

国外降水型滑坡事件个例研究

张健

(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要: 通过搜集美国、意大利、韩国的不同区域的降水型滑坡事件调查资料, 在分析研究区域滑坡的地质资料和气象资料的基础上, 探讨了降水型滑坡的规律特点, 分析了滑坡与降水在时间上的关系以及滑坡与降水频次、降水强度、降水量之间的关系, 并讨论了降水型滑坡的应对措施。

关键词: 滑坡, 降水, 关系

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.z1.002

1 引言

滑坡是一种严重的岩土体失稳现象, 滑坡的发生一方面取决于斜坡自身的地质和地貌条件, 另一方面与斜坡受到的内外应力和人为作用有关。在诸多外部应力中, 降水尤其是强降水是滑坡活动最重要的触发因素。降水对滑坡的触发作用主要表现在: 降水的大量下渗, 导致斜坡上的土石层饱和, 甚至在斜坡下部的隔水层上积水, 从而增加了滑体的重量, 增大了孔隙水压力, 使处于极限平衡状态的坡体产生滑动; 降水由地表进入地下, 转变成为地下水, 浸泡软化滑动面, 降低土石层的抗剪强度。不少滑坡具有“大雨大滑、小雨小滑、无雨不滑”的特点。

降水诱发的滑坡广泛存在, 既造成了广大人员的伤亡和财产损失, 同时又对经济建设和社会稳定产生不良的影响。对滑坡与降水的关系进行研究是非常必要的, 这既有利于加深对降水型滑坡发育规律及防治措施的认识, 又能充分利用其规律来最终达到防灾减灾的目的。国内外研究人员对降水与滑坡的关系进行了很多有效的探索, 他们采用不同的方法或模型来研究某个区域滑坡产生时降水强度或降水持续时间的临界值, 在一定程度上说明了降水与滑坡之间的关系, 从不同的角度探讨了降水对滑坡的作用。

本文通过搜集国外部分典型区域降水型滑坡事件的调查资料, 在分析滑坡的地质资料和气象资料的基础上, 探讨降水型滑坡的规律特点, 揭示降水型滑坡与降水因子的一些关系, 为深入开展降水型滑坡的研究奠定基础。

2 研究区简介

2.1 美国 La Conchita

La Conchita位于加利福尼亚南部海岸线Ventura和

Santa Barbara之间, 地处250m宽的狭窄海岸带和180m高的35°陡壁(图1)。从1865年以来, La Conchita的陡壁已经发生了多次滑坡事件。1889年, 滑坡吞没了沿着海岸线的南太平洋铁路线。1909年, 事件重发, 一辆火车被掩埋。1995年, 吞没了La Conchita社区。其中, 1995年的La Conchita滑坡是一次很复杂的塌落土壤流动, 滑坡发生在3月, 即雨季的末期, 雨量是一般雨量的两倍。

2.2 美国 Cleveland Corral

Cleveland Corral滑坡位于美国加利福尼亚西尔瑞山区。海拔高度位于30~3140m。1983年, 这个区域发生了一次重大的灾害性滑坡。1997年以来, 美国地质调查局(USGS)利用实时数据采集系统对该区进行了监测, 发现在冬季(雨季)斜坡运动和滑坡发生期间, 孔隙水压力和土壤水分都有所增加。

2.3 美国西雅图和 Puget 湾附近地区

美国西雅图和Puget湾附近地区经常会出现滑坡灾害, Puget湾周围低地的表层主要由更新世冰碛物、冲积物和海相沉积物组成; 只有少许基岩出露地表。某些西雅图山脉和Puget湾沿岸的很多海岬, 存在冰河期前的火山岩和沉积岩。研究区主要的第四系地层单元包括非冰碛成因的砂砾、砂、粉砂和粘土(Qob-Qpo)以及冰川沉积物, 包括Vashon冰碛。沿峭壁分布有几个大型的冰河期以后的滑坡沉积物, 其中包括深部的平滑型和转动型滑坡沉积物, 其中一些是活动滑坡。

2.4 意大利 Ruinon

意大利Ruinon滑坡位于Frodolfo河右岸的Valfurva山谷的斜坡上。Ruinon滑坡区的岩石崩塌尤为活跃, 并在Confinale山谷和Cavallaro山谷之间延伸。1954年以来, 该斜坡一直不稳定, 伴随着泥石流、岩崩以及峭壁与断层的扩展。1954年以来的航拍显示, 海拔

