

文章编号: 1673-5196(2021)03-0120-07

# 黄土高填方边坡的稳定性影响因素及其变形规律

叶帅华<sup>\*1,2</sup>, 张玉巧<sup>1,2</sup>, 房光文<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 根据西北某路段黄土高填方边坡工程项目, 运用 PLAXIS 3D 软件建立多级高填方边坡三维有限元模型, 研究了填料、填土边界、坡度以及卸载平台的改变对边坡稳定性的影响。并根据边坡在分步填筑情况下各级边坡坡顶、坡面、坡脚的竖向位移及水平位移, 分析了各级边坡最危险点的分布规律及整体边坡变形趋势。结果表明: 填料黏聚力、内摩擦角是影响高填方边坡稳定性的关键性因素。降低填土与原状土体边界处台阶高度、加深台阶宽度、降低坡度以及加宽卸载平台, 均可提高边坡的稳定性。较低处边坡施工期间竖向位移突变大, 水平位移突变较缓慢; 施工完成后变形情况均良好。较高处边坡施工期间竖向、水平位移突变大, 分布不均匀; 施工完成后固结沉降时期长, 变形量大; 需在施工完成后着重加强高处的变形监测。研究结果确定了西北地区黄土高填方边坡的稳定性影响因素、变形趋势及发展规律, 为进一步研究黄土高填土边坡的变形控制提供了科学依据。

**关键词:** 黄土; 高填方; 稳定性; 变形规律

中图分类号: TU44 文献标志码: A

## Stability factors and deformation law of loess high fill slope

YE Shuai-hua<sup>1,2</sup>, ZHANG Yu-qiao<sup>1,2</sup>, FANG Guang-wen<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Based on the loess high fill slope project in a certain section of Northwest China, this paper uses PLAXIS 3D software to establish a three-dimensional finite element model of the multistage high fill slope. The effects of changing fill, fill boundary, slope and unloading platform on slope stability were studied. According to the vertical displacement and horizontal displacement of the slope top, slope and foot, the distribution law of the most dangerous points at all levels and the trend of the whole slope deformation are analyzed. The results show that the cohesive force and internal friction angle of filling are the key factors affecting the stability of high fill slopes. Reducing the height of the step at the boundary between the fill and the undisturbed soil, deepening the step width, reducing the slope, and widening the unloading platform can improve the stability of the slope. During the construction of the lower slope, the vertical displacement changes rapidly and horizontal displacement changes slowly. The deformation is good after the construction. During the construction of the higher slope, the vertical and horizontal displacement abrupt change rapidly, and the distribution is not uniform. The consolidation settlement period is long and the deformation amount is large after the construction. It is necessary to strengthen the deformation monitoring of the higher slope after the construction. The research results determine the influence factors of stability, deformation trend and development law of loess high fill slope in Northwest China, and provides a scientific basis for further research on controlling the deformation of loess high fill slope.

**Key words:** loess; high fill; stability; deformation law

收稿日期: 2019-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(51508256), 甘肃省建设科技攻关计划项目(JK2015-5), 兰州市科技发展计划项目(2015-3-131)

通讯作者: 叶帅华(1983-), 男, 河南巩义人, 博士, 教授。

Email: yeshuaihua@163.com

受西部大开发战略影响,城市用地紧张,建筑选址逐渐向周边山区扩张,高填方边坡大量涌现,研究高填方边坡稳定性影响因素及变形破坏规律对建设高填方边坡具有重要意义.我国黄土面积分布广、厚度大,各个地区的黄土性质均有差异,不可同一而论,需更进一步地研究各地区黄土的性状.填方边坡相比较于自然边坡受到施工工艺、土体性状、外界环境、时空效应等因素的影响更为复杂.填筑土体性质对边坡变形与稳定性有很大影响,直接影响边坡的变形形式.原始地表平整情况不同,在具有不同物理力学性质的原始土体和填土间形成界面,该处易产生变形破坏.

