

doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0079

Jiao Yun, Wang Guoya. The impact assessment of earthquake on landslide stability—A case study of landslides in Nanqiao Village, Zhouqu, Gansu [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 292–700. [焦贇, 王国亚. 地震荷载对滑坡稳定性的影响评估——以甘肃舟曲南桥滑坡为例 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 692–700.]

地震荷载对滑坡稳定性的影响评估 ——以甘肃舟曲南桥滑坡为例

焦 贇, 王国亚

(甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 通过实现 Druker-Prager 屈服准则与 Mohr-Coulomb 理论等效原则, 采用 ANSYS 软件模拟, 分别就自重和暴雨状态下施加地震荷载构成不同工况组合, 分析评价了地震荷载对甘肃舟曲南桥滑坡稳定性的影响. 以有限元强度折减法为基础, 分别在不同地震设防烈度等级下, 通过改变折减系数计算水平位移最大值和塑性区应变最大值, 以出现突变点、计算不收敛和塑性区贯通来判别土体破坏, 得到不同地震设防烈度下滑坡稳定系数. 结果表明: 在自重+地震与暴雨+地震工况条件下, 稳定系数差值为 0.25~0.32, 为 2 种工况的相互校核和理论推算提供了参考. 有限元强度折减法与极限平衡法的对比分析表明, 二者误差以小于 5% 为主, 考虑地震工况比不考虑地震工况的滑坡稳定系数下降 13%~16%, 进一步验证了数值模拟计算的精准度和可靠性以及滑坡治理中抗震设防的重要性. 计算结果符合实际, 在科研和实际设计中值得推广.

关键词: Druker-Prager 屈服准则; 地震作用; 有限元强度折减法; 滑坡稳定性; 舟曲南桥滑坡

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A

0 引言

地震作用是诱发滑坡灾害发生的重要因素之一, 在滑坡治理工程中, 因为对地震作用缺乏充分考虑或考虑方式错误而导致治理失败的现象屡见不鲜. 吴永等^[1]根据 2008 年汶川地震震后调查发现, 大量滑坡治理工程结构发生变形破坏, 导致工程失效, 主因是对地震作用响应机制认识尚不清楚. 史石荣等^[2]在研究地震动力对边坡的破坏时, 基于静力有限元强度折减系数法, 既考虑边坡的剪切破坏又考虑了边坡的拉破坏, 提出对边坡抗拉强度同时进行折减计算的新思路. 侯超群等^[3]在分析边坡的稳定性影响中提出同时考虑水平地震力和竖向地震力影响, 以二者最不利组合分析边坡稳定性. 李元雄等^[4]和范昭平等^[5]以动应力时程分析方法与静力方法做对比, 得出动安全系数和采用动应力时程分

析方法的相对可靠性.

20 世纪 90 年代以来, 随着计算机信息技术的快速发展, 地理信息系统(GIS)在滑坡和泥石流的危险性评价^[6]以及利用卫星遥感影像监测滑坡泥石流的作用日益增强^[7]. 在平面应变条件下, 把 Druker-Prager(简称 D-P)屈服准则实现与 Mohr-Coulomb(简称 M-C)理论的等效替换, 并实现 D-P 系列准则之间的等价转换, 这使许多复杂的岩土工程问题可借助有限元计算软件 ANSYS 而变得直观和便捷^[5, 8–16]. 利用有限元强度折减法在边(滑)坡稳定性分析中应用广泛并得到验证, 如郑颖人等^[10]把有限单元强度折减用于分析土质和岩质边坡稳定性, 得到理想的计算精度; 吕庆等^[13]把强度折减法与极限平衡法在边坡稳定分析结果作对比, 相对差小于 3%; 黄显贵等^[14]利用强度折减法进行滑坡稳定性分析, 为今后滑坡分析开辟了新途径.

收稿日期: 2013-04-18; 修订日期: 2013-05-20

基金项目: 甘肃省科学院应用研究与开发基金项目(2012-JK-05)资助

作者简介: 焦贇(1963—), 男, 甘肃通渭人, 副研究员, 1988 年毕业于桂林理工大学, 现主要从事地质灾害与岩土工程研究.

E-mail: jiaoyun22@tom.com

甘肃省是我国地质灾害最发育的省份之一，境内自然条件复杂，致灾因素多，赵成等^[17]利用层次分析方法建立了各种致灾作用的统一权重，利用模糊数学评价方法评价分区，比较好地反映了甘肃省地质灾害发育程度。在舟曲县城灾后重建泥石流防治工程中，利用三维可视化技术进行了应用研究^[18]。舟曲南桥滑坡为一老滑坡，近 20 多年来一直有变形活动迹象，在 20 世纪 90 年代就开始分段实施治理和研究。2008 年“5.12”汶川地震加剧了其变形，局部地表裂缝加长加宽，深部地层蠕动迹象明显，威胁到附近南桥村约 2 000 人的生命财产安全。2010 年的“8.8”舟曲特大山洪泥石流灾害^[19]发生后该滑坡又被确定为重大地质灾害隐患点和重点治理对象，同时，开展了该滑坡活动特性及分析方法的研究。本研究在舟曲南桥滑坡地震作用分析中引入有限元强度折减法数值理论，以 ANSYS 软件模拟分析，研究地震荷载对其稳定性影响的分析方法以及不同地震力作用下的影响差异，通过与极限平衡分析法对比，提出有限元强度折减法在舟曲南桥滑坡以及类似滑坡分析中的适用性和优越性。

