

文章编号: 1008 - 2786 - (2011)4 - 493 - 06

# 厚层堆积层震裂斜坡变形特征及破坏机制 ——以小金县某震裂不稳定斜坡为例

侯伟龙<sup>1,2</sup>, 巨能攀<sup>2</sup>, 屈科<sup>1</sup>, 杨红兵<sup>1</sup>, 王科<sup>1</sup>

(1. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610071;

2. 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”汶川特大地震形成了震区大量的震裂不稳定斜坡, 其中绝大部分发生在厚层堆积层斜坡中, 这类次生地质灾害有着特殊的力学破坏机制。以小金县某不稳定斜坡为例, 研究了高程、地形坡度、岩土体结构条件等对斜坡动力响应的影响, 初步分析了厚层堆积层震裂斜坡的变形特征及破坏机制。认为, 在地震动力作用下厚层堆积物斜坡往往出现潜在多级滑动面的现象, 且破裂面多沿着堆积层中某些曲面发生滑动破坏, 这与地震瞬间拉张破坏在斜坡体中产生的震裂缝深度和延伸有关。总的来说, 震裂不稳定斜坡的失稳可以认为是地震使边坡岩土体力学参数降低、震后地下水的软化共同作用下累计破坏的结果。

**关键词:** 厚层堆积层; 震裂不稳定斜坡; 动力响应; 变形破坏机制

**中图分类号:** P642. 2

**文献标识码:** A

“5. 12”汶川特大地震不但导致大量建筑物破坏, 造成众多人员伤亡和不可估量的财产损失, 还诱发了大量崩塌、滑坡等重大次生地质灾害。而在这些次生灾害中, 还有一类分布范围广、规模和潜在威胁一般较大的次生潜在灾害——震裂不稳定斜坡<sup>[1]</sup>。祁生文等人研究发现不同结构类型的岩体对地震的反应不同, 堆积层斜坡可以看成散体结构, 此类斜坡对地震的响应大, 在地震作用下会产生大量的变形、滑塌、滑坡和流滑<sup>[2]</sup>。厚层震裂不稳定斜坡的基本特征是斜坡表面发育大量震裂缝, 一般顺坡走向延伸, 延伸较长, 张开度大小不一, 在坡面陡缓转折部位、不同岩性接触部位、不同岩性内部等均有不同程度的发育<sup>[1-2]</sup>。多数裂缝发育在斜坡体中上部, 这与斜坡的动力响应效应相关, 在一定高程内, 坡体上部受地震动响应较其他部位强<sup>[3]</sup>。震裂缝的发育使斜坡岩体结构遭到了严重破坏, 且为后期雨水下渗提供了有利的通道, 斜坡的稳定性将逐渐恶化<sup>[4]</sup>。总的来说此类斜坡失稳, 是地震惯性力和累积效应共同作用的结果, 在地震瞬时惯性力

的拉剪作用下, 边坡岩体力学参数骤降, 在后来外营力(主要是降雨)作用下, 最终导致了斜坡不断变形、破坏, 最终失稳。

小金县某斜坡为典型的厚层堆积层震裂不稳定斜坡, 坡体堆积物主要为第四系粉质粘土、碎块石土, “5. 12”汶川强烈地震使该斜坡体形成了多条拉裂缝, 主要分布在不稳定斜坡的后缘以及中上部位置, 拉裂缝的形成成为降雨下渗提供了有利的通道, 在后期降雨影响下裂缝不断的拉张、贯通, 形成“网格”状分布特征。不稳定斜坡在不断的变形破坏, 对坡体上住户的生命和财产形成潜在的威胁。笔者经过多次现场调查, 结合钻探资料, 在对该斜坡详细研究的基础上, 对该类震裂斜坡的变形破坏机制做初步的探讨。

## 1 工程概况

斜坡体坡度多在 30° ~ 50°, 前缘临空面近似直立, 局部地段达 70° 以上。所处地段最高高程约

收稿日期 (Received date): 2010 - 09 - 29; 改回日期 (Accepted): 2011 - 03 - 20。

作者简介 (Biography): 侯伟龙 (1984 - ), 男, 主要从事铁路工程地质的研究。[Hou Weilong (1984 - ), male, mainly engaged in railway engineering Geology.]

