doi:10.3799/dqkx.2011.119

汶川地震大型滑坡成因模式

许 强,董秀军

成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川成都 610059

摘要:"5•12"汶川地震诱发了数以万计的滑坡灾害,其中仅大型滑坡就上百处.通过对汶川地震诱发的 20 余处大型滑坡的 变形破坏特征进行深入调研,结合振动台试验和数值模拟等手段,发现汶川地震诱发大型滑坡的变形破坏模式和内在力学机 制与常规重力作用下滑坡机制具有显著的不同.在强震条件下,斜坡中上部地震水平加速度可超过 1g,其地震水平惯性力远 远超过岩体的抗拉强度,地震作用首先在坡体后缘形成与坡面平行且陡倾坡外的深大拉裂缝,随后拉裂岩体的底部产生剪切 滑移,最终形成滑坡.在强震条件下,斜坡岩体最基本的变形破坏单元就是拉裂和剪切滑移,且以拉裂占主导.不同的斜坡结构,其底部剪切滑移会沿不同的结构面发生.根据滑源区所处的地质环境条件、坡体结构以及岩性组合特征,将汶川地震诱发 的大型滑坡划分为五类成因模式:拉裂一顺走向滑移型、拉裂一顺层(倾向)滑移型、拉裂一水平滑移型、拉裂一散体滑移型、 拉裂一剪断滑移型.

关键词:汶川地震;大型滑坡;成因模式;剪切滑移;工程地质.

中图分类号: P642. 2; TU43 **文章编号:** 1000-2383(2011)06-1134-09 **收稿日期:** 2011-01-25

Genetic Types of Large-Scale Landslides Induced by Wenchuan Earthquake

XU Qiang, DONG Xiu-jun

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The "5 · 12" Wenchuan earthquake induced thousands of landslides, including hundreds of large-scale ones. The deformation and destroy characteristics of 20 large-scale landslides induced by Wenchuan earthquake found in our in-depth investigation and extensive survey, combined with the tools of shaking table test and numerical simulation, we find that their deformation and destroy model and intrinsic mechanical mechanism Wenchuan earthquake are significantly different from those of landsides induced by routine gravity. On the condition of strong shock, the earthquake-horizontal acceleration on the middle-top of the declivity can exceed 1 g, and its earthquake horizontal inertia enormously exceeds the tension strength of the rock mass. Seismic action firstly shaped a deep large fissure which was parallel to the clinohedron on the back of the slope, and then the bottom of the pull-apart rock mass engendered shearing glide, finally, there induced landslide. On the condition of strong shock, the most essential deformation and destroy element of the slope rock mass are tension-cracks and shearing glide, and mainly dominated by tension-cracks. With different slope structures, the bottom shearing glide occurs with different discontinuities. According to the geological environment of the landsliding source region as well as the characteristics of the slope form and lithological association, this paper divides the large-scale landslides induced by Wenchuan earthquake into five genetic types, namely, tension-cracking and consequent sliding, tension-cracking and bedding sliding, tension-cracking and horizontal sliding, tension-cracking and scattering sliding and tension-cracking and shearing sliding.

Key words: Wenchuan earthquake; large-scale landslide; genetic types; shearing sliding; engineering geology.

对于地震诱发地质灾害类型和成因模式,国内 外多位学者做过相关方面的研究工作.其中最具代 表性为 Keeper(1984)建立了地震滑坡分类体系.该 分类系统以滑坡物质组成和运动特征为主要依据,

E-mail: xuqiang_68@126.com

基金项目:国家重点基础研究发展计划课题"强震作用下斜坡失稳破坏机理与分布规律"(No. 2008CB425801);教育部创新团队发展计划 (No. IRT0812);地质灾害防治与地质环境保护自主研究课题"汶川地震大型滑坡研究"(No. SKLGP2009Z003).

作者简介:许强(1968-),男,教授,博士生导师,主要从事地质灾害预测评价及防治处理方面的教学与研究工作.