1 研究区概况

舟曲南桥滑坡为一老滑坡，位于舟曲县县城的白龙江南岸的山坡地带，属沟谷斜坡残坡积和老滑坡堆积物交汇形成的地貌，坡体较破碎，近 20 多年来有间断性变形迹象。该滑坡在地貌上呈圈椅形，中后缘发育二级平台，长条形，因变形形成二级台阶。主滑方向 5°，纵轴长约 600 m，底宽约 180 m，中部宽约 170 m，上部宽约 100 m，滑坡总面积约 $9.7 \times 10^4 \text{ m}^2$ ；滑体厚度不均匀，一般为 12~20 m，总体积约 $48 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，滑坡顶部海拔 1558 m，

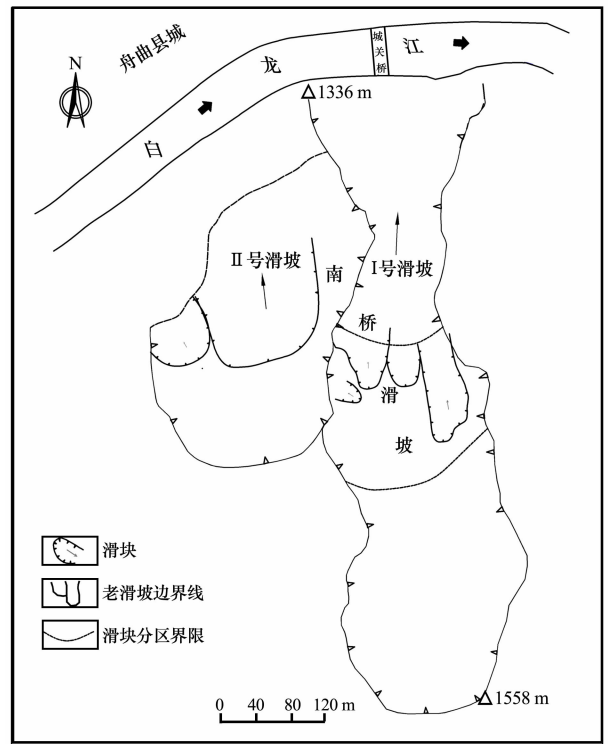


图 1 舟曲南桥滑坡位置图

Fig. 1 The location of landslide in Nanqiao Village, Zhouqu, Gansu

前缘海拔 1 336 m(图 1)。

根据勘查结果，坡体主要组成物质为厚度不等的黄土类土以及黄土和碎石、块石的混合堆积物，滑床为板岩及千枚岩层。具体为 1) 第四系残坡积物 (Q_4^{del+dl})，包括老滑坡堆积体、千枚岩、灰岩、板岩风化残坡积物及风积黄土，以碎块石土为主，中部以碎块石为主，大小混杂，分选性差，厚度变化大，中、下部分布河流冲洪积卵石，是滑体的主要组成物质；2) 志留系中上统白龙江群 (S_{2+3bl}) 和泥盆系中统西汉水群古道岭组 (D_{2g}^2) 炭质板岩、千枚

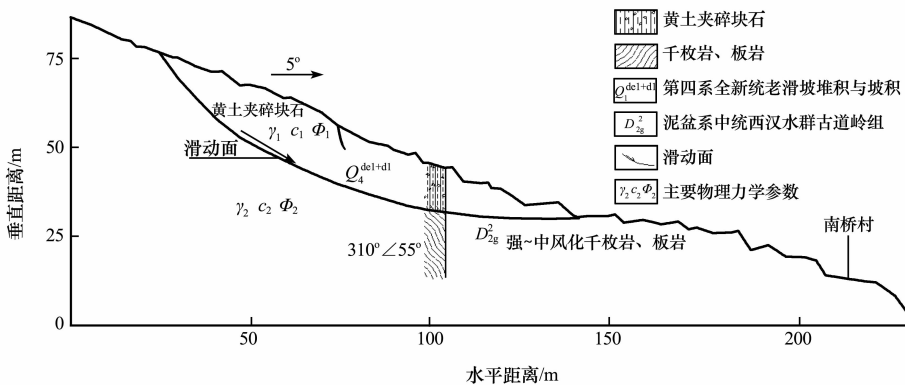


图 2 滑坡工程地质剖面

Fig. 2 The engineering geological vertical section of Nanqiao landslide, Zhouqu

岩、含炭板岩、页岩及灰岩等，灰黑色~紫红色，薄层状构造，产状为 $310^\circ \angle 55^\circ$ ，上部以强风化为主，岩体破碎，是滑体下部和滑床的主要组成物质。本地区抗震设防烈度为 8 度^[20](图 2)。

