

文章编号: 1006-4710(2015)03-0347-06

# 超载作用下土质边坡失稳与破坏模式分析

张媛<sup>1</sup>, 李荣建<sup>1,2</sup>, 李锦<sup>1</sup>, 王亚林<sup>1</sup>, 窦宝<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 影响边坡失稳的因素众多而且繁杂, 超载作用是诱发土质边坡失稳的主要因素之一。基于强度折减有限元法对土质边坡进行了不同坡面超载作用下的稳定性计算, 并分析了在坡面加载变化时边坡稳定性的变化规律及其潜在滑动面的失稳破坏形式。研究表明: 坡面超载作用下土质边坡可能会触发边坡失稳破坏, 坡面加载方式不同, 边坡失稳破坏模式不同, 破坏模式可能会由整体失稳转化为局部失稳。

**关键词:** 土质边坡; 超载; 安全系数; 强度折减有限元法; 失稳模式

**中图分类号:** TU431 **文献标志码:** A

## An analysis of instability and failure mode of soil slope under overloading action

ZHANG Yuan<sup>1</sup>, LI Rongjian<sup>1,2</sup>, LI Jin<sup>1</sup>, WANG Yalin<sup>1</sup>, DOU Bao<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** There are many complex factors that affect the stability of slope, and the overloading effect is one of main factors which lead to the slope instability. Based on the strength reduction finite element method, this paper carries out the stability calculation of soil slope under the action of slope surfaces of different kinds and analyzes the variant laws of slope stability in the slope surface loading changes and the instability failure mode in the potential sliding surface. The research results indicate that the soil slope is likely to trigger the slope instability failure under the action of slope surface overloads and that the different slope loading modes may have the different slope instability failure modes, and the failure modes are likely to make the whole instability convert into the local instability.

**Key words:** soil slope; overload; safety factor; strength reduction finite element method; failure mode

在实际边坡稳定性分析时, 极限平衡法<sup>[1-2]</sup>、极限分析法<sup>[3]</sup>、滑移线法<sup>[4]</sup>等传统方法被广泛使用。面对复杂多变的边坡情况, 这些传统方法并没有全面考虑土体的应力应变关系及变形协调条件。

Zienkiewicz<sup>[5]</sup>于1975年首次提出强度折减概念并将其应用于边坡的稳定性分析, 之后 Ugai、Griffiths 和 Lane 等<sup>[6-7]</sup>推动该方法的发展和运用。由于强度折减有限元法克服了传统方法中的缺点, 可以有效地分析滑动面的移动趋势、边坡的破坏形式及破坏机理, 因此越来越多地得到学者们的广泛

研究与应用。近年来, 李荣建等<sup>[8-10]</sup>将强度折减法引入到非饱和土的范畴进而分析非饱和土边坡的稳定性, 同时在边坡局部失稳的计算分析中对传递系数法和强度折减法进行了计算比较。

影响边坡失稳的因素众多且繁杂, 超载作用是诱发土质边坡失稳的主要因素之一。关于边坡在超载作用下的稳定性分析已有了一些研究成果, 年廷凯等<sup>[11]</sup>对超载作用下的边坡-抗滑桩体系的稳定性及土拱效应进行了研究; 蒋青青等<sup>[12]</sup>分析了坡顶超载情况下的边坡剪胀效应。但是这些成果并没有涉

收稿日期: 2015-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072193); 陕西省教育厅科研基金资助项目(14JS064); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013G1502009)。

作者简介: 张媛, 女, 硕士生, 研究方向为岩土力学及边坡工程。E-mail: 1007313169@qq.com。

通讯作者: 李荣建, 男, 教授, 博士, 研究方向为土力学、土工抗震与边坡工程等。E-mail: lirongjian@xaut.edu.cn。

及坡面坡顶超载作用下的边坡失稳及破坏模式转化问题的研究。

针对目前研究中存在的不足,本文采用强度折减有限元法对坡面、坡顶超载作用下土质边坡的稳定性进行分析,探讨土质边坡在不同加载条件下的稳定性变化及失稳模式的变化规律。

## 1 强度折减有限元

强度折减有限元的思路就是不断地降低边坡岩土体的初始黏聚力和摩擦角,计算直到出现“边坡的塑性区贯通、有限元数值计算结果不收敛或者特征点的位移发生突变”三种情况中的一种或几种,则此时的折减系数就是边坡安全系数<sup>[13]</sup>。