3 133 m,前缘小金河高程 2 200 m,相对高度达 900 m。斜坡体整体成上缓下陡的趋势,坡面多呈阶梯状(图 1)。陡峭的斜坡面使得地震动加速度、位移在坡面的放大效应突出,尤其是在斜坡后缘接近山脊分水岭地段和坡面中上部转折部位,震裂缝也多分布在这些位置,前缘临空面近似直立的坡面在地震时发生多处大规模的垮塌。这较好的反应了地形坡度对地震动力放大效应的影响。

斜坡上覆盖有大量较厚的第四系坡残积( $Q_4^{el+dl}$ )、崩坡积( $Q_4^{c+dl}$ )的碎石土、粉质粘土和粘土,结构松散,母岩成分为全-强风化的变质石英砂

岩、千枚状炭质板岩,堆积物厚约 20 ~ 50 m,属厚层堆积层斜坡<sup>[5]</sup>。下覆地层为三叠系中统杂谷脑组( $T_2z$ )地层,以灰色细粒变质石英砂岩为主,夹少量深灰色薄层千枚状炭质板岩。钻孔岩芯破碎,节理裂隙十分发育,在斜坡 NE 侧山脊两侧和前缘冲沟底部零星出露(图 2)。层面产状: $N45^\circ W/NE \angle 51^\circ$ ,主要发育两组节理: $J_1:N85^\circ E \angle SE \angle 48^\circ$ (倾坡外),延伸长度 2 ~ 4 m,贯通性好,为区内控制性节理; $J_2:N35^\circ E \angle NW \angle 56^\circ$ (倾坡内),延伸长度 1.0 ~ 2.0 m。

研究区位于小金弧形构造带,唐山山倒转向斜

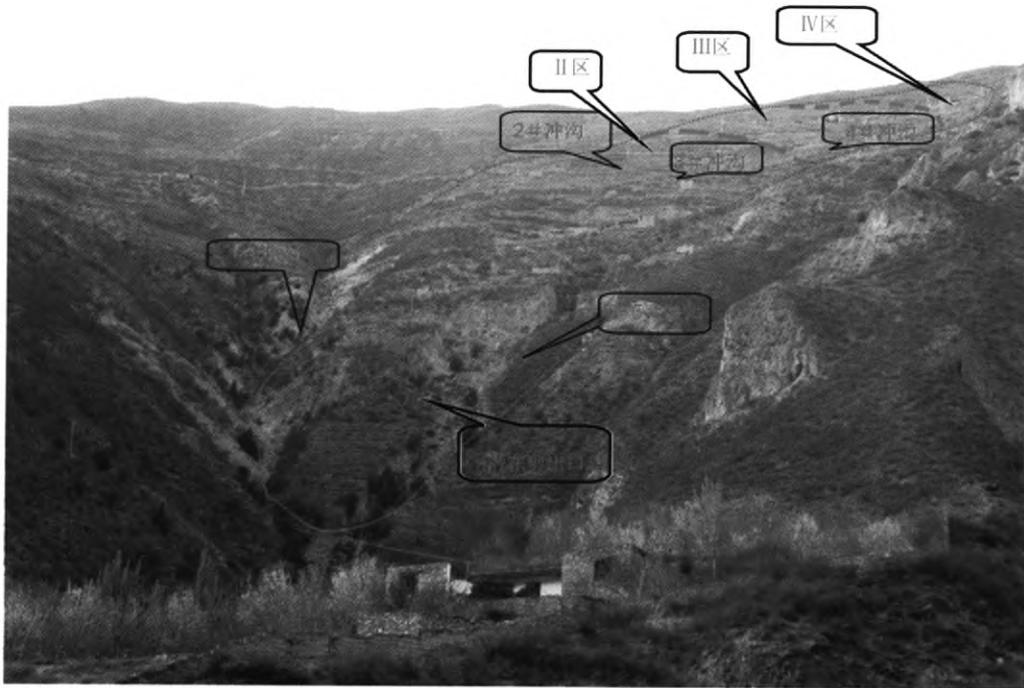


图 1 不稳定斜坡全貌

Fig. 1 Picture of unstable slope



a 变质石英砂岩与千枚状炭质板岩互层



b 差异风化形成的“锯齿”状岩体

图 2 出露基岩( $T_2z$ )

