

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2017.03.018

# 黄土高陡边坡稳定性研究

刘洋<sup>1,2</sup>, 刘润<sup>3,4</sup>, 程辉<sup>3</sup>, 门玉明<sup>3</sup>

(1. 陕西交通职业技术学院 建筑与测绘工程学院, 陕西 西安 710018;

2. 西安建筑科技大学 土木学院, 陕西 西安 710055;

3. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054;

4. 陕西高速公路工程试验检测有限公司, 陕西 西安 710086)

**摘要:** 通过对延安宝塔山景区地质灾害治理工程中的日本工农学校旧址黄土高陡边坡典型案例在进行详细勘察的基础上进行分析,对滑坡发育特征及成灾因素进行深入研究,利用有限元软件FLAC<sup>3D</sup>建立了黄土高陡边坡数值模型,进行了稳定性和破坏机理的数值模拟试验,深入研究了黄土高陡边坡的稳定性和破坏机理。研究结果表明:黄土湿陷性、坡度、水、工程荷载条件、气候变化以及人为因素是影响黄土高陡边坡稳定性的主要因素;黄土高陡临空坡体的破坏形式主要为塑性剪切破坏。最后提出了使用格构锚杆锚固技术进行综合治理的技术方案。

**关键词:** 黄土;高陡边坡;稳定性分析;破坏机理

**中图分类号:** TU42

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1144(2017)03-0092-04

## Stability Evaluation of High and Steep Loess Slope

LIU Yang<sup>1,2</sup>, LIU Run<sup>3,4</sup>, CHENG Hui<sup>3</sup>, MEN Yuming<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering & Geodesy, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

3. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

4. Shaanxi Expressway Testing & Measuring Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710086, China)

**Abstract:** In this paper the stability of high-steep loess slope was studied based on the Baotashan Geological Hazard Management Project in Yan'an. Based on the engineering geological conditions, theoretical analysis and FLAC3D numerical model are used to analyze the failure mechanism of the high and steep slope. The results show that the main factors that affect the stability of high steep slope are loess collapsibility, slope, water, engineering load, climate change and human factors. And damage in the form of high and steep loess slope of the main airport for plastic shear failure. Finally the engineering proposal of lattice anchor was suggested to the project.

**Keywords:** loess; high and steep slope; stability analysis; damage mechanism

黄土富含碳酸盐等易溶盐,以粉粒(0.05 mm ~ 0.005 mm)为主,孔隙比 $e$ 大,垂直节理发育,具有非饱和性、水敏性、湿陷性、欠压密性、结构性、直立性、类超固结性、触变性等工程特性。随着地质演变,厚层堆积的黄土临空条件远比其它岩土边坡明显,坡脚极易遭受降雨与流水侵蚀,极易发生自然的退缩和侵蚀破坏,形成了特有的地形地貌,造就了黄土

塬、黄土梁顶部地形平坦,边缘为陡直斜坡的特征<sup>[1-4]</sup>。

工程地质条件错综复杂的黄土边坡容易形成不良地质现象,引发滑塌、崩塌、边坡失稳等地质灾害。近年来,由于该区域人类活动不断增强,大量高边坡没有进行科学治理,地质灾害频发,严重影响黄土地区人们的生命安全、生活、生产和经济发展。对高陡

收稿日期:2017-01-11

修稿日期:2017-03-08

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41572261);国家自然科学基金青年项目(41502277);西部绿色西部绿色建筑国家重点实验室培育基地开放研究基金项目(LSKF201707)

作者简介:刘洋(1980—),男,陕西子长人,博士研究生,讲师,主要从事结构智能控制、工程防灾减灾方面的研究工作。

E-mail: yangliu1106@163.com

边坡段钊等<sup>[5-6]</sup>分别从弹塑性变形、应力-应变曲线关系方面研究黄土特性。胡晋川<sup>[7]</sup>、孙超等<sup>[8]</sup>从突变等研究了黄土高原区滑坡和崩塌的发育类型、形成特征及分布特征。刘保健等<sup>[9]</sup>理论研究黄土边坡稳定性分析方法。谷天峰等<sup>[10]</sup>、李刚等<sup>[11]</sup>对循环荷载下黄土边坡变形进行了研究。鲁洁等<sup>[12]</sup>进行了压实黄土强度和变形各向异性的试验研究。张涛等<sup>[13]</sup>通过模型试验研究了微型桩、锚拉桩加固黄土边坡的机理。

