

降雨和地震耦合作用对滑坡稳定性的影响

——以甘肃西和Ⅲ号滑坡为例^①

龚文俊¹, 李明永¹, 吴志坚^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以甘肃省西和县西山Ⅲ号滑坡为例分析了地震与降雨耦合作用对滑坡稳定性的影响。采用GEOSTUDIO软件对其进行了天然及地震降雨耦合作用两种条件下的数值模拟。通过计算结果对比可知,西山Ⅲ号滑坡在天然状态下处于稳定状态;地震降雨耦合作用对西山Ⅲ号滑坡的稳定会起到很强的削弱作用,滑坡将处于失稳状态。在此处采用的计算条件下,相同降雨量下地震与不同降雨强度的耦合作用显示,降雨强度越小雨水入渗相对越多,地震作用下超孔隙水压力影响区域越大,滑坡越不稳定。

关键词:地震;降雨;耦合作用;滑坡;稳定性;孔隙水压力

中图分类号: P642.22 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2012)02-0161-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2012.02.0161

Stability Analysis of Landslide under Coupling Action of Earthquake and Rainfall—Taking the No. Ⅲ Landslide of Xihe County, Gansu Province as An Example

GONG Wen-jun¹, LI Ming-yong¹, WU Zhi-jian^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The stability of landslides under the coupling action of earthquake and rainfall is analyzed with an example of No. Ⅲ landslide of Xihe county, Gansu province. We adopte Geostudio software to simulate the landslide in two conditions, i. e. natural status and the coupling influence from earthquake and rainfall. The analysis result shows that the landslide is generally stable in nature state; on the contrary, the coupling action could have serious impact on the stability of NO. Ⅲ landslide of Xihe county. The result also shows that with same calculation condition and rainfall, a certain magnitude earthquake coupling with three kinds of rainfall intensities could cause different landslide possibilities; the less rainfall intensity may cause the more reduction of the landslide stability, due to a more volume of infiltration water and a wider distributional zone of exceeding pore pressure associated with earthquake.

Key words: Earthquake; Rainfall; Coupling effect; Landslide; Stability; Pore pressure

0 引言

降雨和地震是滑坡活动最主要的触发因素。例

如2007年四川沐川县4—9月降雨量达1279mm,在7月25日—9月10日间全县共发生滑坡23处,

① 收稿日期:2012-05-06

基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2011696-7);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2012018

作者简介:龚文俊(1985-),男(汉族),江西乐安人,在读硕士研究生,研究方向:边坡滑坡稳定性。

其中 22 处为降雨触发^[1]；1998 年 8 月 6 日韩国长兴郡发生强暴雨，导致长兴郡及附近区域发生 60 多处浅层滑坡^[2]；李长江等人在 1990—2003 年间对浙江省 1 414 处滑坡进行调查，发现有 71.3% 由历时为一天的降雨引发，与 2 天和 3 天降雨有关的滑坡分别占总数的 6.9% 和 5.7%，只有不足 3% 的滑坡与历时超过 10 天的降雨有关^[3]。1933 年 8 月 25 日四川叠溪发生震中烈度 X 度的 7.5 级强烈地震，在广大范围内诱发强烈的河流岸坡及沟谷斜坡的崩塌与滑坡，造成 6 865 人死亡；1 925 人受伤^[4]。2008 年 5 月 12 日四川汶川发生 8.0 级特大地震，在地震的诱发下距北川县城上游 3.2 km 处唐家山发生了特大型滑坡，导致当地居民 84 人死亡^[5]。

