

黄河某水电站顺层岩质滑坡形成机理与演化过程

刘高^{1,2}, 刘从友¹, 王有林¹, 张帆宇¹

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:黄河上某水电站坝后存在一大型顺层岩质滑坡。钻探、平硐、槽探和现场勘查勘察资料表明该滑坡具有平面分区和剖面分层的显著特征。运用地质环境系统全过程动态演化的观点, 采用力学理论、物理模型、数值模拟等方法, 分析了滑坡的形成机理和演化机制: 该滑坡是在河流冲刷和地震活动等内外综合作用下因层状岩质斜坡岩体层间错动和溃屈基而形成, 其演化具有明显时间和空间差异性的多次滑动。在此基础上采用多种极限平衡计算方法综合评价滑坡各区、各级在天然状态下的稳定状态, 并结合滑坡所处的地质环境及其演化特征预测滑坡在雾雨、地震以及二者耦合作用下的演化趋势。

关键词: 顺层岩质滑坡; 溃屈; 地震; 雾雨; 形成机理; 演化过程

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2008)03-0249-06

Formation Mechanism and Evolution Process of the Consequent Rock Landslide in A Hydropower Station on the Yellow River

LIU Gao^{1,2}, LIU Cong-you¹, WANG You-lin¹, ZHANG Fan-yu¹

(1. School of civil engineering and mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster & Environment in Western China (Lanzhou University),
Ministry of Education, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The landslide located at the downstream of a hydropower station on the Yellow river is a large-scale consequent rock landslide. The data of drilling, cavern, trenching and field investigation shows that the landslide has remarkable characteristics, that are multi zones in plain and multi layers in profile. Based on the viewpoint of dynamical evolution of geological environment system, using the methods of mechanical theory analysis, physical model test and numerical simulation, its formation mechanism and evolution process are analyzed. The landslide formed due to shear between layers of bed rock mass in the slope and bed-burst under the actions of erosion of the river water, earthquakes and so on. The characteristics and evidences show that it slid repeatedly until now and each part has different sliding feature at different phase. Based on the knowledge mentioned as above, the stabilities under current situation of each zone and each layer in the landslide are comprehensively analyzed using many limit equilibrium methods. Combining geological environments where landslide located and their variation features, the develop trend of this landslide is also predicted under the coupled action of atomized rain and earthquake in future.

Key words: Consequent rock landslide; Bed-burst; Earthquake; Atomized rain; Formation mechanism; Evolution process

收稿日期: 2007-08-02

作者简介: 刘高(1970-), 男(汉族), 重庆开县人, 博士, 副教授。主要从事岩土体力学、地下工程、地质灾害等方面的教学和科研。

0 引言

黄河上游某水电站坝后存在一大型滑坡,上距电站坝址 600 m。滑坡对岸为泄洪建筑物且正对面为生活区,下游临夏盆地为居民聚集地。随着电站建设产生对环境的改变,如雾雨的影响范围可以达到滑坡西侧,以及可能产生的水库诱发地震,使当前处于暂时稳定状态的该滑坡可能复活,再次发生滑动并造成堵江,对电站的运营、对面生活区以及下游人民的生命财产安全带来巨大的威胁。因此有必要预测其在未来条件下的稳定状态及发展演化趋势。

滑坡是多种因素耦合作用下地质环境演化的产物,其演化是一个复杂、动态和连续的过程^[1],包括发生、发展演化和稳定(或消亡)的全过程。在此意义上,应将滑坡当前稳定状态评价以及未来发展演化趋势预测置于滑坡动态演化研究之中,其中关键是滑坡形成机理和演化机制,因为滑坡机理的研究有助于正确认识其本质特征、评价稳定性和预测发展趋势,有效地指导滑坡的预防和整治^[1-2]。基于此,本文根据黄河上游某水电站坝后滑坡特征以及滑坡区地质环境及其演化特征,分析其形成条件和影响因素,讨论形成机理和演化过程,进而评价当前稳定性并预测未来发展演化趋势,为工程布局和设计提供参考依据。

1 滑坡特征

黄河上游某水电站坝后滑坡为一大型顺向深层岩质滑坡。滑坡位于峡谷出口段右岸,前缘高程 1 790~1 820 m,后缘高程 2 070 m,南北长大于 500 m,东西平均宽 450 m,平均厚度 60 m,最厚达 80 m,体积约 $13.50 \times 10^6 \text{ m}^3$,主滑方向为 NE18°(图 1)。