目前黄土高陡边坡稳灾害问题已经成为地质灾害治理研究的热点,且对延安地区高陡边坡稳定性研究的相关文献不多,且研究深度较浅。延安市宝塔山地质灾害有特殊的历史意义,选择日本工农学校遗址后典型黄土边坡为研究对象,结合详细勘察,通过理论分析和数值模拟分析相结合的方法,对该高陡边坡的稳定性进行评价,并提出相应的治理工程措施。在此基础上,通过数值模拟对治理工程的效果进行了验算分析。

## 1 工程概况

宝塔山四周沟谷深切,为一黄土梁地形,周边为黄土斜坡。山体的西坡、南坡和东坡较陡,北坡较缓,坡度 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。该地区多年平均降水量496.2 mm,降水量年内分配极不均匀,多集中在7月—9月,每小时最大降水量高达62 mm,日最大降水量达139.9 mm,占全年降水量60%~80%。年际降水量差别较大,最丰年达871.2 mm(1964年),最枯年仅330.0 mm(1974年)。气温方面,延安市多年平均地温 $12.1^{\circ}\text{C}$ ,极端最高地温为 $70.2^{\circ}\text{C}$ ,极端最低为 $-27.8^{\circ}\text{C}$ 。土地冻结期为每年的12月至次年3月,最大冻土深度为86 cm。工程区域内地层岩性由新到老主要有:第四系全新统冲坡积层,上更新统风积层、中更新统风积层、下更新统冲洪积层,侏罗纪地层等。

研究区平面示意图如图1所示,所选典型黄土高陡边坡位于日本工农学校旧址后坡,坡下为居民区。如图2所示,A-A剖面穿过工农学校所在的窑洞区域,由于暴雨冲刷,坡前窑洞的洞门附近均出现了一定程度的坍塌,坡面土体松散,坡体原状黄土松散崩落于坡底堆积。灾害隐患直接威胁到工农学校旧址的安全,急需采取措施予以加固,防止其破坏程度进一步加剧。选择的典型黄土高陡边坡天然坡体既高且陡,坡体后缘裂隙发育,具备降雨入渗引发坡体饱和的基本条件;高陡边坡坡面植被覆盖率不佳,

其变形破坏大都由降雨诱发,强降雨使得坡面冲刷严重,坡脚堆积大量的松散土体及植被碎屑。



图1 研究区面示意图



图2 典型坡面现场示意图

## 2 模型建立及分析

### 2.1 模型建立

依据研究区的详细勘察资料,以图3所示勘察剖面为原型进行建模分析。剖面模型长90 m,宽10 m,高60 m,坡体下部有两层窑洞,窑洞高3.5 m,宽3.0 m,进深8.0 m。整个模型采用Brick六面体块状与Wedge楔形体网格混合划分,共有420 481个节点,398 484个单元。建立的计算模型网格划分图如图4所示,模型土体计算参数如表1所示。模拟中假定土体为理想弹塑性材料,采用Mohr-Coulomb屈服准则进行计算<sup>[14-15]</sup>。对模型四周施加法向约束条件,模型底面施加三向约束,顶面自由,在此边界条件下进行初始地应力平衡,然后计算自然状态下边坡的变形与应力特征。

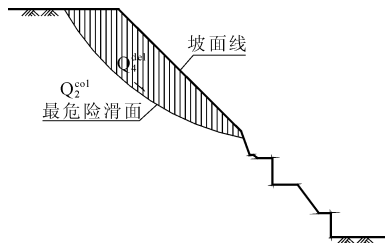


图3 边坡A-A剖面图

### 2.2 数据分析

通过初始地应力平衡数值模拟,计算自然状态

下边坡的变形与应力特征,结果显示:剖体应力云分布图如图 5 所示,坡体的应力呈不均匀分布,整体呈现上小下大的层状分布特征,并在潜在滑动面附近具有明显的分界。

图 6 所示为坡体 A - A 剖面的总位移云图,从图 6(a)可以看出最大位移集中在窑洞上方的坡体上,计算所得的最大位移达到 0.209 m,坡体已经滑塌变形产生破坏。由于上部位移较大,导致坡体整体的总位移云图无法反映窑洞洞门附近的变形情况。为此,将上部坡体移除,对坡体的局部位移进行成图,得到如图 6(b)所示的局部总位移云图,从图 6