关于边坡稳定性问题,诸多学者做了大量研究,胡长明等<sup>[1]</sup>通过离心模型试验研究了高填方贴坡体在天然含水量及饱水状态下的稳定性和变形模式;刘新喜等<sup>[2]</sup>进行降雨作用下高填方边坡暂态饱和与非饱和和滑坡渗流的有限元分析,分析边坡的瞬态安全系数;谷天峰等<sup>[3]</sup>研究在循环荷载的长期作用下,黄土的动强度和动应力-动应变关系以及边坡的变形规律;徐则民等<sup>[4]</sup>用三维有限元与拟静力分析相结合的方法对填方高边坡动力稳定性进行研究;陈志波等<sup>[5]</sup>采用灰色系统理论中的灰色关联分析方法对边坡稳定性进行敏感性分析;胡田飞等<sup>[6]</sup>总结三维数值分析法得出分析边坡稳定性的一套流程;葛苗苗等<sup>[7]</sup>通过分析某高填方的监测成果,将数值计算与分层迭代反演方法结合,对高填方的工后沉降进行反演预测;马闫等<sup>[8]</sup>分析了黄土贴坡高填方结构特点及变形破坏的关键影响因素,研究了其变形破坏机制;吴红刚等<sup>[9]</sup>从变形机理和控制技术两方面对机场高填方边坡问题进行研究;李忠等<sup>[10]</sup>将种群遗传算法(MPGA)引入三维边坡的稳定性分析中,结合有限元计算建立一种基于MPGA边坡三维稳定性分析的新方法;朱彦鹏等<sup>[11]</sup>依据双强度折减法,研究分析了针对黏性土坡的配套折减机制,并与传统的强度折减法结果做了分析与对比;周勇等<sup>[12]</sup>针对泥岩砂岩互层类型高边坡,进行支护结构内力及坡体位移监测,并与数值模拟进行对比分析;李忠等<sup>[13]</sup>根据土质边坡的破坏模式及滑移面形状,提出一种新的确定边坡最危险滑移面搜索模型,对土质边坡滑移面位置及安全系数空间分布进行分析与研究;朱彦鹏等<sup>[14]</sup>针对兰州市地质,通过有限元软件建立模型计算,探究不同开挖方式对洞口未支护及已支护边坡的位移、稳定性安全系数及塑性区域分布的影响.在现有的研究中,针对西北地区无支护情况下多级黄土高填方边坡的静力稳定性影响因素、

变形趋势及发展规律的研究较少.

本次研究以陇南市某路段边坡工程为背景,运用PLAXIS 3D三维有限元软件,对无支护情况下黄土高填方边坡的变形进行有限元数值模拟分析.通过改变边坡填料物理力学性质、填土与原土体边界、填筑体坡度以及卸载平台宽度,分析其安全系数变化规律.并模拟真实分级施工工况,研究不同级边坡上各点的变形情况,分析黄土高填方边坡变形规律,以期对西北地区黄土高填方边坡设计及施工有所裨益.

## 1 安全性分析原理

PLAXIS 3D软件采用有限元强度折减法计算边坡整体稳定性,初始土体强度参数中内摩擦角正切 $\tan \varphi$ 和黏聚力 $c$ 逐步减小,直至边坡发生失稳破坏,得到边坡安全系数及最优滑动面位置.

每个计算阶段中折减的土体强度参数值根据总乘子 $\sum M_s f$ 定义,即

$$\sum M_s f = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_r} = \frac{c}{c_r} \quad (1)$$

式中: $\sum M_s f$ 为折减总乘子; $c$ 、 $\varphi$ 为填土的黏聚力和内摩擦角; $c_r$ 、 $\varphi_r$ 为折减后的黏聚力和内摩擦角.

程序计算开始时,所有土体强度参数取初始值,即 $\sum M_s f = 1.0$ .计算过程中,总乘子由荷载增量进程控制.增量乘子 $M_s f$ 用来控制土体强度参数的折减,即 $\tan \varphi$ 和 $c$ 同步折减,默认第一步取0.1.强度参数自动逐步折减,直到执行完成所有步数.随后检验模型中边坡是否达到了完全破坏状态.若达到了完全破坏,在紧邻破坏发生后的计算步中,给出恒定的 $\sum M_s f$ ,安全系数 $F_s$ 由此得

$$F_s = \frac{\tau_m}{\tau_b} = \sum M_s f_d \quad (2)$$

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

式中: $\tau_m$ 为土体未破坏时的最大抗剪强度; $\tau_b$ 为土体平衡时的抗剪强度; $M_s f_d$ 为土体发生破坏时的增量乘子; $\tau$ 为土体抗剪强度; $\sigma$ 为正应力.

