

# 2008年汶川地震前的中国大陆地震 单体滑坡与边坡地震响应

许冲

中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室,北京 100029

**摘要** 承接“2008年汶川地震前的中国大陆地震滑坡研究”一文,对2008年汶川地震前的典型单体地震滑坡或边坡地震响应开展综述。包括:1) 工程地质分析,包括真实地震滑坡分析和地震动条件下边坡分析;2) 传统力学计算分析方法,包括Newmark方法与极限平衡方法等;3) 有限元分析,包括Geostudio平台与FLAC平台等;4) 离散元分析,主要包括UDEC等离散元程序在地震滑坡领域的应用;5) 物理模型试验。

**关键词** 地震;单体滑坡;数值模拟;中国大陆

**中图分类号** X141

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.01.019

## Earthquake-triggered individual landslides and slope seismic responses across mainland China before the 2008 Wenchuan earthquake

XU Chong

Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

**Abstract** This article focuses on earthquake-triggered individual landslides and slope seismic responses, and is the continuation of “Earthquake-triggered Landslides across Mainland China Before the 2008 Wenchuan Earthquake”. Individual landslides or stability of slopes under seismic forces in cases before the 2008 Wenchuan earthquake are reviewed in detail using the following approaches: 1) geological analysis of real earthquake-triggered landslides or slope stability analysis under seismic forces; 2) conventional computational mechanics analysis, including the Newmark method and ultimate equilibrium method; 3) finite element analyses, such as GeoStudio and FLAC platforms; 4) discrete element analyses, such as UDEC and other programs applied in the field of seismic landslides; and 5) physical models. This review aims to provide references for similar studies in the future.

**Keywords** earthquake; individual landslides; numerical simulation; mainland China

2008年汶川地震触发了大约20万处滑坡<sup>[1-5]</sup>,这些滑坡面积约1160 km<sup>2</sup>,分布区域面积超过10万 km<sup>2</sup>,其中一些滑坡造成了重大的人员伤亡与经济损失。汶川地震滑坡受到了科研人员的广泛关注,并涌现了大量的研究成果,包括区域滑坡分布调查与编录、重点滑坡的详细调查、机制分析、形变、失稳、运动与堆积模拟、地震滑坡影响因子敏感性分析、滑坡易发性、危险性与风险评价、震区泥石流研究与滑坡体力学试验研究等方面<sup>[6]</sup>。虽然关于汶川地震滑坡的研究深度

远远高于以往在中国大陆发生的任何一次地震事件,但是对以往地震事件触发滑坡研究的回顾与总结可以丰富地震滑坡研究实例,为后续的地震滑坡相关研究提供参考,为将来可能的地震事件触发滑坡研究与防灾减灾提供方法、积累历史地震滑坡资料。笔者对2008年汶川地震前的中国大陆地震触发区域滑坡研究进行了总结<sup>[6]</sup>,本文从单体滑坡的角度开展汶川地震前的研究综述。

以往关于单体地震滑坡分析与评价的总结研究大多没

收稿日期:2014-06-10;修回日期:2014-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41472202,41202235)

作者简介:许冲,副研究员,研究方向为地震滑坡与活动构造,电子信箱:xuchong@ies.ac.cn,xc11111111@126.com

引用格式:许冲. 2008年汶川地震前的中国大陆地震单体滑坡与边坡地震响应[J]. 科技导报, 2015, 33(1): 107-119.

有全面反应当前研究现状。如刘立平等<sup>[7]</sup>将地震滑坡的失稳方式分为惯性失稳与衰减失稳两种。前者包括拟静力法、Newmark 分析法、有限元方法、概率分析法等;后者包括流动破坏分析法、变形破坏分析法等。并简要分析了这些方法的局限性与发展趋势。刘红帅等<sup>[8]</sup>对地震边坡响应问题中的一些重要问题进行回顾,包括地震边坡岩土体反应分析方法、动力特性与强度准则及参数测试、地震边坡失稳机理、稳定性评价指标与安全标准、边坡地震动输入与稳定性评价指标的计算精度等。尽管如此,地震边坡响应仍需要深入研究,如当前的研究难以真实模拟岩土体塑性破坏过程,边坡动力破坏的过程缺乏与此对应的数值模拟与试验结果等。洪海春等<sup>[9]</sup>总结了一些地震作用下的岩质边坡动力学分析方法,包括拟静力法、Newmark 法、数值模拟方法、综合评价方法、试验方法、数学方法与工程地质分析方法等。戚王建等<sup>[10]</sup>分析探讨了地震岩土边坡稳定性评价方法分类,包括拟静力法、Newmark 永久位移法、工程地质分析法、数值分析法、试验法、可靠度分析法等,均具有一定的应用范围与局限性,如数值分析方法方面,针对岩土体本构模型与能反映岩土材料破坏特征的强度理论研究还需要开展更多的工作。地震滑坡中的高速远程滑坡类型是危害最严重地震滑坡类型之一,程谦恭等<sup>[11]</sup>介绍了一些典型崩滑事件的几何学与运动学特征,对各种力学机理进行了总结,包括岩体的残余强度过低、触变液化、超高孔隙水压力等,一些假说如无黏性颗粒流说、圈闭空气导致流体化说、岩石自我润滑说等均用来解释这类滑坡独特的机理。以上介绍多是基于单体地震滑坡或地震边坡的某方向,未全面反应 2008 年汶川地震前的单体地震滑坡的总体研究现状。因此,本文拟对 2008 年汶川地震前的中国大陆地震单体滑坡与边坡地震响应开展全面总结。在“2008 年汶川地震前的中国大陆地震滑坡研究”<sup>[16]</sup>一文中,笔者对这一主题的区域地震滑坡特征与分布规律做了详细的总结。与此对应,本文主要对地震触发单体滑坡的分析与评价、边坡地震响应开展总结与综述,从地质分析、传统计算力学分析、有限元分析、离散元分析、物理模型试验共 5 个方面展开。

## 1 工程地质分析

该方法主要是针对一些重要单体地震滑坡或者地震动条件下边坡的调查、机制分析与工程地质分析等工作,分地震滑坡研究实例与地震动条件下边坡分析两个方面进行介绍。

### 1.1 真实地震滑坡分析

据历史记载,中国西北地区发生多次强烈地震,如 1920 年海原地震、1718 年通渭地震、1654 年天水地震等。这些地震发生在黄土覆盖区,导致了大量黄土地震滑坡发生。海原大地震发生在 1920 年 12 月 16 日,震级 8.5 级,震中烈度 XII 度,震源深度为 17 km,地震触发了大量的滑坡并形成了多处堰塞湖。一些学者<sup>[12-14]</sup>认为黄土滑坡具有黄土体解体、斜抛和粉尘化效应,并通过动力变形分析导出黄土滑坡的滑速与

滑距公式。1920 年海原地震中,在固原清水河的四级黄土台塬的马兰黄土中发生了大范围黄土低角度滑坡,白铭学等<sup>[15]</sup>对此滑坡的考察结果表明此滑坡的滑动方向为西北 24°,滑坡体长度为 6 km,宽 1.2~1.8 km,面积约 9 km<sup>2</sup>,认为该滑坡是由于马兰黄土中含砂层段地震液化上涌推挤两侧土层而造成的。袁丽侠<sup>[16,17]</sup>分析了 1920 年海原地震区地震诱发黄土滑坡的形成机理。认为黄土堆积以大孔隙发育的非饱和黄土为主,地震时突发水异常使地下水位瞬间上升、黄土中孔隙水压增高、黄土自重加大,在地震力和水动力的共同作用下,导致黄土发生液化,从而发生滑坡。孙萍等<sup>[18]</sup>在对 1920 年海原地震触发的西吉党家岔滑坡进行野外调研的基础上,采集了具有代表性的滑带土作为试验样品,以其他强震记录作为波动输入,开展了一系列环剪试验研究。结果表明,地震发生时,坡体潜在滑面的滑带土在强震作用下发生的“滑动面液化”现象是导致高速远程滑坡形成的一个重要因素。由于“滑动面液化”现象的存在,滑坡会产生逐渐增大的剪切位移与孔隙水压力,而且会获得较大的速度,从而可以为地震中高速远程滑坡的发生提供条件。郇堡地滑是 1303 年山西洪洞 8 级大地震造成的一处重要的滑坡,赵晋泉等<sup>[19]</sup>通过对该滑坡所处的构造环境与该地区各种与滑坡有关的地质、地貌条件分析,确定了该滑坡的规模与滑动方式,并且对其成因机制进行了讨论。滑坡面积约 6 km<sup>2</sup>,体积约 6×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>,是在水平地震力的作用下使富含水的松散沉积物沿软弱层滑动,滑距 100~200 m,属于后缘推移式滑坡。甘肃省陇南市武都区的九房山滑坡位于复杂的地质构造区,滑坡发生在软硬相间的易滑地层中,张歆等<sup>[20]</sup>通过 TM 多光谱与全色融合影像,对地震活动导致的甘肃省陇南市武都区外纳乡稻畦子村九房山滑坡的再次复活开展了简单的成因分析。认为地震事件是该滑坡形成的直接原因,后加上人类异常活动,导致了九房山老滑坡再次复活。

陕西翠华山国家地质公园位于秦岭北缘断裂带上,曾有过多次历史地震事件记录。贺明静等<sup>[21]</sup>分析翠华山公园中的甘湫池景区是由基岩古滑坡形成,甘湫池并非堰塞湖,而是古滑坡形成的拉张洼地;另一处景区水湫池的堰塞坝沉积物属于黏性重力流的碎屑流堆积。分析水湫池出露的三处崩塌堆积不是一次形成的,其形成条件与动力机制不同,因此可能不是由某次地震事件形成的。另有研究表明,该滑坡的运动与沉积过程存在前后部位的动力过程差异,滑坡体从后部到前部,运动方式与方向发生变化,粒径减小,混杂度增加。滑体前部以块体碰撞大量分解为主;后部以块体整体性滑动与震动不完全解体为主<sup>[22]</sup>。据记载,关中地区在公元前 780 年曾发生过大地震,有“三川皆震,三川竭,岐山崩”的描述,因此即使不是单次地震事件形成的翠华山崩塌,这么大规模的崩塌发生在活动断裂带上,有可能与古地震事件有关。在 1895 年 7 月 5 日塔什库尔干 7 级地震地表破裂带的北端,有一处大型的滑坡体,该滑坡体宽约 2 km,面积约 5.1 km<sup>2</sup>,高约 150 m。尽管该滑坡发生在 1895 年 7 级地震区,但

