土减小 96.4%,可见含水率对改良黄土的抗剪强度影响显著。

当黄土中加入固化剂 SH 后,遇水大分子链上的亲水羧基(-COOH)通过强电荷的作用生成氢键,从而胶结成一个稳定的整体。土的内摩擦角主要是由颗粒间的滑动摩擦和咬合摩擦两部分组成,黏聚力主要由颗粒胶结力和水膜连接力构成。水是一种润滑剂,当含水率较小时,由于颗粒表层接触面不平整,相邻颗粒间相对位移阻碍较大,故土体摩擦角较大;而颗粒间的水膜连接力较大,从而黏聚力较大。随着含水率的增加,颗粒表层接触面开始变得光滑平整,相邻颗粒的相对位移阻力开始变小,所以内摩擦角变小;但水膜厚度增加,其连接力开始变小,颗粒间的胶结作用被削弱,当土体完全饱和时,水膜连接力消失,仅剩少许的颗粒胶结力,因此黏聚力较小。

## 2 强度折减法的基本原理

Zienkiewicz<sup>[17]</sup>等提出抗剪强度折减系数 SSR (shear strength reduction factor):当外界荷载保持不变时,土质边坡提供的最大抗剪强度与外荷载作用下边坡所能承受的最大剪应力的比值。而 1955 年 bishop 认为安全系数是整体滑裂面的抗滑强度与实际产生剪应力的比值。Matsui 和 San<sup>[18]</sup>又结合有限元强度折减法来分析人工填筑边坡和开挖边坡的稳定性。可见,若假设边坡内的所有土体抗剪强度相同,抗剪强度折减系数与极限平衡法定义的安全系数的定义是吻合的。

基本原理:逐步折减土质边坡的基本物理参数内摩擦角  $\varphi$  和黏聚力  $c$ ,当模型单元应力超出屈服

强度,将其不能承受的应力转移到周围土体单元,如果屈服点贯通成连续滑动面,土体则失稳。数值计算时,不断增加折减系数  $F_r$ ,当计算不收敛时,即达到了临空破坏,此时的折减系数称为安全系数。折减系数的基本方程如下:

$$\varphi_1 = \arctan(\tan \varphi / F_r) \quad (1)$$

$$c_1 = c / F_r \quad (2)$$

式中: $\varphi$  为边坡土体所能提供的内摩擦角(内摩擦角的试验值); $\varphi_1$  为维持平衡土体实际发挥的内摩擦角; $c$  为边坡土体所能提供的黏聚力(黏聚力的试验值); $c_1$  为维持平衡土体实际发挥的黏聚力; $F_r$  为强度折减系数。

## 3 模型的建立及结果分析

### 3.1 有限元模型的建立

建立高 20 m,宽 50 m 的均质黄土边坡,见图 3。将固化剂 SH 掺入黄土的厚度取为 10 cm。实际工程中将固化剂掺入到边坡时,应首先挖除坡面表层 0.1 m 后的土体,按照室内试验的方法,首先将土体碾碎,并加入固化剂 SH 进行表层土体固化,最后将固化后的土体置于原位压实即可。

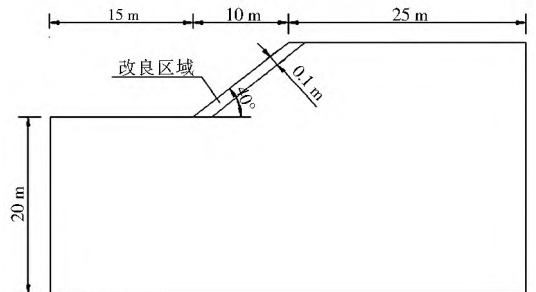


图3 改良黄土边坡模型

Fig. 3 The slope model of improved loess

### 3.2 屈服准则和流动准则

ABAQUS 中的 Mohr-Coulomb 模型是改进版的 Mohr-Coulomb 模型,材料各项同性,且光滑没有尖角,保证了流动方向的单一性<sup>[19]</sup>。本文在采用强度折减法求解边坡稳定性时,采用理想的弹塑性模型 Mohr-Coulomb,它是基于土体破坏时应力莫尔圆提出的,其屈服准则假设:当作用在土体上的剪应力等于该处的抗剪强度时,土体破坏。其公式为:

$$I_1 \sin \varphi / 3 - (\cos \theta_0 + \sin \theta_0 \sin \varphi / \sqrt{3}) \sqrt{J_2} + c \cos \varphi = 0$$