同时考虑了滑体内部破坏程度和地下水含量等因 素,将地震诱发的岩质滑坡分为岩崩(rock falls)、岩 滑(rock slides)、岩质滑坡一碎屑流(rock avalanches)、岩质坍塌(rock slumps)和岩块滑动(rock block slides)等5类;将地震诱发的土质滑坡分为土 崩(soil falls)、散体滑动(disrupted soil slides)、土 质滑坡-碎屑流(soil avalanches)、土体坍塌(soil slumps)、土块滑动(soil block slides)、土溜(slow earth flows)、土质侧向扩离(soil lateral spreads)、 快速土体流动(rapid soil flows)复合型土质滑坡和 (subaqueous landslides)等9类. 黄润秋(2009)根据 对汶川地震诱发地质灾害变形模式和失稳机制的研 究,提出了强震诱发地质灾害的5大类14个小类的 划分方案.大类主要根据斜坡失稳的动力过程来划 分,小类主要根据坡体的地质结构划分,5大类分别 为溃滑型、溃崩型、抛射型、剥皮型和震裂型.

"5・12"汶川地震发生后,许强等(2009b)通过 对汶川地震诱发的 20 余处大型滑坡(基本为岩质滑 坡)进行深入地调查研究发现,汶川地震诱发大型滑 坡的变形破坏模式和内在力学机制与常规重力作用 下滑坡机制具有显著的不同,强震诱发滑坡体其后 缘破裂面(滑坡后壁)主要表现出断壁深大陡直、裂 面粗糙、力学上显张性的特征(图 1).为了查明强震 条件下斜坡变形失稳机制,在汶川地震后我们利用 振动台模拟试验装置,进行了各种工况及数十个模 型的斜坡振动台试验(许强等,2009a),揭示了强震 条件下斜坡岩体以水平拉裂破坏为主的动力失稳机 制.以此为基础,通过对汶川地震区 20 余处大型滑 坡变形破坏特点和模式的调查研究,建立了汶川地



图 1 青川县东河口滑坡后缘陡直粗糙的拉裂壁 Fig. 1 Steep scarp with coarse cracks from Donghekou landslide, Qingchuan

震诱发大型滑坡的5类成因模式.

1 强震作用下斜坡动力失稳机制

郑颖人等(2009)采用数值模拟手段对地震边坡 破坏机制和破裂面的力学性质进行了探讨,结果表 明,边坡在地震动力作用下的破坏是由滑体上部拉 破坏,下部剪切破坏共同组成.破裂面由拉破坏形成 的裂缝和剪切破坏形成的剪切滑移带共同组成.

在常规的重力条件下,斜坡浅表部的应力状态为:最大主应力基本与坡面倾向平行;最小主应力基本与坡面垂直;中间主应力方向基本与坡面走向平行.在此应力状态下,将在斜坡岩土体内的某些软弱面内和坡脚部位产生剪应力集中现象,由此沿坡体内倾向坡外的中缓倾角弱面(软弱结构面、古滑坡滑动面等)发生剪切滑移变形和破坏,此行为主要遵循Mohr-Coulomb准则.当剪切滑移到一定程度时,将在斜坡后缘形成明显的拉应力集中,并由此产生拉裂缝(图 2a).

系列的振动台模型试验结果表明(许强等, 2009b),在强震条件下斜坡的应力状态及变形破坏 模式与上述常规重力条件下具有显著的差别.在重 力条件下,与坡面近于垂直的最小主应力常常表现 为压应力,只是因卸荷等原因会出现局部的、小量值 的拉应力状态;但在地震条件下,斜坡体内的最小主 应力主要为受水平地震波作用而产生的循环往复的 拉一压应力状态.尤其是在汶川地震这种高强度地 震条件下,再加上高程放大效应的影响,斜坡中上部 地震水平加速度往往会超过1g,由此形成的地震水 平惯性力远远超过岩体的抗拉强度.根据 Griffith 裂隙扩展准则(σ₃>σ_r),在地震条件下斜坡岩体很



- 图 2 自重作用下(a)和强震作用下(b)斜坡岩体的典型变 形破坏模式
- Fig. 2 Typical deformation and failure mode of the slope rock under self-weight operative force (a) and strong shock (b)

表1 汶川地震诱发大型滑坡典型成因模式

Table 1 Typical genetic types of lager-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake

成因模式	形成条件	基本特征	典型滑坡实例
拉裂 - 顺走 向滑移型	斜坡岩体由缓一中缓倾坡内的层状岩体 组成,坡体内发育两组分别与岩层走向和 倾向近于平行的陡倾长大结构面,在斜坡 走向方向某一侧具有较好的临空条件.	强震作用下,斜坡岩体以山体内侧顺坡向陡倾 结构面作为内侧边界,追踪顺倾向方向的陡倾 结构面产生后缘拉裂面,基于底部层间(内)软 弱面,沿岩层走向向临空条件较好的一侧发生 滑动.	安县大光包滑坡、青 川窝前滑坡
拉裂一顺层 (倾向)滑移 型	中一陡倾角的顺层斜坡	在地震强大的惯性力作用下,坡体中、上段岩体 沿顺层软弱面(岩层层面、软硬岩接触界面、层 内弱面等)产生拉裂变形,使该面大部分内聚力 丧失,随后在地震动力的持续作用下沿该拉裂 面发生高速顺层滑动.	北川唐家山滑坡、平 武郑家山1#滑坡
拉裂 - 水平 滑移型	近水平缓倾坡外的基岩斜坡	在强大的水平地震惯性力作用下,斜坡后缘首 先产生陡倾坡外的竖向深大拉裂面,裂面外侧 的岩体在后续地震动力作用下沿顺层弱面发生 整体滑出.滑坡一般出露于斜坡中上部,滑源区 下部一般为一陡坎,滑体以一定的初速度水平 滑出后,往往会越过陡坎作一段距离的临空飞 跃,呈现出水平抛射的特点.	青川东河口滑坡、青 川大岩壳滑坡
拉裂 一 散体 滑移型	由灰岩、花岗岩等硬岩构成的斜坡,数组 结构面将斜坡岩体切割成大多相互分离 的岩块	强烈的地震动力作用,首先使斜坡浅表层的块 状岩体震裂松动,进而在持续的地震动力作用 下逐渐解体,直至最后呈散体状整体滑动失稳.	北川中学新区滑坡、 青川石板沟滑坡
拉裂 — 剪断 滑移型	反倾坡内的层状结构斜坡或块状结构斜坡	在地震强大的水平惯性力作用下,首先在坡体 后缘沿一组陡倾坡外的结构面形成深大拉裂 面,进一步持续的地震动力使深大拉裂缝底端 产生拉裂和剪切滑移变形,形成切层滑移面,并 最终沿此面滑动失稳.该类模式即可产生同震 滑坡,也可形成具有一定滞后性的震后滑坡.	北川王家岩滑坡、北 川陈家坝鼓儿山滑 坡、青川董家滑坡、平 武郑家山2#滑坡、 安县罐滩滑坡

容易产生平行于临空面的竖向拉裂面.在持续的地 震过程中,某些拉裂面会不断加宽、加深,并由此在 坡体顶部形成与坡面走向基本平行且陡倾坡外的深 大拉裂缝.随后,在地震动力的持续作用下,拉裂岩 体在底部(拉裂体的根部)产生拉裂一剪切滑移面, 并最终沿此面整体滑出(甚至抛出),形成滑坡 (图 2b).上述振动台试验结果与郑颖人等(2009)的 数值模拟结果基本一致.

通过将图 2a 和图 2b 仔细对比可以看出,在地 震条件下,不仅是如上所述的斜坡应力状态与常规 重力条件有较大的差别,在其他方面两者也具有显 著的差别.比如,在变形的顺序上,常规重力条件下, 斜坡的典型变形破坏模式是先沿弱面发生剪切滑 移,随后才在后缘出现拉裂缝;而在地震条件下,是 先产生后缘深大拉裂缝,然后才沿底部产生剪切滑 移.在斜坡变形的剖面形态方面,地震条件下,后缘 拉裂缝深大、陡直、粗糙,底部剪切滑移面相对短小, 且一般呈张剪性,表现出以后缘拉裂为主的变形破 坏特征;而在常规重力条件下,剪切滑移面长大,呈 纯剪切性质;后缘拉裂面一般较浅,规模相对较小, 表现出以底部剪切滑移为主的变形破坏特点.

2 汶川地震诱发大型滑坡成因模式

由上可知,在强震条件下,斜坡岩体最基本的变 形破坏单元为拉裂和剪切滑移,且以拉裂占主导.不 同的斜坡结构,其底部剪切滑移会沿不同的结构面 发生.为此,根据滑源区所处的地质环境条件、坡体结 构、岩性组合及滑坡发育特征,可将汶川地震诱发的 大型滑坡归纳概括为如表1所示的5类成因模式.

