

地震滑坡危险性评估技术框架设计初探

王 涛, 吴树仁, 石菊松, 辛 鹏

中国地质科学院地质力学研究所, 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京, 100081

我国西部地震滑坡导致死亡人数比例占地震致死人员总数约 1/3~1/2 以上, 仅汶川地震滑坡致死人数就远超过近 20 年来全国因地质灾害死亡人数的总和(国家地震局兰州地震研究所, 1985; 陈永明等, 2006; 黄润秋等, 2009), 因此地震滑坡研究在地震减灾工作中举足轻重。尽管国内外地震滑坡研究在发育特征、形成机制及危险性反演等方面已取得了大量进展(Keefer, 1984; 孙崇绍等, 1997; Jibson et al., 2000; 王兰民, 2003; 孙进忠等, 2004; Chang et al., 2006), 尤其在 2008 年汶川地震之后, 再次掀起了地震地质灾害研究的热潮(黄润秋等, 2009; 许强等, 2009; 殷跃平等, 2009; 许冲等, 2010; Wu et al., 2012)。但同时也暴露出新问题, 如汶川地震期间不仅同震地质灾害导致伤亡惨重、震后数年又频发诸如文家沟特大泥石流等链生灾害, 导致恢复重建城镇严重损毁(刘传正, 2012)。遗憾的是, 目前多数地震滑坡研究局限于总结教训式的灾后反演, 无法较好地满足前期预测和主动减灾的实际需求。相对而言, 国内外针对潜在地震危险性的评估区划更为系统, 为工程抗震设防和国土规划提供了定量设计依据, 我国目前第五代地震区划成果即将发布(Frankel et al., 2002; GARCÍA-MAYORDOMO et al., 2004; PASQUALE et al., 2005; KORAVOS et al., 2006; 高孟潭等, 2006)。如此一来, 对地震滑坡危险性研究快速跟进的要求更显迫切。为更好地服务于地震减灾, 亟需建立地震滑坡危险性评估体系框架, 以便应对地震应急响应、震后恢复重建及潜在地震诱发地质灾害等不同阶段支撑决策的需求。本文结合在汶川地震灾区及关中盆地西部开展的地震滑坡研究工作, 初步提出了地震滑坡危险性评估框架设计构想, 以期抛砖引玉。

1 地震滑坡危险性评估方法

地震滑坡危险性评估方法是评估框架建设的基础, 目前国内外尚无适用于各种滑坡类型的、兼容性好的危险性研究方法(Miles et al., 2009), 但概括起来主要包括两类: 即基于指标体系分析的专家经验、层次分析法、模糊数学评判及多元回归等方法(唐川等, 2001; Marzorati et al., 2002; 王亚强等, 2004; 陈晓利等, 2007; Kamp et al., 2008), 以及基于物理力学机制的 Newmark 永久位移模型方法(Jibson et al., 2000; Refice et al., 2002; 王涛等, 2013)。

基于指标分析的定性或半定量的地震滑坡危险性评估方法在国内应用较为广泛, 主要利用专家经验对地质构造、地形地貌、地层岩性及基本地震参数(如烈度)等要素进行赋权值, 通过要素图层的叠加运算, 进行震后滑坡危险性及其发育规律反演; 或者结合小比例尺地震区划成果, 进行潜在地震诱发滑坡危险性概略评估。

在区域斜坡地震稳定性分析的方法体系中, 基于 Newmark 永久位移模型(Newmark, 1965)的评估方法由于相比数值模拟方法简便, 但可以提供比拟静力分析方法更有价值的信息, 因而成为目前国际上地震滑坡危险性研究应用最为广泛的方法, 且在实践过程中得到了改进(Jibson et al., 2000; Refice et al., 2002; Jibson, 2011; Zhao et al., 2012)。该评估方法基本流程分为 4 步: ① 根据区域岩土体力学强度和斜坡几何形态, 计算斜坡静态安全系数 F_s ; ② 利用静态安全系数和地形坡度, 计算坡体处于地震动极限平衡状态下的临界加速度 a_c ; ③ 利用矩震级 M_w 和震源距 R , 计算研究区的地震动 Arias 强度分布; ④ 根据临界加速度和地震动强度分布,

注: 本文为国家自然科学基金项目(NO.41102165)和国家“十二五”科技支撑计划课题(NO.2012BAK10B02 和 NO.2011BAK12B09)共同资助的成果。