在强度折减有限元法计算中,折减后的强度参数  $c'_F$  和  $\varphi'_F$  分别定义如下:

$$c'_F = c'/F \quad (1)$$

$$\varphi'_F = \tan^{-1}(\tan\varphi'/F) \quad (2)$$

式中: $c'_F$  和  $\varphi'_F$  分别代替了莫尔-库仑准则中的强度参数  $c'$  和  $\varphi'$ ,其中  $F$  为强度折减系数。

首先选择初始折减系数,边坡中每一个单元的强度按这一折减系数折减并且进行有限元计算,将程序计算不收敛作为判断边坡失稳的标准,此时上一步的折减系数即为边坡的安全系数<sup>[14-15]</sup>,相应的程序流程如图1所示。

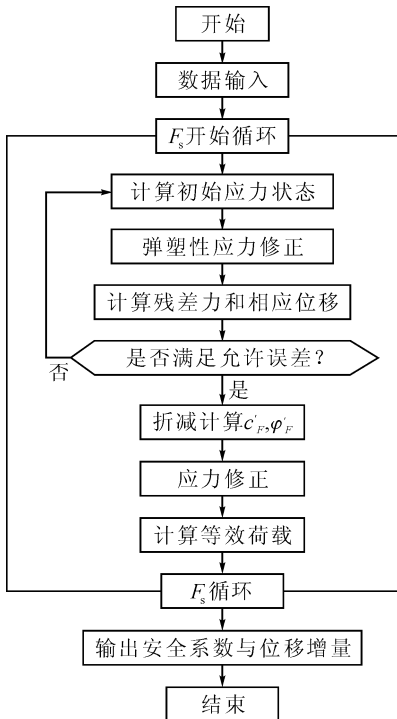


图1 强度折减有限元程序计算流程图

Fig. 1 Flow chart of strength reduction finite element

## 2 坡面超载作用下边坡稳定性分析

### 2.1 工程概况

本文选用某均质黄土土坡,黄土边坡高 80 m,土坡坡角是  $45^\circ$ ,黄土边坡如图2所示,土体物理力学参数如表1所示。

本文采用强度折减有限元法进行二维数值模拟,通过分析边坡在不同加载条件下的位移破坏趋势图,从而确定边坡的滑动面,并分析边坡失稳模式的转化规律。建立的有限元网格如图3所示,单元数 1 644,结点数 1 755,底部水平和竖直方向都施加约束,两侧采用水平方向约束。

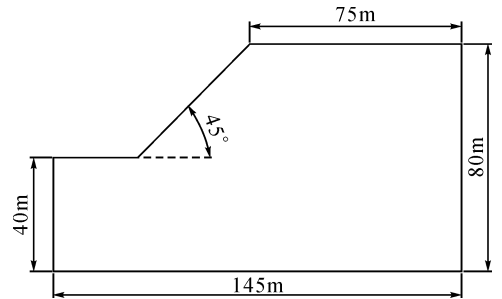


图2 黄土边坡轮廓图

Fig. 2 The loess slope profile

表1 黄土边坡力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of loess slope

| 重度/<br>$\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ | 黏聚力/<br>kPa | 内摩<br>擦角/ $(^\circ)$ | 弹性<br>模量/MPa | 泊松比 |
|--|-------------|----------------------|--------------|-----|
| 14                                     | 35          | 30                   | 30           | 0.3 |

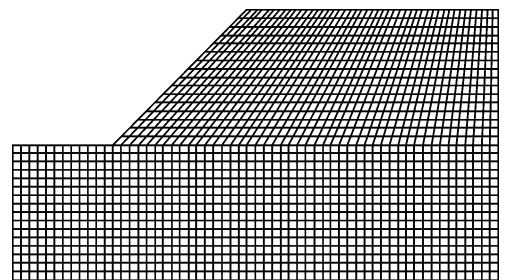


图3 有限元网格

Fig. 3 The finite element mesh

为了研究土质边坡在不同坡面、坡顶超载作用下的稳定性变化规律和失稳模式,本文采用4种工况进行模拟分析,各工况及计算的安全系数如表2所示,工况施加坡面、坡顶荷载示意图如图4所示( $q_1$ 表示边坡坡顶施加均布荷载, $q_2$ 表示边坡坡面施加法向均布荷载)。