2.1 拉裂一顺走向滑移型

当斜坡岩体主要由缓一中缓倾坡内(倾角一般 20°~40°)的层状岩体(如灰岩)组成,坡体内发育两 组分别与岩层走向和倾向近于平行的陡倾长大结构 面,同时,除斜坡前缘坡面外,斜坡的某一侧(左侧或 右侧)还具有较好的临空条件(如大冲沟).在强烈的 地震动力作用下,斜坡岩体以山体内侧顺坡向陡倾 结构面作为内侧边界,追踪倾向方向的陡倾结构面 形成后缘拉裂面,沿底部层间软弱面基本顺岩层走 向方向向临空条件较好的一侧发生整体滑动,形成 "拉裂一顺走向滑移型"滑坡.

在汶川地震区,"拉裂一顺走向滑移型"滑坡的 典型代表为大光包滑坡.事实上,只要地形地貌和坡 体结构满足上述条件,在常规重力作用下也会发生





拉裂一顺走向滑移型滑坡.2009年6月5日的重庆 武隆鸡尾山滑坡就是其典型实例(刘传正,2010;Xu et al.,2010;殷跃平,2010).由于滑坡体的底滑面 倾向山内,而内侧边界又陡倾坡外.因此,滑动块体 往往呈楔形体状.

大光包滑坡位于安县高川乡,其估算体积约 7.5亿m³,是汶川地震诱发规模最大的滑坡(黄润 秋等,2008,2009). 滑源区主体为震日系(Zd)风化 程度较高的泥质灰岩,局部夹泥盆系沙窝子组(Ds) 磷矿及其伴生矿. 滑源区岩层总体产状 N80°~ 88°E/NW/35°~38°. 滑坡区 SE 侧受门槛石沟切 割呈一陡坡,东侧有一系列沟谷切割,该侧临空条件 最好(图 3). 滑源区斜坡岩体内发育两组分别与倾 向和走向近于平行的陡倾长大结构面,其产状分别 为 N40°W/NE 280°~85°和 N55°~60°E/SE 60° (图 3). 上述两组结构面与 E 侧和 S 侧临空面相互 组合将滑源区斜坡岩体切割成块状(黄润秋等, 2009). 在汶川地震强大的动力作用下,块状岩体首 先沿后缘 NW 向陡倾结构面拉开,以山体内侧 NE 向陡倾结构作为侧裂面,以岩层中泥质含量较重的 软弱夹层作为底滑面,发生基本沿岩层走向方向滑 移的失稳破坏(图4和图5).

由大光包滑坡在底滑面上留下的擦痕可以推 测,由于岩层倾向坡内,受重力的影响,滑体不可能 完全沿岩层走向方向滑动,在坡体滑动的起始阶段,



图 4 大光包滑坡滑源区横剖面

Fig. 4 Cross section showing source area of Daguangbao landslide



图 5 大光包滑坡乌瞰(镜头指向 NE 向即主滑方向) Fig. 5 Aerial view of Daguangbao landslide with main sliding direction of NE

其滑动方向与走向方向有一定的交角,滑动方向略向坡内倾斜(图 3).但是,沿此方向的滑移变形显然



图 6 北川县唐家山滑坡全景 Fig. 6 Overview of the Tangjiashan landslide, Beichuan

会受到内侧山体的阻挡,因此在滑动过程中不得不 逐渐向临空方向转向,使之能朝临空面方向顺畅地 滑出(图 3).这一特征在武隆鸡尾山滑坡中也非常 显著(Xu et al., 2010).

2.2 拉裂一顺层(倾向)滑移型

在中一陡倾角的顺层斜坡地区,斜坡岩体在强 大的地震动力作用下,坡体中、上段岩体首先沿顺层 弱面(岩层层面、软硬岩接触界面、层内弱面等)产生 拉裂破坏,并使其大部分内聚力丧失,随后,在地震 动力的持续作用下,沿该拉裂面顺层高速滑动,形成 拉裂一顺层滑移型滑坡.拉裂一顺层滑移型滑坡的 典型案例为北川县唐家山滑坡.

唐家山滑坡在地震诱发下高速顺层下滑,在半 分钟左右的时间内下滑距离约 900 m,堵塞前缘的 湔江,形成顺河向长 803.4 m、横河向最大宽度 611.8 m、最大厚度124 m、体积约2000万m³ 滑坡 堵江坝,同时形成总库容约3亿m³的堰塞湖(图6) (胡卸文等,2009a,2009b),致使近百人死亡.后经相 关部门集中人力物力实施应急抢险工程,在坝体上 开挖泄流槽才使堰塞湖安全隐患得以解除.