(b) 可看出,在上部窑洞洞门附近,总位移值约为 0.039 m,变形明显,且与现场照片情况相符。

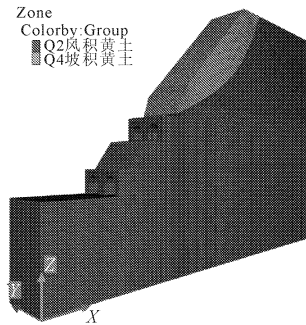
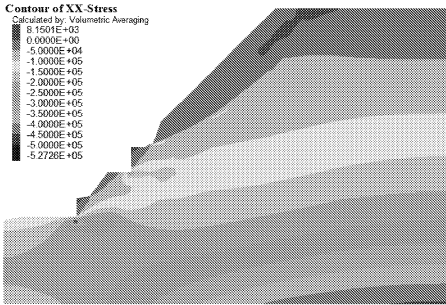


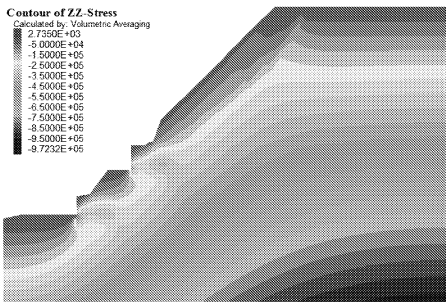
图 4 计算模型

表 1 模型土体计算参数

| 土层类别    | 重度 $\gamma$<br>/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 弹性模量<br>$E/\text{MPa}$ | 泊松比<br>$\mu$ | 黏聚力<br>$c/\text{kPa}$ | 内摩擦角<br>$\varphi/(\text{^\circ})$ | 抗拉强度<br>/Pa | 体积模量<br>$K/\text{MPa}$ | 剪切模量<br>$G/\text{MPa}$ |
|---------|---------------------------------------------------|------------------------|--------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------|------------------------|------------------------|
| Q2 风积黄土 | 17.0                                              | 25.0                   | 0.31         | 27                    | 25.0                              | 0           | 21.93                  | 9.54                   |
| 人工填土    | 17.0                                              | 20.0                   | 0.33         | 15                    | 18.0                              | 0           | 19.61                  | 7.52                   |
| Q4 坡积黄土 | 17.0                                              | 20.0                   | 0.32         | 20                    | 19.0                              | 0           | 18.52                  | 7.58                   |

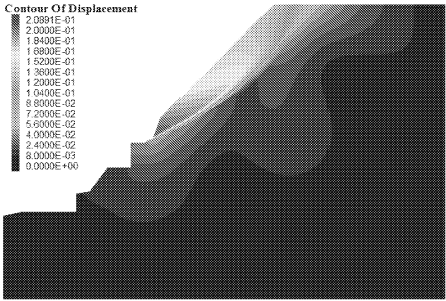


(a) 水平

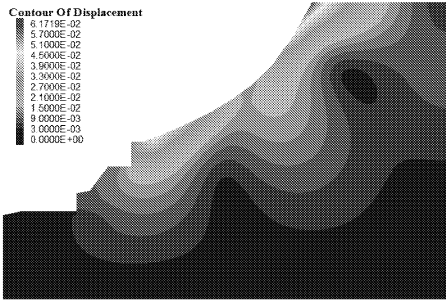


(b) 垂直

图 5 坡体剖面应力分布云图



(a) 总位移云图



(b) 局部

图 6 坡体剖面总位移分布云图

将上述总位移分解,得到水平与垂直方向的位移分布云图如图 7 与图 8 所示,水平位移最大值出现在滑塌体底部,达到 0.199 m,在局部水平位移上,上部窑洞洞门附近水平位移达到 0.021 m;垂直位移最大值出现在滑塌体坡肩附近,坡体下挫距离约 0.116 m,变形程度较大,边坡出现破坏。从图 9

所示 A - A 剖面坡体塑性区分布图来看,在滑塌体内部及边缘,出现了明显剪切塑性破坏分布区,坡体顶部的岩土体还出现了一定范围的张拉塑性破坏,在两层窑洞的洞门附近,张拉破坏分布明显,这种塑性破坏的分布形式与通过勘察发现的现场实际情况基本一致。