目前国内外学者对于地震及降雨诱发滑坡的研究很多。Premchit^[6] 1991 通过研究发现，在香港 24 小时降雨量超过 200 mm 时一定会有滑坡发生。1990 年 Johnson, K. A.^[7] 分析了有降雨在饱和和坡体中引发的正孔隙水压力对坡体的影响。穆鹏^[8] 通过对兰州市九州石峡口滑坡研究发现，降雨和不合理的人工绿化灌溉及高陡地形是诱发滑坡复发的主要因素。Keefer^[9] 1984 年通过对 40 个历史地震进行研究分析得出，地震震级不大于 4 级时不会有滑坡发生，当震级达到 9.2 级时，将会在 500 000 km² 范围内发生滑坡。史宏彦和谢定义^[10] 2001 年提出有限元—滑动面法对土坡进行抗震稳定性分析。石玉成^[11] 2002 年对黄土的震陷性与其微结构特征进行了相关的研究。徐文杰，陈祖煜等人选用 ABAQUS 软件，从三位空间出发对地震诱发肖家桥滑坡的失稳进行了相关的模拟分析，克服了二维分析方法带来的误差，且与现实较符^[12]。但到目前为止在地震及降雨耦合作用对滑坡的影响研究较少。孙军杰认为某种特定条件下(降雨充沛地区发生特大地震时)，地震和降雨的持续影响效应可能会对边坡体稳定性产生耦合削弱作用，由此造成的与滑坡有关的潜在灾害不容忽视^[13]。

为了分析研究降雨及地震耦合作用对滑坡稳定性的影响，本文以甘肃省西和县西山 III 号滑坡为例，采用 GEOSTUDIO 软件模拟滑坡分别在天然及地震与降雨耦合情况下的两种状态，分析各因素对滑坡稳定性的影响程度，以便为日后类似灾害研究提供科学依据。

1 滑坡工程地质特征

1.1 滑坡体平面特征

III 号滑坡位于西和县城西山滑坡群的北侧(图 1)。滑坡体长 675 m，宽 320~410 m，平均厚度约 25 m，主滑方向 75°，面积约 25×10⁴ m²，体积约 564×10⁴ m³，属深层特大型滑坡。滑坡体前缘标高 1 593 m，后缘标高 1 710 m，相对高差 117 m，地面平均坡度 8°，整个坡面已被人工平整为十余级台阶，主要为梯田和村庄。滑坡整体沿中轴线中间低两侧高，北侧边界为人工修筑上城堡陡坎，坎长 410 m，坎高 10~15 m，倾角近直立状；南侧边界为一冲沟，沟长 690 m，宽约 5 m，深 2~4 m。

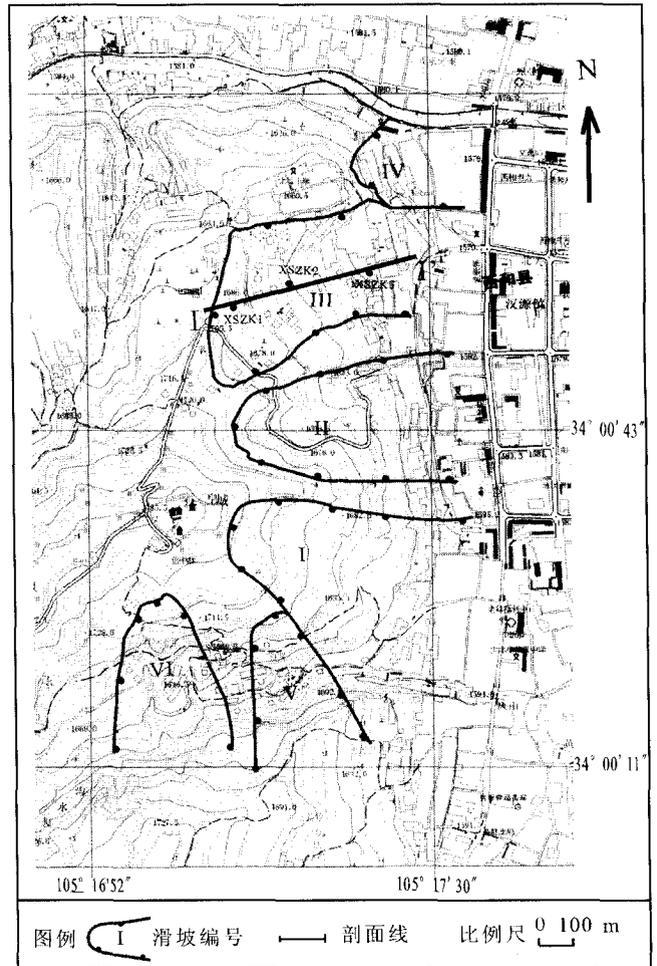


图 1 西和县西山滑坡分布图

Fig. 1 Distributional map of the Xishan landslides in Xihe county.