唐家山滑坡区滑前地形总体坡度约40°,坡脚高程约665m,坡顶分水岭部位高程近1500m,相对高差达835m.滑源区斜坡为寒武系清平组硅质岩夹泥岩,岩层顺倾坡外,倾角50°~85°,为典型的中陡倾顺向坡.顺向坡地层中随机夹有泥岩等软弱夹层,成为潜在滑动面.

当潜在滑动面在坡脚剪出口部位未暴露于地表 时,在强大的地震动力作用下将可能在坡脚部位产 生切层剪切面,这种现象在软岩斜坡中较容易发生, 唐家山滑坡和平武县郑家山1♯滑坡(图7)就是如 此.如果潜在滑动面前缘剪出口直接暴露于地表,一 般将直接沿该面发生直线型滑动,并留下平直的滑 面,这种现象在硬岩地区较容易发生.在汶川地震 区,斜坡岩体沿倾向坡外的层面,发生顺层滑动的现 象非常普遍.

2.3 拉裂一水平滑移型

近水平缓倾坡外的基岩斜坡,在地震的强大水 平地震惯性力作用下,在斜坡后缘首先产生陡倾坡 外的竖向拉裂面,深大拉裂面外侧的岩体在持续的 地震动力作用下,沿近水平层面(尤其是顺层软弱 面)整体滑出,形成拉裂一水平滑移型滑坡.因地震 波具有高程放大效应以及孤立突出山体具有地形放 大效应,拉裂一水平滑移型滑坡一般主要发生在条 形山脊、突出山嘴等特殊地形山体的中上段.滑源区







Fig. 8 Geological section of Donghekou landslide, Qingchuan

1. 碎块石; 2. 硅质板岩; 3. 炭质板岩; 4. 千枚岩; 5. 震后地形线; 6. 岩层产状; 7. 震旦系元吉组上段; 8. 寒武系邱家河组; 9. 震前地形线; 10. 震旦系元 吉组中段; 11. 寒武系油房组; 12. 沉凝灰质砂岩; 13. 沉凝灰岩; 14. 白云质灰岩; 15. 块碎石土; 16. 地层界线; 17. 河流; 18. 石坎断层(逆冲走滑)



图 9 东河口滑坡发生后在滑源区留下一巨大凹槽 Fig. 9 Large trough left in the source area after Donghekou landslide

下部往往存在一陡坎,滑体以一定的初速度水平滑 出后,通常会越过陡坎作一定距离的临空飞跃,随后 才撒落于地面并沿地面继续向前运动直至动能耗散 殆尽.因此,此类滑坡启动后通常会表现出水平抛射 和高速远程运动的特点.

拉裂一水平滑移型滑坡的典型代表是青川县东 河口滑坡.东河口滑坡位于青川县红光乡东河口村, 滑坡区为震旦系上统元吉组(Zy)上覆于寒武系下 统邱家河组(Eq)及油房组(Ey)之上,地层较缓,岩 层呈近水平一缓倾坡外(倾角 12°).斜坡具有上硬 中软下硬的"三明治式"结构(图 8).滑坡右侧边界 受断层切割与控制,左侧边界处存在一相对破碎岩 带.在地震过程中强大的水平惯性力作用下,处于断 层和相对破碎岩带之间的斜坡岩体,首先在后缘产 生深大拉裂面,拉裂面外侧岩体进而沿近水平软弱 面整体滑出,从而在滑源区留下一巨大的凹槽(图 9). 岩体被抛出后,经过一段陡坡加速和临空飞跃 后,散落和撞击到地面,然后沿沟谷以碎屑流的方式 继续向前运动了约2km(孙萍等,2009).

2.4 拉裂一散体滑移型

在由灰岩、白云岩、花岗岩等硬岩构成的斜坡 中,受构造挤压等作用,斜坡岩体往往发育多组结构 面.由多组结构面切割的斜坡岩体,其浅表层因风化 卸荷作用使结构面(尤其是陡倾的竖向结构面)显张 性,各岩块之间大多相互分离.强烈的地震动力,首 先使斜坡浅表层的块状岩体被震裂松动,形成众多 竖向拉裂面,进而在地震循环往复的动力作用下逐 渐分离、解体,直至最后呈散体状整体滑动失稳,形 成"拉裂一散体滑移型"滑坡.