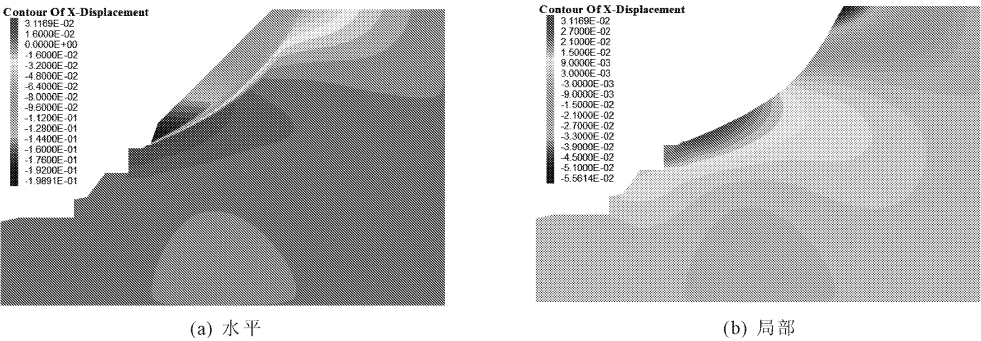


图 7 坡体水平位移分布云图

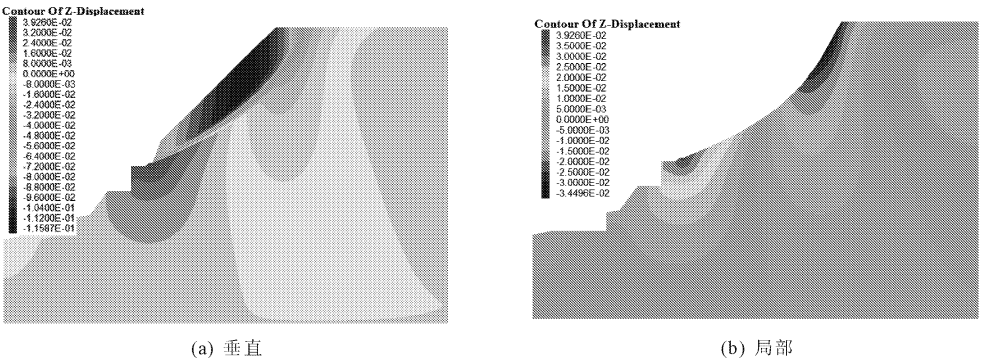


图 8 A-A 剖面坡体垂直位移分布云图

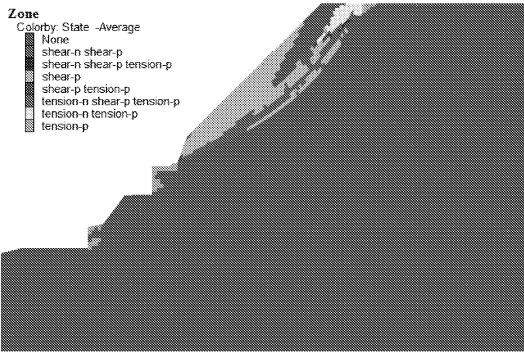


图 9 塑性区分布图

安全系数为边坡刚好达到临界破坏状态时,岩土体的实际抗剪强度与临界破坏时的折减后剪切强度的比值<sup>[16]</sup>,通过逐步减小材料的强度使边坡达到极限平衡状态来实现,针对 Mohr – Coulomb 破坏准则,安全系数  $F$  由方程(1)、方程(2)来确定:

$$c^{\text{trial}} = \frac{c}{F^{\text{trial}}} \tag{1}$$

$$\varphi^{\text{trial}} = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F^{\text{trial}}}\right) \tag{2}$$

式中: $c^{\text{trial}}$  为折减后的黏聚力; $\varphi^{\text{trial}}$  为折减后的内摩擦角; $F^{\text{trial}}$  为折减系数。

经 FLAC<sup>3D</sup> 的强度折减模块计算在自重情况下所得的安全系数为 1.04,按《建筑边坡技术规范》<sup>[16]</sup> (GB50330—2013)推荐的 BiShop 法计算得到的安全

系数为 1.03。两者基本相同,判定边坡处于欠稳定状态。图 10 为最大剪应变增量分布云图,由图 10 可看出研究剖面处出现一道贯通的剪切带,位置与高陡边坡的潜在滑动面位置基本接近。