## 2 工程概况

该工程位于陇南市某路段.k0+460断面人工削坡高度30 m,1:1坡率.分三级边坡,每级10 m,坡间设置卸载平台,宽度3 m.场地类别为II类场地,抗震设防烈度为VIII度,设计地震分组为第二组,特征周期0.40 s.边坡地形剖面如图1所示.场地地层自上而下划分为三个工程地质大层,分别为素填

土层、第四系全新统黄土状粉土层和卵石层.场地土层主要力学参数见表 1.

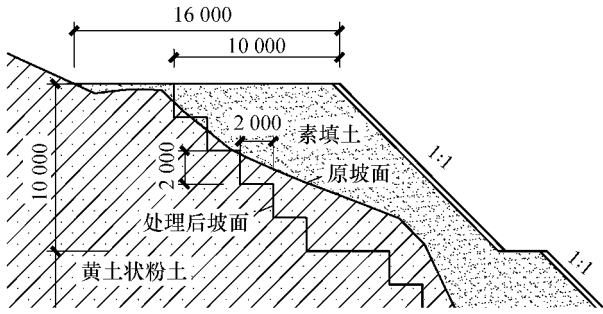


图 1 边坡地形剖面

Fig.1 Topographic section of slope

表 1 土层参数

Tab.1 Physical and mechanical indices of soils

土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$
素填土	17	12.7	20.0	10	0.32
黄土状粉土	17.5	13.2	22.0	15	0.3
卵石	22	10.6	35.0	80	0.25

### 3 建立有限元分析模型

运用 PLAXIS 3D 软件建立数值分析模型.边坡坡高  $H$  为 30 m,坡顶边界均取 20 m,坡底边界取 15 m,宽度取 10 m,可有效减弱边界影响.简化实际工程地形,建立无支护三级填方边坡.原坡体表面台阶高宽均为 2 m;坡间卸载平台 3 m;坡率 1 : 1.分析稳定性影响因素时,根据不同条件在此基础上修改台阶高宽、坡度及卸载平台宽度.采用 Mohr-Coulomb 模型和 Boit 固结理论,填料取统一压实度.该地区地下水位较低,故模拟过程中不考虑地下水的影响.模型边界条件为底面固定约束,控制  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三向变形;模型两侧  $y$  向水平约束;上表面变形开放.计算过程中逐步激活对应填土层,模拟真实施工过程.分三次填筑边坡,用第一、二、三次填筑工况模拟高度为 10、20、30 m 的一层、二层、三层边坡.有限元计算模型如图 2 所示.

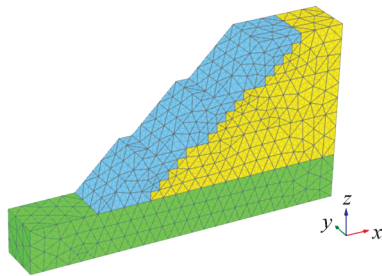


图 2 计算分析模型

Fig.2 Calculation analysis mode

## 4 软件计算结果分析

### 4.1 不同 $c$ 值对边坡稳定性的影响

取  $\varphi$  值固定为  $20^\circ$ ,  $c$  值分别为 0、10、20、30、40 kPa 时边坡安全系数变化曲线见图 3.当黏聚力  $c$  值为 0 kPa 时,三种高度的边坡安全系数相差不大,均为最低,甚至一层边坡低于 0.4.此时填土内部没有黏聚力,近似纯净砂砾,与原状土体间也无黏聚力,大量填土极不稳定,非常危险.当黏聚力  $c$  值增加至 10 kPa 时,边坡的稳定性变化巨大,安全系数突变至接近 0 kPa 时的两倍.在黏聚力较小时,略微增大填土的黏聚力可很好提高边坡的稳定性.其后随着黏聚力的增加,安全系数缓慢上升,上升趋势逐渐缓慢,趋于稳定.此时黏聚力达到一定限值,足够起到稳定边坡的作用,再次增加填土黏聚力对提高边坡稳定性起到较小作用.填土黏聚力小于 20 kPa 时,边坡安全系数较小,边坡不够稳定;高于 20 kPa 时,提升黏聚力对安全系数影响略小.因此,选取填料黏聚力 20 kPa 时最为合理.