收稿日期: 2013年11月19日; 修回日期: 2013年11月30日
作者: 张健(1983—), Email: zhangjian_05@126.com

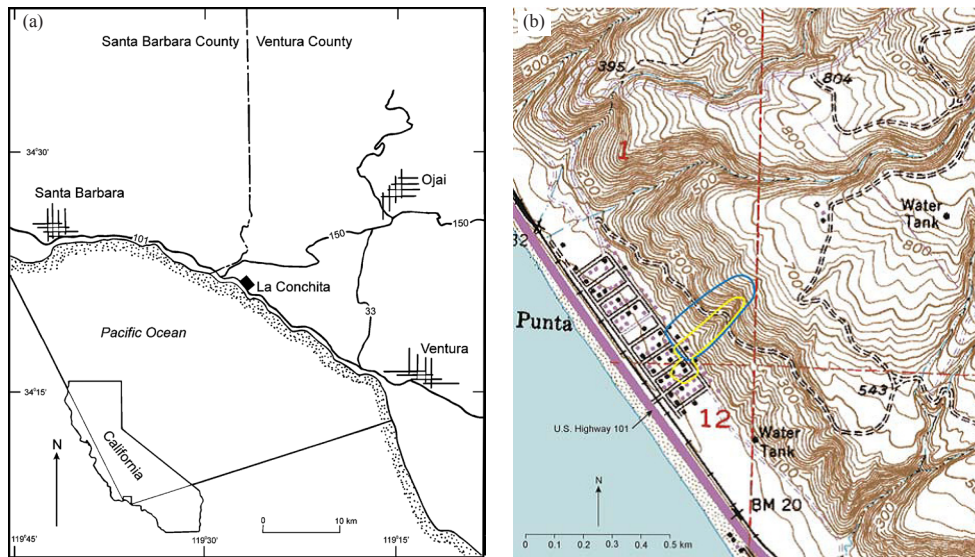


图1 La Conchita位置 (a) 和地形示意 (b)

2100m的地区出现了细微滑坡，1960年第一次滑坡被报道。没有记录显示这里早先发生过滑坡，尽管此地以“Ruinon”命名本身就反映了这段斜坡的持续不稳定。1998年6月，更多的泥石流阻断了Gavia国道，该事件后，伦巴第地区决定拓展气象学和地质学监控网络并使之部分自动化。

2.5 韩国 Deoksan

韩国江原道Inje县的Deoksan地区多山，山区占总面积的80%以上。研究区及附近的海拔主要集中在351~420m，最高海拔达945m。研究区坡度也较大，39.6%的区域坡度在31°~40°之间。由于研究区海拔高、坡度陡且山谷长，导致滑坡、泥石流极易发生。河流的干流方向是WNW-ENE，沿山谷NE-SW方向设置山体滑坡监测点。

研究区的岩性由前寒武纪花岗片麻岩组成，其中具有在复杂变质作用下形成的高密度页理和剪切断裂；崩积层较厚，在坡底平均厚度为4m，在斜坡顶部和中部，厚度为0.5~2m。山坡上的风化土壤层剖面表现为典型的崩积特征，由松散压实的角砾岩和分选差的砂质粉土颗粒组成。从山顶到山底土壤的含水量一致，说明土壤层的渗透系数高。河谷内岩石的大小大都在60cm×50cm左右，是由高密度剪切断裂形成的。根据这一特征，可以清楚地表明，土壤层主要是由以前的山体滑坡物质组成，在研究区发生过许多滑坡和泥石流。

3 滑坡与降水的关系

根据美国、意大利、韩国不同区域的降水型滑坡的地质资料和气象资料，以及国外学者对研究区域降

水型滑坡事件的调查研究，对降水型滑坡的规律特点进行了分析总结，得出了滑坡与降水之间存在的以下几方面关系。

3.1 滑坡与降水在时间上的关系

降水与滑坡的发生有密切的关系，二者在时间上具有很好的一致性，根据国外学者对研究区域降水型滑坡事件的个例研究可以看出，大部分滑坡发生在雨季，从短时间的降水过程来看，由降水诱发的滑坡等地质灾害大多发生于降水的中后期或略滞后。

3.1.1 美国 La Conchita

Jibson等（2006）指出，本研究区域1995年和2005年发生的两次滑坡，是在两种非常不同的机制下引发的同一滑坡堆的移动，并带来明显不同的结果。

1995年的滑坡是深层的、连贯的塌陷—土壤流动的塑性变形，移动比较缓慢，发生时间是在非常湿润的1月以后，其深度模式与延迟是一致的，更深层次的滑坡更多的是由雨水的深层渗透引发的，这可以发生在几周或者数月后。

2005年的滑坡是相同物质的浅层再活化作用，形成快速并且高度液态的土渣，发生于接近两周的湿润期的累积之后（图2），与浅层、液体模式一致，浅层的、快速的渣土移动更多地发生在长时间、密集的降水时期，而没有或者很少有迟滞时间。