是测年结果表明此滑坡并非由 1895 年地震所触发<sup>[23,24]</sup>,而是大约 6800 年之前发生的。取自该滑坡堆积物之上的 6 个样品的年龄是一致的,说明该大型滑坡体是一次滑动形成的,因此这次滑坡极有可能与一次古地震事件相关。Chen 等<sup>[25]</sup>对金沙江上的 8 处古滑坡坝开展了测年研究,12 个<sup>14</sup>C 样品与 9 个光释光样品的测年结果表明,这些滑坡坝的形成时代为 122—1100AD,初步推测这些滑坡坝可能与古地震事件有关。通过对其中一处苏洼龙滑坡导致的堰塞湖的年代学研究,发现苏洼龙一带曾经发生过多次古地震事件(分别发生在距今 1900、1355、1115 年之前),推测该区的大型古滑坡主要由这些地震事件诱发形成,反映了该区域金沙江断裂全新世晚期的强烈活动性<sup>[26]</sup>。然而,这些滑坡与古地震事件有关只是一种可能,是否肯定是由地震触发,还需更多的研究。除了这些距今较近的滑坡,也有一些年代更久远的古滑坡<sup>[27,28]</sup>。其中云南巧家县城滑坡的确定是通过目视解译航片发现所在的斜坡显示为典型的滑坡地形,再加上此处金沙江异常弯道、斜坡上松散物质分布及所处地质环境与降雨条件。该滑坡发生区域分布 5 条主要活动断裂带,包括西南部的小江断裂带与则木河断裂带,中部的布拖-巧家断裂带,东北区域的巧家-莲峰断裂带与东侧的巧家-大关断裂带,因此该滑坡可能由地震活动触发,而降雨因素可能也会导致该滑坡的发生。滑坡的弧形后壁高程 2600~3271 m,后壁平均高 300 m,坡度 30°~60°。该滑坡的体积估计约 120 亿 m<sup>3</sup>,根据滑体前缘堆积的保存完好的 4 级阶地上覆在滑坡堆积体之上,估计该滑坡发生在晚更新世前,中更新世晚期,距今约 10 万年。关于此滑坡更有说服力的年龄数据还需要开展更多的研究<sup>[28]</sup>。

## 1.2 边坡地震动响应分析

与真实地震滑坡研究不同,关于地震动条件下的边坡分析研究主要是分析边坡在地震动条件下的响应。张保军等<sup>[29]</sup>分析了清江隔河岩水库诱发地震对库岸滑坡体稳定性的影响,地震直接使滑坡体深部和地表变形加速,促进滑坡进一步发展。湖北姚家坪库区堰塘滑坡在天然状态下处于稳定状态,魏贵春等<sup>[30]</sup>基于区域地震活动性、地质构造背景等数据,确定了区域地震活动性参数与地震动参数衰减规律,进一步判断出该滑坡在地震条件下处于极限平衡或者不稳定状态。祁生文等<sup>[31]</sup>基于地震作用下的边坡稳定性影响因素,将边坡失稳总计为由于地震惯性力的作用以及地震产生的超静孔隙水压力迅速增大和累积作用这两个方面原因造成的。不同的边坡类型导致动力失稳的主要因素并不相同。其中塑性流动失稳破坏是孔隙水压力的累积作用起主导作用;崩塌型、层体弯折型滑坡为地震惯性力起决定作用;滑动型破坏是由两者共同作用的;后发型边坡失稳是由于地震累积效应导致边坡岩体力学参数降低而决定的。毛彦龙等<sup>[32]</sup>认为地震时的坡体波动振荡在斜坡岩土体变形破坏过程中产生累进破坏效应、启动效应和启程加速效应共 3 种效应。地震时坡体波动振荡在斜坡岩土体内形成不同类型的附加应力导致了累进破坏效应的产生,进而在各种不连续面与裂隙

末端产生应力集中,进一步引起不连续面与裂隙不断扩展并贯通,形成潜在滑动面。滑动过程中会使滑面物质进一步破碎,或由于水的进入而产生孔隙水压力,从而使滑面上的有效应力降低,抗滑力减少,最终形成滑坡。另外,毛彦龙等<sup>[32]</sup>还提出了坡体波动振荡产生的启程高速度,会使一些短程低速滑坡转变成高速远程滑坡。李超等<sup>[33]</sup>分析了堆积层滑坡在地震作用下的成因机制。地震作用下,坡体由于多种因素而减少了安全系数,从而形成滑坡。这些因素包括竖向地震力的震陷作用,水平地震力的剪切作用,滑体与滑床刚度差异导致的不同地震动响应,地震动导致的孔隙水压力放大作用,地震对坡体的累进破坏作用,地震动振荡减阻效应,与地震动压推扩展效应。王来贵等<sup>[34]</sup>建立了单一滑面滑体受基底岩石强迫振动的模型,采用非线性动力学方程描述滑体的变形规律,分析基底岩石振动过程中导致滑体移动的原因。指出了在一个频率与振幅范围内,基底的震动会引起潜在滑体位移突变,在滑面的法线方向上张开,在切向方向发生错动而产生滑坡。

## 2 传统的计算力学分析

### 2.1 Newmark 方法

Newmark 方法是一种较常用的岩质地震滑坡失稳分析方法。卢育霞等<sup>[35]</sup>将地震滑坡最大滑距分解为地震时坡体波动振荡产生的位移和地震波动停止后滑坡的滑移距离两部分,采用 Newmark 有限滑动位移分析模型计算前者的永久地震位移,再进一步计算地震波动停止后滑坡滑移距离。并且将结果用于 1920 年海原地震诱发黄土滑坡的滑距估测,表明提出的地震滑坡滑距计算公式是有效的。祁生林等<sup>[36]</sup>基于剩余推力法思想,结合 Newmark 有限滑动位移法,考虑了由于动力作用造成的孔隙水压力变化,提出了一种简便的估算地震动力永久位移的方法。并将应用此方法得到的结果与应用 FLAC<sup>3D</sup>方法得到的结果进行了对比,结果表明提出的方法得到的结果较为保守,但两者的结果基本接近。李忠生<sup>[37]</sup>应用地震危险性分析理论和地震人工合成技术,给出 Newmark 法中所需的地震动时程,开展一处具体滑坡在地震动作用下的稳定性分析。Newmark 法计算得到的结果比拟静力法要么“稳定”要么“不稳定”的二元结果更具优越性,也更容易被接受。计算实例结果表明坡体中地震动峰值加速度与土层深度存在负指数关系。坡体对基岩入射地震波的放大倍数近似与坡体厚度呈线性关系,但是放大倍数受地震动作用强度的决定。因传统的 Newmark 方法不考虑结构面退化,祁生文<sup>[38]</sup>针对岩质边坡平面滑动问题和楔形体滑动问题,提出了一种考虑结构面退化的岩质边坡的地震永久位移算法,提供了该法实施的流程,发现该方法计算成果与试验计算结果吻合较好,能很好的估计边坡地震永久位移量值,该方法更适合于估计地震永久位移量值较小的边坡。张自标<sup>[39]</sup>应用包括 Newmark 方法在内的多种方法对地震作用下西攀高速公路边坡工程开展了稳定性分析,研究了加速度放大系数与坡高的

关系得到了一些有价值的规律,包括同一高度的边坡人工波加速度放大系数高于输入实际地震波的加速度放大系数;边坡的加速度放大系数范围为1~2,并非随着边坡的高度增加而一直增加;加速度放大系数随着地震烈度的增加而升高;对于实际地震波,在低坡位位置加速度放大系数随坡高变化慢,高坡位上加速度放大系数随着坡高变化而增长较快,而对于人工地震波,放大系数与坡高近似呈线性关系增长。

## 2.2 拟静力方法

拟静力方法采用极限平衡原理,通过反应谱理论将地震对边坡的作用以等效荷载的方法表示,进一步根据这一等效荷载采用静力分析方法对斜坡坡体变形开展分析与位移计算。这一方法采用静力学方法近似解决动力学问题。黄河积石峡水电站坝址上游有一个滑坡堵塞沟谷形成的天池堰塞湖,对应的滑坡坝堆积体顶宽100~250 m,底宽380~450 m,最大宽度约635 m,长720 m,总体积约1.4亿 $m^3$ ,刘惠军等<sup>[40]</sup>应用拟静力法,开展了该滑坡坝在地震作用下的力学分析研究,结果表明该滑坡坝在地震作用下是稳定的。黄建梁等<sup>[41]</sup>基于刚体力学原理的坡体地震动态分析理论,对1976年7月28日唐山地震引起的白河主坝滑坡开展失稳机制分析,结果表明白河主坝滑坡是由于地震过程中坡体抗剪强度显著丧失与地震导致了坡体大幅度位移所引起的,竖直地震动对坡体位移的影响较小,在地震位移计算中可以略去竖直地震动对坡体的影响。栾茂田等<sup>[42]</sup>考虑到拟静力方法与Newmark方法各自的优点和限制,将土石坝地震动力响应分析与拟静力极限平衡分析方法相结合,提出了合理估算坝坡上潜在滑坡体地震滑移量的数值计算方法,结合一个土石坝算例探讨了竖向地震动分量、滑坡体竖向地震响应、震动孔隙水压力等各种因素对土石坝地震位移与抗震性能的影响。作大磊<sup>[43]</sup>以宝鸡市渭北台塬斗鸡台滑坡为例,采用极限平衡法计算了暴雨、地震各种工况下的滑坡稳定性,结果较好的反映了地震降雨型滑坡的形成机制。陈蜀俊等<sup>[44]</sup>对比了奉节长江大桥北岸边坡的现状边坡工况与175 m水位线边坡工况下静力与地震动力稳定性差异。类似的方法还被应用于三峡库区巫山县冯家坝滑坡<sup>[45]</sup>与兴山县核桃树沟滑坡<sup>[46,47]</sup>、大渡河新华古滑坡体<sup>[48]</sup>、清江水布垭坝址库首区古滑坡<sup>[49]</sup>、兰州皋兰山三台阁黄土滑坡<sup>[50,51]</sup>、四川木里县城滑坡<sup>[52]</sup>、攀钢与攀矿场地边坡地震稳定性<sup>[53]</sup>、马钢新区土坡<sup>[54]</sup>、与南京地区滑坡<sup>[55]</sup>等。