收稿日期: 2013-03-13; 改回日期: 2013-03-31; 责任编辑: 刘恋。

作者简介: 王涛, 男, 博士, 主要从事地质灾害评估与防治研究工作。E-mail: wangtao_ig@163.com。

计算区域斜坡体在地震作用下发生的永久滑动位移量 D_N ，并据此进行地震滑坡危险性分级(王涛等, 2013)。

上述两种危险性评估方法在地震滑坡危险性评估框架的各阶段均会用到，具体采用何种方法主要取决于数据获取的效率及质量、评估的精度及时限要求等。在以下地震滑坡危险性评估框架介绍中，重点阐述框架的结构组成，不再赘述具体评估方法。

2 地震滑坡危险性评估框架设计

地震滑坡危险性评估框架设计旨在基于主动减灾的理念，利用地震滑坡危险性预测评估的相关技术方法，解决地震地质灾害形成及演化各阶段的关键地质安全性问题，为地震灾区或潜在地震区的应急部署、工程选址、国土规划等工作提供科技支撑。该框架的结构组成主要包括 4 部分：历史地震诱发滑坡研究、地震滑坡应急快速评估、震后降雨诱发地质灾害危险性评估、潜在地震诱发滑坡危险性评估（图 1）。

2.1 历史地震诱发滑坡研究

正如历史地震分析是地震危险性研究的基础，历史地震对区域滑坡的诱发效应对解释强震活动区的滑坡群发机制也至关重要。地震滑坡危险性评估使用的指标体系也是通过对历史地震滑坡或震后滑坡编录分析得到的(周本刚等, 1994; 陈永明等, 2006; 陈晓利等, 2007)。历史地震滑坡研究对象涉及的地震包括历史地震、史前地震、或者新近发生的现当代地震，涉及的滑坡包括区域群发性滑坡和灾难性单体滑坡。

在我国西部强震活动区或活动断裂带沿线多见古老大型滑坡遗迹，尤其在西北黄土区大型滑坡往往呈现区域群发特征。为探索历史地震与这些群发大型滑坡的关系，以关中盆地西部为例，利用强震诱发滑坡的最远致灾震中距和大型滑坡的优势坡向分析，综合确定了区域周边 300km 范围内需要重点考察的 4 次关键历史强震，并利用基于 Newmark 位移模型评估方法分别对历次地震诱发滑坡事件进行了危险性反演，借助 AUC 曲线比较分析了反演结果与现有大型滑坡分布的空间匹配程度，指出 1654 年天水南 $M8.0$ 级地震对关中盆地西部群发大型滑坡的诱发效应最强。针对单体灾难

性地震滑坡，戴福初等以 1786 年 $M7.75$ 康定地震诱发的老虎岩滑坡为例，利用史料和地貌证据反演了滑坡堰塞坝的形态特征、堰塞湖库容以及溃坝形成灾难性洪流的演化机制，并进一步指出了残余坝体在地震作用下失稳的危险性(Dai et al., 2005)。可见，历史地震滑坡研究不仅可以反演揭示历史地震对区域群发滑坡的诱发效应，而且可以为潜在地震诱发滑坡复活或新生滑坡危险性评估提供参考。

2.2 地震滑坡应急快速评估

鉴于在震后应急救援阶段，时间就是生命。地震滑坡应急快速评估通过快速获取基础地质地理、经济社会发展、即时地震动参数、震后高精度遥感影像等空间数据，利用“3S”技术和快速评估模型，对地震诱发区域滑坡分布及其损失进行快速评估，迅速锁定地震地质灾害高危险区，为争取最佳施救时机和优化应急部署提供依据(王涛, 2010)。具体工作内容根据不同精度、分阶段展开，主要包括地震滑坡危险性及其损失快速评估、基于遥感影像分类提取技术的地震滑坡快速制图及强度评估。

以汶川地震重灾区为例(王涛, 2010)，利用 ArcGIS 空间数据建模工具，编制了基于 Newmark 位移模型的快速评估模块，对区域地震滑坡危险性进行了应急快速评估；在此基础上，结合区域人口及交通网等载体分布制图，通过叠加运算得到了区域地震滑坡损失评估结果，为应急救援决策提供了实用依据。对基于监督分类、非监督分类及面向对象的特征提取等影像分类技术的地震滑坡快制图方法进行了比选研究，选择了面向对象特征提取与人工解译结合的方法，对地震灾区中滑坡密集发育的重点流域进行了精准解译，利用地震滑坡面密度进行了典型流域的地震滑坡强度评估。利用区域快速解译的灾点数据，以滑坡点密度形式进行了区域地震滑坡强度评估。