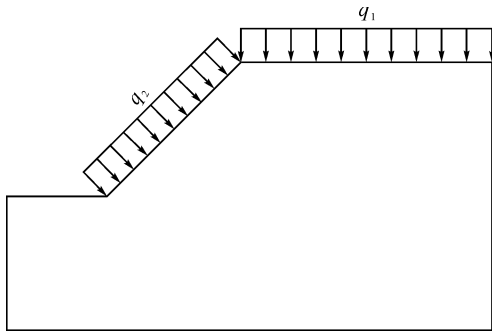


图4 坡面、坡顶加荷的模式

Fig. 4 The loading mode on the side and crest of slope

表2 工况安全系数汇总表

Tab. 2 Summary sheet of the cases and safety factors

| 工况   | 工况说明  | 安全系数 $F_s$ |
|------|---|------------|
| 工况 0 | $q_1 = 0 \text{ kPa}, q_2 = 0 \text{ kPa}$                  | 1.295      |
| 工况 1 | 工况 1-1 $q_1 = 100 \text{ kPa}, q_2 = 0 \text{ kPa}$         | 1.185      |
|      | 工况 1-2 $q_1 = 200 \text{ kPa}, q_2 = 0 \text{ kPa}$         | 1.080      |
|      | 工况 1-3 $q_1 = 300 \text{ kPa}, q_2 = 0 \text{ kPa}$         | 1.010      |
|      | 工况 1-4 $q_1 = 400 \text{ kPa}, q_2 = 0 \text{ kPa}$         | 0.955      |
| 工况 2 | 工况 2-1 $q_1 = 0 \text{ kPa}, q_2 = 100 \text{ kPa}$         | 2.285      |
|      | 工况 2-2 $q_1 = 0 \text{ kPa}, q_2 = 200 \text{ kPa}$         | 2.670      |
|      | 工况 2-3 $q_1 = 0 \text{ kPa}, q_2 = 300 \text{ kPa}$         | 2.310      |
|      | 工况 2-4 $q_1 = 0 \text{ kPa}, q_2 = 400 \text{ kPa}$         | 1.785      |
|      | 工况 2-5 $q_1 = 0 \text{ kPa}, q_2 = 600 \text{ kPa}$         | 1.360      |
|      | 工况 2-6 $q_1 = 0 \text{ kPa}, q_2 = 1\ 000 \text{ kPa}$      | 1.020      |
|      | 工况 2-7 $q_1 = 0 \text{ kPa}, q_2 = 1\ 100 \text{ kPa}$      | 0.960      |
| 工况 3 | 工况 3-1 $q_1 = 100 \text{ kPa}, q_2 = 100 \text{ kPa}$       | 1.990      |
|      | 工况 3-2 $q_1 = 200 \text{ kPa}, q_2 = 200 \text{ kPa}$       | 2.250      |
|      | 工况 3-3 $q_1 = 400 \text{ kPa}, q_2 = 400 \text{ kPa}$       | 2.360      |
|      | 工况 3-4 $q_1 = 600 \text{ kPa}, q_2 = 600 \text{ kPa}$       | 2.310      |
|      | 工况 3-5 $q_1 = 1\ 800 \text{ kPa}, q_2 = 1\ 800 \text{ kPa}$ | 1.790      |

## 2.2 未施加坡面荷载条件下边坡稳定性分析

图5为自然边坡在未施加坡面荷载仅考虑自重作用下的位移破坏趋势图,该工况下安全系数为1.295,边坡是安全的。

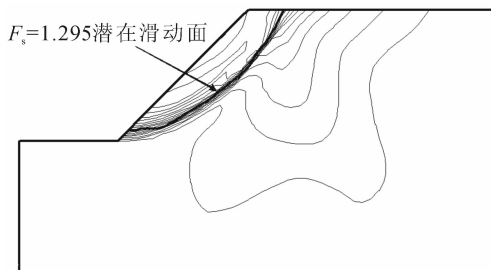
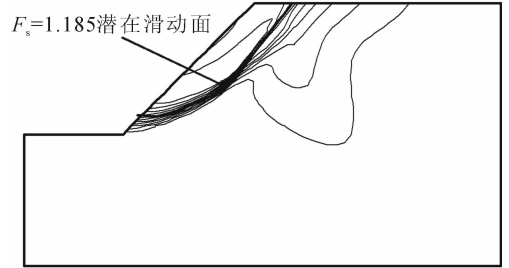