2 研究方法

本研究通过实现 Druker-Prager(简称 D-P)屈服准则与 Mohr-Coulomb(简称 M-C)理论等效原则，采用 ANSYS 软件模拟，分别就自重和暴雨状态下施加地震荷载构成不同工况组合，分析评价地震荷载对舟曲南桥滑坡稳定性的影响。失稳判据主要根据郑颖人等^[10]的研究成果，即有限元滑(边)坡整体失稳判断应满足 3 个条件：1) 有限元静力计算不收敛；2) 坡体或坡面位移突变；3) 潜在滑移面塑性区贯通，这是必要条件，但非充分条件。

2.1 D-P 屈服准则

传统的 M-C 屈服准则是应用最广和应用时间最长的岩土屈服准则，但在主应力空间是不规则六角形截面的角锥体表面，各屈服面之间存在脊梁或尖顶，在 π 平面上为不等角六边形，因而在该处的屈服条件是不定的，不便于数值计算。1952 年由 Druker-Prager 提出的 D-P 准则亦即广义米赛斯准则，在主应力空间的屈服面为一圆锥面，在 π 平面上为一系列圆(图 3)，不存在尖顶产生的数值计算问题，有限元软件 ANSYS 就采用了该准则中的 DP1 准则，以它来近似代替 Mohr-Coulomb 准则^[9-11]。其屈服函数可表示为：

$$f = aI_1 + \sqrt{J_2} - k \quad (1)$$

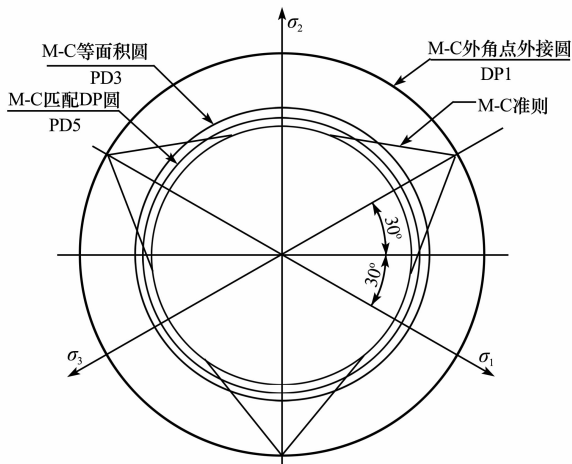


图 3 各屈服准则在 π 平面上的曲线

Fig. 3 The yield surfaces on the deviatoric plane

外角点外接圆 DP1 准则对应的 α 和 k 表达式

分别为：

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}, \quad k = \frac{6c\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} \quad (2)$$

针对平面应变这一特殊条件，如果要使广义米赛斯准则与传统摩尔-库仑准则相匹配，即具有相同的极限承载力或者稳定安全系数，当采用非关联流动法则时，应采用匹配性更高的平面应变圆 DP5 准则，其对应的 α 和 k 表达式分别为：

$$\alpha = \frac{\sin\varphi}{3}, \quad k = c\cos\varphi \quad (3)$$

式中： α 、 k 为与岩土材料 c 、 φ 值相关的常数，取不同的表达式就可以在有限元中实现不同的屈服准则。

对于 D-P 准则之间的等价转换，邓楚健等^[9,16]提出通过调整 D-P 系列准则的 α 和 k 来实现，最简便的方法就是假设它们的 α 和 k 分别相等，可通过调整岩土材料值 c 和 φ 值得以实现。

设 c_0 和 φ_0 为实际岩土参数，若以 DP5 准则进行计算，其 α_5 和 k_5 分别为：

$$\alpha_5 = \frac{2\sin\varphi_0}{3}, \quad k_5 = c_0\cos\varphi_0$$

而 DP1 准则的 α_1 和 k_1 可表示为：

$$\alpha_1 = \frac{2\sin\varphi_1}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi_1)}, \quad k_1 = \frac{6c_1\cos\varphi_1}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi_1)}$$

令 $\alpha_1 = \alpha_5$ ， $k_1 = k_5$ ，联立求解两个等式，得到：

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \arcsin\left(\frac{3\sin\varphi_0}{2\sqrt{3} + \sin\varphi_0}\right) \\ c_1 &= \frac{\sqrt{3}c_0\cos\varphi_0(3-\sin\varphi_1)}{6\cos\varphi_1} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

此时 c_1 和 φ_1 采用 DP1 准则计算与用 c_0 和 φ_0 采用 DP5 准则计算是等价的。这样，在 DP1 中用 c_1 和 φ_1 便实现了 DP5 准则的有限元计算。

2.2 有限元强度折减法原理

有限元强度折减法是 20 世纪 70 年代末由英国科学家 Zienkiewicz 提出的，是通过不断提高强度折减系数来降低坡体岩土抗剪强度参数，并反复试算，直到达到极限破坏状态，程序自动根据弹塑性有限元计算结果得到滑动破坏面，同时得到滑坡的强度储备安全系数。该方法在理论体系上比极限平衡法更严格，它全面满足了静力许可、应变相容以及土体的非线性应力-应变关系^[10,12]。

对于 Mohr-Coulomb 材料，强度折减安全系数可表示为：

$$\tau = \frac{c + \sigma \tan\varphi}{F} = \frac{c}{F} + \sigma \frac{\tan\varphi}{F} = c' + \sigma \tan\varphi' \quad (5)$$