2.3 震后降雨诱发地质灾害危险性评估

强震灾区在震后数年乃至更长时期内，降雨诱发滑坡等地质灾害相比震前会显著增强(Lin et al., 2004; Koi et al., 2008; 黄润秋, 2011)，具体包括震裂山体的崩塌、滑坡及同震崩滑碎屑物形成的泥石流灾害，其中降雨诱发泥石流灾害尤为严重。通过降雨诱发地质灾害危险性评估（图 1），在区域尺度上可以判定潜在崩滑体及泥石流空间分布特征，在局地~场地尺度上通过崩滑流灾害体的运移特征

(Runout) 模拟, 可获得灾害体运移距离、堆覆面积及破坏能量等几何及运动学参数分布, 为震后临时安置点及恢复重建规划选址提供依据, 避免类似汶川地震后文家沟泥石流的悲剧重演。鉴于不同强度降雨事件的发生概率或重现周期不同, 相应地质灾害的危险性也不同。因此, 应结合水文气象领域的可能最大降雨量 (Probable Maximum Precipitation, PMP) 预测方法, 利用水文气象法或数理统计法对可能最大降雨量进行时空分布预测(吴树仁等, 2012)。以汶川地震重灾区为例, 利用 *Weibull* 分布模型预测了超越概率 10% 的汛期日最大降雨量时空分布特征, 基于这种概率水平的降雨条件和区域地质灾害易发性评估结果进行了震后灾区地质灾害危险评估(王涛, 2010)。

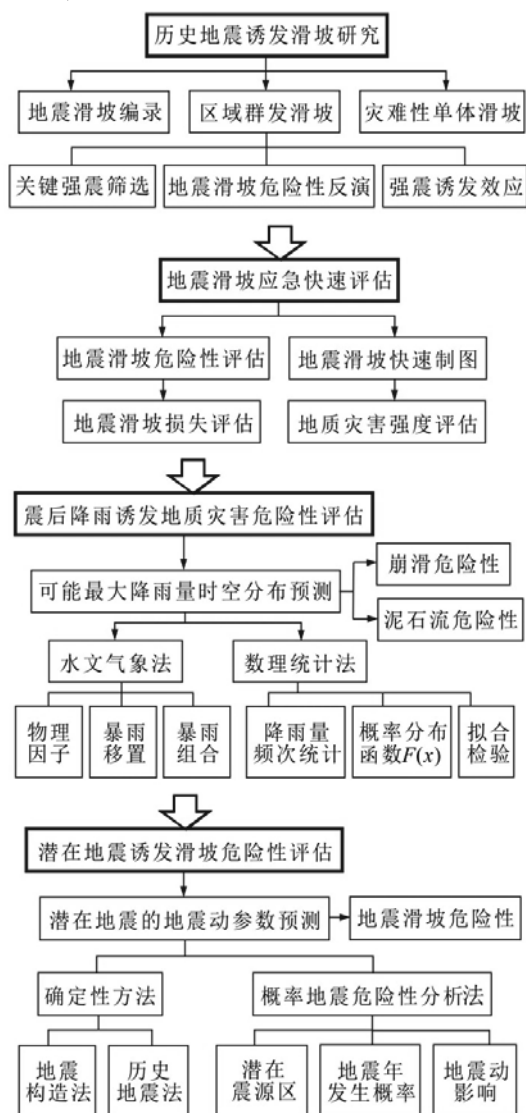


图 1 地震滑坡危险性评估技术框架

2.4 潜在地震诱发滑坡危险性评估

汶川地震诱发的大量灾难性滑坡主要沿中央龙门山断裂带发育(许强等, 2009; 吴树仁等, 2010), 这些高速远程崩滑-碎屑流式的滑坡灾害通常随发震断裂错动瞬间相伴而生, 且许多是已有断裂带滑坡复活。这种现象表明: 目前潜在强震区或发震断裂带沿线发育的大型滑坡, 在未来地震发生时极有可能演化成为灾难性的高速远程滑坡。因此, 在全国范围内、尤其在潜在强震区, 有必要在区域地震危险性评估和局地地震小区划的基础上, 分别开展不同尺度的潜在地震诱发滑坡危险性评估(图 1)。

