

大型阶地型地震滑坡的成因机制和三维稳定性分析

董金玉¹, 王 东², 杨继红¹, 黄志全¹

(1. 华北水利水电大学 资源与环境学院, 郑州 450011; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043)

摘 要: 以陈家坝场镇滑坡为例, 通过对都坝河阶地的调查, 概化出了都坝河阶地模型; 根据对陈家坝滑坡的地貌学分析, 结合水文地质调查和剖面对比, 发现陈家坝滑坡位于都坝河的二级阶地上, 是大型阶地型地震滑坡; 通过陈家坝阶地地震滑坡的地形地貌、物质组成和岩土体力学性质室内试验分析, 对其成因机制进行深入研究, 发现陡倾的地形条件、松散的物质条件以及滑坡区前后缘高差大构成了滑坡的基本条件, 而地震波反复剪切作用下饱和滑带土的残余剪切强度低和距离断裂带较近的强地震动是滑坡形成的主要原因; 在对滑坡阶地模型概化的基础上, 考虑滑坡的三维空间效应, 采用有限差分强度折减法对其在自然状态、暴雨、地震等工况下进行了三维稳定性分析评价, 并得到了不同工况下滑坡潜在三维不稳定的区域。这些分析对阶地型地震滑坡失稳机制的研究及稳定性评价具有一定的意义。

关 键 词: 地震滑坡; 成因机制; 阶地; 松散堆积层; 三维强度折减法

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Analysis of formation mechanism and three-dimensional stability of large scale terrace of earthquake landslide

DONG Jin-yu¹, WANG Dong², YANG Ji-hong¹, HUANG Zhi-quan¹

(1. College of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. College of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Through in-situ investigation, the terrace model of Duba river is generalized. According to the geomorphic characteristics and hydrogeological investigation, Chenjiaba seismically induced landslide is located on the terrace the river; sliding surface is formed by long-term immersion of groundwater. Geological structures of sliding mass and the residua on terrace as well as the attitude of bedrock exposed at the front and posterior margin of the landslide are compared respectively; so failure mode of this landslide is determined; while the severe earthquake occurred, silty clay of the sliding surface are weakened by groundwater, which resulted in the sliding of unconsolidated accumulative formation on the terrace. The finite-difference and strength-reduction method is adopted to compute its stability factors under natural, rainstorm, seismic conditions. And three dimensional shapes of potential unstable body under different conditions are put forward.

Key words: earthquake landslide; formation mechanism; terrace; unconsolidated accumulative formation; three-dimentional strength-reduction method

1 引 言

2008 年 5 月 12 日在四川省汶川县发生的 8.0 级地震,造成了惨重的人员伤亡和巨大的财产损失。

这些崩滑体在峡谷河流地带堵塞河道形成了大量的堰塞湖,时刻威胁着下游人民的生命财产安全。“5·12”汶川地震发生后,研究人员对地震引发的次生地质灾害进行了大量的研究。乔建平等^[1]对地

震诱发滑坡的分布特点和危险性区划进行了研究；姚鑫等^[2]对地震引发滑坡与地层岩性、坡度相关性进行了研究；张永双^[3]、殷跃平^[4-5]、孔纪名^[6]等对牛圈沟、谢家店子等高速滑坡进行了详细描述；胡卸文等^[7]对唐家山滑坡的堵江机制等方面进行了研究；祁生文^[8]、黄润秋^[9]、李秀珍^[10]等的研究也主要集中于宏观的调查分析方面，对地震造成滑坡成因大部分只是进行了初步分析，对于地震区由第四系松散堆积物形成的滑坡研究不多，特别是对河流阶地上的堆积层，由于下部存在基岩夷平面，使这种结构形成一种稳定的斜坡地形，一般情况下不易于滑动和失稳，但陈家坝场镇滑坡却在地震作用下产生了大规模的滑动。本文以陈家坝场镇阶地地震滑坡为例，对其成因机制进行了深入研究，并采用三维有限差分强度折减法对其进行了稳定性分析，得到了不同工况下滑坡潜在三维不稳定的区域，研究成果对阶地型地震滑坡失稳机制的研究及稳定性评价具有一定的意义。