式中: c 、 φ 为岩土材料粘聚力(kPa)和内摩擦角($^{\circ}$); c' 、 φ' 为强度折减后的岩土粘聚力(kPa)和内摩擦角($^{\circ}$); F 为强度折减系数。

3 滑坡稳定性计算

3.1 地震荷载分析

地震对滑坡的影响是通过水平向地震力引起,是坡体因地震而受到的惯性力、土压力和水压力的总称。地震波以纵波和横波的方式在土层中传播,纵波引起坡体竖向震动,横波则引起坡体水平向摆动。大量的边(滑)坡震害现象表明,水平方向的地震作用是引起破坏的主要原因,因此一般只须考虑水平地震作用^[2]。

滑(边)坡抗震稳定性分析中较多采用拟静力法来计算地震力。根据文献[21],用条分法计算地震对边(滑)坡稳定性时,采用下式计算土条重心处的水平地震力 F_{iE} :

$$F_{iE} = \eta \cdot A_g \cdot m_i \quad (6)$$

式中: F_{iE} 为第 i 条块土重心处的水平地震力(kN); η 为水平地震作用修正系数,取值 0.25; A_g 为地震动峰值加速度($m \cdot s^{-2}$); m_i 为第 i 条块土的质量(kg)。

根据文献[22],地震作用时,土体一起与地震加速度产生震动,同时承受了与地震加速度方向相反的惯性力的作用 $m \cdot a$,这里 a 为最大加速度,这个惯性力就是地震力。地震加速度可分解为竖直方向和水平方向两个向量,由于坡体土体在竖直方向有较大的安全储备,因而主要考虑水平方向的地震力作用,按下式计算:

$$P = C_z \cdot k_h \cdot G \quad (7)$$

式中: C_z 为综合影响系数,取 0.25; k_h 为水平地震系数; G 为破裂土体自重(kN)。通过对比式(6)与(7)发现,两式代表的物理意义不同,但在数值上是相同的。这里可引入地震角 α ,对式(7)变换后得到:

$$P = \tan\alpha \cdot G = \tan\alpha \cdot g \cdot m \quad (8)$$

式中: g 为重力加速度($m \cdot s^{-2}$); m 为破裂土体质

量。

在 ANSYS 模型设置荷载约束时,在竖直方向设置重力加速度 $g=9.8 m \cdot s^{-2}$,在水平方向上设置地震加速度,大小按地震角计算,即 $\alpha_n = \tan\alpha \cdot g$ 。

3.2 有限元模型建立

计算软件采用 ANSYS13.0,考虑到滑坡体属纵横比较大的实体,可按平面应变问题来考虑。为方便计算,建立模型时进行如下简化^[23]:

(1) 将坡面形状规则化,减少运算节点。

(2) 只考虑岩土体的自重应力,不考虑构造应力。

(3) 在确定滑坡岩土体材料参数时,将岩土体按工程性状的相似性分成若干工程地质岩组来作为有限元分析中的材料类型,材料类型可分为 2 个单元,分别为滑体(粉土夹碎块石)和滑床(强风化千枚岩),滑带层薄,不单独划分。

(4) 土体材料用二维实体结构单元类型 8 结点 PLANE82 进行模拟。

(5) 由于土体材料变形的非线性特征,本文采用理想弹塑性 DP1 本构模型。

根据滑坡特征和变形状况,选取主滑段局部作为稳定性分析断面。建立模型时,坡脚到右端边界的距离为坡高的 1.5 倍(模型取 75 m),坡顶到左端边界的距离为坡高的 2 倍(模型取 100 m),上下边界总高不低于 2 倍坡高(模型取 100 m)时,网格大小按 $3 m \times 3 m \sim 4 m \times 4 m$ 划分,划分节点数 5 308,单元数 1 701,计算精度较为理想。

3.3 计算参数及边界条件

根据勘查结果,综合确定的岩土体各项参数见表 1。采用双层模型,上部为理想的弹塑性材料,下部为弹性材料。左右边界水平向约束,底边为全约束,上表面为自由面,用重力加速度模拟地层的初始地应力,用水平向地震加速度模拟水平地震荷载作用。

3.4 计算工况

本次稳定性计算选取主滑段典型滑块为计算模型,计算工况以滑坡体主要受力因素确定,分别考

表 1 物理力学参数取值

Table 1 The physical and mechanical parameters

| 编号 | 岩土名称 | 重度 $\gamma / (kN \cdot m^{-3})$ | | 黏聚力 c / kPa | | 内摩擦角 $\varphi / ^{\circ}$ | | 弹性模量 E / GPa | | 泊松比 ν | |
|----|--------|---------------------------------|------|---------------|-----|---------------------------|------|----------------|-----|-----------|------|
| | | 天然 | 饱和 | 天然 | 饱和 | 天然 | 饱和 | 天然 | 饱和 | 天然 | 饱和 |
| 1 | 粉土夹碎块石 | 19 | 20.5 | 12 | 9.6 | 19.9 | 15.9 | 2 | 1.6 | 0.26 | 0.32 |
| 2 | 强风化千枚岩 | 21 | / | 20 | / | 25 | / | 2.5 | / | 0.2 | / |