图5 工况0中边坡位移破坏趋势图

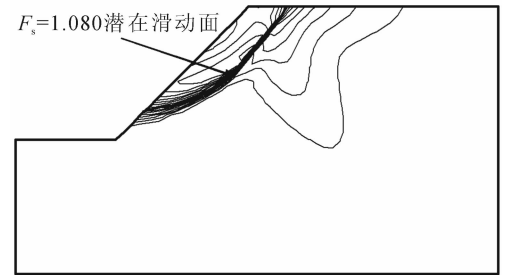
Fig. 5 The trend figure of displacement failure in case 0

## 2.3 坡顶施加均布荷载条件下边坡稳定性分析

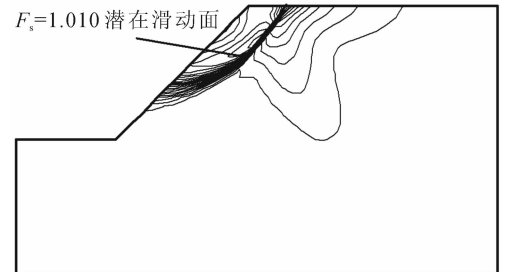
图6(a)~(d)为边坡坡顶施加均布荷载100~400 kPa的位移破坏趋势图,通过计算得到的边坡安全系数依次为1.185、1.080、1.010、0.955,边坡的稳定性逐渐降低,边坡潜在滑动面逐步上移。



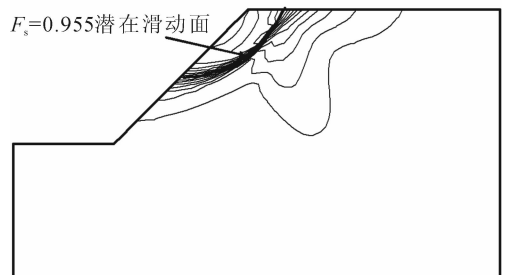
(a) 工况1-1位移破坏趋势图



(b) 工况1-2位移破坏趋势图



(c) 工况1-3位移破坏趋势图



(d) 工况1-4位移破坏趋势图

图6 工况1中边坡位移破坏趋势图

Fig. 6 The trend figures of displacement failure in case 1

当坡顶均布荷载较小时,边坡的安全系数较大,边坡稳定且潜在滑动面位置较深;当坡顶均布荷载达到400 kPa时,边坡的安全系数为0.955,边坡处于临界滑动状态,且相应的滑动面位置较浅。对比分析表明,当坡顶荷载逐步增加时,边坡的稳定性逐渐降低,边坡潜在滑动面有向上移动的趋势,最终边

坡失稳表现出局部失稳的破坏模式。同时,土质边坡在自然状态下安全系数为 1.295,而在坡顶超载作用下边坡的安全系数逐步降到 0.955,因此,坡顶超载作用会使边坡的稳定性降低。

#### 2.4 坡面施加均布荷载条件下边坡稳定性分析

图 7(a)~(g)为边坡坡面施加均布荷载 100~1 100 kPa 的位移破坏趋势图,通过计算得到的边坡安全系数依次为 2.285、2.670、2.310、1.785、1.360、1.020、0.960,边坡的安全系数是先增大后减小,边坡潜在滑动面先略有下移然后逐步上移。

对比分析表明,随着坡面法向荷载的逐步增加,边坡的稳定性先略有提高,随后逐渐降低。当坡面均布荷载从 100 kPa 增加至 200 kPa 时,边坡的安全系数由 2.285 增大至 2.670,此时边坡潜在滑动面的位置略有下移,边坡趋于更加稳定,这是由于坡面施加向内的法向均布荷载起到了对边坡变形进行约束的作用。但当继续增加坡面荷载时,边坡的稳定性逐渐降低,边坡潜在滑动面的位置由深层逐渐上移;当坡面荷载增加到 1 100 kPa 时,安全系数为 0.960,安全系数小于 1,边坡失稳表现出典型的

