

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.023

# 基于滑移线场理论的地震作用下 土质边坡稳定性分析

龚文惠, 陈训龙, 邱金伟, 王 佳, 钟旭晗

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 在土质边坡稳定性分析中, 滑裂面的确定至关重要, 而当前普遍采用的圆弧滑动面法会产生较大误差。采用滑移线场理论确定滑裂面, 并结合动力有限单元法, 提出了一种地震作用下土质边坡稳定性的分析方法。首先求出地震作用下土坡的应力场, 运用滑移线场法搜索得到不同时刻土坡的临界滑移线, 然后再根据临界滑移线上的应力分布求出对应于该滑移线的安全系数, 以最小平均安全系数作为评价指标, 实现地震作用下土质边坡的稳定性分析, 最后结合工程实例, 求得不同时刻的土坡临界滑移线及其对应的安全系数, 并对该土坡的动力抗震稳定性进行了评价。分析表明: 安全系数小于 1.2 的滑移线共同构成了地震作用下土坡的剪切带, 与土坡的塑性区吻合, 验证了文中分析方法的合理性。

**关 键 词:** 土质边坡; 稳定性; 滑移线场; 地震作用; 最小平均安全系数

中图分类号: TU 413.6+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 06-1733-06

## Seismic stability analysis of soil slope using theory of slip line field

GONG Wen-hui, CHEN Xun-long, QIU Jin-wei, WANG Jia, ZHONG Xu-han

(School of Civil Engineering & mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract:** It is important to locate the slip surface in stability analysis of soil slope. The current method, circular slip surface method, results in a major error in the simulation analysis. In this paper, a method for seismic stability analysis of soil slope is proposed based on the theory of slip line field and dynamic finite element. Firstly, the stress field of soil slope is determined under seismic loading. Then, the method of slip line field is used to search the critical slip line under different conditions, and safety factor for every slip line is achieved. Finally, the seismic stability analysis of soil slope is quantified by the minimum mean safety factor. The proposed procedure is used to determine the critical slip lines and safety factors of an example slope at different moments. Seismic stability of the soil slope is evaluated by using the minimum mean safety factor. The study indicates that the shear band is composed of the slip lines with safety factors below 1.2. The shear band is consistent with the plastic zone of soil slope.

**Keywords:** soil slope; stability; slip line field; seismic loading; the minimum mean safety factor

## 1 引 言

滑坡是一种常见的地质灾害, 常常给工农业生产以及人民生命财产造成巨大损失, 甚至是毁灭性的灾难。诱发滑坡的因素很多, 其中地震是最主要的因素之一。自汶川大地震后, 地震作用下的土质边坡稳定性分析已成为国内岩土工程界的重要课题, 目前地震作用下的土质边坡稳定性研究的主要

方法有拟静力法和动力有限元分析法<sup>[1-2]</sup>。拟静力法对地震作用过于简化, 忽略了地震大小和方向上的突变, 因此, 计算得到的安全系数很难较真实地反映土质边坡的稳定性。而动力有限元法通过导入地震加速度-时程曲线进行应力求解, 克服了拟静力法的缺陷, 能相对客观真实地反映出土体在地震作用下的响应机制, 且得到土体的应力场, 是比较理想的分析方法。

收稿日期: 2015-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51278217)。

This work was supported by the Nation Science Foundation of China (51278217).

第一作者简介: 龚文惠, 女, 1966 年生, 博士, 教授, 主要从事边坡防灾减灾和岩土工程可靠度方面的研究。E-mail: gwh87806869@163.com