考虑自重(天然状态)工况、暴雨(饱和状态)工况、自重+地震工况($K_h=0.05、0.10、0.20、0.40$)和暴雨+地震工况($K_h=0.05、0.10、0.20、0.40$)4种不同工况,其中暴雨+地震工况作为本次计算的校核工况。

4 计算结果及对比分析

4.1 ANSYS 计算结果

采用 ANSYS 进行数值模拟,不断改变折减系数进行试算,直至计算不收敛,分别得到不同工况下极限状态时的水平位移最大值与塑性区应变最大值云图(图 4,以 $K_h=0.20$ 为例)。

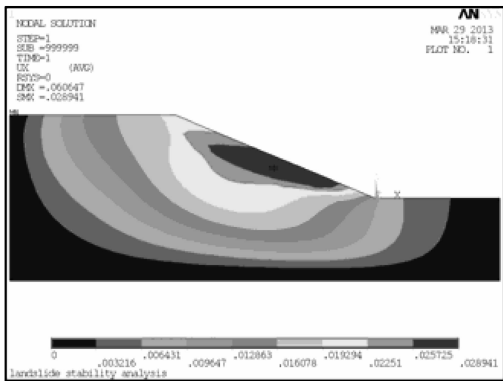
不同工况下折减系数与水平位移及塑性应变最大值关系分析(图 5)。随着折减系数加大,水平位移和塑性应变最大值显著增大,在达到极限拐点(计算不收敛)后,水平位移与塑性应变同步表现为迅速下降,即表明在不同地震荷载下的坡体破坏,地震荷载越大,出现拐点时的折减系数越小,表明坡体的稳定性越差。

在自重+地震工况下,从水平位移峰值变化

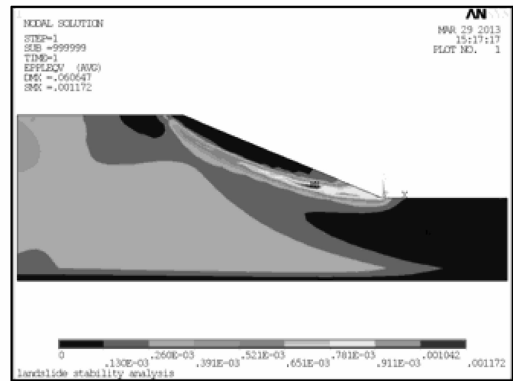
看, $K_h=0.10$ 之前,变化较平缓,以线性增长为主; $K_h>0.10$ 后,峰值提高明显,每级提高幅度为 $2.8\% \sim 5.0\%$ 。表明在不同的地震强度下,在同样形成岩土破坏时表现出的水平位移程度不同。从塑性区应变最大值分析,其变化特征基本同水平位移变化,局部有跳跃性改变或持续增大,表明了土体破坏后的持续性塑性流动应变特征;在 $K_h=0.00 \sim 0.40$ 变化时,对应的折减系数为 $F=1.115 \sim 1.413$,表明该滑坡在自重+地震状态下为基本稳定(图 5a, 5b)。

在暴雨+地震工况下,由于降雨达到局部饱和,土体强度降低,随着地震荷载增大,水平位移和塑性应变最大值出现拐点的折减系数迅速下降。在 $K_h=0.00 \sim 0.40$ 变化时,对应的折减系数为 $F=0.865 \sim 1.095$,属基本稳定~不稳定;在 8 度设防烈度下,该滑坡稳定系数小于 1,为不稳定。进一步证明了南桥滑坡在暴雨条件下遭遇地震的危险性(图 5c 和 5d)。

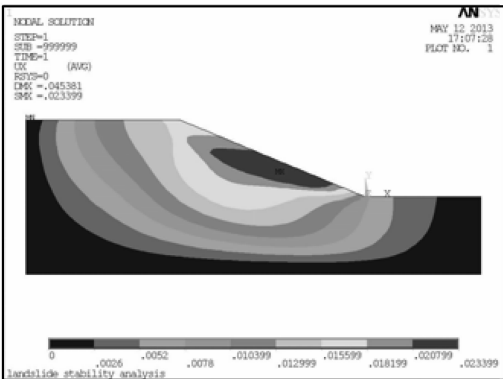
对比自重+地震与暴雨+地震 2 种工况,稳定系数与地震作用呈线性相关关系(图 6),且 2 种工



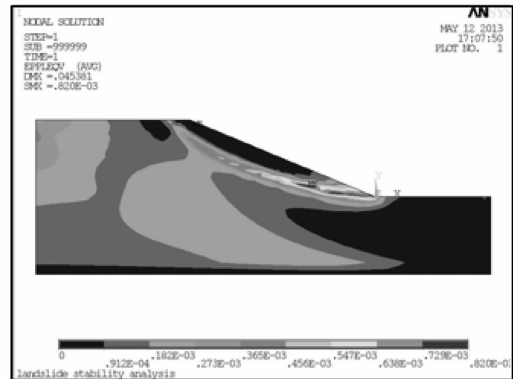
(a) $F=1.235$ (自重+地震) 时水平位移最大值



(b) $F=1.235$ (自重+地震) 时塑性应变最大值



(c) $F=0.965$ (暴雨+地震) 时水平位移最大值



(d) $F=0.965$ (暴雨+地震) 时塑性应变最大值

图 4 水平位移与塑性应变最大值云图($K_h=0.20$)