3.1.2 美国 Cleveland Corral

Ray等（2007）比较了美国Cleveland Corral区域土壤水分和降水趋势与斜坡运动和滑坡事件之间的关系。该研究区域2005年1月—2006年5月的季节趋势表明，每年3月到5月末是强降水比较集中的阶段，土壤

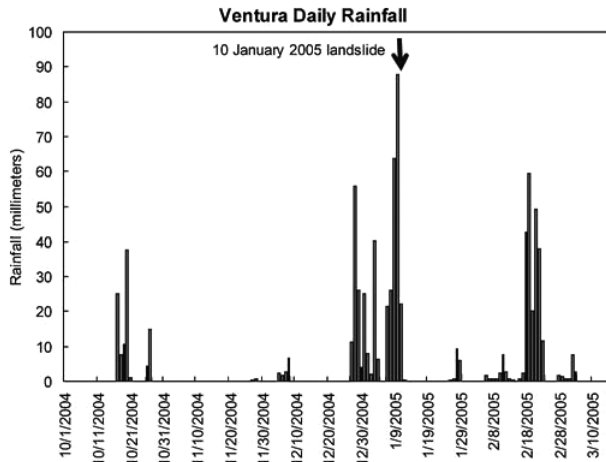


图2 2004年10月1日—2005年3月15日Ventura（位于La Conchita东南方20km）的日降水状况

水分峰值出现在2005年和2006年的4月和5月，土壤水分的上升趋势与强降水出现的时期是一致的。不过，AMSR-E测得的本研究区域的土壤体积含水量峰值要滞后于TRMM降水数据（图3），2005年5月10日和2006年4月14日出现了两次土壤含水量高值，分别为24.9%和28.7%，而降水峰值事件出现在2005年5月1日（31 mm）和2006年4月5日（47.8 mm）。这说明土壤水分更可能反映了累积降水（而不是瞬时强降水）特征。

研究发现，该区域内的斜坡运动开始于2005年2月末，2005年整个5月观测到了多次斜坡运动（<http://landslides.usgs.gov/monitoring/hwy50>）。2006年观测到了两次滑坡，一次是4月3日发生在Whitehall附近，另一次是5月7日发生在Kyburz附近。所有这些斜坡运

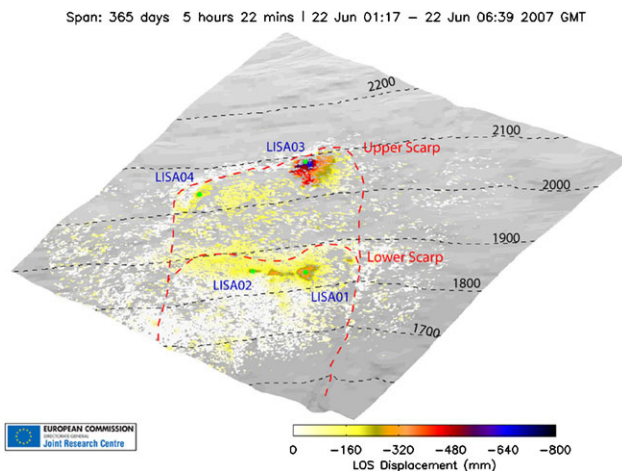


图4 基于4个点（LISA01, LISA02, LISA03, LISA04）的3D累积位移图（2006年6月22日—2007年6月22日）。黑色虚线为等高线，红色虚线为滑坡边界。LOS（line-of-sight）位移的负值表示向观测者的移动距离

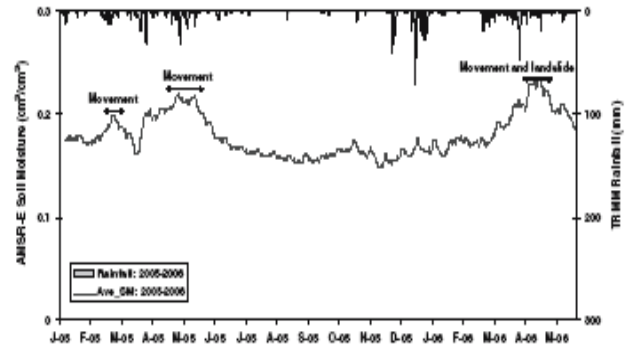


图3 美国Cleveland Corral区域2005年1月—2006年5月的斜坡运动/滑坡、AMSR-E土壤水分含量（1周移动平均）和TRMM日降水数据

动和滑坡与该区表层土壤水分和降水的增加时期相一致。值得关注的是，降水峰值和观测到的斜坡运动和滑坡发生日期并不完全吻合（图3）。

3.1.3 意大利 Ruinon

本研究区是典型的大陆—高山降水类型区，降水主要出现在春秋季。Crosta等（2002）使用ARPA-Lombardia地质监测中心提供的1997—2001年间的实地观测数据，分析了Ruinon区域降水和滑坡之间的关系，其分析认为，受降水影响，斜坡的季节溜滑的加速阶段普遍发生在夏季和秋季，减速则发生在冬季（由降雪和土壤结冻造成）。