拉裂-散体滑移型滑坡的典型代表是北川中学 新区滑坡.北川中学新区滑坡位于北川县城新区后 山,滑源区斜坡岩体由石炭系总长沟群岩关组 (C₁y)灰岩组成,岩层缓倾坡内,多组结构面将斜坡 岩体切割成块状,因此,滑源区斜坡在历史上就曾多 次发生崩滑灾害,为崩滑灾害多发区段.在汶川地震 过程中,斜坡浅表层岩体被震裂松动、解体,最后沿 倾向坡外的一组结构面发生散体状滑动破坏(图 10).此类滑坡堆积区主要由散体的大块石组成 (图 11).

2.5 拉裂一剪断滑移型

在由反倾坡内层状结构或块状结构岩体组成的



图 10 震裂松动(a)和散体滑动(b) Fig. 10 Shattering-cracking (a) and Scattering-sliding (b)



图 11 北川中学新区滑坡堆积区主要为散体的大块石

Fig. 11 Large blocks in the deposition of Beichuan new middle school landslide

斜坡中,在地震强大的水平惯性力作用下,首先在坡体后缘沿一组陡倾坡外结构面形成深大拉裂面,随后,在进一步的持续地震动力作用下,基本与母岩分离的斜坡岩体从深大拉裂缝底端开始产生拉裂和剪切滑移变形,形成切层滑移面,最终整体滑动失稳. 此类滑坡的变形破坏过程可概化为如图 12 所示的4 个阶段.

在汶川地震区,缓倾坡内或与坡面斜交的层状 结构边坡以及块状岩体边坡(映秀一北川断裂上盘 的彭灌杂岩)分布较为广泛,因此,拉裂一剪断滑移 型滑坡也较为普遍.代表性的大型滑坡有北川王家 岩滑坡、北川陈家坝鼓儿山滑坡、平武郑家山2#滑 坡、安县罐滩滑坡、青川董家滑坡等.

图 13 为平武郑家山 2 # 滑坡的典型剖面和变形 破坏模式图.从中可以看出,这些大型滑坡都具有拉 裂一剪断滑移型滑坡的形成条件和变形破坏特点.

值得指出的是,在上述几类滑坡模式中,除拉裂 一剪断滑移型滑坡外,底部滑移面基本都是追踪已 有的结构面形成,而拉裂一剪断滑移型滑坡的底部 滑移面则需通过剪断岩体新生成.因此,相对而言,





cracking and shearing





Fig. 13 Longitudinal section and deformation and failure mode of No. 2 landslide, Zhengjiashan

此类滑坡在底部剪切滑移面的形成相对要难一些.因此,在汶川地震区多处滞后于地震的滑坡基本都 发育于此类型中,其中最为典型的是北川县王家岩 滑坡. 现场调查访问结果表明,北川县王家岩滑坡是 在"5·12"汶川地震主震结束 10多分钟后才整体失 稳下滑的.分析认为,产生这种滞后性的原因可能 是:在地震过程中,王家岩滑坡的后缘拉裂面已完全 形成,但底部滑移面可能仅具"雏型",还存在一定的 锁固段没被彻底剪断,因此,直到地震结束滑坡都还 没"来得及"发生.地震结束后,高宽比(指滑体高度 与厚度之比)较大、且基本与母岩处于分离状态的滑 体(仅在根部与母岩相连),其重力仅靠根部还未剪 断的岩体来承担,最后在自重所产生的强大压应力 作用下,"不堪重负"的根部锁固段被完全剪断,剪切 滑移面彻底贯通,从而形成滑坡.

3 结论与认识

(1) 在强震条件下斜坡的变形破坏模式与常规 重力条件具有显著的差别. 在强震条件下,斜坡中上 部地震水平加速度可超过1g,由此形成的水平惯性 力远远超过岩体的抗拉强度,很容易在岩体内形成 竖向拉裂面. 拉裂面不断扩展、延伸,就在在坡体后 缘形成与坡面平行且陡倾坡外的深大拉裂缝. 随后, 在地震持续作用下,拉裂岩体在底部产生拉裂一剪 切滑移面,并最终沿此面整体滑出(甚至抛出),形成 地震滑坡. 因此,在强震诱发滑坡中,往往存在一个 深大、陡直、粗糙的滑坡后壁.