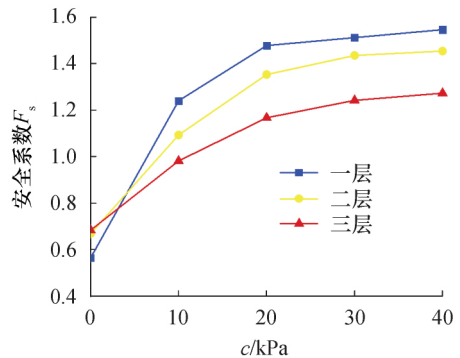


图 3 黏聚力对安全系数的影响

Fig.3 Diagram of safety factor versus cohesive force

### 4.2 不同 $\varphi$ 值对边坡稳定性的影响

在模型中改变填筑土体参数内摩擦角  $\varphi$  值,分析填筑土体不同内摩擦角对边坡稳定性的影响情况.上述分析得出当黏聚力为 20 kPa 时,边坡安全系数前后变化趋势较明显,此时选取黏聚力为 20 kPa 用以分析不同  $\varphi$  值对边坡稳定性的影响.  $\varphi$  值从  $0^\circ$  到  $50^\circ$  之间每  $10^\circ$  取值计算时,边坡稳定性系数变化曲线见图 4.填筑第一层边坡时,高度低,填土量少,仅靠土体自重足以支撑边坡变形,安全系数增长平缓,内摩擦角  $\varphi$  值的改变对于边坡稳定性影响较小.填筑第二、三层边坡时,曲线涨幅基本一致,三层边坡整体安全系数略低于二层边坡.内摩擦角较小时,由于边坡层数多、高度大、填土量大、安全系数改变量大,呈线性增长;内摩擦角达到  $20^\circ$  后,边坡

趋于稳定,再次增加填土黏聚力对提高边坡稳定性起到较小作用,安全系数曲线增长缓慢.土体内摩擦角与安全系数呈正比关系.

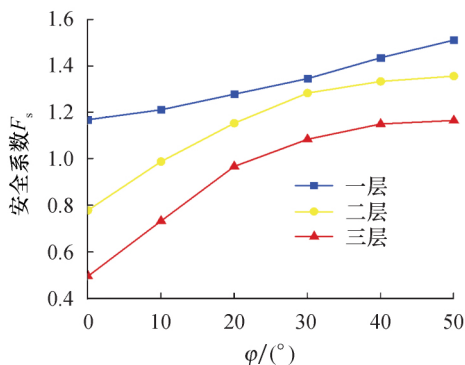


图 4 内摩擦角对安全系数的影响

Fig.4 Diagram of safety factor versus internal friction angle

### 4.3 填土与原状土体边界改变对边坡稳定性的影响

在填方边坡中,为避免所填土区域与原地表区域间形成滑动面,天然地面需清理表层后修建台阶.取模型中填土黏聚力  $c$  值为 20 kPa,内摩擦角  $\varphi$  值为  $20^\circ$ .通过改变填土边界处台阶的高度与宽度,分析边坡稳定性的变化趋势.

#### 4.3.1 台阶高度对边坡稳定性的影响

台阶宽度固定为 1 m,高度以 0.5 m 为差值逐渐增大至 3 m,三层边坡的安全系数变化曲线如图 5 所示.台阶高度与边坡安全系数呈线性变化趋势.由于台阶宽度固定,高度升高,原坡坡角变大,填土与原土体接触界面变陡,原边坡不能提供较好的支撑力,仅靠填土自身重力与黏聚力支撑,安全系数降低,边坡稳定性变差.台阶高度与安全系数呈反比关系,无明显突变趋势.