2 地质环境背景

2.1 都坝河阶地

陈家坝场镇滑坡位于陈家坝场镇西北角都坝河右岸。一个较大支流从陈家坝场镇的北侧汇入都坝河。都坝河河床宽阔，在该处形成“U”型河谷，两岸受到河流快速下切作用影响形成山峰耸立的地貌，多基岩出露。地震前为连续斜坡，地震滑坡后，在高程为 805 m 左右形成了一个宽阔的平台，平台后缘由于崩塌出露泥盆系 (D_1) 砂岩、页岩地层。

通过现场调查，对都坝河两岸地形地层比较发现，在河谷两岸残留的阶地沿河形成了一系列的平台，平台高程大致相当。由于后期河谷的侵蚀作用，残留平台的面积都不大，但阶地的形状仍然得到了保持。同时，由于本地区处于地壳活跃期，新构造运动导致的河流下切造成两岸形成岩质陡坡，陡坡的崩塌作用及少量的坡积物覆盖于阶地顶部，在阶地后部与基岩接触的地方形成过渡带。由于部分残留阶地被侵蚀后剩下的部分较为狭窄，崩塌积物已经将阶地形成的平台掩埋，在初始的地形上看似阶地已经不存在，但实际上借助对基岩面形状的分析仍然可以确定阶地的形状。由于该地区大部分为山区，形成的阶地也均为基座阶地，阶地距现在河床高度大约 100 m 左右，上部冲洪积物厚度约 20~40 m，地质概化模型见图 1。

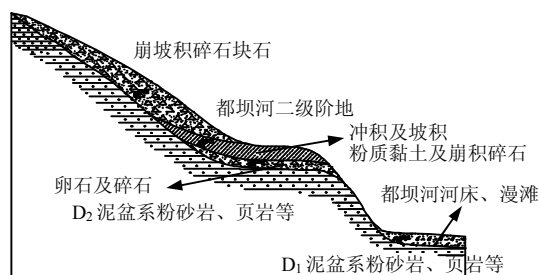


图 1 都坝河阶地模型

Fig.1 Terrace model of Duba river

2.2 区域地质背景

北川断裂是“5·12 汶川大地震”的发震断裂，该断裂为龙门山断褶带得主中央断裂，是映秀—北川断裂的北延段，该断层在北川县经擂鼓—曲山—陈家坝延伸，由西南向东北方向从陈家坝乡场镇北西侧通过，其距场镇 400~600 m，断层倾向北西，倾角为 60°~70°，为寒武系的砂岩逆冲于志留系、泥盆系乃至石炭系之上，切割深度较大，垂直断距千米以上，沿断裂线分布着串珠状的上升泉。

2.3 地层岩性

陈家坝场镇滑坡区域内出露的岩性主要为残留二级阶地上的粉质黏土夹碎石土、碎石夹卵石及在阶地后缘形成的崩塌堆积碎石、块石，下部为都坝河的现代河流漫滩和河床堆积物，主要为卵石夹碎石。

(1) 碎石 (Q_4^{al+pl}): 分布于都坝河的河流漫滩和河床部位，母岩成分主要为砂岩和页岩，夹有花岗岩和白云岩等，磨圆度中等。

(2) 碎石夹块石 (Q_4^{col+dl}): 主要分布于残留阶地后部与基岩接触部位，母岩成分主要为砂岩和泥页岩，泥页岩块石及碎石多强风化，呈棱角状。表层覆盖于残留阶地的粉质黏土上部，为近现代堆积物。

(3) 粉质黏土 (Q_3^{2al+dl}): 褐黄色，稍湿，硬塑，含有 10%~20% 的碎石及少量碎石，为残留阶地上的冲洪积物与崩塌、坡积碎石混合结果，粉质黏土层底部含有角砾，为灰黑色，厚 0~10 m 不等。

(4) 碎石、角砾 (Q_3^{2al+dl}): 母岩成分主要为砂岩，棱角状~次磨圆状，较密实，粒径一般为 2~5 cm，局部含有少量块石，充填有大量的褐黄色、灰黑色粉质黏土。