何斌等<sup>[56]</sup>从拟静力平衡法中的剩余推理法与简布法的基本原理出发,分析了两种方法的不同假设前提条件。实例计算结果表明基于剩余推力法得到的结果比简布法得到的结果稍大,用剩余推力法计算滑坡稳定性时水的影响要大于地震,反过来,用简布法计算稳定性时地震的影响稍大。李亮等<sup>[57]</sup>对该方法应用于浅层与深层滑坡的实用性进行了探讨,无论是浅层或深层滑坡,自重产生的滑动力矩占主要方面。随着滑动面的由浅及深,浅层滑坡自重产生的滑动力矩与总体抗滑力矩比值下降幅度较大,而对于深层滑坡,随着滑动面的由浅及深,地震产生的滑动力矩与总体抗滑力矩比值增

长幅度较大。叶海林等<sup>[58]</sup>与郑颖人等<sup>[59]</sup>考虑到传统的拟静力方法和安全系数时程分析法在评价边坡地震稳定性时存在一定的局限性,提出了基于拉-剪破坏的动力时程分析法和强度折减动力分析法,为地震边坡安全系数计算提供了一种新的思路。

此外,罗渝等<sup>[60]</sup>以极限分析上限定理为基础,分别针对平移式和旋转式两种滑坡滑移形式,推导出这两种滑移形式下滑坡体产生永久位移的临界加速度,考虑地震输入能量及结构能量耗散之间的平衡关系并建立预测地震作用下滑坡永久位移的计算方法。早期的研究如王思敬等<sup>[61]</sup>对岩体边坡楔形体动力学分析,推导出一组相应的动力平衡公式,评价楔形体地震滑动位移。

## 2.3 基于概率理论的计算力学方法扩展

传统的计算力学方法除了Newmark方法与拟静力方法外,还有一些方法是在力学方法的基础上考虑了概率或其他数学方法。如苏燕等<sup>[62]</sup>考虑到基于单纯的抗滑稳定性系数不能满足土石坝地震风险分析的要求,因此在拟静力方法的基础上,结合Monte Carlo可靠度分析,开展土石坝地震滑坡概率分析,得到的结果比单值安全系数法更为合理。马尔曼<sup>[63]</sup>通过讨论地震发生、烈度分布、加速度分布、地震反应量值、土体物理力学参数的随机性,将随机震动理论与可靠度分析理论应用于地震滑坡稳定性分析,建立了滑坡安全系数与一定加速度作用下的失稳概率的关系。谢守益等<sup>[64]</sup>考虑到导致滑坡复活的地震发生的时间、地点、震级等因素均是随机变量,因而滑坡场地的烈度、峰值加速度也都是随机的,进而认为滑坡的可靠度分析与概率分析是地震滑坡分析工作中应该考虑到的因素,在此基础上开展了地震诱发下的黄腊石滑坡失稳概率分析。薛剑峰<sup>[65]</sup>寻找地震滑坡最危险滑动面的问题视为数学规划问题,并采用遗传算法求解,将该方法应用于密云水库白河主坝地震滑坡分析。研究克服了Newmark方法在土体动力强度指标问题上的不足,且考虑了土体性质在地震过程中的变化时程。黄雅虹<sup>[66]</sup>提出了一种基于随机搜索法和遗传算法确定黄土斜坡最危险滑裂面的方法,并且对1920年宁夏海原地震导致的西吉县回回川滑坡进行了验证,结果表明了该方法具有较好的实用性。徐金明与段光贤<sup>[67]</sup>在根据灰色聚类分析与模糊聚类分析的上海地区发生地震滑坡可能性的基础上,应用拟静力方法的条分法对不稳定地区作了重点验证。此外,赵兰浩等<sup>[68]</sup>建立了地震作用下土质库岸边坡失稳运动及初始涌浪数值模拟方法,以动力时程强度折减法进行土质库岸边坡动力稳定分析,根据塑性区贯通确定库岸可能的失稳范围,并实现了地震作用下土质库岸边坡滑动过程。

## 3 有限元分析

### 3.1 GeoStudio 平台

GeoStudio与FLAC是目前比较常用的地震滑坡有限元分析平台。GeoStudio中的QUAKE/W模块为一款地震作用下线

性、非线性土体的水平向与竖向耦合动态响应分析软件。近年来,GeoStudio被应用于一些地震滑坡分析工作中。如校小娥<sup>[69]</sup>以八浪沟滑坡为例,通过GeoStudio的GeoSlope平台计算了该滑坡的安全系数,随着地震动峰值加速度的增加,边坡稳定性逐渐降低,地震条件下的安全系数比天然状态下的安全系数降幅可达50%。当加速度峰值为0.4 g时,滑面会发生贯通而导致整体失稳破坏。龚文俊<sup>[70]</sup>基于GeoStudio软件,对甘肃陇南西和滑坡处于天然、降雨、地震、地震与降雨耦合作用下的稳定性进行分析,结果表明地震与降雨耦合作用下,对滑坡稳定的影响程度大于地震与降雨分别作用下的影响程度。马小宇等<sup>[71]</sup>采用GeoStudio软件的渗流模块模拟了一处高烈度地震区公路滑坡的渗流场,进而用边坡稳定性分析模块与地震动态分析模块,分析了该滑坡在排水前后的稳定性,从而为研究排水措施对滑坡在地震动作用下的稳定性影响提供了一个研究实例。尹紫红<sup>[72]</sup>在对西攀高速公路沿线滑坡区域评价的基础上,以与工程密切相关的15处滑坡为研究对象,应用GeoStudio软件的地震边坡分析模块研究滑坡稳定性的变化规律,对滑坡在自然状态与采取排水措施两种情况下的计算结果进行了比较,讨论并分析了地震对滑坡稳定性的影响。马玉飞等<sup>[73]</sup>以吉林省在建汪延高速公路上的新岩滑坡为例,综合考虑不同峰值加速度的地震荷载与模拟交通荷载,在GeoStudio平台下通过滑坡稳定性系数的变化来研究这2种动荷载对滑坡的影响,结果表明交通震动荷载对其稳定性影响更大。该平台应用于宁夏原州区河川乡北洼黄土滑坡的研究结果表明考虑地震和降雨影响时滑坡的整体稳定性迅速下降,地震的影响作用更大一些<sup>[74]</sup>。蒲丹等<sup>[75]</sup>基于GeoSlope平台对1920年海原大地震诱发的夏家大路低角度高速远程滑坡进行了数值模拟分析,认为地震力作用下的黄土液化是形成此类滑坡的主要原因。马芳芳<sup>[76]</sup>基于该平台分析了高土石坝在不同地震动力时程条件下的稳定性,认为传统分析方法中没有考虑地震荷载作用的过程与边坡破坏累积,是不合理的,提出了边坡稳定时程分析思路,并与传统方法进行了对比。

### 3.2 FLAC平台

近年来,有限差分程序FLAC平台被广泛应用于单体地震滑坡稳定性分析,其包括二维FLAC<sup>2D</sup>与三维FLAC<sup>3D</sup>两个模块。该平台被应用于地震力作用下的多种构造、地形与地质的斜坡类型的滑坡或者边坡稳定性分析中。如王凤昊<sup>[77]</sup>基于FLAC<sup>2D</sup>分析了卸荷裂隙岩质边坡在地震条件下的稳定性。孟庆筱<sup>[78]</sup>采用FLAC<sup>2D</sup>对设定地震作用下的三峡库区黄土坡滑坡稳定性进行了时程分析,分析了设定地震类型及位置等要素对黄土滑坡安全系数时程各类型特征值的影响。戴妙林等<sup>[79]</sup>基于FLAC<sup>2D</sup>平台,开展了降低材料强度法计算复杂岩质边坡动力稳定性研究,综合评估了边坡的动力稳定性与降低强度倍数之间的关系。张华<sup>[80]</sup>基于FLAC<sup>2D</sup>研究了地震作用下堆积层斜坡力学响应规律,并对输入的地震动加速度振幅、频谱特征等参数进行了敏感性分析。FLAC<sup>3D</sup>较2D具有

更广泛的应用,如张友锋等<sup>[81]</sup>将FLAC<sup>3D</sup>应用于一般土质边坡,讨论了边坡地震响应分析中的边界条件设置、地质体阻尼的选取、地震波的时程转化和输入,并依据边坡地震动荷载作用的边坡变形与塑性区域的贯通情况分析了边坡的稳定性。刘春玲等<sup>[82]</sup>将该程序应用于一处基岩裸露的近千米高的高陡边坡。何铮等<sup>[83]</sup>开展了基于FLAC<sup>3D</sup>的顺层岩质高边坡地震变形模拟,揭示了边坡后发型阶段性逐级滑塌的破坏机制与大夹角折线形的后缘破坏面形状。徐光兴等<sup>[84]</sup>建立了一个FLAC<sup>3D</sup>边坡动力响应分析模型,并用振动台模型试验对结果进行了验证,结果表明边坡对输入地震波存在垂直放大与临空面放大效应,单一均值土坡的破坏模式仍是沿某一弧形潜在滑动面失稳。邵东桥等<sup>[85]</sup>与言志信等<sup>[86]</sup>分别模拟了含软弱夹层的反倾向岩质边坡与顺层岩质边坡,无论是顺层还是反倾向岩质滑坡,边坡顶点水平向与垂向加速度峰值放大系数自坡内向坡面方向逐渐增大,在结构面位置增幅较大;坡面点的水平向与垂向加速度峰值放大系数随高程增加而增加,在结构面及坡顶处增幅较大。祁生文等<sup>[87]</sup>利用FLAC<sup>3D</sup>平台,对边坡动力响应规律进行了研究,发现了边坡动力响应的位移、速度、加速度三量放大系数等值线在边坡剖面上分布的节律性特点。并把单面边坡的动力反应分为高边坡反应和低边坡动力反应两类,研究了两种不同动力反应形式临界边坡高度的影响因素<sup>[88]</sup>。该平台还被应用于川藏公路通麦至105道班沿线18个松散堆积体滑坡<sup>[89]</sup>及西攀高速高烈度地震区7个高路堑土质滑坡<sup>[90]</sup>、核电厂边坡简化的含结构面的单自由面柱体和多自由面斜坡<sup>[91]</sup>、固原九龙山黄土高边坡<sup>[92]</sup>、约在2.6万年以前发生的大渡河章古滑坡<sup>[93]</sup>、青海八大山滑坡群<sup>[94]</sup>等。