式中: $I_1$  为应力张量的第一不变量; $J_2$  为应力偏张量的第二不变量; $\theta_0$  为应力罗德角; $c$  为材料的内摩擦角; $\varphi$  为材料的黏聚力。

它采用光滑的流动势函数,其形状在子午面上是光滑的双曲线,在  $\pi$  平面上为光滑,呈椭圆形。定

义剪胀角  $\Psi = \varphi$  (内摩擦角) 为关联流动法则;  $\Psi = 0$ , 为非关联流动准则。

### 3.3 结果分析

边坡模型选用前面的均质黄土边坡, 由于固化剂 SH 掺入边坡的厚度较小, 因而忽略固化剂对边坡土体容重和弹性模量及泊松比的影响, 即改良黄土边坡容重  $\gamma = 14.5 \text{ kPa/m}^3$ , 弹性模量  $E = 350 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.3$ <sup>[20]</sup>, 不同含水率下的内摩擦角和黏聚力取自上面直剪试验, 经固化剂 SH 改良后的内摩擦角取  $21.76^\circ$ , 黏聚力取  $197.97 \text{ kPa}$ <sup>[2]</sup>。采用关联流动准则, 剪胀角  $\Psi = \varphi$  (内摩擦角)。

#### 3.3.1 弹性模量对边坡变形的影响

当改良黄土边坡在自然条件下, 边坡的形状不变, 即坡角、坡高不变, 抗剪强度的力学参数内摩擦角和黏聚力不变, 也不考虑土体材料泊松比的变化, 单一的改变土体的弹性模量, 而进行的边坡水平位移、竖向位移变化分析, 称为弹性模量对改良黄土边坡变形的影响。

由图 4 可以看出, 随着弹性模量的增加, 改良黄土的变形呈减小的趋势。当弹性模量为  $1e+6 \text{ Pa}$ 、 $1e+7 \text{ Pa}$  时, 边坡的最大水平位移、最大隆起位移和最大下滑位移变化较小; 当弹性模量为  $1e+8 \text{ Pa}$  时, 边坡的最大水平位移和最大下滑位移均减小了约  $1 \text{ cm}$ , 最大隆起位移减小了  $0.6 \text{ cm}$ , 有了一定的变化, 但变化较小, 可以忽略; 而当弹性模量为  $1e+10 \text{ Pa}$  时, 边坡的最大水平位移为  $0.137 \text{ cm}$ 、最大隆起位移为  $0.063 \text{ cm}$ 、最大下滑位移为  $0.115 \text{ cm}$ , 可见各项变形均很小; 但考虑到黄土的弹性模量单位一般为  $\text{MPa}$ , 而在  $1e+9 \text{ Pa}$  时, 各项变形是比较小的, 因此弹性模量是可以取经验值的。

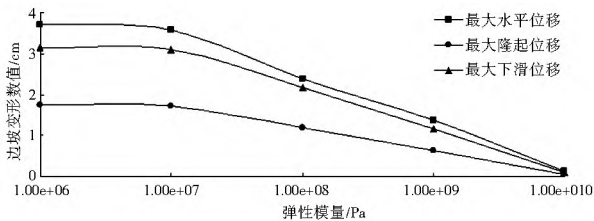


图 4 不同弹性模量下的变形

Fig. 4 Deformation curves of different elastic modulus

#### 3.3.2 泊松比对边坡变形的影响

从图 5 可以看出, 随着泊松比的增加, 边坡的各项变形很小, 基本成水平直线; 边坡水平位移较大, 其次是最大下滑位移, 最大隆起位移较小; 当泊松比为  $0.2 \sim 0.4$  时, 边坡水平位移为  $3.946 \sim 3.905$ , 最大隆起位移为  $1.831 \sim 1.819$ , 最大下滑位移则为  $3.306 \sim 3.271$ , 相对泊松比的变化来说, 各项位移均