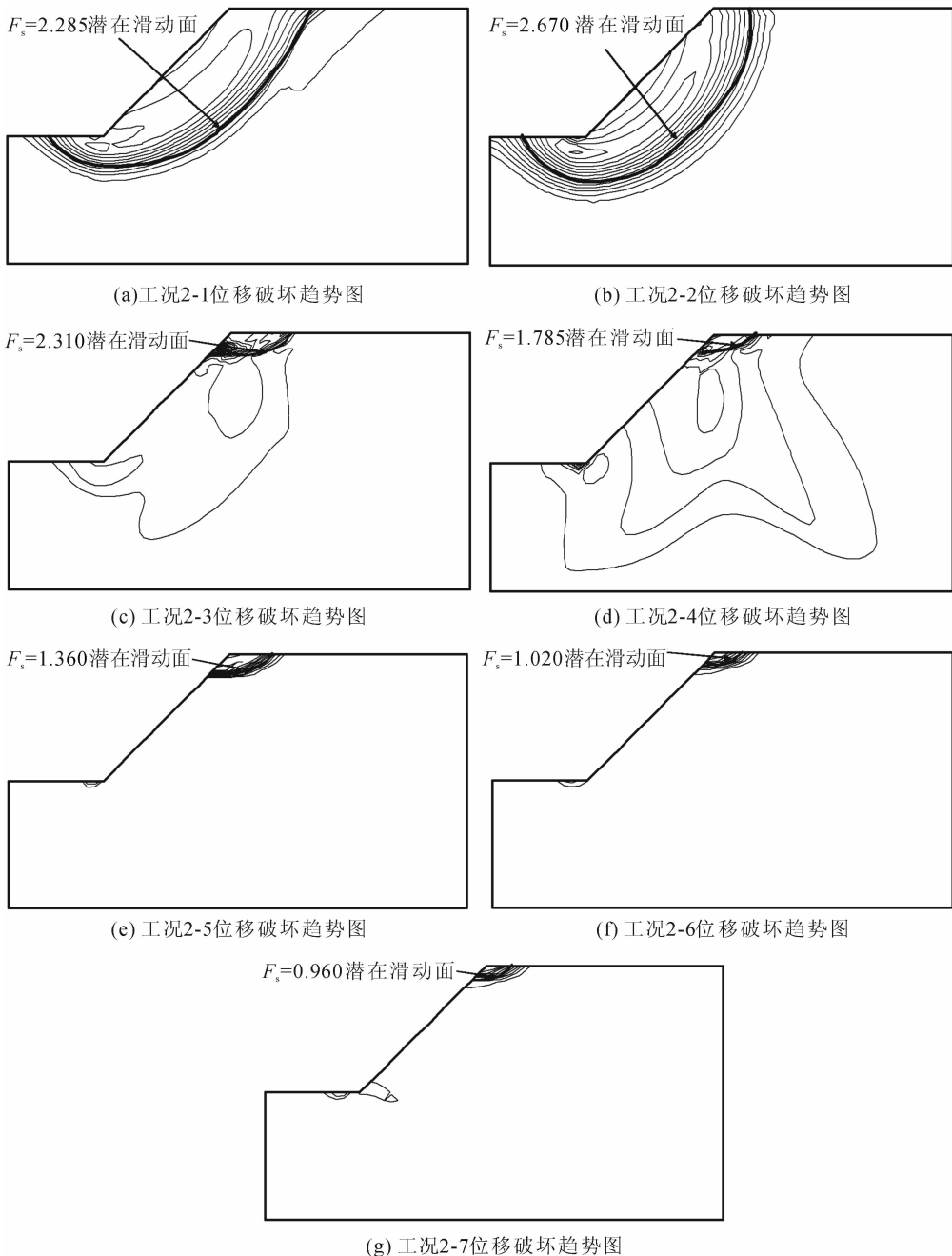


图 7 工况 2 中边坡位移破坏趋势图

Fig. 7 The trend figures of displacement failure in case 2

局部失稳模式。

值得注意的是,坡面超载作用下,在一定范围内的坡面荷载会对边坡起一定的约束作用,会使边坡的稳定性略有提高;但在较大的坡面超载作用下,边坡的安全系数最终会逐渐减小直至边坡发生局部失稳。