### 3.3 其他有限元分析成果

除GeoStudio与FLAC平台外,其他有限元模拟软件也在地震滑坡中有过一些应用。如基于ANSYS平台,刘红帅<sup>[95]</sup>对国道108线石棉大渡河大桥引道挖方高边坡开展了地震动分析;倪振强等<sup>[96]</sup>开展了折线型滑面斜坡的动力响应,表明斜坡在地震动作用下出现了应力转移,节理上下两侧岩层会发生错动,由于锁固段的存在,斜坡下部错动大于上部;万洪<sup>[97]</sup>开展了岩质高边坡有限元动力响应分析研究,探讨了岩质高边坡在水平震动荷载作用下动力响应的加速度、速度、位移3个指标的放大系数分布规律与特点;梁力等<sup>[98]</sup>基于ANSYS平台开展了一处露天矿岩质高边坡的应力、位移、速度和加速度地震动力响应分析,引入单元安全度计算评价坡体重点部位的局部稳定性,在此基础上计算滑裂面安全系数,从而评价边坡的地震整体稳定性。ADINA平台被应用于地震荷载岩质边坡的有限元分析<sup>[99]</sup>与含软弱夹层岩质边坡的地震稳定性分析<sup>[100,101]</sup>。云南省德钦县燕门乡茨菇滑坡滑坡宽度450~470 m,长约500 m,体积约400万m<sup>3</sup>,柏永岩等<sup>[102]</sup>应用有限元软件Phase2开展了该滑坡的滑带土扰动样强度参数取值分析及滑坡稳定性评价。张燕等<sup>[103]</sup>用FSSI-CAS 2D软件对一处岩质边坡开展了强震作用下的动力响应分析,结果表明地

震波的放大效应与所处位置高度成正相关关系,高度越高,地震波放大效应越明显。贺龙鹏<sup>[104]</sup>采用GTS有限元软件,首先进行拟静力有限元计算,然后计算边坡的位移、应力及塑性区,最后根据强度折减法区计算黄土滑坡的稳定性。毕忠伟等<sup>[105]</sup>以1976年印度Koyna地震为动荷载输入,利用Abaqus有限元分析了一个匀质土坡的地震动响应规律。结果表明当土体发生破坏以后坡体位移随地震持时增加而增大。郭俊英等<sup>[106]</sup>利用弹塑性动力有限元方法建立了一个黄土斜坡模型,假定模型左右两侧受水平向位移约束,底边受垂直向位移约束,坡面为自由边界,荷载以地震动加速度时程方式输入,采用Drucker-Prager准则为塑性屈服准则,开展了不同峰值加速度、频谱、持续时间作用下黄土斜坡的变形破坏特征分析。姜彤等<sup>[107]</sup>应用动力有限单元法和加卸载响应比理论开展边坡的全时程动力分析,建立了地震边坡加卸载响应模型,讨论了地震过程中边坡加卸载响应比的变化,提出了以加卸载响应比判断地震边坡稳定性的新思路,可进一步应用于具有周期荷载特征的边坡动力响应分析。张均锋等<sup>[108]</sup>总结了含裂隙的岩质边坡发生局部损伤软化、破坏区域的扩展、演化过程与规律,开展了强地震荷载作用下含断层岩质边坡稳定性分析,从而揭示这类滑坡的发生机理,并应用有限元模拟手段进行验证。其他类似的地震边坡动力响应有限元分析的各种工程应用实例较多,如九寨黄龙机场填方高边坡三维模拟<sup>[109]</sup>、三峡重庆库区某岩体边坡<sup>[110]</sup>、金沙江龙蟠边坡变形岩体<sup>[111]</sup>、湖北省清江流域水布垭电站马崖岩质高陡边坡<sup>[112]</sup>、攀枝花机场人工高填方边坡<sup>[113]</sup>、位于高地震烈度区的金安桥水电站坝址上游近坝左岸的一处大规模崩塌堆积体边坡<sup>[114]</sup>等,这些研究为各种类型边坡的地震动响应分析提供了实例参考。

#### 4 离散元分析

鉴于2008年汶川地震前保存良好的单体地震滑坡研究实例较少,因此依托实际地震滑坡的离散元分析模拟成果较依托实际地震滑坡与地震力作用下边坡的有限元分析模拟成果要少。在为数不多的用于地震滑坡离散元模拟软件中,离散元程序UDEC是被应用较多的地震滑坡离散元模拟分析程序。吕艳等<sup>[115]</sup>以陕西翠华山古崩塌为研究对象,采用典型天然地震记录作为地震输入条件,借助UDEC离散元动力分析模块,对翠华山山崩动力响应规律进行了数值模拟,再现了地震山崩的启动、加速、解体、堆积的全过程。肖克强等<sup>[116]</sup>依托1995年1月17日本地震触发的Rokko滑坡与1980年10月23日意大利地震触发的Andretta滑坡,应用二维UDEC计算了地震荷载作用下顺层岩质边坡的位移,并将计算结果与Newmark法计算结果及震后现场实测值进行了对比。结果表明,Newmark法计算得到的位移值较实测值偏小,离散元计算得到的位移结果较Newmark法更接近于实测值。并用三维UDEC初步分析了地震荷载下的坡高、坡角、岩层倾角等因素对顺层边坡位移的影响规律。类似的方法还被应用于

沪蓉钟家湾深路顺层边坡的变形特征及稳定性研究<sup>[117,118]</sup>。李鹏等<sup>[119]</sup>利用UDEC模拟了含软弱层岩质边坡的动力响应,对所得斜坡震动放大系数进行了计算分析,软弱层对于边坡放大作用的影响程度依次为软弱层的倾角、埋深、弹性模量、剪切强度、厚度、泊松比。毛彦龙等<sup>[120]</sup>对骆驼岭滑坡开展了离散元模拟,发现坡体波动振荡会在斜坡岩土体变形破坏过程中产生累进破坏效应、启动效应和启程加速效应三种效应。除了UDEC系列平台外,陈光齐<sup>[121]</sup>采用DDA(非连续变形分析)技术离散元模拟开展了地震作用下从边坡流下的土石运动速度、到达范围及堆积形态研究,计算出的土石特征与实际结果基本吻合。冯春等<sup>[122]</sup>利用基于CDM(连续介质力学的离散元方法)获取震后结构面处的残余强度,将残余强度代入极限平衡公式求解重力作用下的安全系数,以完成顺层边坡的地震稳定性定性分析,并良好体现了地震波频率对边坡稳定性的影响。陶连金等<sup>[123]</sup>将动力离散元方法应用于一处位于康定县的高烈度区的节理发育的岩体边坡中,开展了动力响应分析与稳定性评价。

#### 5 物理模型试验

研究人员往往将物理试验模型与有限元或者离散元数值模拟技术结合起来开展研究。徐光兴等<sup>[124]</sup>制作了1:10的边坡大型振动台模拟平台,通过输入不同类型、振幅、频率的地震波,探讨地震作用下模型边坡的动力特征与动力响应规律,研究表明边坡输入地震波具有明显的放大作用,沿坡面向上,加速度峰值放大系数递增,在坡肩附近突然增大。任自铭<sup>[125]</sup>依托川藏公路林芝县东九乡拉月大型高位岩质滑坡工程背景,探讨了振动台模型试验中的动力相似律、边界条件处理等问题,探索了用大型振动台模型试验研究斜坡地震动力特性和地震动力反应性状的试验方法和技术。张华<sup>[180]</sup>将斜坡体概化为花岗岩强风化土与砂土配制而成的匀质土模型,采用土工离心模型试验的方法,探讨地震影响深度为10 m时不同震松程度对边坡地震后的时效变形与长期稳定性影响,结果表明随着震松坡体损伤程度增大,其应力与位移在震后短期的调整幅度将提高。周永习等<sup>[126]</sup>以陕西省华县滑坡和宁夏西吉滑坡为背景,通过对这两个地区的土样进行不排水三轴试验研究饱和黄土的稳态特性。比较地震触发与灌溉触发滑坡流滑的机理,前者地震引起的滑坡土体残余强度是关键因素,而后者中滑坡土体的峰值强度起决定作用。

关于单体地震滑坡或者地震力作用下的斜坡研究,除了上述的地质分析、传统的计算力学分析、有限元分析、离散元分析、物理模型试验之外,在2008年汶川地震之前的地震滑坡实例与相关研究之前,还包括少量其他方面的研究。如杨泉等<sup>[127]</sup>探讨了地震滑坡各阶段所对应的势能变化过程及其大小,阐述了各阶段产生的原因以及地震滑坡结束的条件,提出了一种计算地震滑坡发生时所释放能量大小的简便算法,并据此将“主震不滑,余震诱发”这一类型的地震滑坡划

分为孕育、潜存、诱发3个阶段。许文锋等<sup>[128]</sup>开展了地震荷载作用下海底滑坡的特征及其机理,将地震滑坡的研究空间从陆上发展到海洋地层区域中。刘贵荣等<sup>[129]</sup>则开展了暴雨和地震触发滑坡滑速计算,对平推式滑坡采用能量守恒与动量守恒定理推导滑速计算公式,对地震滑坡推导出考虑地震作用的等效摩擦系数。这些研究可为后续的地震滑坡研究提供一些新颖的思路与想法,促进了地震滑坡研究方向的多样发展。

## 6 展望

目前地震滑坡研究方法均具有一定的局限性,如传统力学方法不能开展对地震随机性与边坡地震响应规律的研究,Newmark方法不能考虑自然变形与动力放大系数对边坡位移影响,有限元与离散元数值模拟方法中本构模型的选取,物理模型试验中模型的相似率与尺寸效应的存在等方面<sup>[7-10]</sup>。另一方面,这些研究方法之间具有一定的互补性,如物理模型试验往往可以与有限元分析与离散元分析得到的结果互为验证,但是目前这方面的研究成果比较少。因此,考虑多种研究方法的单体地震滑坡的震动响应、形变、失稳、运动与堆积研究将是今后的一个重点研究方向。

2008年汶川地震滑坡研究是中国地震滑坡研究的一个标志性事件与分水岭。2008年汶川地震之后,地震滑坡事件受到广泛的关注,且随着遥感与GIS(geographic information system)等新技术的出现,相应的研究成果也趋于成熟,如2010年玉树地震<sup>[130-134]</sup>、2013年芦山地震<sup>[135,136]</sup>与2013年岷县漳县地震<sup>[137]</sup>等,均有相应的较成熟的地震滑坡成果出现。2008年汶川地震之前的地震滑坡事件研究受到了当时科研条件的限制,虽然有一些地震滑坡成果,但是受到的关注不够,一些地震事件触发的滑坡还有很大的研究空间,因此对那些工作开展全面总结是非常有必要的。本文从单体地震滑坡或地震力作用下边坡响应分析的角度开展了总结,从地质分析、传统的计算力学分析、有限元分析、离散元分析、物理模型试验这几个方面对以往研究成果的一个详细完整的梳理,这些研究成果可以为将来的同类研究提供参考。