变化较小, 可见, 泊松比对边坡变形影响较小, 因此, 本文采用经验值是比较合理的。

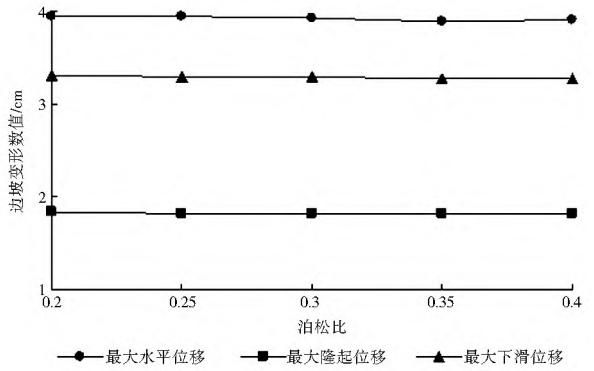


图 5 不同泊松比下的变形

Fig. 5 Deformation curves of different Poisson ratio

#### 3.3.3 含水率对边坡变形的影响

从图 6 可以简单看出, 随着含水率的增大, 最大隆起位移、最大下滑位移及最大水平位移均有不同程度的增加, 且边坡的水平位移变形较大, 下滑位移次之, 隆起位移最小, 可见降雨或者地下水入渗时应充分考虑水平位移的变形, 防止滑坡现象的产生。

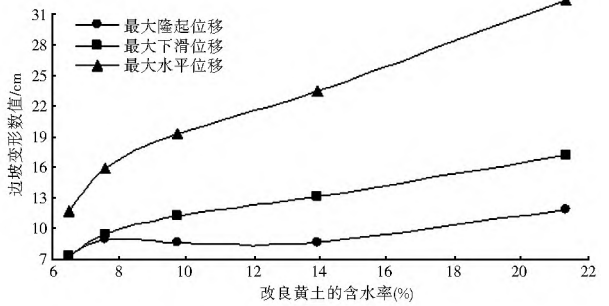


图 6 不同含水率下的变形曲线

Fig. 6 Deformation curves of different water content

受篇幅限制, 下面仅列出含水率为  $6.48\%$ 、 $7.57\%$ 、 $9.75\%$ 、 $13.95\%$ 、 $21.34\%$  五种典型情况下对应的水平位移等值线图, 见图 7- 图 11。

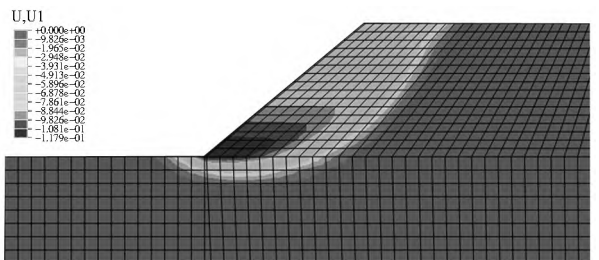


图 7 含水率为  $6.48\%$  的水平位移等值线

Fig. 7 Horizontal displacement isoline map of  $6.48\%$  water content

图 7 为含水率为  $6.48\%$  的改良黄土边坡的水平位移等值线图, 从图中可以看出, 坡面附近的水平位移较大, 最大位移发现在坡角附近, 数值是  $11.79 \text{ cm}$ 。