Fig. 4 The contours of the maximum of the horizontal displacement and plastic strain($K_h=0.20$)

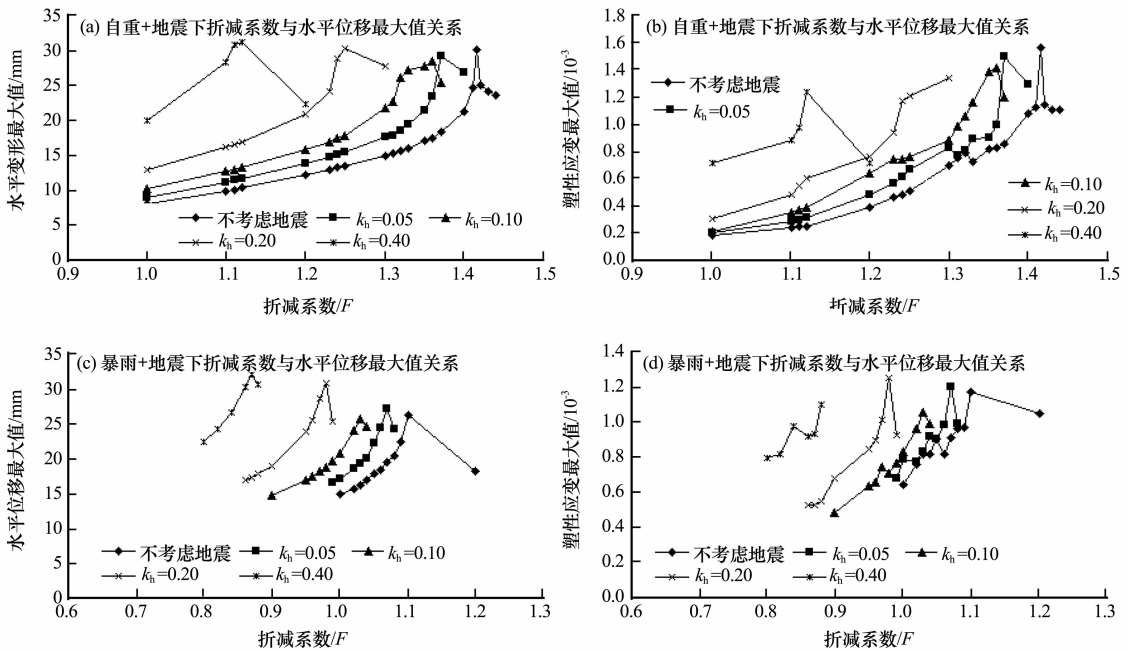


图 5 不同工况下水平位移与塑性应变最大值走势

Fig. 5 The maximum horizontal displacement and plastic strain with different working conditions

况在同样地震作用下的稳定系数差值为 0.25 ~ 0.32, 也为 2 种工况下的相互理论推算提供了可能。

4.2 对比分析

在滑坡稳定性计算中, 传统的极限平衡法是规范推荐的使用方法, 这里按条分法进行计算, 得出不同工况下的稳定系数(表 2)。与有限元强度折减法结果对比, 二者计算误差一般为 1%~6%, 以小于 5% 为主; 当以 $K_h = 0.20$ 时的地震作用考虑时, 有限元强度折减法和极限平衡法计算结果表明, 考虑地震工况与不考虑地震工况相比, 其稳定系数下降 13%~16%。结果证明了地震作用使滑坡稳定性大幅度降低, 增加了滑坡体危险程度。计算结果与实际工程勘查分析结果吻合。

5 结论

(1) 舟曲南桥滑坡为一老滑坡, 坡面面积大, 具有坡体厚度变化悬殊和多级分布特征, 主要表现为遇地震作用和持续降雨条件下蠕动变形较大的特

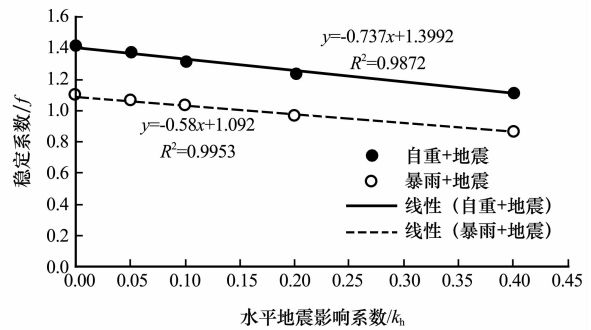


图 6 稳定系数与 K_h 的关系图

Fig. 6 The changes of the stability factors with K_h

点, 适合根据局部特征分段分析和治理, 其稳定性取决于最不利工况组合及其作用程度。

(2) 作为对该滑坡稳定性分析方法的讨论, 极限平衡法需要确定潜在滑动面, 而南桥滑坡地形及地层变化复杂, 判断滑动面尚有一定难度, 会影响计算结果的精准度。采用基于 D-P 屈服准则下的 ANSYS 软件模拟, 并实现了拟静力条件下对地震