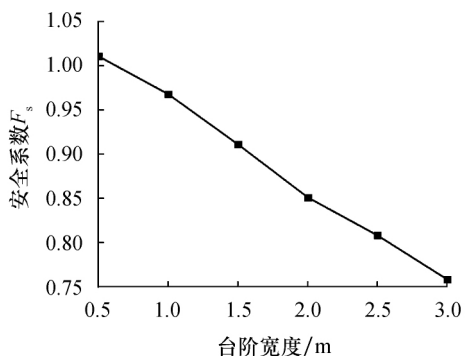


图 5 改变台阶高度对安全系数的影响

Fig.5 Diagram of safety factor versus the step height

#### 4.3.2 台阶宽度对边坡稳定性的影响

台阶高度固定为 1 m,宽度以 0.5 m 为差值逐渐增大至 3 m,其边坡的安全系数变化曲线如图 6

所示.台阶高度固定,宽度增加,原坡面坡角变小,坡度变缓,整体曲线呈现抛物线形式,安全系数升高,边坡稳定性加强.当台阶宽度较小时,填土量小但原边坡坡度较陡,支撑力不足,此时增大台阶宽度对提高边坡安全系数有显著作用;当台阶宽度大于 1.5 m 后,坡角小于  $33^\circ$ ,填土量大但坡面平缓,大量土体积压在原坡面上,原坡面可提供很好的支撑力,靠填土自重与原坡面间摩擦力即可保持平衡.继续增大台阶宽度,放缓原坡面提供的支撑力作用较弱,安全系数增长缓慢,趋于稳定.

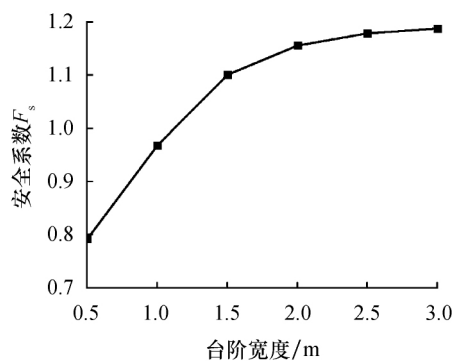


图 6 改变台阶宽度对安全系数的影响

Fig.6 Diagram of safety factor versus the step width

### 4.4 不同坡度对边坡稳定性的影响

在模型中改变填土坡度,由  $20^\circ$  至  $80^\circ$  每隔  $5^\circ$  建立模型,分析边坡稳定性的变化曲线如图 7 所示.随着坡度的增大,填土面逐渐变陡,安全系数不断减小.当坡度在  $20^\circ \sim 35^\circ$  之间变化时,曲线斜率较陡,安全系数变化较大,此时改变坡度对安全系数影响较大;当坡度超过  $35^\circ$ ,向  $80^\circ$  变化过程中,曲线斜率逐渐趋于平缓,安全系数变化速率较小,此时改变坡度对安全系数影响较小.由此得出坡度对填方边坡稳定性有显著影响.并在坡度较小时,改变坡度对填方边坡安全性影响较大,而在坡度大于  $35^\circ$  后,继续增大坡度,虽然安全系数仍具有持续降低的趋势,但

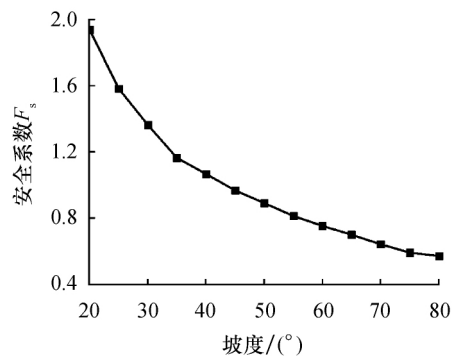


图 7 改变填土坡度对安全系数的影响

Fig.7 Diagram of safety factor versus slope degree

变化速率减小,逐渐趋于平缓.

#### 4.5 不同卸载平台宽度对边坡稳定性的影响

在模型中改变卸载平台宽度,由无平台至 7 m 宽平台每隔 0.5 m 建立模型,得出边坡稳定性变化曲线如图 8 所示.随着平台宽度的增加,安全系数在不断增大,整体呈现抛物线形式.从无平台到 0.5 m 平台时,边坡由一个整体分解为三个次级边坡,整体破坏分散,由次级边坡承担,整体安全性显著提高.其后继续增大平台宽度至 3.5 m,安全系数逐渐增大,趋势较为稳定,曲线基本呈现线性趋势.可根据工程实际情况,选取平台宽度在此范围之内.而平台宽度大于 3.5 m 后,由于此时已达到足够的平台宽度,再继续增加平台宽度,对安全系数影响较小,曲线逐渐趋于平缓.