Del Ventisette等（2012）使用地基干涉合成孔径雷达（Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar, GBInSAR）数据，分析了2006/2007年Ruinon滑坡动态与降水的关系，GBInSAR数据具有高的空间分辨率和极高的时间分辨率（大约每小时5幅影像）。研究选取了位于Ruinon滑坡区的不同位置的4个点（LISA01, LISA02, LISA03, LISA04）来研究滑坡动态，这4个点的位置参见图4，该图也呈现了2006年6月22日—2007年6月22日间基于这4个点的累积位移。位移速度（图5）显示出明显的季节性。研究进一步分析了这4个点的位移速度、降水随

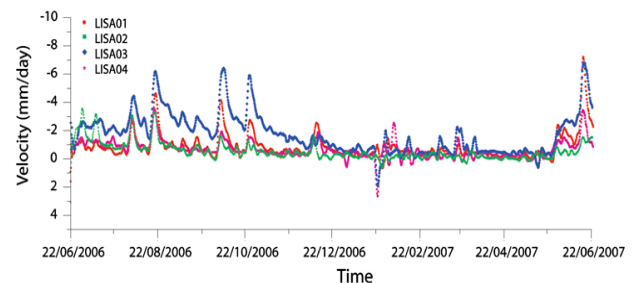


图5 位移速度随时间的变化（LISA01, LISA02, LISA03, LISA04同图4）

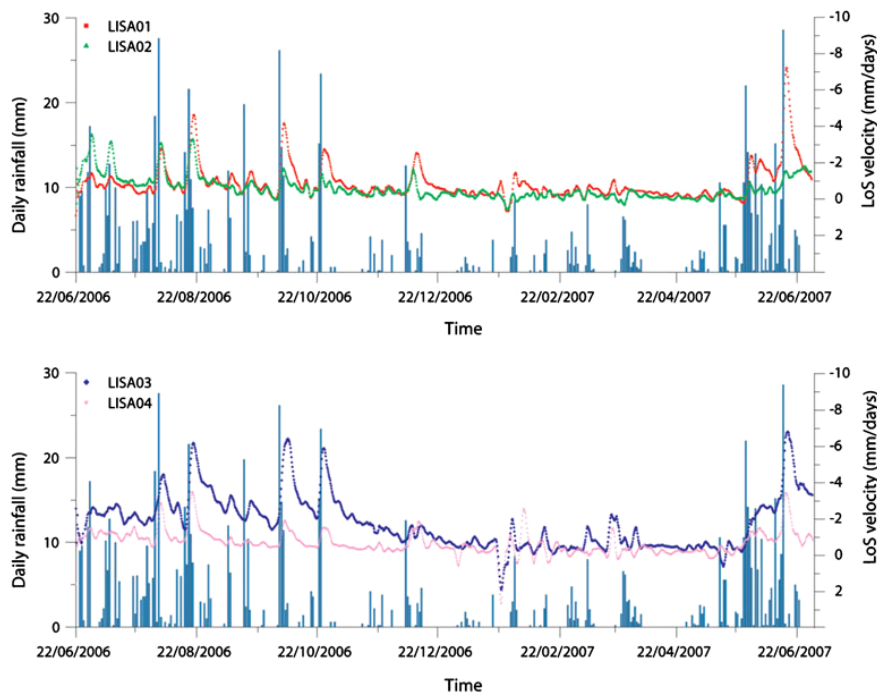


图6 位移速度与降水随时间的变化 (LISA01, LISA02, LISA03, LISA04同图4)

时间的变化 (图6)。其中, 降水数据采集于ARPA-Lombardia建立在Ruion滑坡顶端 (海拔约2140m) 的气象站。2006年6月22日—2007年6月22日的累计降水量是791mm, 与该区的多年平均降水量 (750mm) 基本一致。从图6可以发现, 位移速度与降水量具有明显的一致性。

3.2 滑坡与降水频次、降水强度之间的关系

滑坡发生与降水频次也有较好的一致性, 降水相对密集期是滑坡发生最多的时期。对于蠕动型滑坡和慢速滑坡来说, 降水密集期也是滑坡发生的加速期, 它们具有很好的对应关系。

Del Ventisette等 (2012) 将Ruion滑坡区域整个研究时段 (2006年6月—2007年6月) 的降水情况分为4个主要阶段:

(1) 2006年6—8月: 相对密集降水期 (日均降水量为8~10mm), 持续几天降水;

(2) 2006年9—10月: 降水持续时间稍短 (2~3d), 但是强度大 (高强度的日均降水可达10~15mm);

(3) 2006年9月—2007年4月: 降水强度低, 第一场雪发生在12月6日;

(4) 2007年5—6月: 日均降水量为3~7mm。

在这4个阶段中, 观测到的位移速度峰值主要出现在2006年6—11月和2007年5—6月期间, 表明了位

移速度格局与日降水强度的关联。

但是, 更细节的分析显示, 只有一部分速度峰值可以和降水事件联系起来。LISA01和LISA03分别位于较高和较低斜坡的变形最严重的区域, 这两个点分别有16和15个位移加速峰值可以与降水事件联系在一起, 主要是由持续时间短而强度大的降水 (2~3d, 但是日均降水量为15~20mm) 导致的加速和位移速度峰值。虽然低强度降水事件 (日降水为4~5mm) 通过每一次降水的累积可以产生加速, 但持续多日的低强度降水事件没有明显地影响到滑坡动态, 进一步讲, 在这些降水的发生和滑坡位移速度变化之间有明显的延迟。例如, 在低层陡坡上的点, 7月和8月降水事件开始后, 位移速度峰值出现时间估计有3~4d的滞后, 不过, 秋季的滞后时间较短。

为了较好理解降水事件和滑坡运动的关系, 图7给出了LISA01和LISA03测量点的每次降水事件的强度、持续时间和相应的滑坡平均加速之间的关系。很明显, 可以看出导致滑坡最快加速的降水事件在强度和持续时间方面有特定的特征。总体上, 低强度和短持续时间的降水事件, 滑坡的加速不是很明显; 短持续时间但是强度高的降水事件能引起滑坡的加速。然而, 在LISA03测量点上, 有一些例外, 一些短持续、低平均强度 (4~6d的持续时间, 2~4mm/d的降水强度) 的降水也引起了滑坡的加速, 这些事件总是出现

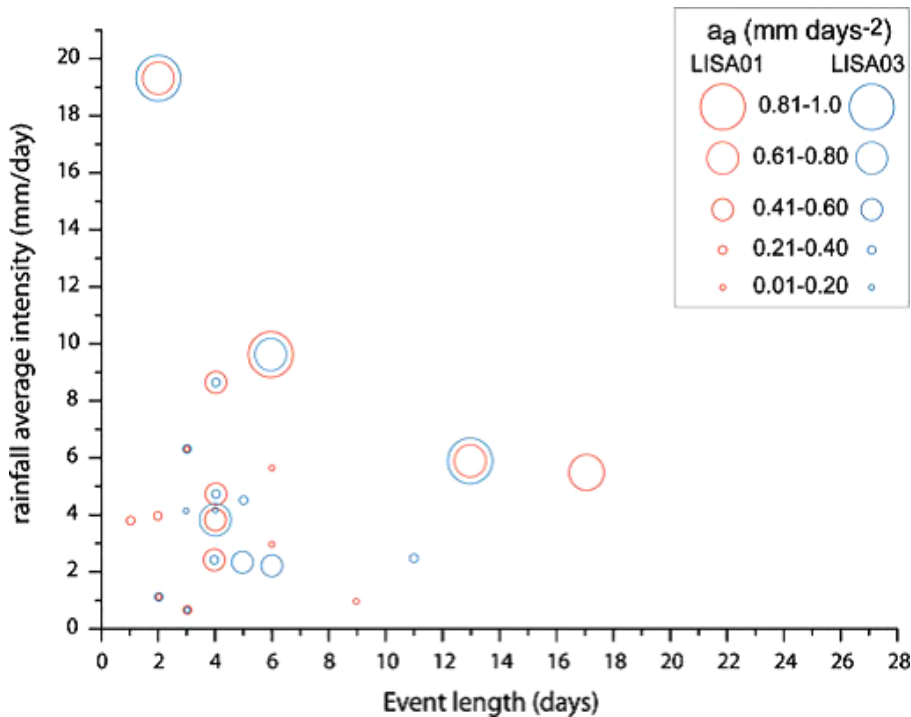


图7 LISA01 (红色圆环) 和LISA03 (蓝色圆环) 的降水持续时间与平均降水强度、滑坡平均加速的速度 (a_a) 之间的关系示意 (LISA01, LISA03同图4)

在春季, 这可能是由于降水和积雪融化的共同影响。

滑坡与降水强度的关系也可以通过临界降水强度来度量, 临界降水强度被定义为某一降水量阈值, 当一定时间内降水量超过该阈值时, 则会引发滑坡事件。一般而言, 当具备引发滑坡发生的降水条件时, 多数滑坡均发生在降水强度最大的时候或者略滞后。