通讯作者: 陈训龙, 男, 1989 年生, 博士, 主要从事岩土工程可靠度研究。E-mail: chenxl1989@hust.edu.cn

进行地震作用下土质边坡稳定性分析需要解决的一个重要问题就是临界滑裂面的确定。传统的土质边坡稳定性分析常用圆弧滑动法来确定滑裂面<sup>[3]</sup>。然而,实际的滑裂面一般并非圆弧,当滑裂面的形状是任意时,传统方法就不适用了。目前,有两种滑裂面的搜索方法,即数学规划法<sup>[4]</sup>和滑移线场法<sup>[5-9]</sup>。数学规划法首先确定整个土坡范围内的潜在滑裂面,再运用数学规划法进行最危险滑裂面的搜索,该方法虽然在一定程度上能求出土坡临界滑裂面,但用滑裂面位置表示的安全系数的泛函在应力场中不仅具有无穷多个局部极值,而且由于实际的土坡不均匀性或材料的各向异性导致其不连续,脱离了土坡稳定性计算过程的物理本质。滑移线场法是根据平衡方程、屈服条件和应力边界条件求出土坡塑性区以及弹性区的应力、位移速度分布,进而进行滑裂面的搜索,避开了数学规划法的诸多不利因素。

本文采用动力有限单元法求解地震作用下土坡的应力场,运用滑移线场理论搜索土坡的最危险滑裂面,并计算每条滑裂面相应的安全系数,从而进行地震作用下的土质边坡稳定性分析。

## 2 地震反应的动力有限元计算方法

在土质边坡的地震反应分析中,视土体为弹塑性体,本构关系采用的是理想弹塑性本构关系,其动力平衡方程为<sup>[10]</sup>

$$[M]\{\ddot{\mathbf{u}}(t)\} + [C]\{\dot{\mathbf{u}}(t)\} + [K]\{\mathbf{u}(t)\} = -[M]\{\ddot{\mathbf{u}}_g(t)\} \quad (1)$$

式中:  $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$ 分别为总质量矩阵、总阻尼矩阵和总刚度矩阵;  $\{\ddot{\mathbf{u}}(t)\}$ 、 $\{\dot{\mathbf{u}}(t)\}$ 和 $\{\mathbf{u}(t)\}$ 分别为土体的节点加速度、速度和位移列阵;  $\{\ddot{\mathbf{u}}_g(t)\}$ 是地震加速度列阵。总矩阵 $[C]$ 由各单元阻尼阵组成,单元阻尼阵 $[C]^e$ 采用瑞利阻尼,计算公式为

$$[C]^e = \alpha_i [M]^e + \beta_i [K]^e \quad (2)$$

式中:  $\alpha_i$ 为单元 Alpha 阻尼;  $\beta_i$ 为单元 Beta 阻尼。由下式计算<sup>[11]</sup>

$$\alpha_i = 2\lambda_i \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (3)$$

$$\beta_i = 2\lambda_i \frac{1}{\omega_1 + \omega_2} \quad (4)$$

式中:  $\omega_1$ 为土体的基频;  $\omega_2$ 为土体的二阶自振频

率;  $\omega_1 = n\omega_2$ ,  $n$ 为大于 $\omega_c/\omega_1$ 的奇数,其中 $\omega_c$ 为地震波的主频;  $\lambda_i$ 为土体单元的阻尼比。

土体的阻尼比和动剪切模量  $G$  采用文[12]介绍的方法选取。

## 3 土质边坡滑动面的滑移线场搜索方法

在平面应变问题中,平面上任一点都存在着两个相互垂直的主应力。把表示各点主应力方向的线段连接起来,就得到2簇相互正交的曲线,称为主应力迹线,如图1中的1-1和2-2。当材料处于塑性状态时,每一点都存在两个剪切破坏面,把各点的剪切破坏面(或称滑移面)连接起来,又可以得到2簇曲线,称为滑移线,如图1中 $\alpha$ - $\alpha$ 和 $\beta$ - $\beta$ 。滑移线上一点的切线方向就是相应点的滑移面方向。 $\theta$ 为第1主应力迹线切线与 $x$ 轴的夹角。