实际上, 对潜在地震危险性评估的缺失是目前地震滑坡危险性研究中存在的主要问题之一, 这种评估模式并不具备严格的危险性或时空分布概率意义, 建议将潜在地震及其诱发滑坡的双重危险性评估相结合。潜在地震动参数预测方法包括: 确定性方法和概率地震危险性分析方法 (Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA); 确定性方法又包括地震构造法和历史地震法; 概率地震危险性分析法是目前中、美两国编制地震区划图使用的标准方法, 中国还通过考虑地震活动时空分布不均匀性角度, 对美国的概率地震分析方法进行了改进, 具体评估步骤主要包括潜在震源区划分、不同震级分档的年发生概率分析、场地遭受的地震动影响分析、确定任意超越概率的地震动参数分布 (如地震动峰值加速度)(刘静伟, 2011; 吴树仁等, 2012)。针对场地尺度的地震小区划, 相比全国地震区划更加重视场地工程地质条件及其与地震环境的耦合作用, 且进一步对地震地质灾害进行了初步评估。

3 结论与讨论

本文基于在汶川地震灾区和关中盆地西部开展的地震滑坡研究, 初步提出了地震滑坡危险性评估技术框架的设计构想, 其结构组成包括 4 部分: 历史地震诱发滑坡研究、地震滑坡应急快速评估、震后降雨诱发地质灾害危险性评估、潜在地震诱发滑坡危险性评估。而地震滑坡危险性评估方法则贯穿框架的始终, 具体包括两类: 基于指标体系分析方法和基于物理力学机制的 Newmark 永久位移模型方法。

地震滑坡危险性评估技术框架涵盖了地震滑

坡相关的各阶段研究内容, 尽管主题是针对地震诱发滑坡危险性, 但也包括震后降雨诱发滑坡、泥石流危险性评估问题, 实际上基本囊括了典型因素诱发地质灾害的危险性问题。尽管针对服务于地震减灾的目标而言, 需要对地震地质灾害进行系统的风险评估和控制研究, 但是本文重点从工程地质学科角度, 阐述了地震滑坡危险性评估问题, 也即地震滑坡风险体系中关键技术部分; 其后续部分还包括可容许风险标准和承载体易损性评估, 需要进一步从社会与经济学角度研究解决。

对于目前地震滑坡危险性研究存在的问题及发展趋势, 从技术层面包括历史地震资料的搜集与甄别、区域岩土体物理力学性质及承灾体分布等空间数据基础设施 (Spatial Data Infrastructures) 建设、震后即时地震动参数速报、遥感影像快速获取及地震滑坡快速解译技术等, 从管理层面则亟需建立地震防灾减灾各相关部门之间的数据共享发布及协作联动机制。尽管地震及其地质灾害无法避免, 但是通过先期危险性及风险评估的手段可以有效的识别隐患, 为地震地质灾害潜在风险减缓提供依据。

参考文献 / References

- Chang, K.-J., A. Taboada, Y.-C. Chan and S. Dominguez. 2006. Post-seismic surface processes in the Jiufengershan landslide area, 1999 Chi-Chi earthquake epicentral zone, Taiwan. *Engineering Geology*(86): 102~117.
- Dai, F. C., C. F. Lee, J. H. Deng and L. G. Tham. 2005. The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China. *Geomorphology*(65): 205~221.
- Frankel, D., M. D. Petersen, C. S. Mueller, K. M. Haller, R. L. Wheeler, E. V. Leyendecker, R. L. Wesson, S. C. Harmsen, C. H. Cramer, D. M. Perkins and K. S. Rukstales (2002). Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard Maps, U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR, U.S. GEOLOGICAL SURVEY: 33.
- GARCÍA-MAYORDOMO, J., E. FACCIONI, ROBERTO and PAOLUCCI. 2004. Comparative Study of the Seismic Hazard Assessments in European National Seismic Codes. *Bulletin of Earthquake Engineering*(2): 51~73.
- Jibson, R. W. 2011. Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective. *Engineering Geology*(122): 43~50.
- Jibson, R. W., E. L. Harp and J. A. Michael. 2000. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps. *Engineering Geology* 58(3-4): 271~289.
- Kamp, U., B. J. Growley, G. A. Khattak and L. A. Owen. 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region. *Geomorphology* 101(4): 631~642.
- Keefer, D. K. 1984. Landslides caused by earthquakes. *GSA Bulletin* 95(4): 406~421.
- Koi, T., N. Hotta, I. Ishigaki, N. Matuzaki, Y. Uchiyama and M. Suzuki. 2008. Prolonged impact of earthquake-induced landslides on sediment yield in a mountain watershed: The Tanzawa region, Japan. *Geomorphology* 101(4): 692~702.
- KORAVOS, G. C., T. M. TSAPANOS and M. BEJAICHUND. 2006. Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Japan. *Pure and Applied Geophysics*(163): 137~151.
- Lin, C.-W., C.-L. Shieh, B.-D. Yuan, Y.-C. Shieh, S.-H. Liu and S.-Y. Lee. 2004. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan. *Engineering Geology* 71(1-2): 49~61.
- Marzorati, S., L. Luzi and M. De Amicis. 2002. Rock falls induced by earthquakes: a statistical approach[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 22(7): 565~577.
- Miles, S. B. and D. K. Keefer. 2009. Evaluation of CAMEL- comprehensive areal model of earthquake - induced landslides. *Engineering Geology*(104): 1~15.
- Newmark, N. M. 1965. Effects of earthquakes on dams and embankments. *Geotechnique* 15(2): 139~160.
- PASQUALE, G. D., G. ORSINI and R. W. ROMEO. 2005. New Developments in Seismic Risk Assessment in Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*(3): 101~128.
- Refice, A. and D. Capolongo. 2002. Probabilistic modeling of uncertainties in earthquake-induced landslide hazard assessment. *Computers & Geosciences* 28(6): 735~749.
- Wu, S., J. Shi and H. Wang. 2012. Analysis of activity intensity for landslides triggered by the Wenchuan earthquake, Sichuan Province, China. *Environmental Earth Sciences* 65(4): 1021~1028.
- Zhao, H. and Er-xiangSong. 2012. A method for predicting co-seismic displacements of slopes for landslide hazard zonation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*(40): 62~77.
- 陈晓利, 祁生文, 叶洪. 2007. 基于 GIS 的地震滑坡危险性的模糊综合评价研究. *北京大学学报(自然科学版)网络版* 2(2): 1~6.
- 陈永明, 石玉成. 2006. 中国西北黄土地区地震滑坡基本特征. *地震研究* 29(3): 276~281.
- 高孟潭, 卢寿德. 2006. 关于下一代地震区划图编制原则与关键技术的