在此情况下,边坡的变形较小,不会产生滑坡现象。

图 8 为含水率为 7.57% 的改良黄土边坡的水平位移等值线图,从图中可以看出,坡面附近的水平位移较大同图 7。最大位移发现在坡角附近,数值是 16.01 cm。对比图 7 可知,随着含水率的增加,边坡的水平位移增加了 4 cm,变化较小,故不会对边坡产生扰动。

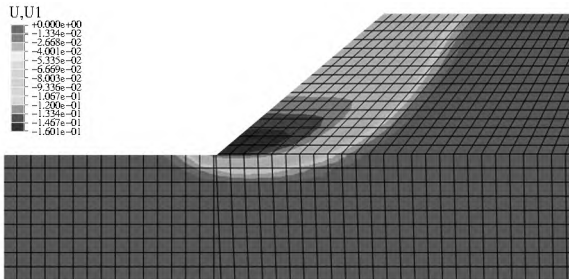


图 8 含水率为 7.57% 的水平位移等值线

Fig. 8 Horizontal displacement isoline map of 7.57% water content

图 9 为含水率为 9.75% 的改良黄土边坡的水平位移等值线图,从图中可以看出,坡面附近的水平位移较大同图 7、图 8。最大位移发现在坡角附近,数值是 19.43 cm。对比图 7 可知,随着含水率的增加,边坡的水平位移增加了将近 2 倍。

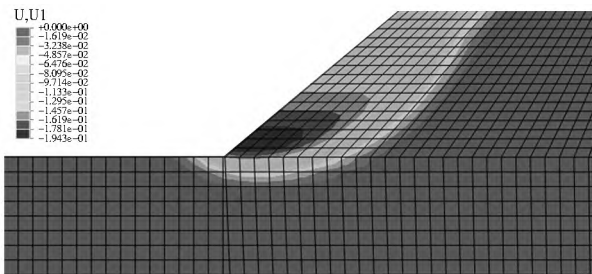


图 9 含水率为 9.75% 的水平位移等值线

Fig. 9 Horizontal displacement isoline map of 9.75% water content

图 10 为含水率为 13.95% 的改良黄土边坡的水平位移等值线图,从图中可以看出,坡面附近的水平位移较大同图 7、图 8、图 9。最大位移发现在坡角附近,数值是 23.64 cm。

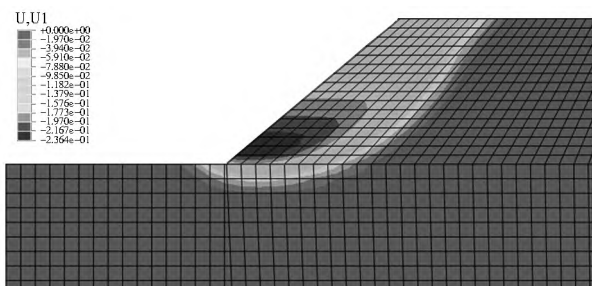


图 10 含水率为 13.95% 的水平位移等值线

Fig. 10 Horizontal displacement isoline map of 13.95% water content

水平位移等值线图,从图中可以看出,坡面附近的水平位移较大同图 7- 图 10。最大位移发现在坡角附近,数值是 32.49 cm。较图 10 水平位移增加了约 10 cm,是图 7 的最大水平位移的 3 倍,变化较大,应此需及时观测边坡的变形,防止滑坡类工程事故的发生。