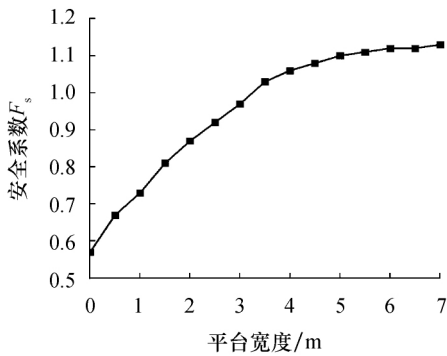


图 8 改变卸载平台宽度对安全系数的影响

Fig.8 Diagram of safety factor versus the width of unloading platform

#### 4.6 填筑过程中边坡各点变形位移

选取原坡顶 A,填土第三层边坡坡顶 B、坡面 C、坡脚 D,第二层边坡坡顶 E、坡面 F、坡脚 G,第一层边坡坡顶 H、坡面 I、坡脚 J,以及各层填土体内部点 K、L、M 共 13 点作为分析对象,位置分布如图 9 所示.各点竖向位移模型云图及曲线图如图 10、图 11 所示;各点水平位移模型云图及曲线图如图 12、图 13 所示.位移曲线图中第 1、第 7、第 11

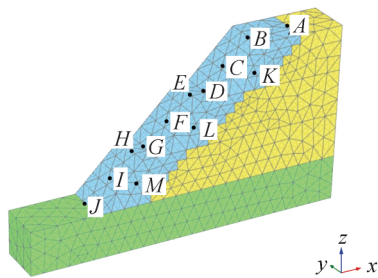


图 9 分析点位置

Fig.9 Distribution position diagram of Analysis point

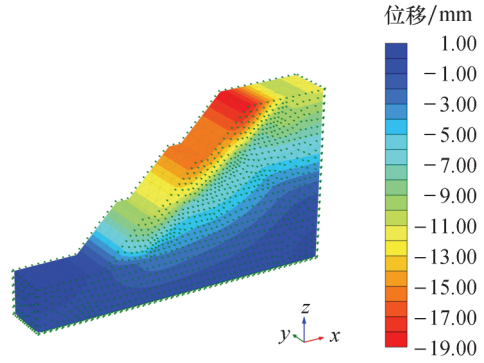


图 10 边坡竖向位移模型云图

Fig.10 Model nephogram of vertical displacement

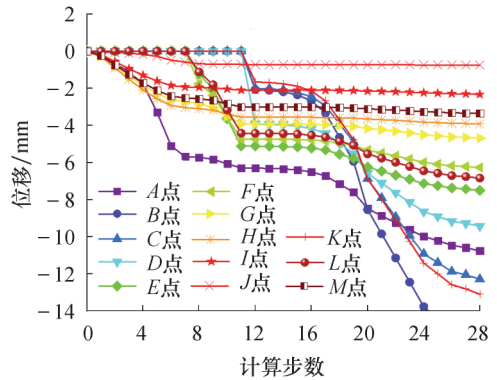


图 11 边坡竖向位移曲线

Fig.11 Vertical displacement curve of slope

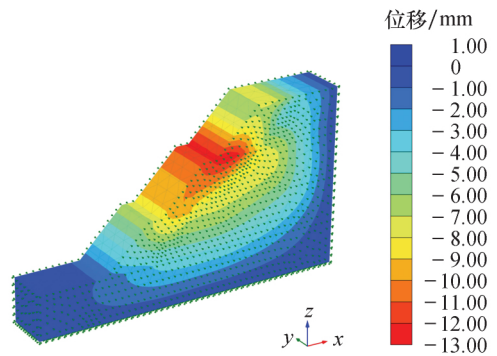


图 12 边坡水平位移模型云图

Fig.12 Model nephogram of horizontal displacement

步计算步数分别为第一、二、三层填筑工况开始步骤.

##### 4.6.1 竖向位移

填筑第一层边坡,由于原坡体受到施工扰动,原坡顶 A 竖向位移变化最大.填土表面及内部各点随第一层边坡的施工竖向位移逐渐增大,填土有小部分压实沉降情况.G、H 两点位于同一高度,但由于卸载平台的存在,G 点位移略小于 H 点.