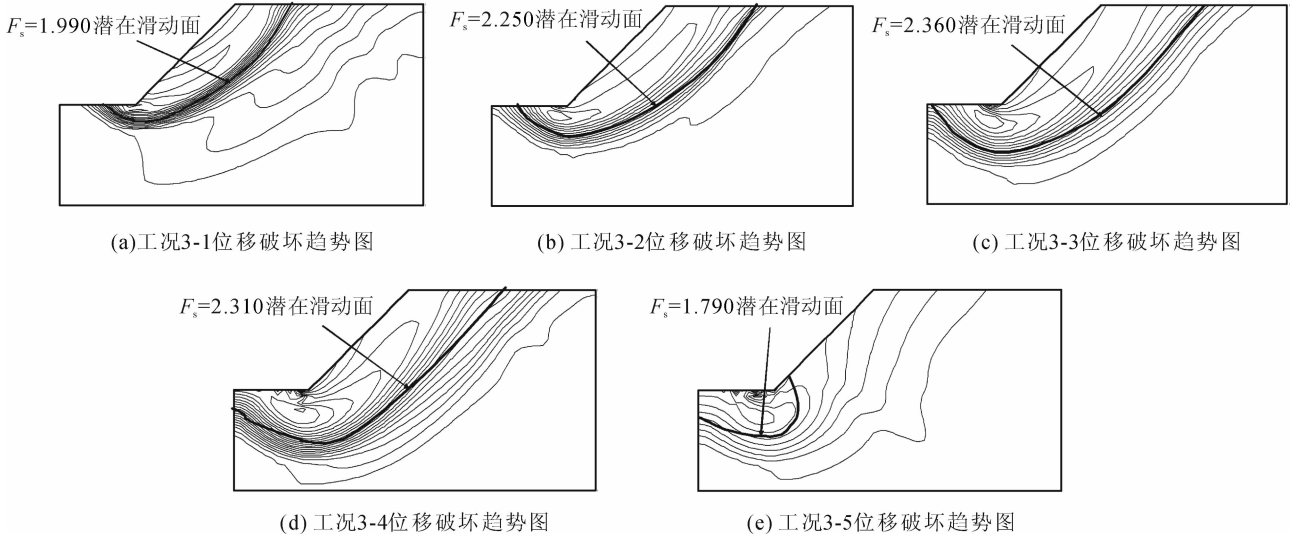


图8 工况3中边坡位移破坏趋势图

Fig. 8 The trend figures of displacement failure in case 3

当坡面、坡顶同步施加较小的均布荷载时,边坡的安全系数较大,边坡稳定且潜在滑动面位置较深;当坡面、坡顶同步施加的均布荷载增大至1 800 kPa时,边坡的安全系数为1.790,边坡稳定且潜在滑动面位置较深,位于坡脚底部。

对比分析表明,随着坡面、坡顶均布荷载的同步增加,边坡的安全系数并不是呈现单一上升或下降的趋势,而是在局部范围内有明显上升,由于边坡同时受到坡面坡顶的约束变形作用,此时边坡更加趋于稳定;但是当坡面坡顶荷载增加到一定程度时,安全系数又逐渐下降,边坡失稳表现为坡底地基变形较大且较为集中,仍可能发生坡底局部失稳破坏。

### 3 结论

通过土质边坡分析了坡面、坡顶加载变化对边坡失稳破坏模式的影响规律,可以得出如下结论:

1) 坡面、坡顶超载作用可能会导致土质边坡发生失稳破坏,但不同超载作用下,土质边坡的破坏模式有所不同。

2) 坡顶超载对于边坡的稳定性影响较大,在坡顶超载作用下,边坡的安全系数随着坡顶荷载的增加而降低,潜在滑动面上移,边坡失稳逐渐发展为局部失稳破坏模式。

### 2.5 坡面、坡顶同步施加荷载时边坡稳定性分析

图8(a)~(e)为边坡坡面、坡顶同步施加均布荷载100~1 800 kPa的位移破坏趋势图,通过计算得到的边坡安全系数依次为1.990、2.250、2.360、2.310、1.790,边坡安全系数先逐步增大后逐步减小,边坡坡底地基变形较大且较为集中。

3) 在坡面超载作用下,当坡面荷载较小时,边坡的安全系数较大,边坡稳定且潜在滑动面位置较深;当荷载较大时,安全系数降低,潜在滑动面上移,坡顶可能会发生局部失稳破坏。

4) 坡面、坡顶同步施加均布荷载,在一定范围内使得边坡更加趋于稳定,但是当荷载达到一定程度时,安全系数也会降低,坡底地基土体变形较大且较为集中,可能发生坡底局部失稳破坏。