### 参考文献(References)

- [1] Xu C, Xu X W, Dai F C, et al. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan  $M_w$  7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis[J]. Landslides, 2014, 11(3): 441-461.
- [2] 许冲,戴福初,姚鑫.汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积[J].科技导报, 2009, 27(11): 79-81.  
Xu Chong, Dai Fuchu, Yao Xin. Incidence number and affected area of Wenchuan earthquake-induced landslides[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(11): 79-81.
- [3] 许冲.汶川地震滑坡详细编录及其与全球其他地震滑坡事件对比[J].科技导报, 2012, 30(25): 18-26.  
Xu Chong. Detailed inventory of the 2008 Wenchuan earthquake triggered landslides and its comparison with global other earthquake events[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(25): 18-26.
- [4] 许冲,戴福初,徐锡伟.汶川地震滑坡灾害研究综述[J].地质论评, 2010, 56(6): 860-874.  
Xu Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei. Wenchuan earthquake induced landslides: An overview[J]. Geological Review, 2010, 56(6): 860-874.
- [5] Xu C, Xu X W, Yao Q, Wang Y Y. GIS-based bivariate statistical modelling for earthquake-triggered landslides susceptibility mapping related to the 2008 Wenchuan earthquake, China[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2013, 46(2): 221-236.
- [6] 许冲.2008年汶川地震前的中国大陆地震滑坡研究[J].科技导报, 2014, 32(16): 63-77.  
Xu Chong. An overview of earthquake-triggered landslides across Chinese Mainland before the 2008 Wenchuan  $M_w$  7.9 earthquake[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(16): 63-77.
- [7] 刘立平,雷尊宇,周富春.地震边坡稳定分析方法综述[J].重庆交通学院学报, 2001, 20(3): 83-88.  
Liu Liping, Lei Zunyu, Zhou Fuchun. The evaluation of seismic slope stability analysis methods[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, 20(3): 83-88.
- [8] 刘红帅,薄景山,刘德东.岩土边坡地震稳定性分析研究评述[J].地震工程与工程振动, 2005, 25(1): 164-171.  
Liu Hongshuai, Bo Jingshan, Liu Dedong. Review on study of seismic stability analysis of rock-soil slopes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(1): 164-171.
- [9] 洪海春,徐卫亚.地震作用下岩质边坡稳定性分析综述[J].岩石力学与工程学报, 2005, 24(增1): 4827-4836.  
Hong Haichun, Xu Weiya. Review on the stability of rock slopes under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Suppl 1): 4827-4836.
- [10] 咸玉建,陈学军.地震作用下岩土边坡稳定性安全评价方法研究评述[J].岩土工程技术, 2013, 27(5): 242-247.  
Xian Yujian, Chen Xuejun. Review study of safety evaluation methods of rock-soil slopes seismic stability[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2013, 27(5): 242-247.
- [11] 程谦恭,张倬元,黄润秋.高速远程崩滑动力学的研究现状及发展趋势[J].山地学报, 2007, 25(1): 72-84.  
Cheng Qiangong, Zhang Zhuoyuan, Huang Runqiu. Study on dynamics of rock avalanches: State of the art report[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(1): 72-84.
- [12] 王家鼎,张倬元.地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J].岩土工程学报, 1999, 21(6): 670-674.  
Wang Jiading, Zhang Zhuoyuan. A study on the mechanism of high-speed loess landslide induced by earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 670-674.
- [13] 王家鼎,白铭学,肖树芳.强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理研究[J].岩土工程学报, 2001, 23(4): 446-450.  
Wang Jiading, Bai Mingxue, Xiao Shufang. A study on compound mechanism of earthquake-related sliding displacements on gently inclined loess slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 446-450.
- [14] 王念秦.黄土滑坡发育规律及其防治措施研究[D].成都:成都理工大学, 2004.  
Wang Nianqin. Study on the growing laws and controlling measures for loess landslide[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004.
- [15] 白铭学,张苏民.高烈度地震时黄土地层的液化移动[J].工程勘察,

- 1990(6): 1-5.  
Bai Mingxue, Zhang Sumin. Liquefaction and movement of loess strata during high intensity earthquakes[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1990(6): 1-5.
- [16] 袁丽侠. 宁夏西吉县低角高速远程黄土滑坡及其形成机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(2): 219-223.  
Yuan Lixia. Forming mechanism of the loess landslides in Xiji of Ningxia with low-angle, high speed and far-distance[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(2): 219-223.
- [17] 袁丽侠. 宁夏海原地震诱发黄土滑坡的形成机制研究[D]. 西安: 西北大学, 2005.  
Yuan Lixia. The mechanism of loess landslide caused by earthquake in Haiyuan of Ningxia[D]. Xi'an: Northwestern University, 2005.
- [18] 孙萍, 殷跃平, 吴树仁, 等. 高速远程地震黄土滑坡发生机制试验研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 449-454.  
Sun Ping, Yin Yueping, Wu Shuren, et al. An experimental study on the initiation mechanism of rapid and long run-out loess landslide caused by 1920 Haiyuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 449-454.
- [19] 赵晋泉, 张大卫, 高树义, 等. 1303年山西洪洞8级大地震郅堡地滑之研究[J]. 山西地震, 2003(3): 16-22.  
Zhao Jinquan, Zhang Dawei, Gao Shuyi, et al. Huanbu ground slide, the relic of 1303 Hongtong, Shanxi, Earthquake of M8[J]. Earthquake Research in Shanxi, 2003(3): 16-22.
- [20] 张歆, 王莉, 余剑平. 九房山滑坡成因分析、影像判读及防治对策[J]. 水土保持应用技术, 2007(3): 42-44.  
Zhang Xin, Wang Li, Yu Jianping. Cause mechanism, image interpretation, and countermeasures for the Jiufangshan landslide[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2007(3): 42-44.
- [21] 贺明静, 孙根年, 宋咏梅. 陕西西安翠华山地质景观遗迹成因探析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 145-149.  
He Mingjing, Sun Gennian, Song Yongmei. Study on the formation causes of the geologic landscape relics in the Cuihuashan Mountain National Geo-Park in Xi'an City, Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(2): 145-149.
- [22] 南凌, 崔之久. 西安翠华山古崩塌性滑坡体的沉积特征及其形成过程[J]. 山地学报, 2000, 18(6): 502-507.  
Nan Ling, Cui Zhijiu. The deposit characteristics of the paleo-avalanchine landslide in Xi'an Cuihua mountain and analysis of its generative process[J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(6): 502-507.
- [23] 袁兆德, 陈杰, 李文巧, 等. 帕米尔高原东部塔合曼大型滑坡体的<sup>10</sup>Be测年[J]. 第四纪研究, 2012, 32(3): 409-416.  
Yuan Zhaode, Chen Jie, Li Wenqiao, et al. <sup>10</sup>Be dating of Taheman large scale landslide in eastern Pamir and paleoseismic implications [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(3): 409-416.
- [24] Yuan Z D, Chen J, Owen L A, et al. Nature and timing of large landslides within an active orogen, eastern Pamir, China[J]. Geomorphology, 2013, 182: 49-65.
- [25] Chen J, Dai F C, Lü T Y, et al. Holocene landslide-dammed lake deposits in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau and their ages [J]. Quaternary International, 2013, 298: 107-113.
- [26] Wang P F, Chen J, Dai F C, et al. Chronology of relict lake deposits around the Suwalong paleolandslide in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau: Implications to Holocene tectonic perturbations[J]. Geomorphology, 2014, 217: 193-203.
- [27] Zhang Y S, Zhao X T, Lan H X, et al. A Pleistocene landslide-dammed lake, Jinsha River, Yunnan, China[J]. Quaternary International, 2011, 233(1): 72-80.
- [28] 王治华. 特大规模滑坡遥感调查——巧家县城滑坡[J]. 环境遥感, 1996, 11(4): 280-284.  
Wang Zhihua. Remote sensing investigation for a huge landslide: Qiaojia County landslide[J]. Remote Sensing of Environment China, 1996, 11(4): 280-284.
- [29] 张保军, 李运栋, 焦发解. 水库诱发地震对库岸滑坡体稳定性的影响[J]. 人民长江, 2009, 40(1): 67-68, 75.  
Zhang Baojun, Li Yundong, Jiao Fajie. Influences of reservoir induced earthquake on stability of a reservoir bank landslide[J]. Yangtze River, 2009, 40(1): 67-68, 75.
- [30] 魏贵春, 陈俊华, 张丽芬, 等. 堰塘滑坡的地震危险性分析[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(5): 88-91.  
Wei Guichun, Chen Junhua, Zhang Lifen, et al. Analysis of seismic risk on Yantang landslide[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(5): 88-91.
- [31] 祁生文, 伍法权, 刘春玲, 等. 地震边坡稳定性的工程地质分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2792-2797.  
Qi Shengwen, Wu Faquan, Liu Chunling, et al. Engineering geology analysis on stability of slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2792-2797.
- [32] 毛彦龙, 胡广韬, 赵法锁, 等. 地震动触发滑坡体滑动的机理[J]. 西安工程学院学报, 1998, 20(4): 45-52.  
Mao Yanlong, Hu Guangtao, Zhao Fasuo, et al. Mechanics of the landslide sliding caused by seismic[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 1998, 20(4): 45-52.
- [33] 李超, 秦威. 地震作用下诱发堆积层滑坡的机制分析[J]. 四川建材, 2013, 39(5): 107-109, 112.  
Li Chao, Qin Wei. Analysis of the sliding mechanism of accumulation horizon landslide under the action of earthquake[J]. Sichuan Building Materials, 2013, 39(5): 107-109, 112.
- [34] 王来贵, 章梦涛, 王泳嘉, 等. 基岩振动干扰下的动力滑坡机制研究[J]. 工程地质学报, 1997, 5(2): 137-142.  
Wang Laigui, Zhang Mengtao, Wang Yongjia, et al. The study of mechanism for dynamic slope-slipping by vibration in base rock[J]. Journal of Engineering Geology, 1997, 5(2): 137-142.
- [35] 卢育霞, 石玉成, 陈永明, 等. 地震诱发黄土滑坡的滑距估测[J]. 西北地震学报, 2006, 28(3): 248-251.  
Lu Yuxia, Shi Yucheng, Chen Yongming, et al. Slippage estimation of the loess landslide triggered by earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(3): 248-251.
- [36] 祁生林, 祁生文, 伍法权, 等. 基于剩余推力法的地震滑坡永久位移研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 63-68.  
Qi Shenglin, Qi Shengwen, Wu Faquan, et al. On permanent displacement of earthquake induced slide based on residual pushing force method[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 63-68.
- [37] 李忠生. 地震动作用下滑坡稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2004(2): 4-8.  
Li Zhongsheng. Landslide stability analysis under seismic ground motion[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004(2): 4-8.
- [38] 祁生文. 考虑结构面退化的岩质边坡地震永久位移研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 452-457.  
Qi Shengwen. Evaluation of the permanent displacement of rock mass slope considering deterioration of slide surface during earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 452-457.
- [39] 张自标. 地震作用下西攀高速公路边(滑)坡工程稳定性分析[D]. 成