填筑第二层边坡,在两层边坡中间新增卸载平台,坡体处施加填土体自重压力,填土量达到整个坡

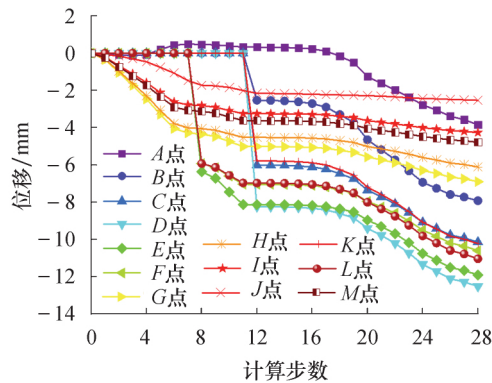


图13 边坡水平位移曲线

Fig.13 Horizontal displacement curve of slope

体的一半以上, A点竖向位移得到有效控制, 第一层边坡各点沉降增量明显减少, 趋于稳定. G点因位于第二层边坡坡脚处, 受到第二层边坡填土自重压力影响, 出现第二次沉降现象, 竖向变形略有增大. 第一层边坡上各点受影响较小, 趋于稳定. D、E、F、L点位于新增第二层边坡的关键点位置, 填土固结沉降开始, 竖向位移随着施工工况的进行逐渐增大, 曲线趋势明显.

填筑第三层边坡, 施工期间 A点处变形均保持稳定, 直至整体边坡施工完成, 填土压实度逐渐增加, 竖向沉降趋势明显, 此时 A点处平衡重新破坏, 竖向变形增大至最大值. 此时第一层边坡完工较早, 新填筑的第三层边坡对其基本没有影响, 第一层边坡上各点竖向位移略有变化, 趋于稳定. 第二层边坡受影响较小, 工况前期 E、F、L点突变趋势得到制止, 基本保持不变, 后期随着整体边坡沉降略有增加. 第三层边坡施工期间 B、C、K点突变至 2 mm 后短时间内保持稳定. 由于坡脚处承受填土自重荷载较大, D点整体位移量大于 B、C、K点, 突变至 4 mm. 施工完成后由于填土固结, 坡顶处 B、C、K点位移量逐渐增大, B点是整个边坡最危险点. 填土内部 K点初期位移略小于坡面 C点, 后期随着填土固结程度加大, 沉降位移逐渐累计增大, 超过坡面 C点位移. 而 D点处下部土体支撑力大, 固结程度好, 位移趋势远小于 B、C两点.

施工时边坡沉降发展迅速, 沉降量大, 原坡顶处位移较大. 施工完成后, 边坡发生次固结现象, 此时沉降量较小, 发展缓慢, 固结时间长. 第三层边坡坡顶处沉降位移最大.

#### 4.6.2 水平位移

填土水平位移曲线均与施工工况一一对应, 整体趋势为向背离土体方向位移, 仅有前期小部分土体向土体方向位移. 位移最大点处为第三层边坡坡

脚处, 处于规范要求最大位移量以内.

填筑第一层边坡, 此时原始坡体本身处于固结沉降状态, A点处于原始边坡最高点处, 初期填筑低层边坡时对其影响较小, 呈现自然固结沉降趋势, 水平方向呈现向坡体内部位移趋势. 第一层边坡各点随着工况水平位移逐渐增大, 坡肩处变形由竖向位移引导, 水平位移变化较小, 坡脚处竖向位移受到下部原状土层支撑, 变化较小, 上部受新增填土竖向沉降挤压, 施加水平推力, 向坡面外侧水平位移增大较快. 第一层边坡上各点随高度的降低, 位移逐渐减小.

填筑第二层边坡, 底部填土量较大, 向原坡体施加水平推力, A点朝向坡体内部位移受到影响, 出现向坡外位移的趋势. 此时第一层边坡沉降趋势相似于竖向位移, 趋于稳定. E、F、L点位于第二层边坡关键点位置, 第二层边坡填筑工况初始, 填土未稳定, 水平位移突变增大至 6 mm, 后期趋势较为缓慢, 位移量逐渐增大.

填筑第三层边坡, 施工期间新增填土压力使得 A点向坡外位移趋势稍有减缓, 施工完成后填土压实度逐渐增加, A点水平位移随新填第三层边坡一起朝向坑外迅速增大. 第一层边坡上各点水平位移趋势延续第二层边坡填筑工况, 略有增大, 整体趋于稳定. D、E、F、L点在第三层边坡较大的下滑推力作用下产生水平蠕滑变形, 位移趋势类似竖向位移变化趋势, 施工期间点突变趋势停止, 完工后逐渐增大. 第三层边坡上各点施工期间位移趋势类似竖向位移变化趋势, 竣工后在高自重应力作用下继续产生固结沉降及蠕变. 此时为填方边坡工后沉降时期, 填土自重较大, 固结时间长, 位移变化量大, 再加上后期外界因素, 易出现变形裂缝甚至滑坡崩塌现象.