1.2 地层岩性

(1) 滑坡体：黄土(黄土状土)，黄褐色，土质较均，结构松散，含少量钙质粉末，可塑。

(2) 滑带：属于粉质粘土和泥岩接触面滑坡，滑带物质为粉质粘土夹杂少量泥岩颗粒。

(3) 滑床：青灰色砂质泥岩、粘土岩。为新第三

系(N₂)泥岩,垂直节理发育,遇水极易软化膨胀,风化后呈碎片状。产状在西山为35°~80°∠10°~40°。在山体周围侵蚀较深部位均可见到,厚度不详。

1.3 水文地质特征

滑坡体地下水补给来源主要为降雨入渗补给,排泄方式主要以地下径流形式进入漾水河阶地内。地下水类型为基岩裂隙孔隙潜水,含水层主要为滑体泥岩碎屑与黄土状土松弛部分。滑床下部完整泥岩发育有高角度节理面,沿节理面有少量含水,滑体地下水位埋深在2.5~30 m之间。

2 分析方法

2.1 天然状态

本文采用 GEOSTUDIO 软件中 SLOPE/W 模块对其进行稳定性分析。其原理采用极限平衡法,包括瑞典条分法、毕肖普法、江布法、摩根斯坦-普赖斯法等。后者能计算考虑孔隙水压力情况下的边坡稳定性,目前在全国许多大型水电工程中均有应用,效果良好。本文采用摩根斯坦-普赖斯法对其进行分析。

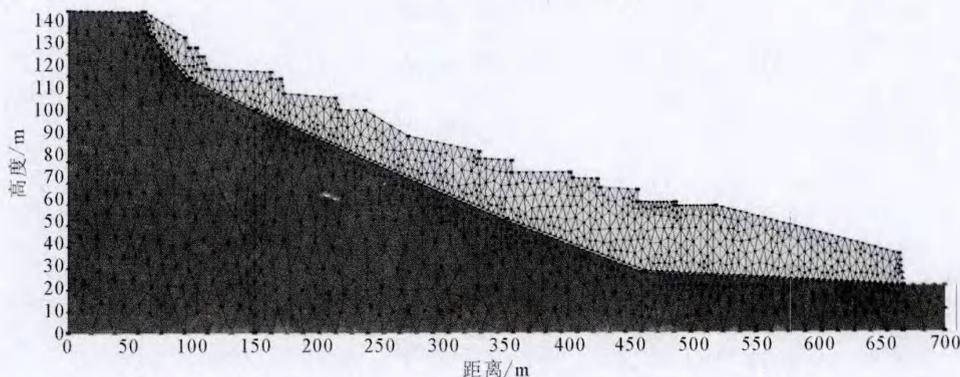


图2 西山Ⅲ号滑坡 SEEP/W 模型

Fig.2 SEEP/W calculation model of the Xishan No. III landslide.

2.2.2 地震输入

在西和县Ⅲ号滑坡150 km范围内共划分了30个潜在震源区,其中8.0级潜源3个,7.5级潜源区12个,7.0级潜源区10个,6.5级潜源区5个,工程场地临近礼县-罗家堡8.0级潜在震源区。分别统计了相应的地震动衰减关系。由于地处青藏高原东北缘,中强以上地震的等震线形状大多为NWW向椭圆形状,因此本项工作采用了考虑长、短轴的椭圆衰减模型。结合中国地震局推荐的“考虑地震活动时不均匀性的地震安全性评价程序包ESE”,计算得到50年超越概率10%地震时程曲线。其峰值加

2.2 地震与降雨耦合

2.2.1 降雨条件

为了研究不同降雨类型与地震耦合对边坡稳定性的影响,考虑了降雨总量相同,三种不同降雨强度雨型,分别为50 mm/d,持续4天;100 mm/d,持续2天;200 mm/d,持续1天。吴宏伟^[14]认为水在非饱和土中的渗流为饱和-非饱和流动。GEOSTUDIO中SEEP/W模块正是基于二维条件下饱和-非饱和模型建立的渗流软件,其渗流公式可表述如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t}$$