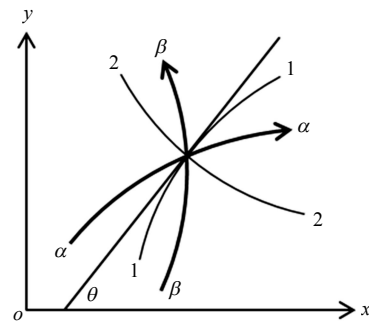


图1 滑移面和主应力迹线

Fig.1 Slip lines and principal stress traces

Mohr-Coulomb 材料的两簇滑移线相互夹角为  $2\mu = \pi/2 - \varphi$ , 与主应力迹线的夹角为  $\mu$ 。以第1主应力  $\sigma_1$  为基线,顺时针方向与基线成锐角的称为  $\alpha$  线,逆时针与基线成锐角的称为  $\beta$  线。 $\alpha$  线和  $\beta$  线的微分方程式<sup>[13]</sup>分别为

$$\frac{dy}{dx} = \tan(\theta - \mu) \quad (5)$$

$$\frac{dy}{dx} = \tan(\theta + \mu) \quad (6)$$

由于滑移线场理论是建立在塑性力学基础上的,只合适于塑性区。弹塑性有限元计算则同时考虑了弹性区和塑性区。利用弹塑性有限元计算弹性区会使得计算结果偏小。计算时将弹性区的  $\mu$  值调整为  $\mu_c$ <sup>[2]</sup>

$$\text{弹性区: } \mu_c = \frac{\pi}{4} - \frac{\theta_{\max}}{2} \quad (7)$$

其中

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + c \cot \varphi} \quad (8)$$

式中:  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  分别为第一主应力和第三主应力;  $c$  和  $\varphi$  分别为黏聚力和内摩擦角。

经典滑移线场理论隐含着一个假定, 即材料服从相关联的流动法则, 材料的膨胀角  $\psi$  等于材料的内摩擦角  $\varphi$ 。对于服从 Mohr-Coulomb 准则的岩土介质, 采用相关联的流动法则会夸大剪胀的作用。真实土体的膨胀角要比其内摩擦角低很多<sup>[14]</sup>。并且, 膨胀角不等于内摩擦角时, 滑移线不再与应力特征线重合<sup>[15]</sup>。计算时应将  $\mu$  值调整为  $\mu_p$

$$\text{塑性区: } \mu_p = \frac{\pi}{2} - \frac{\psi}{2} \quad (9)$$

此时, 滑移线上的正应力和剪应力具有类似于 Mohr-Coulomb 准则的关系

$$F = \tau^* - c^* - \sigma_n^* \tan \varphi^* = 0 \quad (10)$$

式中: 强度参数  $c^*$ 、 $\varphi^*$  和 Mohr-Coulomb 准则中的  $c$  和  $\varphi$  具有相似的意义, 它们之间的关系为

$$\frac{c^*}{c} = \frac{\tan \varphi^*}{\tan \varphi} = \frac{\cos \psi \cos \varphi}{1 - \sin \psi \sin \varphi} \quad (11)$$

运用动力有限元方法可得到所有节点的应力, 通过上述方法可计算得到每一节点的滑移线方向, 从任一不在边界上的点出发, 顺着该点的滑移线方向向坡体后方追踪相交于下一条搜索路径, 如果交点恰好在节点上, 则顺着该节点滑移线方向继续追踪, 如果交点不在节点上, 则需利用交点相邻两节点滑移线方向进行线性插值获取该交点的滑移线方向。再沿着插值得到的方向继续追踪, 直至达到坡面, 最终形成一条完整的滑移线。选取不同的起点, 得到不同的滑移线, 最终形成滑移线场。

## 4 土质边坡安全系数的计算方法

通过动力有限元法可求出各单元节点的应力  $\sigma_{xi}$ 、 $\sigma_{yi}$  和  $\tau_{xyi}$ 。如图 2 所示, 将滑裂面划分成若干