- 都: 西南交通大学, 2007.
- Zhang Zibiao. Stability analysis of Xipan highway slopes under earthquake action[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [40] 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(增2): 2809-2812.
- Liu Huijun, Sun Guanping, Liu Xiaowei. Stability analysis of Tianchi landslide-dam under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Suppl 2): 2809-2812.
- [41] 黄建梁, 王威中, 薛宏交. 坡体地震稳定性的动态分析[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(4): 113-122.
- Huang Jianliang, Wang Weizhong, Xue Hongjiao. Dynamic analysis of seismic stability of slopes[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(4): 113-122.
- [42] 栾茂田, 李湛, 范庆来. 土石坝拟静力抗震稳定性分析与坝体地震滑移量估算[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 224-230, 236.
- Luan Maotian, Li Zhan, Fan Qinglai. Analysis and evaluation of pseudo-static aseismic stability and seism-induced sliding movement of earth-rock dams[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 224-230, 236.
- [43] 仵大磊. 地震作用下宝鸡市渭北台塬典型黄土滑坡的机理研究及稳定性评价[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- Wu Dalei. Study on mechanism and stability evaluation of earthquake induced loess landslide in Baoji City Weiwei Tableland[D]. Xi'an: Northwestern University, 2010.
- [44] 陈蜀俊, 党晓英, 曾心传, 等. 奉节长江大桥北岸边坡在地震荷载作用下的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 657-662.
- Chen Shujun, Dang Xiaoying, Zeng Xinchuan, et al. Seismic stability analysis of slope at north bank of Fengjie Changjiang River bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 657-662.
- [45] 胡君. 考虑竖向地震作用下库岸边坡稳定性研究[J]. 山西建筑, 2012, 38(4): 65-66.
- Hu Jun. Research on slope stability of coast in reservoir's bank under vertical seismic motion[J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(4): 65-66.
- [46] 罗红明, 唐辉明, 熊承仁. 基于地震力影响的滑坡稳定性评价[J]. 路基工程, 2008(4): 32-34.
- Luo Hongming, Tang Huiming, Xiong Chengren. Landslide stability evaluation by considering seismic forces affect[J]. Subgrade Engineering, 2008(4): 32-34.
- [47] 罗红明, 唐辉明, 胡斌, 等. 考虑地震力的刚体极限平衡法及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3590-3595.
- Luo Hongming, Tang Huiming, Hu Bin, et al. Rigid limit equilibrium method considering seismic force and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl 1): 3590-3595.
- [48] 吉锋, 石豫川, 刘汉超, 等. 大渡河新华古滑坡体成因机制及稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2005(4): 24-27.
- Ji Feng, Shi Yuchuan, Liu Hanchao, et al. Study on formation mechanism and stability of ancient Xinhua landslide in Daduhe River [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005(4): 24-27.
- [49] 王建锋, 晏同珍, 崔政权, 等. 清江水布垭坝址库首区古滑坡稳定性研究[C]. 第四届全国青年岩石力学与工程学术研讨会, 中国河南郑州, 8月1日, 1997.
- Wang Jianfeng, Yan Tongzhen, Cui Zhengquan, et al. Study on the stability of ancient landslide in the reservoir head area of the Shuibuya dam on the Qing Jiang[C]. The 4th National Youth Conference on Rock Mechanics and Engineering, Zhengzhou, Henan Province, China, 1997-08-01.
- [50] 孟兴民, 张世武. 皋兰山三台阁滑坡特征及形成机理[J]. 甘肃科学学报, 1990, 2(1): 48-53.
- Meng Xingmin, Zhang Shiwu. The characteristic and mechanism of Gaolanshan, Santai Pavillion landslides[J]. Journal of Gansu Science, 1990, 2(1): 48-53.
- [51] 殷跃平, 张作辰, 黎志恒, 等. 兰州皋兰山黄土滑坡特征及灾度评估研究[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3): 302-310.
- Yin Yueping, Zhang Zuochen, Li Zhiheng, et al. Occurrence and hazard assessment on loess landslide of Gaolanshan in Lanzhou[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(3): 302-310.
- [52] 贺金良. 四川省木里县城滑坡稳定性与地震诱发危险性评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- He Jinliang. Estimating of the landslide stability and fatalness cause of earthquake in Muli in the Szechwan Province[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [53] 马声浩, 雷建成, 伍先国, 等. 攀钢攀矿场地边坡地震稳定性研究[J]. 四川地震, 1993(1): 1-11.
- Ma Shenghao, Lei Jiancheng, Wu Xianguo, et al. Research on the seismic stability of slope in the mineral area of Panzhuhua[J]. Earthquake Research in Sichuan, 1993(1): 1-11.
- [54] 庄儒新, 杨向东, 石光炬. 基于剩余推力法的地震滑坡稳定性分析[J]. 西部探矿工程, 2008, 20(4): 1-3.
- Zhuang Ruxin, Yang Xiangdong, Shi Guangju. Stability analysis of a seismic landslide based on the residual thrust method[J]. West-China Exploration Engineering, 2008, 20(4): 1-3.
- [55] 南金生, 刘松玉, 谢瑞征. 南京地区滑坡与崩塌特征分析及地震可能引起的崩塌危险区预测[J]. 地震学刊, 1998(2): 52-56.
- Nan Jinsheng, Liu Songyun, Xie Ruizheng. Characteristic analysis of landslide and collapse in Nanjing area and forecast for hazard zone of earthquake collapse[J]. Journal of Seismology, 1998(2): 52-56.
- [56] 何斌, 汪洋. 滑坡稳定性计算中剩余推力法和简布法[J]. 安全与环境工程, 2004, 11(4): 60-62.
- He Bin, Wang Yang. Residual thrust method and Janbu method used to calculate landslide stability[J]. Safety and Environmental Engineering, 2004, 11(4): 60-62.
- [57] 李亮, 褚雪松, 庞峰, 等. 地震边坡稳定性分析的拟静力方法适用性探讨[J]. 世界地震工程, 2012, 28(2): 57-63.
- Li Liang, Chu Xuesong, Pang Feng, et al. Discussion on suitability of pseudo-static method in seismic slope stability analysis[J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(2): 57-63.
- [58] 叶海林, 黄润秋, 郑颖人, 等. 地震作用下边坡稳定性安全评价的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1248-1252.
- Ye Hailin, Huang Runqiu, Zheng Yingren, et al. The study of safety evaluation on slope seismic stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(6): 1248-1252.
- [59] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋, 等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 173-180.
- Zheng Yingren, Ye Hailin, Huang Runqiu, et al. Study on the seismic stability analysis of a slope[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 173-180.
- [60] 罗渝, 何思明, 吴永, 等. 地震作用下滑坡永久位移预测[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 117-122.
- Luo Yu, He Siming, Wu Yong, et al. Permanent displacement forecast of landslide under seismic loading[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(1): 117-122.
- [61] 王思敬, 薛守义. 岩体边坡楔形体动力学分析[J]. 地质科学, 1992