式中:H为总水头; k_x 、 k_y 分别为x、y方向的渗透系数;Q为施加的边界流量; m_w 为土水特征曲线的斜率; γ_w 为水的容重。

SEEP/W渗流模型建立及网格划分如图2。模型两侧地下水位以上边界按零流量边界处理,地下水位以下按常水头边界。坡体表面降雨区为流量边界或定水头边界,当孔隙水压力小于零时为流量边界,反之而定水头边界。共划分单元2604个,节点1489个。

速度为0.3 g。如图3。

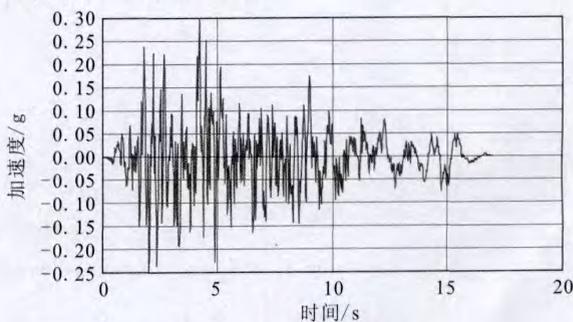


图3 地震加速度时程曲线

Fig.3 Time-history curve of input seismic acceleration.

采用 QUAKE/W 模块中线弹性模型对 III 号滑坡进行地震作用下动力有限元分析。计算网格采用 SEEP/W 划分网格。

边界处理:①底部边界(即基岩处)水平和竖向均固定;②为减少地震波在滑体中回弹导致影响计算结果,在滑坡前后边界设置阻尼边界,滑坡下部为竖向和水平向位移固结边界;③顶部边界水平和竖向均自由。

3 计算结果分析

3.1 天然状况

计算参数如表 1 所示。

SLOPE/W 中采用摩根斯坦—普赖斯法对其进行分析。其稳定性计算结果是 1.237。参照《地质灾害防治工程勘察规范》DB50/143—2003 第 12 节。滑坡处于稳定状态。

表 1 岩土体物理参数

土体类别	饱和容重 γ_w / $[\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}]$	摩擦角 φ / $^\circ$	粘聚力 c / kPa	天然重度 γ_s / $[\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}]$
滑体土	20.11	25.5	27.4	17
滑带土	24.24	11.2	7	21
滑床土	25.14	28.8	112.3	22.6

3.2 地震与不同降雨耦合

计算参数如表 2。

表 2 降雨地震耦合作用下滑坡模型计算参数

土体类别	弹性模型 E / kPa	阻尼比 ξ	饱和渗透系数 / $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	孔隙度 S_r / $\%$
滑体土	22 000	0.1	5.28×10^{-6}	40.6
滑带土	18 000	0.1	3.5×10^{-6}	38.7
滑床土	1.14×10^6	0.1	1.19×10^{-7}	25