1.1 滑坡区地质环境

滑坡发育于下白垩统中,地层的显著特征是岩层软硬相间分布。总体上, K_1^1 和 K_3^3 为相对较坚硬的砂砾岩,单层厚度 1~3 m; K_2^2 则为软弱的粉红色粉砂质泥岩,单层厚度 1 m 左右。各层内部也是软硬相间分布, K_3^3 和 K_1^1 为砂砾岩夹粉砂质泥岩,而 K_2^2 为粉砂质泥岩夹砾砂岩。

滑坡区位于青藏高原东北部,主要受关门断面向东逆冲迭覆运动的影响。在滑坡周围,左侧前部的 F_{14} 以及滑坡右侧 F_{16} 和 F_{18} 等断层(图 1)对该滑坡的形成和稳定性有一定的影响。节理以 NNE 组和 NNW 组的剪节理为主。

滑坡区总体为一复杂单斜构造,岩层产状 310°

$\sim 340^\circ \text{NE} \angle 25^\circ \sim 45^\circ$;滑坡左翼岩层倾向黄河偏上游,右翼则略偏下游,中部略微拱起;从前向后,岩层倾向角逐渐增大至 45° 左右(图 1)。

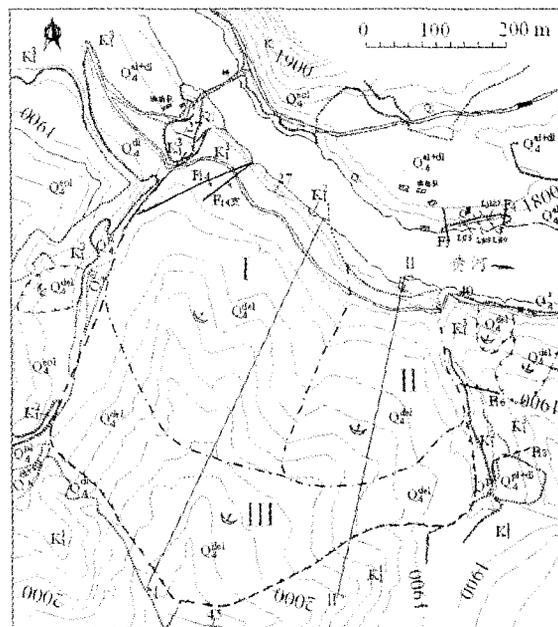


图 1 滑坡区工程地质平面图

Fig. 1 Engineering geological map of the landslide.

滑坡段黄河为不对称河谷,左岸高陡,右岸总体较缓,基本上与岩层倾角一致,故滑坡所在的右岸斜坡为顺向斜坡。滑坡两侧为深切冲沟,使坡体与两侧山体分开;两侧冲沟各有一支沟在滑坡后缘汇合而“双沟同汇”(图 1)。

研究区周围 100 km 范围内有记录的破坏性地震共 26 次,其中 7 级 2 次;6~6.9 级 3 次;4.3~5.3 级 21 次^[3]。其中发生在约 3.65 kaB. P. 的大地震造成了距该滑坡 7 km 的“喇家文明”的消失^[4]。该区地震基本烈度为 VII 度,50 年超越概率水平 10% 的水平加速度峰值为 0.11 g。

1.2 滑坡特征

1.2.1 平面分区性

在平面上滑坡分为 3 区(图 1),各区的微地貌特征、滑体物质和坡体结构特征迥异。

I 区表面呈阶梯状展布,陡坎较多,多有崩塌落石,裂缝较发育;发育 3 级主要平台以及众多小平台和反坡;滑坡物质为紫红色块碎石,泥质较多,含水量相对较大,表层黄土薄;滑体基本保持原岩 K_3^3 的层序特征,但相对破碎;滑体前缘沿岩层产状变缓甚至反翘。

II 区坡度较缓,前缘相对高差较小;岩体较为完整且明显保持原岩 K_3^3 的层序结构特征,前缘岩层产

状变陡;裂缝不发育;平台数量少且同级平台较 I 区位置高;物质组成主要为碎裂砂岩,滑体表层黄土较厚,最厚可达 20 m。

III 区位于 I、II 区后部,主滑面靠近山脊部位,壁高 40 m 左右,产状与原岩产状相同;前端局部有与 I、II 区后壁平行的拉张裂缝,而后部两侧则发育与滑动方向垂直的裂缝;从中间向东西两侧呈阶梯状下降并表现出多级台阶。