(5) 泥页岩、砂岩 (D_1) 为泥盆系滨海类复理式碎屑岩建造地层，岩性上部灰黄、灰绿色粉砂岩、细砂岩、石英砂岩、泥页岩夹深灰、灰绿色细砂岩、泥质砂岩、炭质页岩，区内主要分布于都坝河左岸。

2.4 水文地质特征

地震前阶地平台北侧沟谷内有一个小型水利发电厂, 在地震过程中被摧毁。现场调查发现在点 q1~q5 出现多处泉水, 表明平台上地下水比较丰富 (图 2)。泉水出露点的高程较为一致, 为基岩与第四系松散堆积物接触界面上出露, 在边坡的表面形成下降泉, 下雨时泉水流量大, 平时仅以浸润状出现, 表明现在平台上部第四系松散储水层水量较小, 与四周泉水易于排泄有关, 补给方式主要为大气降水。

3 滑坡体基本特征及成因机制分析

3.1 空间形态及特征

陈家坝场镇滑坡体平面形态呈“长条状”, 沿近东西向展布。该滑坡整体地势西高东低, 呈上陡中缓下陡, 纵向上呈台阶状, 滑体平均坡度为 21° 。滑坡总体呈两级平台, 滑坡后部一级缓倾平台明显, 平均长为 115 m, 平均宽为 79 m, 坡角为 $9^{\circ}\sim 12^{\circ}$; 前部二级缓倾平台平均长为 65 m, 平均宽为 380 m, 坡角为 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$, 见图 3 和图 4。主滑方向为 78° , 纵向长为 512 m, 横向宽为 290 m, 滑坡面积

为 $20.3\times 10^4\text{ m}^2$, 滑体平均厚度为 17 m, 体积约为 $345.1\times 10^4\text{ m}^3$, 属大型滑坡。

滑坡滑动前没有明显的阶地平台, 滑动后在高程为 805 m 左右处形成了平台。泉水 q1~q5 沿地震后形成的平台周边分布, 主要是由于基岩为泥盆系泥岩和砂岩, 岩体总体较完整, 形成隔水层, 大气降水由第四系松散层入渗, 到基岩界面受到阻隔后形成泉水出露, 因此, 基岩在该处也是一个平台。

对于平台上的地层物质进行调查, 发现在滑坡的西北部 D 点保留有未滑动的地层, 见图 5。该处植被发育, 主要为灌木丛, 有少量乔木生长, 下部地层主要为褐黄色粉质黏土层, 里边夹有较多的磨圆较差的块石和碎石, 块石和碎石的母岩成分主要为砂岩和泥页岩, 与出露基岩岩性相同, 表明为残积和坡积成因。在滑坡后形成的冲沟内也发现, 粉质黏土底部有较厚的碎石层, 碎石母岩成分除了砂岩、页岩外, 还有白云岩、白云质砂岩等磨圆中等的成分, 从而表明平台上的物质为冲洪积成因与崩塌、坡积成因的共生性, 与平台所处位置相符合。因此, 滑坡所处位置为都坝河的阶地上。