采用 Frellund 和 Xing 法对其土水特征曲线及渗透系数函数进行估算,其结果如图 4。

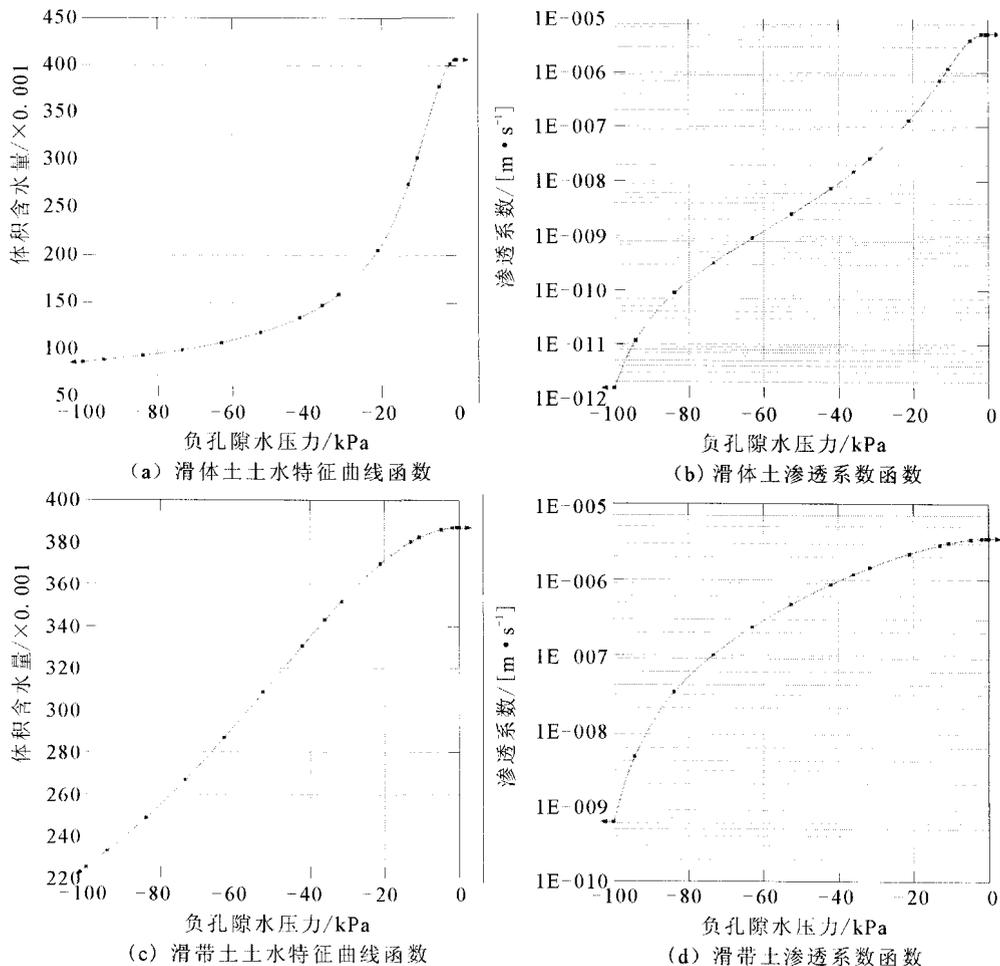


图 4 土水特征曲线及渗透系数函数

Fig. 4 Soil-water characteristic curves and percolation coefficient functions.

首先利用有限元软件 SEEP/W 分析研究对象在降雨渗流作用下的孔隙水压力,将其作为

QUAKE/W 的初始含水条件,对其进行地震动力分析,将 QUAKE/W 计算的应力场及渗流场调入

SLOPE/W 中分析稳定性。从 QUAKE/W 中求得的应力中减去初始静应力可得出动应力,每条块底部的动应力均可计算,沿整个滑面累加就可得到总的动剪力。用总动剪力除以滑体重量即为平均加速度值,并可和由 SLOPE 计算得出的稳定系数对应起来,稳定系数 1.0 对应的平均加速度称为屈服加速度 a_y 。将每一累加时步获得的平均加速度也可用图表示为和时间的关系,即平均加速度—时间曲线。平均加速度大于 a_y 的部位表示边坡将移动。将大于 a_y 的部分汇总,就得到地震时滑体的运动速度,在速度—时间曲线下的面积积分就得到地震时

的累计位移。

分析不同降雨强度相同降雨量情况下浸水面的变化情况(图 5)。通过分析对比发现,在相同降雨量情况下,降雨强度越小浸水面上升越多。这种情况可以用下述机理进行解释:当降雨强度与土的饱和和渗透系数之比较大时(例如该值接近于 1),相比较小时,雨水更容易滞留在坡体浅部,甚至部分随表面径流流出而不进入坡体;当降雨强度与饱和渗透系数之比较小时,相比较小时,雨水更容易流入坡体,浸水面上升较快。