1.2.2 剖面分层性

钻孔和平硐以及两侧深切冲沟露头均揭示,该滑坡在垂向上具有明显的分层性(图 2)。滑坡的主滑面为 K_1^2 与 K_1^3 的分界 H_3 。滑体物质主要为 K_1^3 , 其内的软弱夹层多有滑动,其中 H_2 和 H_3 规模较大。

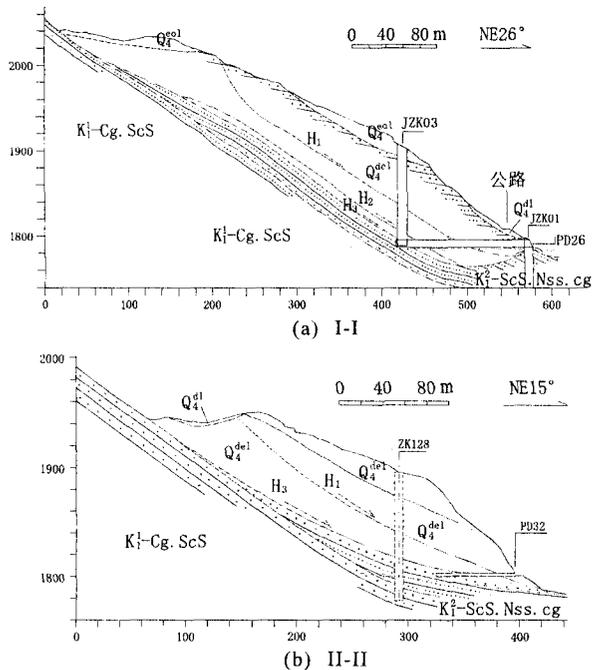


图 2 滑坡纵剖面图
Fig. 2 Profile of the landslide.

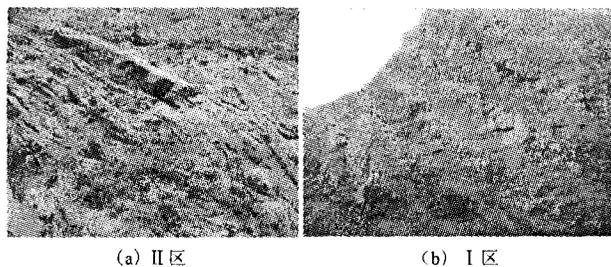


图 3 滑坡前缘特征
Fig. 3 Characteristics of the front of the landslide.

不同分区的剖面分层性也显示出一定的差异(图 3)。在 I 区,因强烈的后期滑动裂缝较发育,滑

体物质破碎,原岩结构遭到极大破坏;II 区滑体相对较为完整,原岩层序结构基本保持,裂缝不发育。在前缘出口段物质及结构特征上, I 区滑体破碎,岩层产状明显变缓,甚至反翘; II 区岩体完整且产状变陡; I 区内的次级滑动面明显多于 II 区,如 II - II 剖面中不发育 H_2 滑面。

上述分区性和分层性是滑坡差异性运动的结果,反映了滑坡的形成机理和演化过程。

2 滑坡形成机理

2.1 滑坡形成条件和影响因素

该滑坡是在顺层岩质斜坡基础上发育的大型岩质滑坡。软硬相间的原岩结构、顺倾斜坡的复杂单斜构造以及顺向坡的地貌为滑坡的形成和发育提供了内在条件。黄河下切旁蚀及河水冲刷以及史前地震等则是其重要的影响因素。

2.2 滑坡形成机理

对于顺向坡,随岩层倾角与斜坡坡角的不同,顺层岩质斜坡岩体变形破坏可有沿软弱层面的平面型滑动、弯曲倾倒和溃屈等不同的模式^[5]。

如前述,该滑坡形成以前原斜坡为一在复杂单斜构造基础上发育的顺向斜,岩体倾角 $25^\circ \sim 45^\circ$ 且前缓后陡,单层厚度 1 ~ 3 m 且普遍发育软弱夹层,岩层长度大于 600 m,滑坡所在的右岸为顺向坡。根据顺向斜坡岩体溃屈极限分析,该斜坡发生溃屈的最小坡长 111 m、最大层厚 21 m。显然滑坡区原岩特征和地貌特征满足斜坡岩体溃屈的必要条件。