- (2): 177-182.  
Wang Sijing, Xu Shouyi. Dynamic analysis of wedge sliding on rock slopes[J]. Scientia Geologica Sinica, 1992(2): 177-182.
- [62] 苏燕, 武甲中, 林芳芳. 基于 Monte Carlo 法的土石坝地震滑坡概率分析[C]//现代水利水电工程抗震防灾研究与进展. 北京: 中国水利发电工程学会, 2009: 19-23.  
Su Yan, Wu Jiazhong, Lin Fangfang. Probability analysis of seismic landslides for an earth-rock dam based on the Monte Carlo method [C]//The Studies and Progresses of the Modern Earthquake Disaster Prevention on Water Conservancy and Hydropower Engineering. Beijing: China Society for Hydropower Engineering, 2009: 19-23.
- [63] 马尔曼. 边坡地震稳定性的概率分析方法[C]//滑坡监测技术讨论会论文集. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 1988: 1-19.  
Ma Erman. Probabilistic stability analysis of seismic slopes[C]//Proceedings of Symposium of Landslide Monitoring Technology. Beijing: Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, 1988: 1-19.
- [64] 谢守益, 许兵, 张年学, 等. 地震诱发下黄腊石滑坡的概率分析[C]//第五届全国工程地质大会文集. 北京: 地震出版社, 1996: 142-148.  
Xie Shouyi, Xu Bing, Zhang Nianxue, et al. Probabilistic analysis of the Huanglashi landslide triggered by an earthquake[C]//The Fifth National Conference on Engineering Geology. Beijing: Seismological Press, 1996: 142-148.
- [65] 薛剑峰. 地震作用下土坡稳定性遗传算法分析及可靠度研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2002.  
Xue Jianfeng. Stability analysis by genetic algorithm and reliability study of earth slopes under earthquake[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2002.
- [66] 黄雅虹. 地震作用下黄土斜坡的稳定性分析预测[J]. 西北地震学报, 1998, 20(3): 52-58.  
Huang Yahong. Analysis and prediction for stability of loess slope under the effect of earthquakes[J]. Northwestern Seismological Journal, 1998, 20(3): 52-58.
- [67] 徐金明, 段光贤. 上海市地震滑坡的预测研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1990, 1(1): 42, 67-72.  
Xu Jinming, Duan Guangxian. A study on predicting landslide caused by earthquake in Shanghai[J]. Journal of Geological Hazard and Control, 1990, 1(1): 42, 67-72.
- [68] 赵兰浩, 杨庆庆, 李同春. 地震作用下土质库岸边坡失稳运动及初始涌浪数值模拟方法[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 104-108.  
Zhao Lanhao, Yang Qingqing, Li Tongchun. Numerical simulation of landsliding and initial surges for soil banks of reservoir under earthquake action[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6): 104-108.
- [69] 校小娥. 地震作用下滑坡稳定性分析——以八浪沟滑坡为例[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
Xiao Xiaoe. Dynamic and stability of landslide under earthquake loading: Taking Balanggou landslide as an example[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [70] 龚文俊. 西和县西山 III 号滑坡稳定性分析[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所, 2012.  
Gong Wenjun. Stability analysis of No. III landslide in Xishan, Xihe County[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2012.
- [71] 马小宇, 任自铭, 张自标. 排水措施对地震作用下滑坡稳定性的影响[J]. 路基工程, 2009(1): 132-133.  
Ma Xiaoyu, Ren Ziming, Zhang Zibiao. Influences of drainage measures on the stability of a landslide under seismic loading[J]. Subgrade Engineering, 2009(1): 132-133.
- [72] 尹紫红. 地震作用下的滑坡稳定性分析——以西攀高速公路为例[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
Yin Zihong. Dynamic and stability of landslide under earthquake loading: Take Xi-Pan highway as an example[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [73] 马玉飞, 陈剑平, 牛宏志, 等. 新岩滑坡地震与交通动荷载响应分析[J]. 金属矿山, 2013(7): 54-57, 61.  
Ma Yufei, Chen Jianping, Niu Hongzhi, et al. Dynamic response analysis of earthquake and traffic loads of Xinyan landslide[J]. Metal Mine, 2013(7): 54-57, 61.
- [74] 常允良, 倪万魁, 张韬, 等. 宁夏南部典型黄土滑坡形成过程数值模拟及稳定性分析[J]. 西部探矿工程, 2012, (8): 24-27.  
Chang Yunliang, Ni Wankui, Zhang Tao, et al. The formation numerical simulation and stability analysis of a typical loess landslide in southern Ningxia[J]. West-China Exploration Engineering, 2012, (8): 24-27.
- [75] 蒲丹, 裴向军, 刘维. 夏家大路低角度液化型黄土滑坡成因分析[J]. 科技风, 2013(12): 144-144.  
Pu Dan, Pei Xiangjun, Liu Wei. The cause mechanism analysis of the Xiajiadalu low-dip loess landslide[J]. Technology Wind, 2013(12): 144-144.
- [76] 马芳芳. 基于地震动力时程反应的有限元边坡稳定性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.  
Ma Fangfang. Study on the seismic stability of slope based on time history analysis method and finite element method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [77] 王凤昊. 卸荷裂隙岩质边坡在地震作用下的数值计算分析[J]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn>, 2006.  
Wang Fenghao. Analysis of dynamic stability for rock slope with unloading fissures and weak seams [J]. Sciencepaper Online, <http://www.paper.edu.cn>, 2006.
- [78] 孟庆筱. 设定地震作用下三峡库区黄土坡滑坡稳定性分析[D]. 武汉: 中国地震局地震研究所, 2012.  
Meng Qingxiao. Stability analysis of Huangtupo landslide in Three Gorges Reservoir area under the action of scenario earthquake[D]. Wuhan: Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2012.
- [79] 戴妙林, 李同春. 基于降强法数值计算的复杂岩质边坡动力稳定性安全评价分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 2749-2754.  
Dai Miaolin, Li Tongchun. Analysis of dynamic stability safety evaluation for complex rock slopes by strength reduction numerical method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl 1): 2749-2754.
- [80] 张华. 堆积层斜坡的地震诱导行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.  
Zhang Hua. Study on earthquake induced behaviors of slopes covered by deposits[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [81] 张友锋, 袁海平. FLAC<sup>3D</sup>在地震边坡稳定性分析中的应用[J]. 江西理工大学学报, 2008, 29(5): 23-26.  
Zhang Youfeng, Yuan Haiping. The application of FLAC<sup>3D</sup> to the analysis of slope stability in earthquake[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2008, 29(5): 23-26.
- [82] 刘春玲, 祁生文, 童立强, 等. 利用 FLAC<sup>3D</sup> 分析某边坡地震稳定性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2730-2733.  
Liu Chunling, Qi Shengwen, Tong Liqiang, et al. Stability analysis of

- slope under earthquake with FLAC<sup>3D</sup>[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2730-2733.
- [83] 何铮, 徐卫亚, 石崇, 等. 顺层岩质高边坡地震变形破坏机制三维数值反演研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3512-3518.  
He Zheng, Xu Weiya, Shi Chong, et al. 3D dynamic response back analysis of failure mechanisms of a high dip bedding rock slope in earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3512-3518.
- [84] 徐光兴, 姚令侃, 李朝红, 等. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 918-923.  
Xu Guangxing, Yao Lingkan, Li Chaohong, et al. Dynamic response of slopes under earthquakes and influence of ground motion parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 918-923.
- [85] 邵东桥, 谌文武, 黄云飞. 地震作用下含软弱夹层的反倾向岩质边坡动力响应及变形破坏机制研究[J]. 中国科技论文在线, 2013, 201303-340.  
Shao Dongqiao, Shen Wenwu, Huang Yunfei. Dynamic response and deformation and failure mechanism of a toppling rock slope under earthquakes[J]. Sciencepaper Online, 2013, 201303-340.
- [86] 言志信, 张刘平, 曹小红, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应规律及变形机制研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增1): 54-59.  
Yan Zhixin, Zhang Liuping, Cao Xiaohong, et al. Dynamic response and deformation mechanism of a bedding rock slope under earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Suppl 1): 54-59.
- [87] 祁生文, 伍法权, 孙进忠. 边坡动力响应规律研究[J]. 中国科学E辑技术科学, 2003, 33(Suppl): 28-40.  
Qi Shengwen, Wu Faquan, Sun Jinzhong. General regularity of dynamic responses of slopes under dynamic input[J]. Science in China Ser. E Technological Sciences, 2003, 33(Suppl): 28-40.
- [88] 祁生文. 单面边坡的两种动力反应形式及其临界高度[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 518-523.  
Qi Shengwen. Two patterns of dynamic responses of single-free-surface slopes and their threshold height[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(2): 518-523.
- [89] 巴桑卓玛. 基于FLAC<sup>3D</sup>法的地震作用下滑坡稳定性分析研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.  
Basang Zhuoma. FLAC<sup>3D</sup> method based on landslide stability analysis seismic study[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009.
- [90] 佟海宁. 山区公路边(滑)坡地震灾祸评估及防治措施[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
Tong Haining. Mountains road slope (landslide) seismic disaster evaluation countermeasure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [91] 郑文棠, 程小久, 李焯芬, 等. 核电站边坡地震动力响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增2): 3514-3521.  
Zheng Wentang, Cheng Xiaojiu, Li Zhuofen, et al. Research on seismic response analysis of slopes in nuclear power plant[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Suppl 2): 3514-3521.
- [92] 陈昌禄, 邵生俊, 郑万坤, 等. 黄土高边坡的三维动力稳定性分析—以固原九龙山边坡为例[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 229-232, 252.  
Chen Changlu, Shao Shengjun, Zheng Wankun, et al. Three-dimensional dynamic stability analysis of high loess slope taking the Jiulongshan slope for example[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 229-232, 252.
- [93] 蒋发森, 王运生, 吴俊峰. 大渡河章古滑坡演化机制分析及稳定性评价[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 138-141, 146.  
Jiang Fasen, Wang Yunsheng, Wu Junfeng. Analysis of formation-evolution mechanism and stability assessment of Zhanggu landslide in Daduhe River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(3): 138-141, 146.
- [94] 崔芳鹏, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 青海八大山滑坡群形成机制及稳定性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 848-857.  
Cui Fangpeng, Hu Ruilin, Tan Rujiao, et al. Study on formation mechanism and stability evaluation of Badashan landslide group in Qinghai province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 848-857.
- [95] 刘红帅. 岩质边坡地震稳定性分析方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2006.  
Liu Hongshuai. Study on analysis method of rock slope seismic stability[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2006.
- [96] 倪振强, 孔纪名, 阿发友, 等. 地震作用下折线型滑面斜坡的动力响应[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(增1): 1-6.  
Ni Zhenqiang, Kong Jiming, A Fayou, et al. Dynamic response of slope with broken line slip surface under action of earthquake[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(Suppl 1): 1-6.
- [97] 万洪. 岩质高边坡动力响应分析及其应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
Wan Hong. Research on dynamic response of high rock slope and its application[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [98] 梁力, 王伟, 李明. 某露天矿岩质高边坡地震动力响应及稳定性分析[J]. 金属矿山, 2008, 8(8): 21-25.  
Liang Li, Wang Wei, Li Ming. Analysis of the seismic dynamic response and stability of the high rocky slope at an opencast mine[J]. Metal Mine, 2008, 8(8): 21-25.
- [99] 杜晓丽. 地震荷载作用下岩质边坡稳定性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.  
Du Xiaoli. Research on the stability of rock slope under seismic loadings[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- [100] 石乃鑫. 含软弱夹层岩质边坡的地震时程响应分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.  
Shi Naixin. Seismic time-history response analysis of rock slope contains soft soil layer[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010.
- [101] 李慧, 石乃鑫, 杜永峰. 含软弱夹层边坡的地震时程响应分析[J]. 低温建筑技术, 2010(8): 54-56.  
Li Hui, Shi Naixin, Du Yongfeng. Seismic time-history response analysis of rock slope containing soft soil layer[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2010(8): 54-56.
- [102] 柏永岩, 聂德新. 茨菇滑坡滑带土扰动样强度参数取值分析及滑坡稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 496-502.  
Bai Yongyan, Nie Dexin. Strength of disturbed clay in sliding zone of Cigu landslide and associated stability analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 496-502.
- [103] 张燕, 纪洪广, 叶剑红. 扰动岩质边坡强震作用下动力响应分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增2): 304-311.  
Zhang Yan, Ji Hongguang, Ye Jianhong. Dynamic response analysis of disturbed rock slope under strong earthquake loading[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(Suppl 2): 304-311.
- [104] 贺龙鹏. 西安市地震地质灾害区划与可视化研究[D]. 西安: 长安大