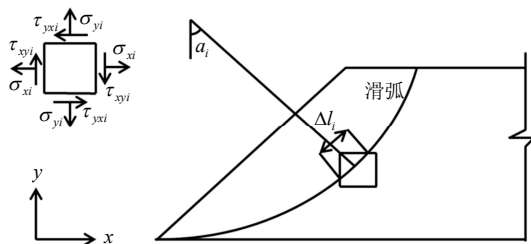


图2 滑弧示意图  
Fig.2 Sketch of sliding surface

小弧段  $\Delta l_i$ , 小弧段  $\Delta l_i$  上的应力用圆弧中点的应力代表, 设弧段  $\Delta l_i$  与示意图上铅垂线的夹角为  $a_i$ 。

则作用在弧段上的法向应力  $\sigma_{ni}$  和剪应力  $\tau_i$  分别为

$$\sigma_{ni} = \frac{1}{2}(\sigma_{xi} + \sigma_{yi}) - \frac{1}{2}(\sigma_{xi} - \sigma_{yi}) \cos 2a_i + \tau_{xyi} \sin 2a_i \quad (12)$$

$$\tau_i = -\tau_{xyi} \cos 2a_i - \frac{1}{2}(\sigma_{xi} - \sigma_{yi}) \sin 2a_i \quad (13)$$

式中:  $a_i = \theta_i - \mu_i$ 。

将滑裂面上所有小弧段的剪应力和抗剪强度分别求出后, 累加得到沿着滑动面的总剪切力和抗剪力。则土质边坡的动力安全系数  $K_s$  为

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i + \sigma_{ni} \tan \varphi_i) \Delta l_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i \Delta l_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \int \tau_{fi} dl}{\sum_{i=1}^n \int \tau_i dl} \quad (14)$$

由于地震作用下, 土质边坡的安全系数变化较快, 在某一瞬间, 安全系数可能低于规范规定的容许值  $[K_s]$ , 但在紧接着的下一时刻, 由于地震加速度方向的改变, 安全系数又可得到部分恢复。因此, 单凭最小安全系数无法评价该土坡是否安全, 本文参考文献[16]介绍的方法来计算土质边坡的最小平均安全系数  $\bar{K}_s$  为

$$\bar{K}_s = K_{s0} - 0.65(K_{s0} - K_{smin}) \quad (15)$$

式中:  $K_{s0}$  和  $K_{smin}$  分别代表静力作用下的安全系数和地震作用下的最小安全系数。

## 5 算例

### 5.1 计算条件和参数

和平互通为贵州省道真至新寨高速和溪至流河渡段 S2 标段的一座互通, 选取其中一段路堤土质边坡进行分析, 该段路堤土质边坡由黏土组成, 根据其坡高以及破坏后果, 将其安全等级划分为二级<sup>[17]</sup>, 其计算模型图如图 3 所示。该地区抗震设防烈度为Ⅶ度。

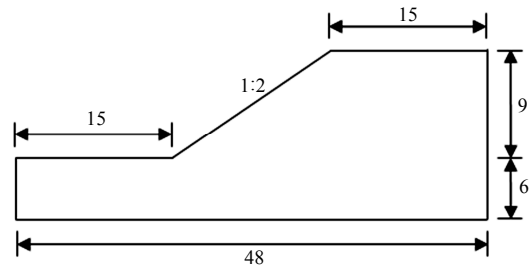


图3 土质边坡计算断面图(单位: m)  
Fig.3 The cross section of soil slope profile (unit: m)

本文选取 Landers 地震对该土质边坡进行稳定性分析, 该地震震级为 7.5 级, 取该地震前 16 s, 其加速度-时程曲线见图 4, 通过计算软件导入地震波加速度-时程曲线, 不考虑竖向地震作用。动力计算是在静力计算的基础上进行的。土体的重度为  $19.05 \text{ kN/m}^3$ , 黏聚力为  $22.83 \text{ kPa}$ , 内摩擦角为  $10.27^\circ$ , 弹性模量为  $20 \text{ MPa}$ , 泊松比为  $0.33$ 。黏土动力计算参数见表 1。