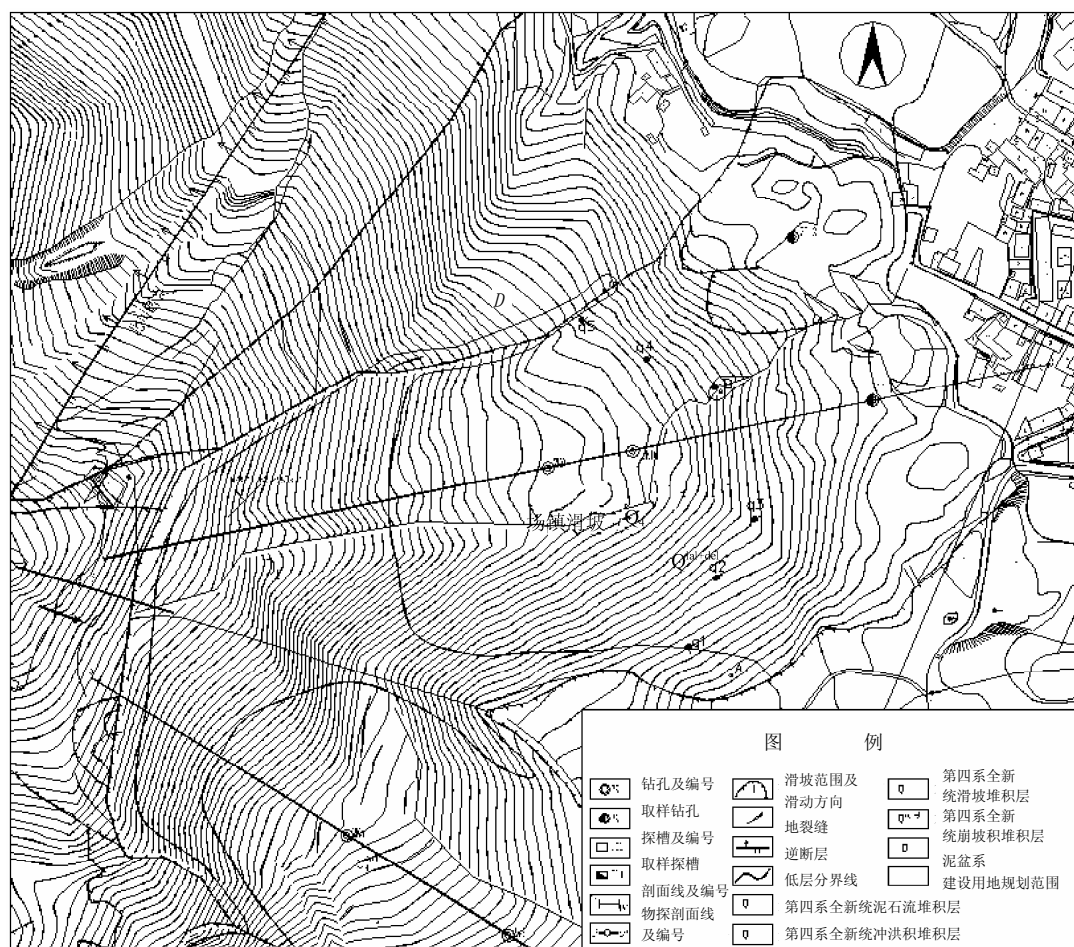


图 2 陈家坝场镇滑坡地质平面图
Fig.2 Geological plan of Chenjiaba landslide

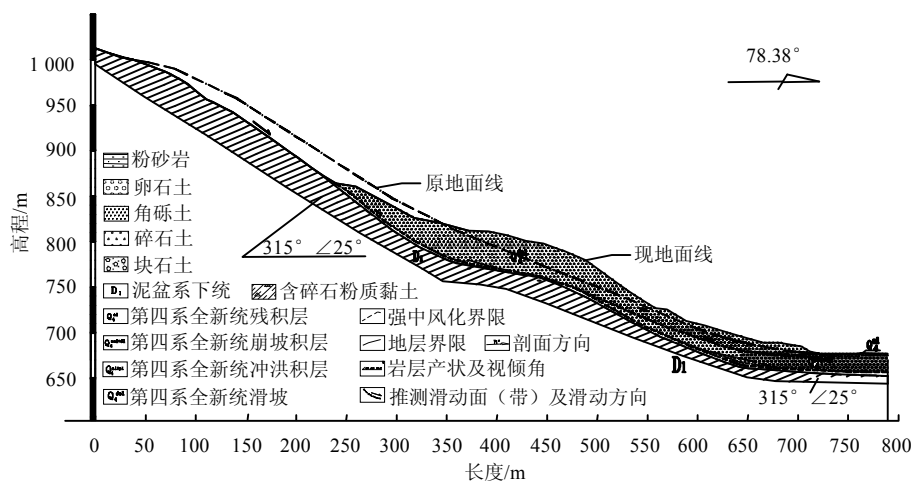


图 3 滑坡地质剖面图
Fig.3 Geological profile of slope



图 4 滑坡地貌
Fig.4 Geomorphic features of landslide



图 5 残留的地层
Fig.5 Residual stratum

3.2 滑坡体物质组成

陈家坝场镇滑坡滑体物质组成主要为灰色、深灰色、灰褐色、灰黑色块石土、碎石土、含碎石粉质黏土、粉质黏土等组成。滑床主要为泥盆系(D₁)粉砂岩,局部滑床为密实度相对较高,透水性相对较差原崩坡积土。近基岩顶部处见一层含角砾粉质黏土,以此判断滑床基本上以基岩顶部为界,滑带土为含角砾粉质黏土,呈灰色、深灰色,局部见镜面、擦痕,角砾具一定程度的定向排列特征,呈次棱角状,连续性较好,从而形成一含水率高、抗剪强度低的软弱面(滑面)。

3.3 滑坡成因机制分析

滑坡区构造作用强烈,新构造运动以上升为主,河谷深切,地形陡峭,为滑坡形成创造了临空面条件。北川断层从陈家坝滑坡区后部横穿而过,因该断层挤压作用,形成了大量破碎岩体,以及在坡面上存在大量的松散残坡积物,为滑坡的形成提供了物质条件。整个陈家坝滑坡区前后缘高差将近 475 m,为滑坡形成提供了势能条件。

对滑体和滑带土进行室内剪切试验,结果见表 1。发现滑体和滑带土体饱和快剪强度较天然状态有较大降低,饱和残余剪切强度则更低。震区气候湿润,附近还存在一小水电站,致使滑体与滑带土经常处于饱和或近饱和状态,在地震剪切波的反复作用下,滑带土强度产生强烈弱化,是造成滑坡的一个重要因素。