Fig. 2 Exposed bedrock( $T_2z$ )

中段 SW 翼和美兴镇倒转背斜中段的 NE 翼。受地质构造影响,区内岩体破碎、节理裂隙十分发育,降低了岩体抗风化能力,也为坡体上厚层堆积层形成的提供了有利条件。区内地下水类型主要有第四系松散层孔隙潜水和基岩裂隙水,地下水的软化是斜坡震后变形的主要因素。

变形体目前仍处于蠕变阶段,坡体上部分裂缝在不断拉张、拉深,在降雨或地震的诱发下极可能产生严重灾害。另外,斜坡地势较陡,堆积物很厚,一旦失稳将造成大量堆积物沿冲沟滑下涌入小金河,形成堵江汇水、甚至堰塞湖,将威胁到下游人员的生命和财产安全。

## 2 不稳定斜坡变形破坏特征

### 2.1 斜坡形态特征

不稳定斜坡呈“椭圆”状,中下部宽,两头相对较小。后缘以小路下部的震裂拉裂缝为界,高程约 2 860 m,斜坡前缘呈“舌状”,潜在剪出口位于坡体临空面处,高程约 2 560 m,相对高度约 300 m,主滑

方向 202°左右,两侧边界分别以坡体上的冲沟为界。坡面发育有多条冲沟,植被稀少,因人工开荒种植,坡面多成阶梯状耕地,堆积体整体坡度在 31°~35°之间,地势较陡,前缘潜在剪出口临空面近似直立,有利的地形特征为变形体的变形、破坏提供天然的地形条件。斜坡体纵向长约 505 m,后缘宽处约 159 m,中部下最宽处约 237 m,前缘呈舌状宽约 170 m,均宽 185 m,总面积为 0.10 km<sup>2</sup>,堆积层厚约 20~50 m,平均厚约 35 m,总体积约 250 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。斜坡体上发育多级陡坎,陡坎部位一般都伴随有数条方向大致与坡向平行的拉裂缝。据当地居民观测,这些拉裂缝在不断地拉张、拉宽,局部已出现垮塌现象。根据其变形特征可分为四个变形区,Ⅰ区为强烈变形区,Ⅱ、Ⅲ为中等变形区,Ⅳ为相对稳定区(见图 1)。

### 2.2 变形破坏特征

研究区所处的小金县是“5.12”汶川特大地震的重灾区之一,受特大地震影响,斜坡体上开始出现小规模的震裂缝,但是并不明显,不稳定斜坡地质剖面图如图 3。当地村民观测,大地震后该斜坡体前缘