#### 参考文献:

- [1] 李骞, 李宁. 基于参数敏感性反演分析的岩质高边坡稳定性研究 [J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(2): 132-137.  
Li Qian, Li Ning. Stability research on the high rock slope based on the back analysis of parameter accuracy [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(2): 132-137.
- [2] 刘钊, 柴军瑞, 陈兴周, 等. 库水位骤降时坝体渗流场及坝坡稳定性分析 [J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 466-470.  
Liu Zhao, Chai Junrui, Chen Xingzhou, et al. An analysis of the seepage field and the stability of dam slope during rapid drawdown of reservoir water table [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011,

- 27(4): 466-470.
- [3] 姜玉平, 陈征宙, 毕港, 等. 基于极限分析法的边坡临界高度及稳定性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 43-46.
- Jiang Yuping, Chen Zhengzhou, Bi Gang, et al. Research on critical height and stability of slopes based on upperbound limit analysis method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39(2): 43-46.
- [4] 张国祥, 刘宝琛. 潜在滑移线法分析边坡滑动面及稳定性 [J]. 土木工程学报, 2002, 35(6): 79-81.
- Zhang Guoxiang, Liu Baochen. Analysis of slope slip surface and stability by the potential slip surface theory [J]. Chinese Journal of Civil Engineering Journal, 2002, 35(6): 79-81.
- [5] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and nonassociated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 691-689.
- [6] Ugai K. A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM [J]. Soils and Foundations, 1989, 29(2): 190-195.
- [7] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite element [J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [8] 李荣建, 刘军定. 在边坡局部失稳中传递系数法与强度折减法的计算比较 [J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(3): 260-265.
- Li Rongjian, Liu Junding. The calculation comparison of transfer coefficient method with strength reduction finite element method in slope local instability [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(3): 260-265.
- [9] 李荣建, 于玉贞, 李广信. 强度折减有限元法在非饱和土边坡稳定分析中的应用 [J]. 水利水电技术, 2006, 37(3): 42-45.
- Li Rongjian, Yu Yuzhen, Li Guangxin. Application of strength reduction FEM to analysis on stability of unsaturated soil slope [J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2006, 37(3): 42-45.
- [10] 李荣建, 郑文, 邵生俊, 等. 非饱和土边坡稳定分析中强度折减法与条分法的比较 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 8(9): 207-214.
- Li Rongjian, Zheng Wen, Shao Shengjun, et al. Comparison analyses on stability of unsaturated soil slopes by strength reduction FEM and slice method [J]. Journal of Northwest Agriculture & Forestry University(Natural Science Edition), 2010, 8(9): 207-214.
- [11] 年廷凯, 徐海洋, 李东晨, 等. 超载作用下边坡-抗滑桩体系稳定性及土拱效应研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(2): 177-182.
- Nian Tingkai, Xu Haiyang, Li Dongchen, et al. Research on stability and soil arching effect of slope-pile system under uniform surcharge [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(2): 177-182.
- [12] 蒋青青, 陈占锋, 赖伟明, 等. 考虑坡顶超载情况下的边坡剪胀效应分析 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(2): 498-503.
- Jiang Qingqing, Chen Zhanfeng, Lai Weiming, et al. Dilation effect of slope under over-loading on top of its surface [J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2009, 40(2): 498-503.
- [13] 陈力华, 靳晓光. 有限元强度折减法中边坡三种失效判据的适用性研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 136-146.
- Chen Lihua, Jin Xiaoguang. Study on the applicability of three criteria for slope instability using finite element strength reduction method [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 136-146.
- [14] 李荣建, 于玉贞, 邓丽军, 等. 非饱和土边坡稳定分析方法探讨 [J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2060-2064.
- Li Rongjian, Yu Yuzhen, Deng Lijun, et al. Discussion on stability analysis of unsaturated soil slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2060-2064.
- [15] 李荣建, 郑文, 王莉平, 等. 非饱和土边坡稳定性分析方法研究进展 [J]. 西北地震学报, 2011, 33(S2): 322-326.
- Li Rongjian, Zheng Wen, Wang Liping, et al. Progress and developing trend on stability analyses of unsaturated soil slope [J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(S2): 322-326.

(责任编辑 李斌)