Chleborad (2003) 指出, 强降水 (1d或2d内降水达到50~75mm) 是美国西雅图地区大部分滑坡发生的直接诱因, 在降水期间或降水之后发生滑坡证实了这一点。1986年1月17日, 在西雅图的Puget湾附近, 从当地时间晚上6时开始的28个小时内的总降水量达到128mm, 平均降水强度为4.6mm/h, 在第25小时, 降水强度达到了峰值, 为15.5mm/h; 此次降水诱发了29处浅层滑坡; 在1月18日当地时间晚上6时, 即降水24个小时后, 降水强度最大的一段时间里, 在测量降水的雨量计附近, 发生了2起滑坡。

3.3 滑坡与降水量之间的关系

边坡失稳与总降水量的大小有直接关系。不同地区诱发滑坡的临界降水量有一定的差别, 同时, 滑坡的类型、规模都会影响到临界降水量的大小。对于同一规模的不同类型滑坡来说, 基岩滑坡所需要的降水量 (日降水量和累积降水量) 一般要大于土层碎屑滑坡。而对于同一类型不同规模的滑坡来说, 规模大

的滑坡需要较大的降水量。在其他因素相同的条件下, 滑坡发育程度有随降水量增大而增多的趋势, 雨量越大的地区滑坡越发育。例如, 发生在美国加利福尼亚La Conchita、韩国Gangneung等区域的大量降水型滑坡事件。

Jibson (2006) 发现, 2005年美国加利福尼亚La Conchita滑坡发生在一个15天降水期的末尾时段, 在加利福尼亚南部许多区域, 这个15天降水期的降水量达到或接近历史降水纪录。例如, 在Ventura (La Conchita东南20km) 地区, 2004年12月27日—2005年1月10日的降水量达到378mm, 只比多年平均降水量 (390mm) 略少一点。虽然降水强度不是极端强烈, 但

是中等—高强度的降水时间持续达2周多, 经过这段时间的降水累积, 便导致了滑坡的发生。

Chae等 (2012) 指出, 2002年8月31日—9月1日, 在韩国Gangwon省Gangneung地区及其附近, 台风Rusa诱发了约1500次山体滑坡事件。根据记录, 当时12h的降水量超过了895mm。2003年9月12—13日, 台风Maemi诱发了1200多次山体滑坡事件, 期间, 韩国南部和中部的日最大降水量分别为410mm和300mm, 南部地区的小时最大降水量达到89.5mm。在2006年7月14—17日, 强降水造成了Gangwon省Inje和Pyongyang地区共发生了约1500处山体滑坡, 3天降水量超过476mm。2006年7月15—16日, Inje地区发生了400余次滑坡事件, 长度在31~40m之间的山体滑坡占总滑坡的12.5%, 62.3%的山体滑坡宽度为6~10m; 虽然每处滑坡的规模较小, 碎屑物平均厚度为4m, 但是在从山坡向下的搬运过程中, 这些物质会在山谷中堆积。

根据韩国国家防灾研究所的数据, Inje研究区1998—2007年的平均年降水量为1337mm, 约有60%的总降水通常集中在7—9月, 表明在此期间最可能发生山体滑坡灾害。2006年7月14—20日发生特大暴雨, 累积峰值降水量为476mm。在此期间, 由于浅层滑坡和泥石流, 造成Inje地区8人死亡。最大小时降水

量为66.0mm，相当于50年一遇；2小时降水量为99.0mm，超过了百年一遇。

韩国国家防灾研究所在Inje的Seowha、Deoksan、Garisan和Bupyeong等区域安装了雨量站，它们和韩国气象局设在Inje市中心的自动气象站测得的降水事件有所不同（图8）。虽然在2008年7月1日、7日、14日和17日，上述4个局地雨量站中至少有一个站点监测到了降水，但在此期间，Inje市中心并没有出现降水事件。降水数据的差距清楚地表明，局地降水与地形密切相关，特别是夏季，在山区不同海拔处以及距观测点的不同位置差异更为明显（图略）。

在Deoksan雨量站，7月20日和7月24日降水量分别为72.4和131.6mm，比位于Inje市中心KMA雨量站观测到的同日降水量约低40mm（图8）。根据单位面积降水影响分析，位于山区的Deoksan地区面积为0.36km²，为Inje市中心面积（1.83km²）的1/5。尽管7月20日和7月24日Deoksan地区比Inje市中心的降水量要小，然而，按照单位面积的降水影响来计算，降水对Deoksan地区比Inje市中心的影响要大。因此，即使降水量相同，仍有必要考虑降水对不同地形的影响。在陡坡和山区的强降水会增加孔隙水压力、含水量和土壤饱和度，从而导致山体滑坡和泥石流的发生。