北川断层从陈家坝场镇滑坡区后部横穿而过,在强大的地震动作用下,并且边坡上部受高山地震放大作用影响下,该滑坡从变形至发生滑动在短短的 2 min 内完成,可见地震是该滑坡形成的诱因。

表 1 滑体土和滑带土力学参数
Table 1 Mechanical parameters of soils of landslide mass and belt

野外编号	天然直接快剪		饱和直接快剪		饱和残余快剪	
	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
滑体	17.4	32.9	16.3	31.0	14.8	29.1
滑带	16.3	23.0	15.5	21.7	12.8	19.9

4 三维稳定性分析

4.1 计算方法选取

在边坡稳定性评价方法方面,用的较多的主要

有极限平衡法和基于强度折减概念的数值分析法^[11]。其中强度折减法能够对复杂地形地貌和地质结构的边坡进行三维稳定分析,考虑边坡的空间效应,并且能够考虑岩土体的本构关系和应力变形情况,不需要提前假定滑面,因此,采用强度折减法对边坡进行三维稳定性分析。强度折减法临界状态的判别主要有以下 4 种:①特征点位移法,以边坡特征部位位移突变转折处对应的强度折减系数作为边坡的安全系数^[12];②滑动面某一幅值广义剪应变的贯通^[13];③计算不收敛^[14-15];④滑动面塑性区贯通^[16]。文中采用计算不收敛判别边坡的失稳破坏。

4.2 模型构建及参数选取

根据滑坡的结构特征和物质组成将模型概化为 3 种材料,即滑体、滑带(厚 0.5 m)、滑床。根据现场调查,结合工程地质平面图和剖面图,建立三维模型如图 6 所示,模型 X 轴方向长为 600 m, Y 轴方向宽为 400 m, 竖直方向高为 380 m, 模型侧边界施加法向位移约束,底部边界施加位移全约束。材料的力学模型为弹塑性模型,强度准则采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。