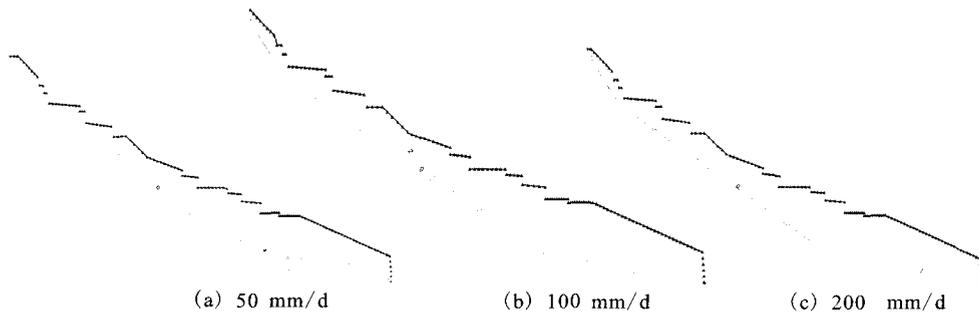


图 5 各种降雨强度浸水面变化情况

Fig. 5 Groundwater surface in different conditions of rainfall intensity.

前人普遍认为地震荷载对边坡稳定性的影响主要是由于地震惯性力导致边坡整体下滑力加大降低了边坡的稳定系数。考虑到拟静力法所得的稳定系数并不能说明边坡在地震荷载作用下的实际稳定性^[15],本文采用 GEOSTUDIO 中 QUAKE/W 模块对西和Ⅲ号滑坡进行动力有限元时程分析,结合 SLOPE/W 模块计算出稳定系数时程曲线和 New-

mark 位移。图 6 为降雨强度是 50 mm/d 时的计算结果,其它强度下和结果见表 3。从表中可以得知,永久位移随着降雨强度的增加而减少,屈服加速度随着降雨强度的增加而增加,最低稳定系数将随着降雨强度的增加而增加。这说明在相同降雨量情况下,降雨强度越大,地震耦合情况下相对于降雨强度小更稳定。这是因为在相同降雨量情况下,降雨强

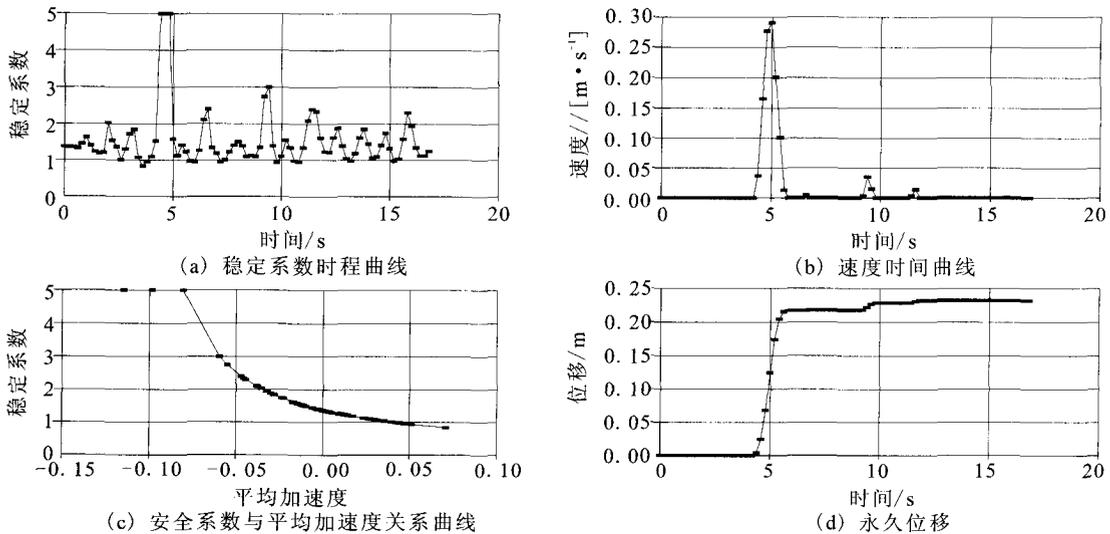


图 6 地震与降雨耦合结果(强度:50 mm/d)

Fig. 6 Coupling effect of earthquake and rainfall (intensity: 50 mm/d).