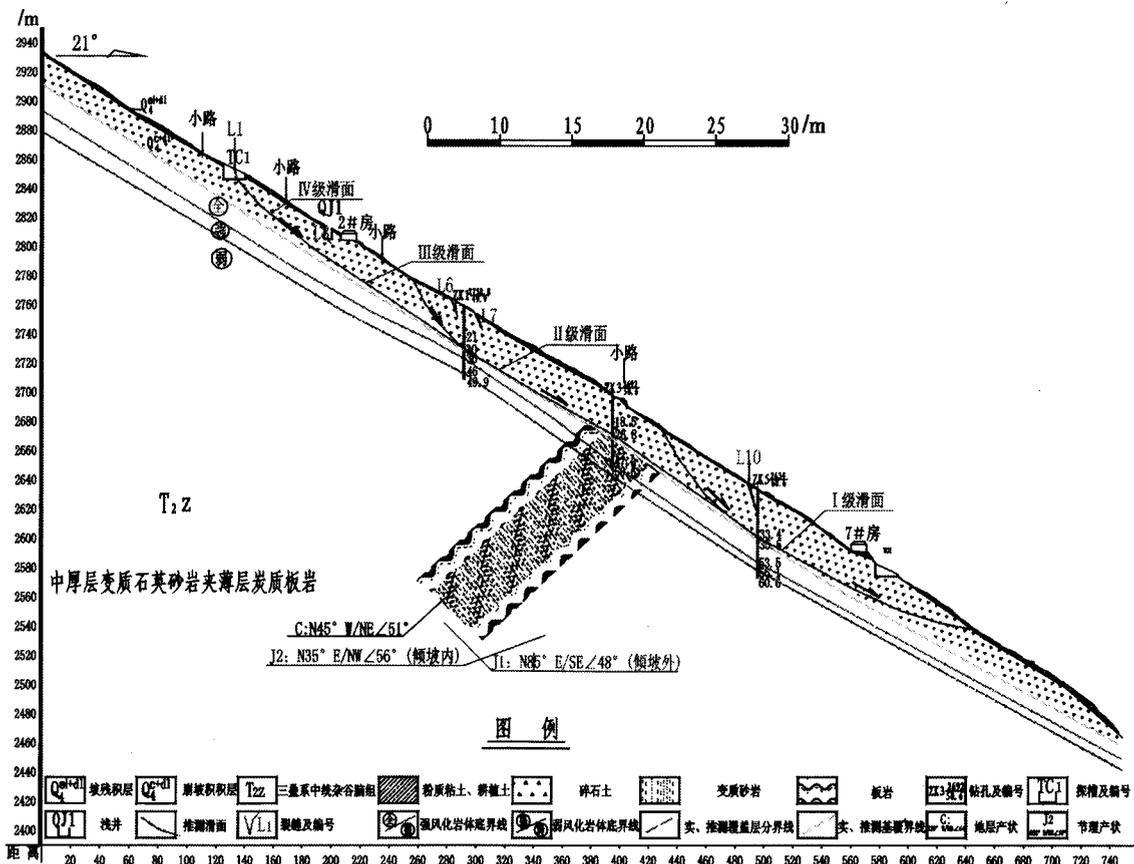


图3 震裂不稳定斜坡工程地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of Shattered unstable slope

和两侧冲沟边出现局部小范围的垮塌,斜坡体上出现了多条震裂缝,裂缝宽约 0.1~0.2 m,可见深度 <0.5 m,延伸长度较小,斜坡体上仅有少数几间房屋出现了裂缝,规模较小,未见明显的变形迹象。预测斜坡开始进入初步蠕滑变形阶段。

2009-02 斜坡体上开始出现大量的裂缝,主要分布在斜坡的前缘和两侧冲沟边以及后缘。坡体上变形最大的 L1 拉裂缝就是在这时间出现的,该裂缝的变形发展特征对研究这个变形体的变形破坏极具代表性,坡体上其他的拉裂缝的变形发展于该裂缝比较相似。L1 裂缝刚开始出现于 5#冲沟靠近斜坡体前缘附近,随后该裂缝沿着冲沟边,向坡体的上部、后缘发展,同时出现多级次级拉裂缝,造成了坡体上多间房屋的开裂变形。这主要是受 2008-06—09 雨季降水的影响,加速了变形体的变形破坏。推测该阶段变形体由开始变形进入初步匀速蠕滑变形阶段。

2009-11—12,整个斜坡体上已有裂缝开始拉宽、拉深贯通,同时还出现了大量的新的次级裂缝,部分裂缝深度能达 8 m 以上,而且变形速度加快。据村民观测,耕田里的拉裂缝填平后再过 1~2 月就

会重新拉开。该阶段斜坡上的裂缝初显“网格状”分布状态,斜坡开始由匀速变形向加速变形转变(图 4)。

### 3 变形体形成机制

1. 厚层堆积层地质历史演化:斜坡下覆基岩为变质石英砂岩夹薄层千枚状炭质板岩。这种软硬岩层组合的特征是,随着时间的延续,下部板岩经风化、冲刷、剥蚀,形成“岩腔”,上部砂岩在重力的长期作用下,向下部发生倾倒变形。当应变能和变形积累到一定程度后,将产生崩塌、垮塌、滑坡等破坏,并堆积到坡体中下部地形平缓段,在后期流水的搬用下,堆积形成厚层堆积物(图 5(a))。