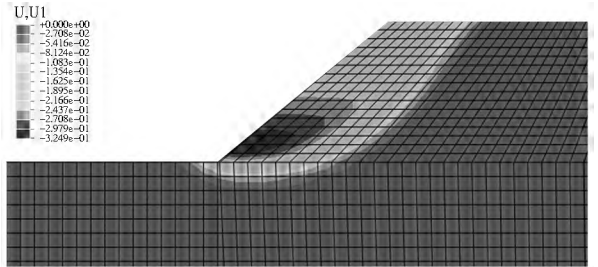


图 11 含水率为 21.34% 的水平位移等值线

Fig. 11 Horizontal displacement isoline map of 21.34% water content

## 4 结论

(1) 将固化剂 SH 掺入到黄土后,其抗剪强度明显提高,内摩擦角和黏聚力增加。

(2) 随着弹性模量、泊松比和含水率的增加,改良黄土边坡水平位移、隆起位移和下滑位移均有不同程度的增加,其中水平位移变化最大。

(3) 对比弹性模量、泊松比和含水率对改良黄土边坡变形的影响,发现含水率对边坡变形的影响较大,弹性模量次之,泊松比对边坡变形的几乎没有影响。因此,需格外重视含水率的变化对边坡变形的检测,防止事故发生。

### 参考文献(References):

[1] 王银梅,程佳明,高立成.冻融循环对化学改良黄土性能的影响[J].太原理工大学学报,2013,44(4):536-538. (WANG Yir mei, CHENG Jiar ming, GAO Li cheng. Influence of freeze thaw cycles on properties of chemical improved loess. [J]. Taiyuan University of Technology, 2013,44(4): 536-538. (in Chinese))

[2] 程佳明,王银梅,苗世超,等.固化黄土的干湿循环特性研究[J].工程地质学报,2014,22(2):226-233. (CHENG Jiar ming, WANG Yir mei, MIAO Shi chao, et al. Property study of solidified loess under wet-dry cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(2): 226-233. (in Chinese))

[3] 周浩,郭永建,郭风明,等.利用离心模型试验求解岩质边坡抗滑稳定安全系数[J].南水北调与水利科技,2012,10(1):27-29. (ZHOU Hao, GUO Yong jian, GUO Feng ming, et al. Using geotechnical centrifuge model test to solve rock slope safety factor against sliding[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1):27-29. (in Chinese))

[4] 康永君,杨军,宋二祥.地震作用下边坡安全系数时程计算及参数研究[J].岩土力学,2011,32(1):261-268. (KANG Yong jun, YANG Jun, SONG Er xiang, et al. [J]. Calculation method