(2)在强震条件下,斜坡岩体最基本的变形破坏 单元就是拉裂和剪切滑移,且以拉裂占主导.不同的 斜坡结构,其底部剪切滑移会沿不同的结构面发生. 根据滑源区所处的地质环境条件、坡体结构以及岩 性组合特征,可将汶川地震诱发的大型滑坡归纳概 括为五类成因模式:拉裂一顺走向滑移型、拉裂一顺 层(倾向)滑移型、拉裂一水平滑移型、拉裂一散体滑 移型、拉裂一剪断滑移型.

References

- Hu, X. W., Huang, R. Q., Shi, Y. B., et al., 2009a. Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan landslide and dam-breaking mode of its barrier dam. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(1): 181-189 (in Chinese with English abstract).
- Hu, X. W., Luo, G., Huang, R. Q., et al., 2009b. Study of stability of remnant mountain body in back scarp of Tangjiashan landslide after "5 • 12" Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engi-*

neering, 28(11): 2349-2359 (in Chinese with English abstract).

- Huang, R. Q. ,2009. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8. 0 earthquake. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering ,28(6):1239-1249 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R. Q., Pei, X. J., Li, T. B., 2008. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake. *Journal of Engineering Geology*, 16(6): 730-741 (in Chinese with English abstract).
- Huang, R. Q., Pei, X. J., Zhang, W. F., et al., 2009. Futher examination on characteristics and formation Mechanism of Daguangbao Landslide. *Journal of Engineering Geology*, 17(6):725-736 (in Chinese with English abstract).
- Keeper, D. V. , 1984. Landslides caused by earthquakes. Geological Society of America Bulletin, 95(4):406-421. doi:10,1130/0016-7606(1984)95<406:LCBE>2.0. CO;2
- Liu, C. Z. ,2010. Mechanism analysis on the Jiweishan rockfall disaster happened in Wulong, Chongqing, June 5, 2009. Journal of Engineering Geology, 18(3): 297-304 (in Chinese with English abstract).
- Sun, P., Zhang, Y. S., Yin, Y. P., et al., 2009. Discussion on long run-out sliding mechanism of Donghekou landslide debris flow. *Journal of Engineering Geology*, 17(6): 737-744 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Chen, J. J., Feng, W. K., et al., 2009a. Study of the seismic response of slopes by physical modeling. *Jour*nal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 41(3), 266-272 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Pei, X. J., Huang, R. Q., et al., 2009b. Large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, Q., Fan, X. M., Huang, R. Q., et al., 2010. A catastrophic rockslide-debris flow in Wulong, Chongqing, China in 2009: background, characterization, and causes. *Landlides*,7(1):75-87. doi:10.1007/s10346-009-0179-y
- Yin, Y. P. ,2010. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide—a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,29(2):217-226 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. R., Ye, H. L., Huang, R. Q., 2009. Analysis and

discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(8):1714-1723 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 胡卸文,黄润秋,施裕兵,等,2009a. 唐家山滑坡堵江机制及 堰塞坝溃坝模式分析. 岩石力学与工程学报,28(1): 181-189.
- 胡卸文,罗刚,黄润秋,等,2009b. 唐家山滑坡后壁残留山体 震后稳定性研究. 岩石力学与工程学报,28(11): 2349-2359.
- 黄润秋,2009. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质 力学模式. 岩石力学与工程学报,28(6): 1239-1249.
- 黄润秋,裴向军,李天斌,2008. 汶川地震触发大光包巨型滑 坡基本特征及形成机理分析. 工程地质学报,16(6): 730-741.

- 黄润秋,裴向军,张伟锋,等,2009.再论大光包滑坡特征与形成机制.工程地质学报,17(6):725-736.
- 刘传正,2010.重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析. 工程地质学报,18(3):297-304.
- 孙萍,张永双,殷跃平,等,2009.东河口滑坡一碎屑流高速远 程运移机制探讨.工程地质学报,17(6):737-744.
- 许强,陈建君,冯文凯,等,2009a. 斜坡地震响应的物理模拟 试验研究.四川大学学报(工程科学版),41(3): 266-272.
- 许强,裴向军,黄润秋,等,2009b. 汶川地震大型滑坡研究. 北京:科学出版社.
- 殷跃平,2010.斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以 重庆武隆鸡尾山滑坡为例.岩石力学与工程学报,29 (2):217-226.
- 郑颖人,叶海林,黄润秋,2009. 地震边坡破坏机制及其破裂 面的分析探讨. 岩石力学与工程学报,28(8): 1714-1723.