2. 地下水影响因素:地震瞬时惯性力使斜坡体产生大量的震裂缝,为后期雨水的下渗提供有利的通道。一方面后期余震将在这些地下水赋存带又会引起孔隙水压力而出现液化流滑,产生很大的永久位移,另一方面地下水软化了岩土体,降低了其力学参数,这就是斜坡体上大量震裂拉裂缝形成和变形的主要原因之一。震裂不稳定斜坡的变形破坏可



a: L1 拉裂缝; b: L2 拉裂缝; c: 耕地里填平的裂缝被重新拉开

图 4 斜坡体上典型拉裂缝

Fig. 4 Typical tensile cracks on the slope

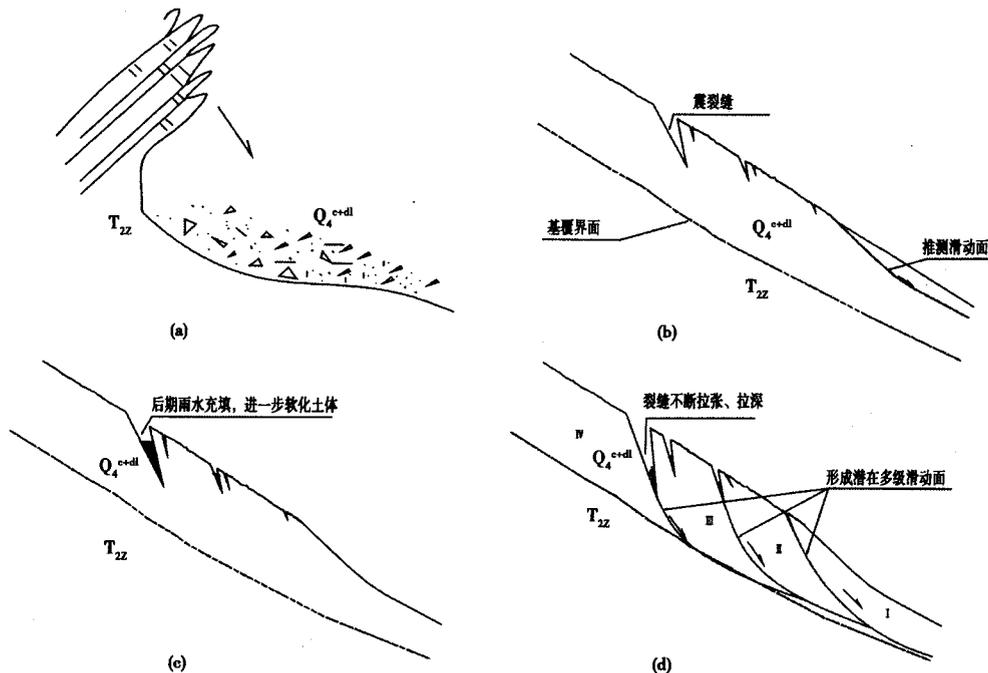


图5 斜坡变形破坏过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the deformation and failure process of the slope

以认为是地震使斜坡岩土体力学参数的降低、孔隙水压力、震后水的软化共同作用的结果(图5(b)和(c))。

3. 斜坡地震动力响应:从坡体上的震裂缝分布来看,厚层的松散堆积层斜坡动响应最突出的部位为斜坡中上部、坡面陡缓过度带和山脊冲沟转折处,这与斜坡的高度、坡度和坡面形态密切相关。据钻孔资料推测,潜在滑动面为多级,且均出现在堆积层一定范围之内,局部段在基覆界面附近,而没有深入到下覆基岩里,这与厚层松散堆积层对动力响应的消减作用有关。总的来说斜坡对地震的动力响应与斜坡体的地形地貌、地质构造、地层岩性、岩土体结构、坡体结构、水文地质6个因素有密切的关系,其中地形地貌和岩土体结构特征是该震裂斜坡形成的主要条件。