表 2 不同工况下的滑坡稳定系数

Table 2 The Landslide stability factor with different working conditions

| 水平地震影响系数 / K_h | 自重 状态 | 暴雨 状态 | 自重+地震 | | | | 暴雨+地震 | | | |
|---------------------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0.05 | 0.10 | 0.20 | 0.40 | 0.05 | 0.10 | 0.20 | 0.40 |
| 强度折减法 | 1.413 | 1.095 | 1.365 | 1.315 | 1.235 | 1.115 | 1.065 | 1.035 | 0.965 | 0.865 |
| 极限平衡法 | 1.394 | 1.105 | 1.289 | 1.285 | 1.166 | 0.998 | 1.025 | 0.994 | 0.953 | 0.846 |

荷载的施加, 计算方式和结果更直观可靠。

(3) 地震是影响滑坡稳定的主要因素之一, 模拟施加不同地震荷载, 在自重和暴雨条件下, 随着地震影响系数增大, 2 种工况下滑坡稳定系数呈一致性线性下降, 且暴雨时比自重时稳定系数降低 0.25~0.32, 为 2 种工况下的稳定系数相互估算提供了参考; 对比分析有限元强度折减法和极限平衡法计算结果, 二者误差以小于 5% 为主, 计算精度较高。两种分析方法表明, 考虑地震工况 ($K_h = 0.20$ 为例) 比不考虑地震工况, 其稳定系数将下降 13%~16%, 地震作用使滑坡稳定性大幅度下降, 进一步证明了滑坡治理中抗震设防的重要性。

(4) 目前, 国内外对考虑地震惯性力条件下通过有限元强度折减法实施对滑坡稳定性数值分析的研究还不深入, 通常是从拟静力理论、反应谱理论和直接动力分析理论等方面进行尝试研究, 这对工程设计仍缺乏鲜明的指导性, 所以应继续深入进行该领域内的研究。

参考文献 (References):

- [1] Wu Yong, He Siming, Li Xinpo. Failure mechanism of anti-slide pile under seismic waves[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition) 2009, **41**(3):284-288. [吴永, 何思明, 李新坡. 地震波作用下抗滑桩的失效机理[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, **41**(3):284-288.]
- [2] Shi Shirong, Chen Linjie, Yu Chao. Slope stability analysis in high-intensity earthquake zone by strength reduction method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2011, **30**(2):273-276. [史石荣, 陈林杰, 余超. 基于强度折减法的高烈度地震区边坡稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, **30**(2):273-276.]
- [3] Hou Chaoqun, Wang Xiaomou, Shi Hengjun. Impact analysis of earthquake on the slope stability [J]. Subgrade Engineering, 2008, **141**(6):187-188. [侯超群, 王晓谋, 石恒俊. 地震对边坡稳定性影响分析[J]. 路基工程, 2008, **141**(6):187-188.]
- [4] Li Yuanxiong, Yan Echuan, Yang Biao. Analysis on dynamic stability of soil slope under seismic action [J]. Subgrade Engineering, 2010, **149**(2):32-34. [李元雄, 晏鄂川, 杨彪. 地震作用下土质边坡动力稳定性分析[J]. 路基工程, 2010, **149**(2):32-34.]
- [5] Fan Zhaoping, Zhang Lihua. Analysis on slope stability during earthquake [J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, **32**(4):339-342. [范昭平, 张丽华. 地震作用下边坡稳定性分析[J]. 西北地震学报, 2010, **32**(4):339-342.]
- [6] Qi Yuan, Liu Yong, Yang Zhenghua, et al. GIS-based analysis of landslide and debris flow hazard in Lanzhou [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(1):96-104. [祁元, 刘勇, 杨正华, 等. 基于 GIS 的兰州滑坡与泥石流灾害危险性分析[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(1):96-104.]
- [7] Bai Xiaohua, Feng Weihui. Monitoring debris flow by means of satellite Image [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(2):176-179. [白晓华, 冯文辉. 利用 TM 卫星数据监测泥石流[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(2):176-179.]
- [8] Wang Xianjun, Chen Mingxiang, Chang Xiaolin, et al. Studies of application of Drucker-Prager yield criteria to stability analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12):3733-3736. [王先军, 陈明祥, 常晓林, 等. Drucker-Prager 系列屈服准则在稳定分析中的应用研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12):3733-3736.]
- [9] Deng Chujian, He Guojie, Zheng Yingren. Studies on Drucker-Prager yield criterions based on M-C yield criterion and application in geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(6):735-739. [邓楚键, 何国杰, 郑颖人. 基于 M-C 准则的 D-P 系列准则在岩土工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(6):735-739.]
- [10] Zheng Yingren, Zhao Shangyi. Application of strength reduction fem in soil and rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(19):3381-3386. [郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(19):3381-3386.]
- [11] Zhong Caigen, Zhang Bin. Transformation of slope safety factor based on different Drucker-Prager criteria [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(12):3751-3754. [钟才根, 张斌. 采用不同 Drucker-Prager 屈服准则得到的边坡安全系数的转换[J]. 岩土力学, 2011, **32**(12):3751-3754.]
- [12] Zheng Yingren, Chen Zuyu, Wang Gongxian, et al. Engineering Treatment of Slope and Landslide [M]. Beijing: China Communications Press, 2007:194-209. [郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007:194-209.]
- [13] Lü Qing, Sun Hongyue, Shang Yuequan. Slope failure criteria of shear strength reduction finite element method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, **42**(1):83-85. [吕庆, 孙红月, 尚岳全. 强度折减有限元法中边坡失稳判据的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, **42**(1):83-85.]
- [14] Huang Xiangui, Chen Zhihua, Wang Bin. Application of strength reduction finite element method to slope stability assessment at Beimengou site[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, **14**(5):666-669. [黄显贵, 陈植华, 汪斌. 有限元强度折减系数法在北门沟坡稳定性评价中的应用[J]. 工程地质学报, 2006, **14**(5):666-669.]
- [15] Zheng Yingren, Kong Liang. Geotechnical Plastic Mechanics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010:70-77. [郑颖人, 孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010:70-77.]
- [16] Xiong Huan, Xiao Shengxie. Calculation method of slope stability safety factor based on the Drucker-Prager criterion [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science),