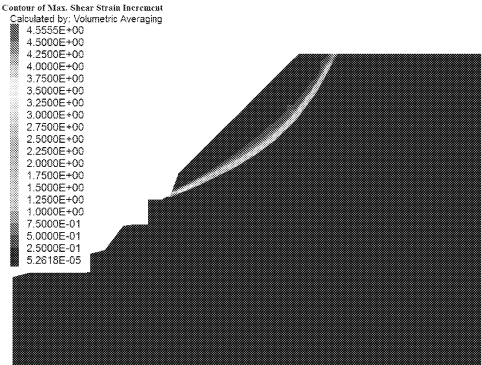


图 10 最大剪应变增量分布云图

通过分析可以看出,影响黄土高陡边坡稳定性的因素主要有内在因素和外部因素两方面,内在因素包括组成边坡的黄土湿陷性、地形坡度、水的作用等。外部因素包括地震、工程荷载条件、气候变化以及人为因素等等。内在因素对边坡的稳定性起控制作用,外部因素起诱发破坏作用。高陡临空坡体的破坏形式主要为塑性剪切破坏,坡面高陡积聚了较大的重力势能,加之降雨冲刷或入渗引起浅层部分坡体抗剪强度降低,极易引发变形破坏。

(下转第 122 页)

### 3 结 论

(1) 通过分析得出影响黄土高陡边坡稳定性的因素主要有:黄土湿陷性、地形坡度、水、工程荷载条件、气候变化以及人为因素等。

(2) 黄土高陡临空坡体的破坏形式主要为塑性剪切破坏,坡面高陡积聚了较大的重力势能与降雨入渗和冲刷引起浅层部分坡体抗剪强度降低,引发变形破坏。

(3) 依据研究区高陡边坡的变形破坏机理的研究成果,并结合治理区的特殊情况,建议治理工程采用轻型锚杆格构,在保证安全的前提下,不破坏坡体的原有景观,并结合边坡防排截水等辅助措施,能够极大地降低边坡在雨季或汛期失稳的可能性。

#### 参考文献:

- [1] 薛民臣.黄土边坡破坏的模型试验研究[D].西安:长安大学,2013:1-16.
- [2] 黄云飞.黄土边坡稳定性数值模拟研究[D].兰州:兰州大学,2013:1-24.
- [3] 肖 冰.高原峡谷区高陡边坡滑塌综合治理技术[J].铁道建筑,2014(10):78-81.
- [4] 郭江涛.新疆伊犁非饱和黄土的直剪性能试验研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):129-132.
- [5] 段 钊,李文可,王启耀.泾河下游台塬区黄土滑坡类型与时空分布规律[J].西安科技大学学报,2015,35(3):369-375.
- [6] 段 钊.黄土滑坡触发机理研究——以泾河下游南岸黄土塬区滑坡为例[D].西安:长安大学,2013:1-20.
- [7] 胡晋川.基于突变理论的黄土边坡稳定性分析方法研究[D].西安:长安大学,2011:1-64.
- [8] 孙 超,吕一彦,吴继敏.大型堆积体边坡极限平衡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(1):147-150.
- [9] 刘保健,谢定义,谢永利,等.土的自适应应力认识与研究[J].岩土工程学报,2015,37(7):1288-1293.
- [10] 谷天峰,王家鼎,王念秦.吕梁机场黄土滑坡特征及其三维稳定性分析[J].岩土力学,2013,34(7):2009-2016.
- [11] 李 刚,杨志强,高 谦,等.基于岩体等效模型的高陡边坡稳定性研究[J].金属矿山,2014,43(12):30-34.
- [12] 鲁 洁,杨朝旭,王铁行.压实黄土强度和变形各向异性的试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2016,48(5):676-680.
- [13] 张 涛,门玉明,石胜伟,等.悬臂式单锚抗滑桩加固黄土滑坡的模型试验[J].安全与环境工程,2015,22(3):151-157.
- [14] 吴 玺.基于数值模拟方法的黄土边坡稳定性研究[D].西安:长安大学,2015:1-14.
- [15] 王念秦,汤廉超.黄土崩塌灾害运动机理及其离散元数值模拟研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):152-156.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑边坡技术规范:GB50330—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.