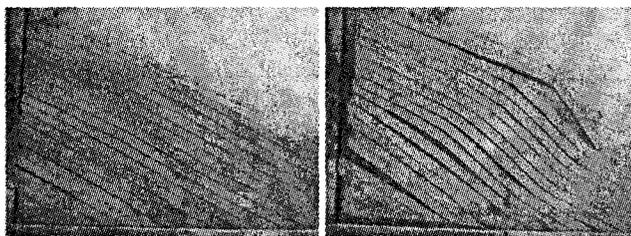


图 4 底面摩擦试验
Fig. 4 Results of bottom friction test.

物理模型试验和离散元数值模拟结果(图 4、图 5)表明,岩层在自重作用下普遍沿层面(软弱夹层)发生差异性层间错动(图 4(a)),尤其 K_1^2 和 K_1^3 层间错动十分明显。层间错动变形进一步发展,表层各岩层根部向临空方向弯曲、隆起并伴有架空现象,如 II 区前缘(图 3(a));与此同时后缘相应下沉。隆起部位的岩层因过大变形而折断,产生横向放射状裂缝(图 4(b)、图 5(b))。随着溃屈(蠕滑 - 弯

曲)变形加剧,裂缝由表入里扩展,切断各岩层,最终切断整个 K_3^3 ,当横向放射状拉张裂缝与 K_1^2 与 K_1^3 界面连通时,统一滑面形成, K_3^3 沿该滑面整体下滑(图 5(b))。

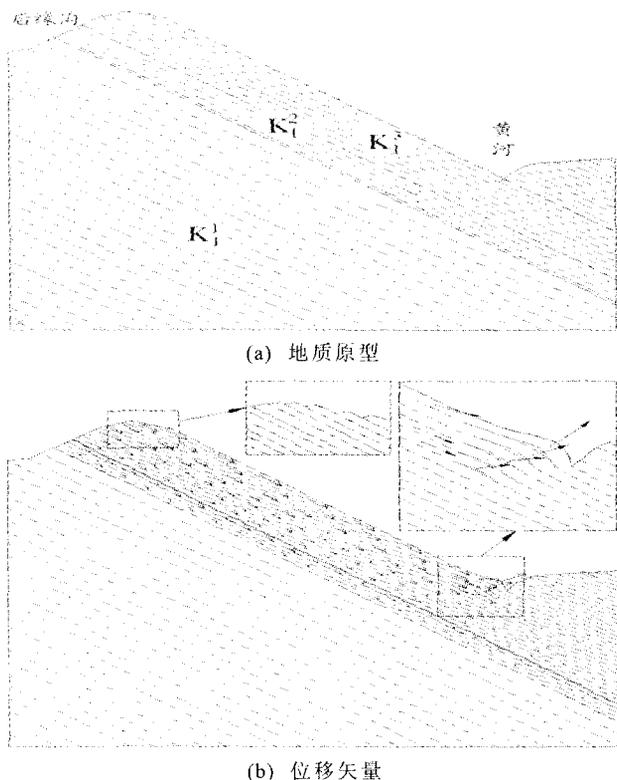


图5 滑坡形成机理数值模拟

Fig. 5 Numerical modeling of formation mechanism of the landslide.

3 滑坡演化过程

3.1 滑坡发展过程

(1) 右岸顺向斜坡的形成

晚第三纪末夷平面(2.4 Ma B. P.)和第四纪初期剥蚀面(2.4 ~ 1.8 Ma B. P.)形成以后,本段黄河开始形成并下切,切穿积石山并连通临夏盆地和循化盆地,其间共形成了7级阶地^[6],右岸形成顺向斜坡(图 6(a))。

(2) 斜坡岩体的层间错动和溃屈

黄河下切和右岸顺向斜坡形成的整个过程中,继卸荷回弹并导致斜坡应力重分布后,斜坡岩体开始蠕变变形。蠕变早期为层间错动和后期弯折或溃屈(图 4、图 5、图 6(b)),其间滑坡前缘中部出露的 K_1^2 最先受到黄河冲刷的影响,层间错动加剧。随着层间错动的发展,坡脚位置处层状岩体根部向临空方向挠曲而后部轻微地沿层面下沉(图 4(b)),在