## 5 结论

依据实际工程, 对西北地区黄土高填方边坡进行数值模拟, 研究边坡稳定性的影响因素. 模拟实际填筑工况, 分析边坡上各点位移的变形规律. 所得结论如下:

1) 土体黏聚力、内摩擦角、填土与原状土体边界、坡度及卸载平台宽度均对黄土高填方边坡安全系数有显著影响. 其中土体黏聚力、内摩擦角、台阶宽度以及卸载平台宽度与边坡稳定性关系曲线均呈现抛物线形式. 在数值较小时, 增大其数值对边坡稳定性有较大提升; 而在数值较大时, 继续增大对边坡稳定性影响较小. 台阶高度、填土坡度与安全系数呈现反比趋势, 提升台阶高度与填土体坡度会造成边坡

稳定性下降。

2) 第一、二层边坡填筑时期竖向位移突变较大,施工完成后受固结沉降影响较小;第三层边坡填筑时期不同点处竖向位移突变情况差距较大,后期土体逐渐固结沉降,变形量大.需在边坡施工时加强对低层边坡的变形监测,施工完成后加强高层边坡坡顶处的变形监测。

3) 第一层边坡填筑时期水平位移小,增长缓慢,填筑完成后其它工况对其影响较小;第二、三层边坡填筑时期水平位移突变较大,施工结束后固结沉降时期长,变形趋势明显,位移量大.在后期监测中需着重注意边坡中间层各点水平位移。

参考文献:

- [1] 胡长明,梅源,刘增荣,等.湿陷性黄土高贴坡变形模式和稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(12):2585-2592.
- [2] 刘新喜,夏元友,蔡俊杰,等.降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J].岩土力学,2007,28(8):1705-1709.
- [3] 谷天峰,王家鼎,任权,等.循环荷载作用下黄土边坡变形研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1):3156-3162.
- [4] 徐则民,张倬元,许强,等.九寨黄龙机场填方高边坡动力稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(11):1883-1890.
- [5] 陈志波,简文彬.边坡稳定性影响因素敏感性灰色关联分析[J].防灾减灾工程学报,2006,26(4):473-477.
- [6] 胡田飞,刘建坤.复杂边坡三维地质建模技术及稳定性分析方法[J].防灾减灾工程学报,2016,36(4):580-587.
- [7] 葛苗苗,李宁,张炜,等.黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J].岩石力学与工程学报,2017,36(3):745-753.
- [8] 马闫,王家鼎,彭淑君,等.黄土贴坡高填方变形破坏机制研究[J].岩土工程学报,2016,38(3):518-528.
- [9] 吴红刚,冯文强,艾挥,等.山区机场高填方边坡工程实践与研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(1):385-400.
- [10] 李忠,范润赞,罗华.基于MPGA的边坡三维稳定性分析[J].兰州理工大学学报,2018,44(1):116-120.
- [11] 朱彦鹏,杨晓宇,严锐鹏,等.双强度折减法的配套折减机制[J].兰州理工大学学报,2017,42(2):121-126.
- [12] 周勇,王旭日,朱彦鹏,等.泥岩砂岩互层高边坡监测与数值模拟对比分析[J].兰州理工大学学报,2018,44(1):109-115.
- [13] 李忠,朱彦鹏.土坡稳定性分析中滑移面位置及安全系数空间分布探讨[J].兰州理工大学学报,2007,33(4):113-117.
- [14] 朱彦鹏,张浩亮,李忠,等.大断面隧道施工对洞口边坡稳定性的影响[J].兰州理工大学学报,2014,40(3):120-125.
- [15] 崔晓如.高填方路基沉降变形分析与预测及其控制标准研究[D].长沙:长沙理工大学,2010.
- [16] 宋焱勋,彭建兵,张骏.黄土填方高边坡变形破坏机制分析[J].工程地质学报,2008,16(5):620-624.
- [17] 李喜忠.斜坡高填方黄土路基破坏机理与加固措施[J].北方交通,2013(9):28-31.
- [18] 张丽萍.黄土高路堤稳定性研究[D].西安:长安大学,2005.
- [19] 张卫兵.黄土高填方路堤沉降变形规律与计算方法的研究[D].西安:长安大学,2007.
- [20] 徐明,宋二祥.高填方长期工后沉降研究的综述[J].清华大学学报(自然科学版),2009,49(6):770-773.