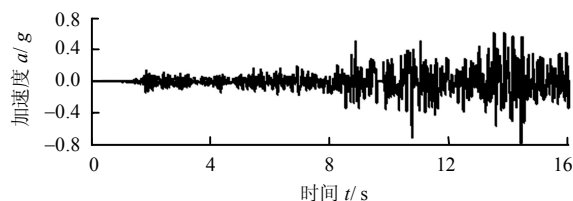


图 4 地震波加速度-时程曲线

Fig.4 Seismic acceleration time history

表 1 黏土动力参数与剪应变关系  
Table 1 The relation of soil dynamic properties and shear strain

剪应变 $\gamma / 10^{-4}$	$G/G_{\max}$	$\lambda$	剪应变 $\gamma / 10^{-4}$	$G/G_{\max}$	$\lambda$
0.05	0.995 4	0.034 2	5.00	0.634 7	0.128 4
0.10	0.989 7	0.040 8	10.00	0.464 7	0.170 3
0.50	0.946 5	0.060 8	50.00	0.147 8	0.240 2
1.00	0.897 5	0.071 6	100.00	0.079 8	0.254 3

## 5.2 动力有限元分析模型

有限元模型的建立是服务于滑移面搜索的。如图 5 所示, 水平方向每条线之间的距离为  $b$ , 垂直方向每条线之间的距离为  $d$ 。 $b$  和  $d$  的选取取决于计算精度和计算速度, 如果取值较大, 最终搜索到的滑移面将严重偏离实际情况, 如果取值较小, 计算数据会很庞大, 计算过程将会很长。本文选取  $b = 0.3 \text{ m}$ ,  $d = 0.3 \text{ m}$ , 四边形八节点有限单元, 局部采用三角形单元, 边界为无限边界。通过有限元计算程序可得到每个节点的应力。

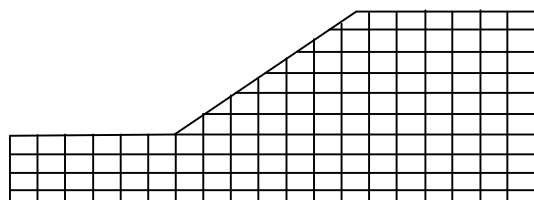


图 5 动力有限元计算模型

Fig.5 The dynamic finite element calculation model

## 5.3 滑裂面的搜索结果及安全系数的求解

土坡在静荷载作用下, 可以搜索得到滑移线场如图 6 所示, 每一条滑移线对应的安全系数均在图

中标明。

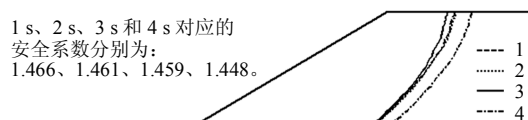
滑移线对应的安全系数从  
上至下依次是:  
1.487、1.478、1.471、  
1.470、1.476、1.484。



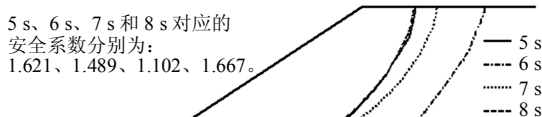
图 6 静荷载作用下的滑移线场和临界滑裂面

Fig.6 Slip line field and slip surfaces under static loads

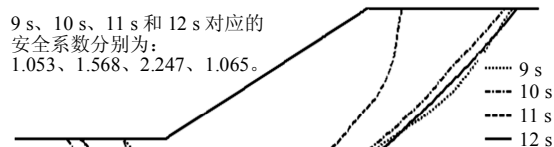
土坡在地震荷载作用下, 随着地震的持续, 土坡潜在滑裂面不断变化, 受地震影响较大。每隔 1 s 选取一个时间点对土坡进行最危险滑裂面的搜索, 并求取该滑裂面的安全系数。其计算结果如图 7 所示。