- 学, 2011.  
He Longpeng. Study on seismic geological hazards microzonation and visualization[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [105] 毕忠伟, 张明, 金峰, 等. 地震作用下边坡的动态响应规律研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增1): 180-183.  
Bi Zhongwei, Zhang Ming, Jin Feng, et al. Dynamic response of slopes under earthquakes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (Suppl 1): 180-183.
- [106] 郭俊英, 石玉成. 地震动特性对黄土斜坡稳定性的影响分析[J]. 西北地震学报, 2004, 26(3): 250-254.  
Guo Junying, Shi Yucheng. Analysis on influence of earthquake motion to loess slope instability[J]. Northwestern Seismological Journal, 2004, 26(3): 250-254.
- [107] 姜彤, 马莎, 许兵, 等. 边坡在地震作用下的加卸载响应规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3803-3807.  
Jiang Tong, Ma Sha, Xu Bing, et al. Study on laws of load-unload response of slope under seismic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3803-3807.
- [108] 张均锋, 李正国. 强地震荷载作用下含断层岩质边坡稳定性分析[J]. 力学与实践, 2010, 32(1): 24-28.  
Zhang Junfeng, Li Zhengguo. Stability analysis of fractured rock slope under strong seismic loading[J]. Mechanics in Engineering, 2010, 32(1): 24-28.
- [109] 徐则民, 张倬元, 许强, 等. 九寨黄龙机场填方高边坡动力稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1883-1890.  
Xu Zemin, Zhang Zhuoyuan, Xu Qiang, et al. Dynamic stability analysis of high fill slope of Jiuzhai-Huanglong airfield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1883-1890.
- [110] 吴兆营, 薄景山, 刘红帅, 等. 岩体边坡地震稳定性安全系数分析方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2004, 24(3): 237-241.  
Wu Zhaoying, Bo Jingshan, Liu Hongshuai, et al. A method for evaluating dynamic safety factor rock slope seismic stability analysis [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2004, 24(3): 237-241.
- [111] 谭儒蛟, 李明生, 徐鹏道, 等. 地震作用下边坡岩体动力稳定性数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 3986-3992.  
Tan Rujiao, Li Mingsheng, Xu Pengxiao, et al. Numerical simulation of dynamic stability of slope rock mass under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Suppl 2): 3986-3992.
- [112] 陈玲玲, 陈敏中, 钱胜国. 岩质陡高边坡地震动力稳定分析[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(1): 33-35.  
Chen Lingling, Chen Minzhong, Qian Shengguo. Stability analysis of high-steep rocky slope under earthquake loads[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(1): 33-35.
- [113] 陈昌凯. 地震作用下边坡的有限元动力模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.  
Chen Changkai. Infinite element simulation on dynamic response of slopes under earthquake load[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.
- [114] 周永江, 王开云, 符文熹, 等. 高地震烈度区堆积体边坡动力响应时程特征分析[J]. 山地学报, 2007, 25(1): 93-98.  
Zhou Yongjiang, Wang Kaiyun, Fu Wenxi, et al. Analysis on time history dynamic response of a rockfall-type slope under high earthquake intensity[J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(1): 93-98.
- [115] 吕艳, 王根龙, 张新社. 翠华山山崩地质遗迹景观离散元数值模拟[J]. 工程地质学报, 2013, 21(3): 443-449.  
Lü Yan, Wang Genlong, Zhang Xinshe. Numerical simulation of Cuihua rock avalanche with discrete element method[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(3): 443-449.
- [116] 肖克强, 李海波, 刘亚群, 等. 地震荷载作用下顺层岩体边坡变形特征分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1557-1564.  
Xiao Keqiang, Li Haibo, Liu Yaqun, et al. Study on deformation characteristics of bedding slopes under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1557-1564.
- [117] 李海波, 肖克强, 刘亚群. 地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2385-2394.  
Li Haibo, Xiao Keqiang, Liu Yaqun. Factor of safety analysis of bedding rock slope under seismic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2385-2394.
- [118] 肖克强. 地震荷载作用下顺层岩体边坡变形特征及稳定性研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.  
Xiao Keqiang. Study on deformation characteristics and stability of bedding slope under earthquake[D]. Wuhan: Chinese Academy of Sciences, Institute of Rock and Soil Mechanics, 2006.
- [119] 李鹏, 苏生瑞, 王闰超, 等. 含软弱层岩质边坡的动力响应研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增1): 365-371.  
Li Peng, Su Shengrui, Wang Yanchao, et al. Research on dynamic response of rock slope with weak layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Suppl 1): 365-371.
- [120] 毛彦龙, 胡广韬, 毛新虎, 等. 地震滑坡启程刷动的机理研究及离散元模拟[J]. 工程地质学报, 2001, 9(1): 74-80.  
Mao Yanlong, Hu Guangtao, Mao Xinhui, et al. Mechanism of set-out violent-slide of slope mass during earthquake and its simulation by using discrete element method[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(1): 74-80.
- [121] 陈光齐. 地震引起的边坡灾害风险分析实用技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2395-2402.  
Chen Guangqi. Practical techniques for risk analysis of earthquake-induced landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2395-2402.
- [122] 冯春, 李世海, 王杰. 基于CDEM的顺层边坡地震稳定性分析方法研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 717-724.  
Feng Chun, Li Shihai, Wang Jie. Stability analysis method for bedding rock slopes under seismic load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 717-724.
- [123] 陶连金, 苏生瑞. 节理岩体边坡的动力稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2001, 9(1): 32-38.  
Tao Lianjin, Su Shengrui. Dynamic stability analysis of jointed rock slope[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(1): 32-38.
- [124] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 624-632.  
Xu Guangxing, Yao Lingkan, Gao Zhaoning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 624-632.
- [125] 任自铭. 地震作用下斜坡动力响应及稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.  
Ren Ziming. Dynamic response and stability of slope under seismic excitations[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [126] 周永习, 张得焯, 周喜德. 黄土滑坡流滑机理的试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 72-77.

- Zhou Yongxi, Zhang Dexuan, Zhou Xide. Undrained consolidation triaxial test for flow sliding mechanism of loess landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 72-77.
- [127] 杨泉, 肖盛燮. 地震诱发滑坡的链式阶段势能分析[J]. 西部交通科技, 2011(2): 27-30.
- Yang Xiao, Xiao Shengxie. Analysis on chain stage static energy of slope sliding caused by earthquake[J]. Western China Communications Science & Technology, 2011(2): 27-30.
- [128] 许文锋, 车爱兰. 地震荷载作用下海底滑坡特征及其机理[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(5): 782-786.
- Xu Wenfeng, Che Ailan. Destruction characteristic of seabed landslide during earthquake motion and its mechanism[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(5): 782-786.
- [129] 刘贵荣, 石豫川. 暴雨和地震触发滑坡滑速计算[J]. 地质灾害与环境保护, 2007, 18(4): 20-22, 27.
- Liu Guirong, Shi Yuchuan. Computing velocity of landsliding triggered by rainstorm and earthquake[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2007, 18(4): 20-22, 27.
- [130] Xu C, Xu X W, Lee Y H, et al. The 2010 Yushu earthquake triggered landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence modeling[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(6): 1603-1616.
- [131] Xu C, Xu X W, Yu G H. Landslides triggered by slipping-fault-generated earthquake on a plateau: An example of the 14 April 2010,  $M_w$  7.1, Yushu, China earthquake[J]. Landslides, 2013, 10(4): 421-431.
- [132] Xu C, Xu X W. Statistical analysis of landslides caused by the  $M_w$  6.9 Yushu, China, earthquake of April 14, 2010[J]. Natural Hazards, 2014, 72(2): 871-893.
- [133] 许冲, 徐锡伟, 于贵华, 等. 玉树地震滑坡影响因子敏感性分析[J]. 科技导报, 2012, 30(1): 18-24.
- Xu Chong, Xu Xiwei, Yu Guihua, et al. Susceptibility analysis of impact factors of landslides triggered by Yushu earthquake[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(1): 18-24.
- [134] 许冲, 徐锡伟. 玉树地震滑坡体积、重力势能降与造成的区域质心改变定量研究[J]. 科技导报, 2013, 31(2): 22-29.
- Xu Chong, Xu Xiwei. Quantitative study on volume, gravitational potential energy reduction and caused regional centroid position change: An example of the 2010 Yushu earthquake triggered landslides[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(2): 22-29.
- [135] 许冲. 2013年芦山 $M_w$  7.0级地震滑坡易发性快速评价方法[J]. 科技导报, 2013, 31(28/29): 15-23.
- Xu Chong. Quick landslide susceptibility evaluation and its validation for the 2013  $M_w$  7.0 Lushan earthquake[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(28/29): 15-23.
- [136] Xu C. Assessment of earthquake-triggered landslide susceptibility based on expert knowledge and information value methods: A case study of the 20 April 2013 Lushan, China  $M_w$  6.6 earthquake[J]. Disaster Advances, 2013, 6(13): 119-130.
- [137] 许冲, 徐锡伟, 郑文俊. 2013年7月22日岷县漳县 $M_w$  6.6级地震滑坡编录与空间分布规律分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(5): 736-749.
- Xu Chong, Xu Xiwei, Zheng Wenjun. Compiling inventory of landslides triggered by Minxian-Zhangxian earthquake of July 22, 2013 and their spatial distribution analysis[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 736-749.

(责任编辑 吴晓丽)

## ·学术动态·



中国科学技术协会

## 中国科协第98期“新观点新学说学术沙龙” 为中国海洋渔业发展出谋划策

2014年11月26—27日,主题为“海洋渔业的现在和未来”的中国科协第98期“新观点新学说学术沙龙”在珠海举行。南海水产研究所研究员贾晓平、上海海洋大学教授黄硕琳担任领衔专家,来自全国高校、科研院所及渔业生产管理一线岗位的23位专家与会,围绕海洋渔业资源与修复、海洋渔业管理与养护、海洋渔业延展与支持等议题进行了充分讨论。

专家一致认为,应尽快修订中国1986年制定并开始实施的《渔业法》,将渔民作为渔业的法律主体,将海洋渔业分为生计渔业与商业渔业,并区分开来实施管理;制定科学严格的渔业养护与捕捞政策并予以有效监管;鼓励并扶持现有海洋渔业劳动力转型转产,以提高渔民的生活质量、减少海洋鱼类资源恢复所面临的强大压力,变海洋渔业各环节的恶性循环为生态、社会与经济效益的良性循环。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38560/16131234.html>。