II区下游侧关沟沟口至今仍保留变形痕迹(图 3(a))。

(3) 统一贯通面的形成

坡脚部位弯曲的加大,使该部位层间局部扩离而“空化”,进一步减小了岩层之间结合和抗滑力,加速了层间错动的进程。而横向裂缝进一步向深部的扩展,使上部 K_1^3 岩层逐层由外向内被折断(图 6(b)),从而与原层面共同形成 X 型结构面。同时后缘岩层下沉加剧而出现多级小平台,表层黄土随之下落或坍塌。随着变形进程的深入,坡脚处弯曲显著增强,岩体扩容更为明显,横向挤压性拉张裂缝向深部扩展并切断更多岩层,加剧了原斜坡岩体的破坏。在地震及其它因素作用下拉张破裂面继续扩展, K_1^3 全部岩层均从弯曲最大点处被折断,最终扩展至 K_1^2 界面处,前缘拉张破裂面与层间错动带形成统一贯通性面(图 6(c))。

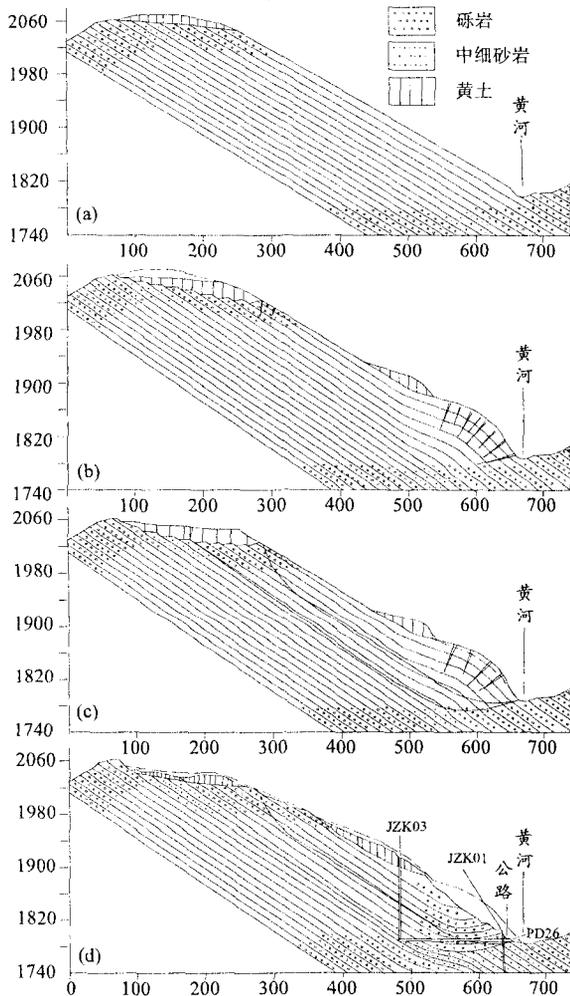


图6 滑坡演化机制

Fig. 6 Evolution process of the landslide.

(4) 滑坡的产生

统一贯通面的形成标志着斜坡区地质环境演化发生根本性改变,即由斜坡变形(变形体)转化为滑坡,应力状态也相应发生突变,贯通面上的 K_1^3 有下滑的趋势,统一贯通面转化为早期滑面或主滑面 H_3 (前缘拉张破裂带也转化为剪切性质而成为统一滑面的一部分),这正是该滑坡滑面前段反翘且岩层平缓甚至反翘(图2(a)、图3(b))的根本原因。

统一贯通面形成后,在自重和外因诱发作用下 K_1^3 沿滑面产生整体性下滑而产生滑坡(图6(d))。除洪水对前缘(尤其中部 K_1^2)冲刷外,地震是产生滑动的主要外因。该滑坡的发生位置(后缘位于山脊)、坡体结构、表面微地貌等特征均与地震诱发滑坡的特征^[7-11]相似;库区支流上的天池系地震滑坡所致^[3];按照滑坡滑动经历时间的估算方法^[11],该滑坡发生时间3.7 kaB. P.,与导致“喇家文明”消失的那次地震以及伴随而来的洪水的发生时间^[4]非常接近,均表明该滑坡的整体滑动与地震密不可分。