度越小入渗总量越多,坡体饱和区面积越大,地震产生的超孔隙水压力范围越大,可能液化区及永久位移增大,稳定系数越低。在天然状况下滑坡处于稳定状况;在地震及降雨耦合情况下滑坡将会产生较大的位移,且最小稳定系数在 0.834~0.861 之间,滑坡会发生失稳破坏,表明地震及降雨耦合作用对滑坡稳定性影响显著。

表3 50年超越概率10%地震情况下不同降雨强度耦合分析

降雨强度 /[mm·d ⁻¹]	永久位移 /m	屈服加速度 /[m·s ⁻²]	最低稳定系数	稳定状态
50	0.232 23	0.409 8	0.834	失稳破坏
100	0.205 48	0.043 41	0.856	失稳破坏
200	0.200 23	0.043 98	0.861	失稳破坏

4 结论

(1) 选择摩根斯坦—普赖斯法对西山Ⅲ号滑坡进行在天然状态下稳定性分析,稳定系数为 1.237,滑坡处于稳定状态;采用 SEEP/W 模块模拟分析Ⅲ号滑坡降雨渗流情况,发现在相同降雨量条件下,降雨强度越小雨水渗入越多,浸水面上升越高。

(2) 通过对地震降雨耦合作用下滑坡的稳定状况分析得知:降雨强度越小,永久位移越大,屈服加速度越小,最小稳定系数越小。这可能与本文计算过程中的排水条件有关,由于降雨强度越大时排水量也越大,并不会导致地下水位的显著升高。因此相同降雨量条件下小降雨强度的人渗雨水量更多,可能导致滑体内饱和区扩大,超孔隙水压力范围增大。

(3) 通过分析对比发现,降雨与地震耦合作用相比在天然状态下对滑坡影响显著,其稳定性将会被严重削弱,滑坡将会失稳破坏。

[参考文献]

- [1] 乔建平,杨宗信,田宏岭. 降雨滑坡预警的概率分析方法[J]. 工程地质学报,2009,17(3):343-348.
- [2] Dongyeob KIM, Sangjun IM, Sang Ho LEE, et al. Predicting the Rainfall-Triggered Landslides in a Forested Mountain Region Using TRIGRS Model[J]. Mt. Sci., 2010, 7(1): 83-91.
- [3] 李长江,麻士华,李炜,等. 滑坡频度—降雨量的分形关系[J]. 中国地质灾害与防治学报,2010,21(1):87-93.
- [4] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(3):434-455.
- [5] 李守定,李晓,张军,等. 唐家山滑坡成因机制与堰塞坝整体稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(1):2908-2915.
- [6] Premchitt J. Salient aspects of landslides in Hong Kong[A]// proceedings of the 9th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Bangkok, Thailand: 1991:497-502.
- [7] Johnson K A, Sitar N. Hydrologic conditions leading to debris-flow Initiation[J]. Can. Geotech. J., 1990, 27(6): 789-801.
- [8] 穆鹏,董兰凤,吴玮江. 兰州市九州石峡口滑坡形成机制与稳定性分析[J]. 西北地震学报,2008,30(4):332-336.
- [9] David K Keefer. Landslides caused by earthquakes[J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95(4): 406-421.
- [10] 史宏彦,谢定义. 土坡抗震稳定性分析的有限元——滑动面法[J]. 西北地震学报,2001,23(1):46-52.
- [11] 石玉成,李兰,刘红玫. 黄土的震陷性与其微结构特征的关系研究[J]. 西北地震学报,2002,24(2):129-134.
- [12] 徐文杰,陈祖煜,何秉顺,等. 肖家桥滑坡堵江机制及灾害链效应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(5):933-942.
- [13] 孙军杰,王兰民,龙鹏伟,等. 地震与降雨耦合作用下区域滑坡灾害评价方法[J]. 岩石力学与工程学报,2011,3(4):752-760.
- [14] 吴宏伟,陈守义,庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学,1999,20(1):1-14.
- [15] 范昭,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.