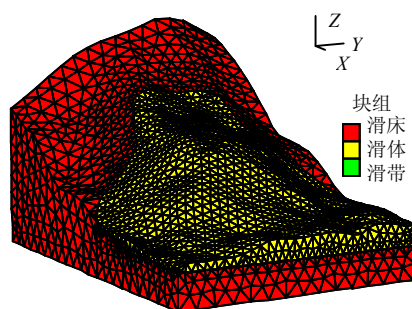


图 6 计算模型

Fig.6 Model used in calculation

本区为降雨集中和暴雨多发区,例如 2009 年 9 月 24 日遭遇暴雨,局部降雨量达到 272.8 mm,要考虑暴雨对滑体加载及对滑带弱化的影响。根据 2008 年 6 月实施的《中国地震动参数区划图》(GB110386—2001)国家标准第 1 号修改单及附件 2—1 及 2—2,场地地震烈度为Ⅷ度,地震动峰值加速度为 0.20 g,地震动反应谱特征周期为 0.40 s。因此,采用强度折减法计算 3 种工况下的边坡稳定性系数:①自然状态,②暴雨工况,③地震状态下。根据现场及室内试验确定计算参数如表 2 所示,其中暴雨工况下滑体和滑带取饱和状态下的物理力学参数。

4.3 计算结果及分析

在自然状态下稳定性系数为 1.24,滑坡体是稳定的;在暴雨工况下,由于坡体岩土体性质的弱化,

其稳定性有了大幅度的降低,稳定性系数为 1.04,处于基本稳定状态,其剪应变增量分布如图 7 所示。潜在危险区域主要为受地形的影响位于滑坡体南侧局部区域内,这也和现场调查中发现的情况完全一致,对该部位应进行重点加固处理,见图 8;地震工况下强度折减法计算的安全系数为 0.96,处于不稳定状态,其剪应变增量分布如图 9 所示,滑坡体将有发生再次整体滑动的可能,即在地震作用下滑坡体可能发生整体失稳,尽管对地震考虑为地震惯性力方向指向坡外,做法比较保守,会造成计算结果偏小,但由于滑坡体属于大型滑坡,且处于陈家坝场镇的关键部位,应采取一定的措施进行处理。

表 2 岩土体力学参数取值表

Table 2 Mechanical parameters of rock and soil in calculation

岩土类型	重度 /(kN/m ³)	变形模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa
滑体(天然)	21.6	1.2	0.28	32.9	17.4
滑体(饱和)	23.0	1.0	0.28	29.1	14.8
滑带(天然)	19.0	0.8	0.30	23.0	16.3
滑带(饱和)	21.0	0.7	0.30	19.9	12.8
滑床	25.3	10.0	0.21	41.0	230.0

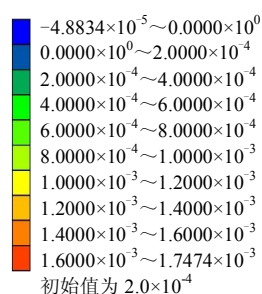


图 7 剪应变增量云图 ($F_s=1.04$)

Fig.7 Nephogram of shear strain increaments ($F_s=1.04$)



图 8 潜在危险区域

Fig.8 Potential dangerous area

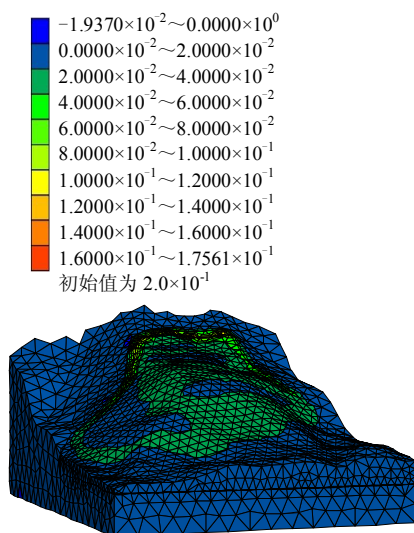


图 9 剪应变增量云图 ($F_s=0.96$)

Fig.9 Nephogram of shear strain increments($F_s=0.96$)

5 结 论

(1) 通过地貌对比分析, 概化了都坝河阶地的地质模型, 发现陈家坝场镇滑坡位于都坝河的二级阶地上, 为大型阶地型滑坡。

(2) 通过陈家坝场镇滑坡的地形地貌、物质组成和岩土体力学性质室内试验分析, 对陈家坝地震滑坡的成因机制进行研究, 发现陡倾的地形条件、松散的物质条件以及滑坡区前后缘高差大则构成了滑坡的基本条件, 而饱和滑带土的残余剪切强度低和距离断裂带较近的强地震动是滑坡形成的主要原因。