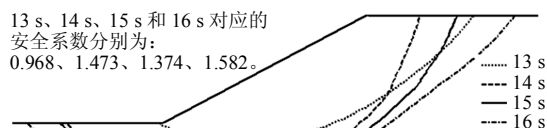
(a) 1~4 s



(b) 5~8 s



(c) 9~12 s



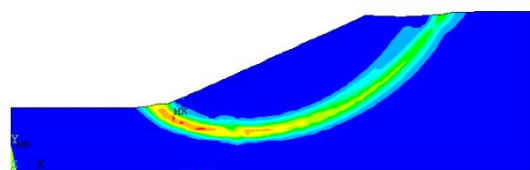
(d) 13~16 s

图 7 不同时刻土坡最危险滑动面

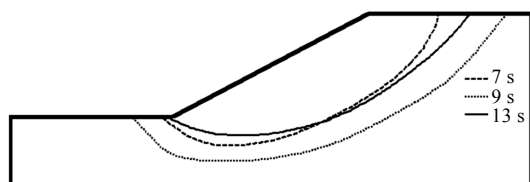
Fig.7 Unstable sliding planes of soil slop at different moments

前期,地震加速度变化较小,土坡最危险滑动面基本无变化,且在静力作用下的安全系数附近震荡变化,变化幅度较小,受地震影响微弱。后期,随着地震加速度变化增大,地震作用下土坡最危险滑动面的变化呈现不规则性的变化,受地震影响较为明显。同时,由图7可以看出,安全系数低于1.2的分别是7、9 s和13 s(见图7(b)~7(c)),其对应的滑裂面均位于坡脚处。因而,在位于震区的实际工程中,应在坡脚处做好保护措施。

图8为算例土坡的塑性区分布与搜索得到的临界滑裂面的关系,图示临界滑裂面由地震作用7、9、13 s时刻土质边坡的最危险滑裂面组成,这3个时刻土坡的安全系数接近于1。从图中可以看出,土坡的临界滑裂面正好贯穿于土坡的塑性区,说明了本文搜索的滑裂面的合理性。该3条滑移线安全系数相差不多,并且都位于塑性区内,沿每条滑移线均有可能发生实际滑移,3条滑移线构成了土坡的剪切带。



(a) 地震作用下土坡的塑性区分布



(b) 地震作用下土坡的剪切带

图8 地震作用下土坡的塑性区分布与剪切带

Fig.8 The plastic zone distribution and shear zone of the soil slop under seismic loading

图9给出了地震作用下土坡的安全系数-时程

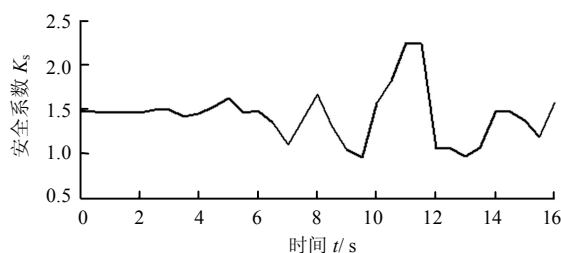


图9 安全系数时程曲线

Fig.9 The safety coefficient curve

曲线。静力下的安全系数为1.470,最小的安全系数为0.961,发生时间为9.50 s。最终求得地震作用下土质边坡的最小平均安全系数为1.139,达不到规范规定的1.2,表明土坡有可能发生破坏,与上述求解中土坡出现塑性区和剪切带相吻合。

## 6 结 论

(1) 地震作用下土质边坡的滑裂面受地震影响较大,当地震加速度变化较小时,滑裂面与静力作用下的滑裂面接近,当地震加速度变化较大时,滑裂面在整个土坡内震荡,变化幅度大。