- 初步探讨. 震灾防御技术 1(1): 1~6.
- 国家地震局兰州地震研究所. 1985. 陕甘宁青四省(区)强震目录(公元前 1177 年-公元 1982 年). 西安, 陕西科学技术出版社.
- 黄润秋. 2011. 汶川地震地质灾害后效应分析. 工程地质学报 19(2): 145~151.
- 黄润秋等. 2009. 汶川地震地质灾害研究. 北京, 科学出版社.
- 刘传正. 2012. 汶川地震区文家沟泥石流成因模式分析. 地质论评 58(4): 709~716.
- 刘静伟. 2011. 基于历史地震烈度资料的地震危险性评估方法研究. 构造地质学 (博士): 153.
- 孙崇绍, 蔡红卫. 1997. 我国历史地震时滑坡崩塌的发育及分布特征. 自然灾害学报 6(1): 25~30.
- 孙进忠, 陈祥, 王余庆. 2004. 岩土边坡地震崩滑的三级评判预测. 地震研究 27(3): 256~264.
- 唐川, 朱静, 张翔瑞. 2001. GIS 支持下的地震诱发滑坡危险区预测研究. 地震研究 24(1): 73~81.
- 王兰民. 2003. 黄土动力学. 北京, 地震出版社.
- 王涛. 2010. 汶川地震重灾区地质灾害危险性评估研究. 地质工程 (博士): 161.
- 王涛, 吴树仁, 石菊松, 辛鹏. 2013. 基于简化Newmark位移模型的区域地震滑坡危险性快速评估-以汶川 Ms8.0 级地震为例. 工程地质学报 21(1): 16~24.
- 王亚强, 王兰民, 张小曳. 2004. GIS 支持下的黄土高原地震滑坡区划研究. 地理科学 24(2): 170~176.
- 吴树仁, 石菊松, 王涛, 张春山, 石玲. 2012. 滑坡风险评估理论与技术. 北京, 科学出版社.
- 吴树仁, 王涛, 石玲, 孙萍, 石菊松, 李滨, 辛鹏, 汪华斌. 2010. 2008 汶川大地震极端滑坡事件初步研究. 工程地质学报 18(2): 145~159.
- 许冲, 戴福初, 徐锡伟. 2010. 汶川地震滑坡灾害研究综述. 地质论评 56(6): 860~874.
- 许强, 裴向军, 黄润秋, 等. 2009. 汶川地震大型滑坡研究. 北京, 科学出版社.
- 殷跃平, 潘桂堂, 刘宇平, 等. 2009. 汶川地震地质与滑坡灾害概论. 北京, 地质出版社.
- 周本刚, 张裕明. 1994. 中国西南地区地震滑坡的基本特征. 西北地震学报 16(1): 95~103.