(3) 由三维强度折减法分析可知: 在自然状况下滑坡体的稳定性系数为 1.24, 处于稳定状态; 在暴雨工况下稳定性系数为 1.04, 潜在危险区域位于滑坡体南侧局部区域内; 地震工况下强度折减法计算的安全系数为 0.96, 处于不稳定状态, 滑坡体将有发生再次整体滑动的可能, 因此, 应对其进行必要的加固处理。

参 考 文 献

- [1] 乔建平, 蒲晓虹, 王萌, 等. 大地震诱发滑坡的分布特点及危险性区划研究[J]. 灾害学, 2009, 24(2): 25—30.
QIAO Jian-ping, PU Xiao-hong, WANG Meng, et al. A study on characteristics of distribution of earthquake-induced landslides and hazard zoning[J]. *Journal of Catastrophology*, 2009, 24(2): 25—30.
- [2] 姚鑫, 徐冲, 戴福初, 等. 四川汶川 Ms8 级地震引发的滑坡与地层岩性、坡度的相关性[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1156—1163.

- YAO Xin, XU Chong, DAI Fu-chu, et al. Contribution of strata lithology and slope gradient to landslides triggered by Wenchuan Ms8 earthquake, Sichuan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8): 1156—1163.
- [3] 张永双, 石菊松, 孙萍, 等. 汶川地震内外动力耦合及地质灾害实例[J]. 地质力学学报, 2009, 15(2): 131—141.
ZHANG Yong-shuang, SHI Ju-song, SUN Ping, et al. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geohazards[J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15(2): 131—141.
- [4] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 29—39.
YIN Yue-ping. Features of landslides triggered by the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 29—39.
- [5] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433—444.
YIN Yue-ping. Researches on the geohazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(4): 433—444.
- [6] 孔纪名, 崔云, 田述军, 等. 地震碎裂滑动型滑坡发育特点及典型实例分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(3): 119—125.
KONG Ji-ming, CUI Yun, TIAN Shu-jun, et al. Typical case study on the development characteristics of fragmentation-sliding seismic landslide[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(3): 119—125.
- [7] 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 181—189.
HU Xie-wen, HUANG Run-qiu, SHI Yu-bing, et al. Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan landslide and dam-breaking mode of its barrier dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(1): 181—189.
- [8] 祁生文, 徐强, 刘春玲. 汶川地震极重灾区地质背景及次生斜坡灾害空间发育规律[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 39—49.
QI Sheng-wen, XU Qiang, LIU Chun-ling. Slope instabilities in the severest disaster areas of 5·12 Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(1): 39—49.

- [9] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 19—29.
HUANG Run-qiu, LI Wei-le. Fault effect analysis of geohazard triggered by Wenchuan earthquake[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2009, 17(1): 19—29.
- [10] 李秀珍, 孔纪名, 邓红艳, 等. 5·12 汶川地震滑坡特征及失稳破坏模式分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(3): 72—77.
LI Xiu-zhen, KONG Ji-ming, DENG Hong-yan, et al. Analysis on characteristics and deformation failure mode of large-scale landslides induced by 5·12 Wenchuan earthquake[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2009, 41(3): 72—77.
- [11] DUCAN J M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1996, 122(7): 577—596.
- [12] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 1—7.
SONG Er-xiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(2): 1—7.
- [13] 连镇营, 韩国城, 孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 407—411.
LIAN Zhen-ying, HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 407—411.
- [14] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403.
- [15] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHERA. Slope stability analysis by strength reduction[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(6): 835—840.
- [16] 邓建辉, 张嘉翔, 闵弘, 等. 基于强度折减概念的滑坡稳定性三维分析方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 871—875.
DENG Jian-hui, ZHANG Jia-xiang, MIN Hong, et al. 3D stability analysis of landslides based on strength reduction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 871—875.