(5) 滑坡的分解及次级滑动

滑坡的整体滑动使原岩层序结构遭到一定程度的破坏,同时滑动暂时休止并开始新的应力调整和能量积蓄,在外界因素作用下开始新的发展演化。滑坡中部前缘出口处的 K_1^2 和西部前缘的 F_{14} 及其分支断层均易受到冲刷,在汛期黄河和西侧深大冲沟洪水的联合冲刷作用下(甚至仍有可能受到地震作用),中西部前缘不断淘蚀,进而使滑体由表入里沿早期层间错动面(如 H_1 和 H_2)产生多级次级滑动(图6(d)),不生多个平台甚至反坡。滑体东部因受黄河冲刷作用较弱,后期活动不甚明显。

因两侧冲沟深大,应力重分布以及洪水强烈冲刷导致滑坡向两侧冲沟横向解体,在沟侧壁产生众多与沟平行的拉张裂缝, I 区尤为明显和严重。

III 区向前的运动受前部 I 区和 II 区的阻挡,但受两侧冲沟的影响,本区滑体向两侧产生次级滑动,形成中间高而两侧低的多级台阶。

3.2 滑坡当前稳定性分析

继大滑动和分解运动完成以后,滑坡进入暂时的相对稳定状态并演化至今。定性评价方法以及简化 Bishop 法(B)、Morgenstern 法(M)、简化 Janbu 法(J)和不平衡推力法(U)定量计算方法综合评价表明,该滑坡当前整体处于稳定状态或暂时稳定状态($F_s = 1.09 \sim 1.41$), II 区优于 I 区, I 区浅部优于深部, II 区深部优于浅部(表1)。

3.3 滑坡演化趋势

滑坡距坝较近,其西部前缘将受水库泄洪雾化雨的影响,而且滑坡在 VII 度地震区内,故滑坡将在雾雨、地震等诱因及其耦合作用下继续演化。

计算表明(表1),在地震作用下, I 区将整体性复活, II 区稳定性也有所降低,但其表层也可能局部失稳;泄洪雾雨联合作用下,当雾雨上升至 I 区前缘 1 840 m 高程时,稳定性普遍降低而处于极限平衡状态($F_s = 1.0 \sim 1.1$);雾雨和地震耦合作用下, I 区稳定性大为降低并可能整体失稳复活。

表1 滑坡稳定性计算结果

| 状态 | 剖面 | 滑带 | 不同方法计算的 F_s | | | |
|---------------------|---------|-------|---------------|-------|-------|-------|
| | | | B | M | J | U |
| 天然 | I - I | H_1 | 1.215 | 1.234 | 1.216 | 1.103 |
| | | H_3 | 1.123 | 1.213 | 1.092 | 1.109 |
| | II - II | H_1 | 1.338 | 1.308 | 1.261 | 1.305 |
| | | H_3 | 1.407 | 1.397 | 1.338 | 1.408 |
| 地震 ($a=0.11g$) | I - I | H_1 | 0.983 | 1.003 | 0.970 | 0.889 |
| | | H_3 | 0.905 | 1.005 | 0.866 | 0.879 |
| | II - II | H_1 | 1.088 | 1.063 | 1.011 | 1.043 |
| | | H_3 | 1.117 | 1.113 | 1.043 | 1.083 |
| 雾雨 ($H=1840m$) | I - I | H_1 | 1.082 | 1.199 | 1.098 | / |
| | | H_3 | 1.010 | 1.062 | 0.995 | / |
| 地震和雾雨 耦合作用 | I - I | H_1 | 0.865 | 0.895 | 0.863 | / |
| | | H_3 | 0.755 | 0.853 | 0.743 | / |

4 结论

(1) 该滑坡是一大型顺层岩质滑坡,软硬相间的岩层组合和顺向坡的坡体结构是其主要形成条件,黄河冲刷和地震作用是其主要影响因素。

(2) 滑坡是在顺向坡层间错动和溃屈基础上发展的顺层-切层岩质滑坡, II 区反映了该滑坡早期演化特征, I 区为 II 区的发展方向。地震对该滑坡的形成有至关重要的作用。

(3) 受诸多因素影响和制约,该滑坡整体滑动后,各部分的应力状态的不同使滑坡产生差异性的分解运动,从而使其在微地貌、物质和坡体结构等表现出显著的平面分区性和剖面分层性特征。

(4) 综合分析表明,该滑坡当前处于稳定状态。在未来环境条件变化情况下,滑坡将向不稳定方向发展,其中地震和泄洪雾雨均将导致滑坡稳定性降低,而在地震和雾雨耦合作用下,滑坡将可能整体失稳复活。

[参考文献]

- [1] 刘高,张帆宇,李新召. 凤安山滑坡地质过程研究[A]//第二届全国岩土与工程学术大会论文集[C]. 北京:科学出版社, 2006, 418-424.