4 滑坡灾害的预警及对策措施

对于所有的自然灾害，预防和减灾措施都是非常重要的工作。降水型滑坡灾害在世界上的分布之广，发生频率之高，给人类造成的危害之大受到了包括政

府在内的各种组织和机构的广泛重视。本文所选的部分研究区在应对降水型滑坡时也采取了相应的措施。

4.1 美国西雅图

滑坡通常会重复发生，因此可以通过了解研究区的滑坡历史，并与其他相关资料相结合，来绘制滑坡灾害图，进而确定最危险的区域。一般认为滑坡灾害图（在居民区和工业区，风险图更为适宜，有助于进行敏感性评价）非常重要，有助于主管机构制定最终的预防/准备措施。

政府和私人部门在多层次上展开合作，对1997年的滑坡和其他最近出现的滑坡事件进行分析，为Puget湾地区制定了地质灾害减灾措施。1996年10月，USGS启动了一个针对Puget湾5个地区的地震、洪涝、滑坡和火山灾害的研究项目，西雅图、USGS、华盛顿大学于1998年开始合作，利用现有的上万个岩土勘察成果（钻孔、爆破和开挖）建立了详细的三维地质模型和数据库，并将这些成果应用于滑坡灾害研究中。1998年，美国联邦应急管理局（简称FEMA）启动了一项名为“项目影响评估”的减灾计划，选择西雅图作为试点城市之一。FEMA投资了100万美元，成立了由公共和私人机构组成的项目影响评估委员会，希望将西雅图建设成一个更具灾害抵抗力的城市。

在西雅图开展的这些合作整合了更多的可用资源，为开发、测试和比较各种滑坡灾害评价方法创造了机会，使USGS可以利用一种更全面的方法来评价西雅图的滑坡特征，这一方法包括对斜坡稳定性和滑

坡发生的相关关系、滑坡重现概率、野外试验仪器、降水阈值以及特定滑坡的野外调查和模拟的研究。

4.2 意大利

在意大利，全国的各级机构，从政府部门到市政当局都参与民事保护工作。在民事保护组织层面，建立了区域功能中心网络，这些中心负责所有的民事保护任务：监测、预防和应急预案。特别是这些功能中心负责收集不同灾害的参数，生成实时风险情景。支持风险管理和决策过程的科技中心（即能力中心）负责提供原始数据和分析结果。

区域功能中心实时处理环

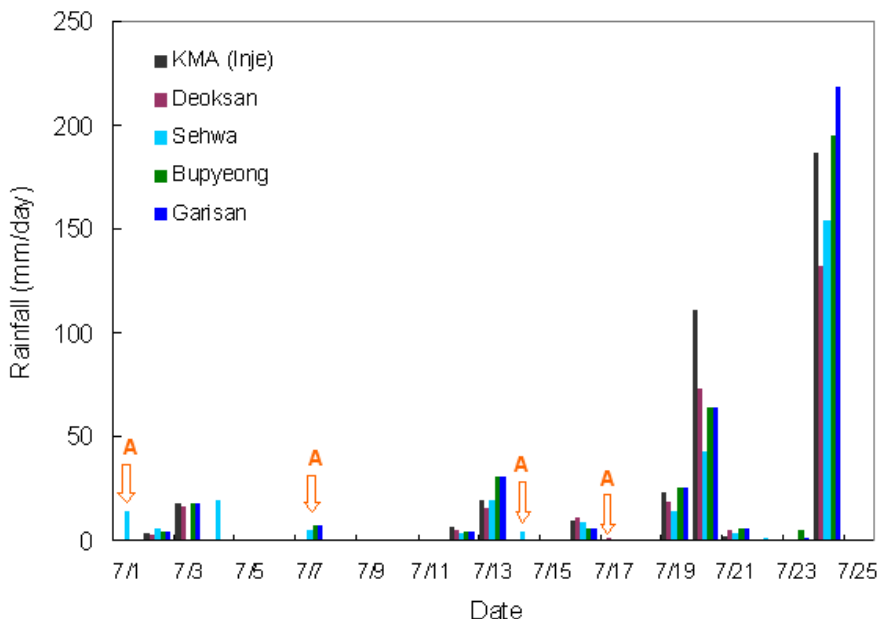


图8 韩国气象局（KMA）设在Inje的自动气象站和韩国国家防灾研究所设在Inje的Seowha、Deoksan、Garisan和Bupyeong等区域的雨量站测得的降水事件的对比。
“A”所指的日期内，KMA自动站没有监测到降水