(2) 地震作用下土质边坡最危险滑裂面一般发生在坡脚处,故在震区的实际工程中,应在坡脚处做好防震保护措施。

(3) 土质边坡破坏并非发生在一个面上,而是发生在具有一定厚度的剪切带上。地震作用下土质边坡的剪切带由不同时刻下的安全系数小于规范规定的容许值 $[K_s]$ 的滑移线共同构成。按本文方法可得出地震过程中土质边坡的剪切带以及安全系数,可以为边坡的抗震设防提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] KAR V R, PANDA S K. Thermoelastic analysis of functionally graded doubly curved shell panels using nonlinear finite element method[J]. **Composite Structures**, 129: 202—212.
- [2] MACLEOD A R, SIMPSON AHRW, PANKAJ P. Reasons why dynamic compression plates are inferior to locking plates in osteoporotic bone: a finite element explanation[J]. **Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering**. 2014, 18(16): 1818—1825.
- [3] TSUCHIDA T, ATHAPATHTHU, AMRG. Practical slip circle method of slices for calculation of bearing capacity factors[J]. **Soils and Foundations**, 2014, 55(2): 484—485.
- [4] 邵龙潭, 陈璧宏. 确定边坡最危险滑裂面的广义数学规划法[J]. **计算数学**, 1989, (增刊): 313—318.  
SHAO Long-tan, CHEN Bi-hong. General mathematics programme to determinate the slop surface in slope[J]. **Chinese Journal of Computational Mathematics**, 1989, (Supp.): 313—318.
- [5] 张国祥, 刘新华, 魏伟. 二维边坡滑动面及稳定性弹塑

- 性有限元分析[J]. 铁道学报, 2003, 2: 79—83.
- ZHANG Guo-xiang, LIU Xin-hua, WEI Wei. Analysis of elastic-plastic finite element for two dimension slope slip surface and stability[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2003, 2: 79—83.
- [6] 朱以文, 吴春秋, 蔡元奇. 基于滑移线场理论的边坡滑裂面确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 15: 2609—2616.
- ZHU Yi-wen, WU Chun-qiu, CAI Yuan-qi. Determination of slip surface in slope based on theory of slip line field[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 15: 2609—2616.
- [7] 王昌业. 基于滑移线法的边坡临界滑动面搜索方法研究[D]. 长安大学, 2013.
- WANG Chang-ye. The research on the method about tracking the critical sliding surface of the slope with the slip line theory[D]. Chang'an University, 2013.
- [8] 王宁. 基于弹塑性有限元的边坡潜在滑动面搜索与稳定系数计算研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- WANG Ning. The research on tracking the critical sliding surface and the calculation of the factor base on the elastic-plastic finite element[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [9] 李凯, 陈国荣. 基于滑移线场理论的边坡稳定性有限元分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 2: 191—195.
- LI Kai, CHEN Guo-rong. Finite element analysis of slope based on slip line theory[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2010, 2: 191—195.
- [10] 王元汉, 李丽娟, 李银平. 有限元法基础与程序设计[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- WANG Yuan-han, LI Li-juan, LI Yin-ping. The basic finite element and program design[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2001.
- [11] HUDSON M. User manual for QUAD4m: A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base[D]. Berkeley: University of California, 1994.
- [12] 袁晓铭, 孙锐, 孙静. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 4: 133—139.
- YUAN Xiao-ming, SHUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils[J]. **Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2000, 4: 133—139.
- [13] 俞茂宏, 杨松岩, 刘春阳. 统一平面应变滑移线场理论[J]. 土木工程学报, 1997, 2: 14—26+41.
- YU Mao-hong, YANG Song-yan, LIU Chun-yang, et al. Unified plane strain theory of slip line field[J]. **China Civil Engineering Journal**, 1997, 2: 14—26+41.
- [14] ISHIHARA K, KABILAMANY H. Stress dilatancy and hardening laws for rigid granular model of sand[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1990, 28(9): 66—77.
- [15] DAVIS E H. Theories of plasticity and the failure of soil masses[C]. **Soil Mechanics**, 1968: 341—380.
- [16] 刘汉龙, 费康, 高玉峰. 边坡地震稳定性时程分析方法[J]. 岩土力学, 2003, 4: 553—556+560.
- LIU Han-long, FEI Kang, GAO Yu-feng. Time history analysis method of slope seismic stability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 4: 553—556+560.
- [17] 重庆市建设委员会. GB50330—2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- The chongqing municipal construction commission. GB50330—2002 construction Side slope Engineering technology Standard[S]. Beijing: China building Industry Press, 2002.