- and parameter research for time history of factor of safety of slopes subjected to seismic load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 261-268. (in Chinese)
- [5] 王洪新. 考虑二维和三维尺寸效应的基坑抗隆起稳定安全系数[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(11): 2144-2152. (WANG Hongxin. Safety factor of heave resistant stability considering two and three dimensional size effects of foundation pits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(11): 2144-2152. (in Chinese))
- [6] 柏俊磊, 王乐华, 王瑞红. 基于敏感性分析的加锚岩质边坡锚固参数优化设计[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(4): 200-205. (BO Junlei, WANG Lehua, WANG Hongrui, et al. Optimization design of anchorage parameters of an anchor slope based on sensitivity analysis[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(4): 200-205. (in Chinese))
- [7] 文畅平. 多级支护边坡屈服加速度及因素敏感性分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(10): 2889-2897. (WEN Changping. Study of yield acceleration of slope stabilized by multistage retaining earth structures and sensitivity analysis of influence factors[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10): 2889-2897. (in Chinese))
- [8] 陈高峰, 程圣国, 卢应发. 基于均匀设计的边坡稳定性敏感性分析[J]. *水力学报*, 2007, 37(11): 1397-1401. (CHEN Gaofeng, CHENG Shengguo, LU Yingfa. Sensitivity analysis of the slope stability based on uniform design[J]. *Journal of Hydraulic*, 2007, 37(11): 1397-1401. (in Chinese))
- [9] 张昊, 余巍伟, 林杭, 等. 不同安全系数对应的边坡滑动面位置分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(2): 449-453. (ZHANG Hao, YU Weiwei, LIN Hang, et al. Analysis of location distribution of slope slip plane with different factors of safety[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(2): 449-453. (in Chinese))
- [10] 高玮, 张鲁渝, 张飞君. 边坡临界滑动面搜索的奖惩蚁群算法研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(2): 209-215. (GAO Wei, ZHANG Luyi, ZHANG Feijun. Critical slip surface searching for slope based on premium penalty ant colony optimization[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(2): 209-215. (in Chinese))
- [11] 李靖. 黄土边坡及其稳定分析图简介[J]. *西北农业大学学报*, 1999, 27(2): 101-104. (LI Jing. Introduction to the loess slope and its stability analysis[J]. *Journal of Northwestern Agricultural University*, 1999, 27(2): 101-104. (in Chinese))
- [12] 刘志伟. 土体强度参数对边坡隧道影响数值模拟分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2014, 12(4): 176-180. (LIU Zhiwei. Numerical stimulation analysis for the effects of soil mass strength parameters on the tunnels with side slopes[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2014, 12(4): 176-180. (in Chinese))
- [13] 杜太亮, 张永兴, 谢强, 等. 岩体基本参数对岩质边坡变形的影响[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2006, 17(1): 22-27. (DU Tai liang, ZHANG Yongxing, XIE Qiang, et al. Effects of rock mass parameters on rock slope deformation[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2006, 17(1): 23-27. (in Chinese))
- [14] 李春忠, 陈国兴, 樊有维. 基于 ABAQUS 的强度折减有限元法边坡稳定性分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2006, 26(2): 207-212. (LI Chunzhong, CHEN Guoxing, FAN Youwei. Strength reduction fem slope stability analysis based on ABAQUS[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation of Engineering*, 2006, 26(2): 207-212. (in Chinese))
- [15] SL239 1999. 中土工试验规程[S]. SL239 1999. Specification of Soil Test[S]. (in Chinese)
- [16] 王银梅, 谌文武, 韩文峰. SH 固沙机理的微观探讨[J]. *岩土力学*, 2005, 26(4): 650-654. (WANG Yinmei, CHEN Wenwu, HAN Wenfeng. Microstudy on mechanism of sand fixation with SH[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(4): 650-654. (in Chinese))
- [17] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non associated visco plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. *Geotechnique*, 1975, 25(4): 671-689.
- [18] Matsui Y, Zsebo K, Hogan B L M. Derivation of pluripotential embryonic stem cells from murine primordial germ cells in culture[J]. *Cell*, 1992, 70(5): 841-847.
- [19] 费康, 张建伟. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 浙江大学出版社, 2009. (FEI Kang, ZHANG Jianwei. Application of ABAQUS in Civil Engineering[M]. Zhejiang University Press, 2009. (in Chinese))
- [20] 杨博闻, 付刚. Q<sub>2</sub>黄土中隧道断面扩大开挖优化分析[J]. *山西大同大学学报: 自然科学版*, 2011, 27(4): 59-62. (YANG Bowen, FU Gang. Optimization of section expansion stages of tunnel in Q<sub>2</sub> loess[J]. *Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition)*, 2011, 27(4): 59-62. (in Chinese))

(上接第 166 页)

- [9] 杨斌. 橡胶水封的变形计算理论与应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. (YANG Bin. Deformation calculation theory and application research of rubber water seal. [D] Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese))
- [10] 刘礼华, 王蒂, 欧珠光, 等. 橡胶类止水材料超弹性性能的研究与应用[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2011(4): 199-204. (LIU Lihua, WANG Di, OU Zhuguang, et al. Application and research on the hyper elastic properties for rubber like water-stop material[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2011, (4): 199-204. (in Chinese))
- [11] 匡震邦. 非线性连续介质力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989. (KUANG Zhengbang. Tensor Analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 1989. (in Chinese))
- [12] Pidapartimv, Mayaw. Micromechanical analysis of fatigue cracks in cord rubber composites[J]. *Composite Structures*, 2001, 54(2): 459-465.
- [13] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. (WANG Xu cheng. Finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese))
- [14] R W Ogden, G Saccomandi, I Sgura. Fitting hyper elastic models to experimental data[J]. *Computational Mechanics*, 2004(34): 486.