境数据,根据结果进行不同类型风险的情景模拟。能力中心的主要任务是建立并改进这些模型,以确定不同现象和诱发因素的预警水平。根据不同事件(例如导致滑坡风险的降水和地面位移)确定特定阈值,按照预警水平系统进行预警,每个水平对应着不同的应急预案,包括从市长、地方和技术部门的参与到发布疏散命令。

大部分活动滑坡都对人类具有一定威胁,因此需要采用最新的技术,加强长期监测网的建设。Del Ventisette等(2012)通过GBInSAR方法对Ruinon滑坡进行监测,GBInSAR不同于传统的现场仪器定点监测,它能够提供更整个研究时段整体表面塌陷更全面的变化覆盖面,以及在很多不稳定区域的表面塌陷探测。

4.3 韩国

对于强降水诱发的滑坡,仅根据天气预报结果不足以确定暴风雨是否具有危险性。在许多情况下,可以通过采用更为密集的监测点,或设备更为完善的气象监测网(包括基于地面的气象雷达站)及时预测临界天气情况。

通过考虑降水和山体滑坡之间的关系,针对韩国的地形,采用实时监测降水和土壤含水量梯度,建立滑坡早期预警方法。Chae等(2012)根据某一山谷安装的实时监测系统提供的信息,观察降水期间土壤物理性质的变化。采用监测系统测得所需的参数,之后根据土壤体积含水量来识别滑坡事件。将现场收集的数据与通过实验室水槽试验获得的体积含水量进行比较,以更好地了解山体滑坡和土壤体积含水量变化之间的关系。根据初步分析结果,提出了基于土壤体积含水量梯度的阈值(取决于降水条件和土壤性质),以进行滑坡早期预警。

5 小结

本文选取针对美国、意大利、韩国等一些研究区的滑坡研究进展,概述了国外学者对研究区降水型滑坡事件的研究结果,探讨了降水型滑坡的规律特点,得出以下结论:

(1)降水与滑坡的发生在时间上具有很好的一致性,大部分滑坡发生在雨季,从短时间的降水过程来看,由降水诱发的滑坡等地质灾害大多发生于降水的中后期或略滞后于降水期。

(2)滑坡的发生与降水的频次也具有较好的一致性。降水相对密集期是滑坡发生频次最多的时期,对于蠕动型滑坡和慢速滑坡来说,降水密集期也是滑坡发生的加速期,它们具有很好的对应关系。

(3)滑坡的发生与降水强度及不同的降水形式有关系。当一定时间内降水量超过临界降水阈值时,会引发滑坡事件,多数滑坡均发生在降水强度最大的时候或者略滞后。

(4)边坡失稳与总降水量的大小有直接关系。滑坡发育程度有随降水量的增大而增多的趋势,雨量越大的地区滑坡越发育。

此外,本文对所选部分研究区在应对降水型滑坡时采取的相应措施也进行了介绍,这些应对或预警方法具有一定的借鉴作用。

本文所选研究区均为具有一定代表性的区域,但并不全面,未能包含所有类型的降水型滑坡,各研究区降水型滑坡事件的调查研究资料有限,未能包含降水滑坡研究的所有方面。因此,在降水与滑坡关系的讨论上和降水滑坡应对措施的总结上也并不全面,还有待进一步补充和完善。

深入阅读

- Baum R L, Coe J A, Godt J W, et al. 2005. Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. *Landslides*, 2: 266-279.
- Chae B G, Kim M I. 2012. Suggestion of a method for landslide early warning using the change in the volumetric water content gradient due to rainfall infiltration. *Environmental Earth Sciences*, 66: 1973-1986.
- Chleborad A F. 2003. Preliminary evaluation of a precipitation threshold for anticipating the occurrence of landslides in the Seattle, Washington, Area. US Geological Survey Open-File Report 03-463.
- Crosta G B, Agliardi F. 2002. How to obtain alert velocity threshold for large rockslides. *Phys Chem Earth A/B/C*, 36: 1557-1565.
- Del Ventisette C, Casagli N, Fortuny-Guasch J, et al. 2012. Ruinon landslide (Valfurva, Italy) activity in relation to rainfall by means of GBInSAR monitoring. *Landslides*, 9: 497-509.
- Jibson R W. 2006. The 2005 La Conchita, California, landslide. *Landslides*, 3: 73-78.
- Laprade W T, Kirkland T E, Nashem W D, et al. 2000. Seattle landslide study. Shannon & Wilson, Inc Internal Report W-7992-01.
- Ray R L, Jacobs J M. 2007. Relationships among remotely sensed soil moisture, precipitation and landslide events. *Nat Hazards*, 43: 211-222.