- 2010, **29**(4):582—586. [熊欢,肖盛燮. 基于 Drucker-Prager 系列准则的边坡安全系数计算方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, **29**(4):582—586.]
- [17] Zhao Cheng, Zhang Yongjun, Zhao Yuhong. Application of the Hierarchical analytical methods to evaluating geological hazard tendency in Gansu Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, **31**(1):182—188. [赵成, 张永军, 赵玉红. 层次分析法在甘肃省地质灾害易发性评价中的应用[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(1):182—188.]
- [18] Wu Hong, Dong Jinyi, Li Ruidong *et al.* Application of 3D Visualization Technology to Debris Flow Control Engineering of Post-Disaster Reconstruction in Zhouqu County[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(2):383—388. [吴宏, 董金义, 李瑞冬, 等. 三维可视化技术在舟曲县城区灾后重建泥石流防治工程中的应用[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(2):383—388.]
- [19] Zhang Zhixian, Zhang Qiang, Tao Jichun, *et al.* Climatic and geological environmental characteristics of the exceptional debris flow outburst in Zhouqu, Gansu Province, on 8 August, 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(4):898—905. [张之贤, 张强, 陶际春, 等. 2010年“8.8”舟曲大山洪泥石流灾害形成的气候特征及地质地理环境分析[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(4):898—905.]
- [20] Jiao Yun, Yao Zhengxue, Dong Yaogang. Nanqiao Landslide stability and countermeasures in Zhouqu[J]. Gansu Geology, 2011, **21**(1):59—63. [焦贺, 姚正学, 董耀刚. 舟曲南桥滑坡稳定性分析及治理对策研究[J]. 甘肃地质, 2011, **21**(1):59—63.]
- [21] Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Railway Engineering(GB50111—2006) [S]. Beijing: China Planning Press, 2009:16—18. [中华人民共和国铁道部. 铁路工程抗震设计规范 GB50111—2006(2009年版)[S]. 北京:中国计划出版社, 2009:16—18.]
- [22] Li Haiguang. New Retaining Structure Design and Engineering Practices [M]. Beijing: China Communications Press, 2010:33—35. [李海光. 新型支挡结构设计 with 工程实例[M]. 北京:人民交通出版社, 2011:33—35.]
- [23] Wen Duwu, Xie Wanli, Liu Qiang, *et al.* Analyze the high loss slope excavation and unloading stability based on ANSYS [J]. Groundwater, 2012, **34**(3):190—191. [温笃武, 谢婉丽, 刘强, 等. 基于 ANSYS 的黄土高边坡开挖卸荷稳定性分析[J]. 地下水, 2012, **34**(3):190—191.]

The Impact Assessment of Earthquake on Landslide Stability

— A Case Study of Landslides in Nanqiao Village, Zhouqu, Gansu

JIAO Yun, WANG Guo-ya

(*Geologic Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China*)

Abstract: Based on the equivalent of Drucker-Prager (abbreviated DP) yield criterion and the Mohr-Coulomb (abbreviated MC) theory, by the simulation of ANSYS software, the influences of earthquake on the stability of landslide in Nanqiao village under the conditions of its weight and rainstorm respectively were estimated. The results show that on the different intensity level of seismic fortification by changing the reduction factor to calculate the maximum of the horizontal displacement and plastic strain. To distinguish the destruction of landslide based on the abrupt point occurs and the calculation does not converge and the plastic zone penetration. So the landslide stability factor of different seismic fortification intensity had been

obtained. Under the condition of weight add earthquake and rainstorm add earthquake, the discrepancy of the stability factors is between 0.25 and 0.32, which offered the possible for the mutual verification and theoretical calculations of the two conditions. The comparative analysis of the Finite Element Strength Reduction and the Limit Equilibrium Method showed that the errors of less than 5% are primary, when considering earthquake the stability coefficient of landslide will decrease by 13% to 16%. And the accuracy and reliability of numerical simulation were verified further. The result of calculation is consistent with the actual results. So this research should be promoted in scientific research and the actual design.

Key words: Drucker-Prager yield criteria; earthquake; the strength reduction of finite element method; landslide stability; Nanqiao landslide of Zhouqu County