- [2] 王恭先,徐峻岭,刘光代. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社,2004.
- [3] 刘惠军,孙冠平,刘小伟. 天池滑坡坝在地震作用下稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(Supp. 2):2809-2812.
- [4] 夏正楷,杨晓燕,叶茂林. 青海喇家遗址史前灾难事件[J]. 科学通报,2003,48(11):1200-1204.
- [5] 孙广忠,张文彬. 一种常见的岩体结构-板裂结构及其力学模型[A]//中国科学院地质研究所编. 工程地质研究文集(二)[G]. 1985:275-282.
- [6] 李吉均,方小敏,马海洲. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. 中国科学,1996,26(4):316-322.
- [7] Panizza M. Geomorphology and seismic risk[J]. Earth - Science Review,1991,31(1):11-20.
- [8] Jibson R W, Harp E L. Landslides triggered by the Northridge earthquake[J]. Earthquakes & Volcanoes, 1991, 25(1): 31-35.
- [9] 卢育霞. 宁夏西吉县境内地震滑坡的地貌特征及其减灾开发对策探讨[J]. 西北地震学报,2007,29(1):79-83.
- [10] 李元池. 地震与滑坡的关系及地震滑坡预测的探讨[A]//滑坡文集(第二集)[G]. 北京:人民铁道出版社,1979:127-132.
- [11] Keefer D K. Landslides caused by earthquakes[J]. Geo. Soc. America Bulletin. 1984, 95: 406-421.



(上接 248 页)

本文探讨了美国西部第四纪冲积土中覆盖土层厚度大于 100 m 的 D 类场地的地表地震反应的一般情况。由于地震安全性评价中的基岩面一致概率谱依据的是“基岩”场地强震记录建立的衰减规律,故与立体台阵资料得到的土层放大效应或理论分析的结果相比,直接比较“基岩面”和地表强震记录的结果不确定性最小,最接近安评中的实际情况。在我国,对于象上海、温州等具有厚覆盖土层的地区,厚土层对地震动的影响是人们普遍关注的课题,故本研究结果将有助于认识这些地区安评中厚土层地表峰值加速度的放大作用。

[参考文献]

- [1] 徐永林. 软土覆盖层地震面波的地震动反应及台湾 8 级地震对上海高层建筑影响估计[J]. 西北地震学报,2004,26(4):309-314.
- [2] 姜慧. 地震动随机模拟方法中的场地效应研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2005.
- [3] 陈继华. 新近沉积土动力性能及深软场地地震效应研究[D]. 南京:南京工业大学,2004.
- [4] 周锡元. 场地条件对地面运动峰值加速度的影响[A]//房屋建筑抗震设计[G]. 北京:地震出版社,2005:365-377.
- [5] 霍俊荣. 近场强地面运动衰减关系规律的研究[D]. 哈尔滨:国家地震局工程力学研究所,1989.
- [6] 钟羽云,朱新运,张震峰. 不同类型地震的地震矩-震级标度关系研究[J]. 西北地震学报,2004,26(1):57-61.
- [7] 国家地震局震害防御司. 地震工作手册[M]. 北京:地震出版社,1990.
- [8] 陈培善,白彤霞. 震源参数之间的定量关系[J]. 地震学报,1991,13(4):401-411.
- [9] C J Wills, M Petersen, W A Bryant, et al.. A Site-Conditions Map for California Based on Geology and Shear-Wave Velocity [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2000,90(6B):187-208.
- [10] 石树中. 上海及邻近地区地震动衰减关系研究[D]. 上海:同济大学,2004.
- [11] 俞言祥. 长周期地震动衰减关系研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2002.
- [12] POTAPOV V A, CHERNOV E A. Strong Seismic Effects on Systems of "Ground-building" in the Presence of Softened Grounds [J]. 西北地震学报,2005,27(1):30-34.