4. 后期累积效应:坡体前缘坡面较陡,局部近似直立,为变形体向该部位蠕滑变形提供了较好的临空条件,斜坡首先向临空面方向滑移形成了蠕滑变形区(I区),并且不断的自坡脚向坡顶坡内发展使得坡体后缘被拉裂,并在降雨、融雪、风化营力等的作用下向深部逐渐发展,最终在斜坡后缘形成拉裂扩展区(IV区)。同时坡内应力不断重分布,剪应力不断集中于坡体中部逐渐缩短的锁骨段部位,在该部位形成应力集中带(II、III区)(图5(d))。冯

文凯等人研究发现地震力的作用将直接导致斜坡应力场的瞬时改变,使斜坡处于一个不断变化的应力场当中,拉动和剪动应力的正负交替反复作用,是导致斜坡震裂变形破坏的重要控制因素<sup>[1]</sup>。某震裂斜坡的变形破坏特征也较好的反应了这一应力场的变化特征。

## 4 结论

1. 震裂不稳定斜坡都有滞后效应,即在地震作用下,斜坡并不会马上发生失稳,而是在反复拉张、剪切应力作用下在斜坡高位形成大量裂缝,这些裂缝在自重、地下水等影响下,不断拉张延伸、贯通,形成“网格”,将斜坡体划分成不同规模的变形区,逐个或整体。

2. 厚层堆积层震裂的破坏受地震动力形成的震裂缝控制,潜在滑动面不一定会延伸至基覆界面处。这主要是松散的堆积层对地震动力响应的坡面放大作用和坡内消减作用,使得动力响应最为突出的部位往往出现在堆积层内一定范围内,这与坡体的岩土体结构和地下水条件有关。

3. 受地形地貌、坡体结构特征影响,厚层震裂不稳定斜坡的潜在滑动面往往不是单一的,多呈多级潜在滑面破坏的形式。这些潜在的滑动面的位

置、埋深受震裂拉裂缝延伸方向、长度和规模形态的控制。

4. 高程、地形坡度、岩土体结构条件决定着斜坡的动力响应特征,其主要表现为坡体上不同位置发育的拉剪震裂缝,一般而言在一定高程范围内,斜坡中上部位置对地震加速度、速度的放大响应较下部大,该部位的震裂缝也较其他部位多而密。

5. 震裂不稳定斜坡的失稳的机制可以认为是地震使边坡岩体力学参数降低、震后地下水的软化共同作用的结果。

### 参考文献 (References)

- [1] Feng Wenkai, Xu Qiang, Huang Runqiu. Preliminary study on mechanical mechanism of slope earthquake induced deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 28(Suppl. 1): 3125 - 3129 [冯文凯, 许强, 黄润秋. 斜坡震裂变形力学机制初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 28(增)1: 3125 - 3129]
- [2] 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, 2010, 23(16): 2793 - 2796 [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, 2010, 23(16): 2793 - 2796]
- [3] Ju Nengpan, Hou Weilong, Zhao Jianjun, et al. Geohazards of Jushui river in the Wenchuan Earthquake area [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 28(6): 732 - 740 [巨能攀, 侯伟龙, 赵建军, 等. 安县岷水河流域地质灾害发育、分布及影响因素[J]. 山地学报, 2010, 28(6): 732 - 740]
- [4] Ding Xiumei. A study on the deformation and stability of typical debris & embankment Slope with complicated environment in Southwestern China [D]. PhD thesis, Chengdu University of Technology, 2005: 10 - 80 [丁秀美. 西南地区复杂环境下典型堆积(填)体斜坡变形及稳定性研究[D]. 成都理工大学博士学位论文, 2005: 10 - 80]
- [5] Specification of geological investigation for landslide stabilization (DZ/T0218 - 2006) [S]. [滑坡防治工程勘查规范(DZ/T0218 - 2006)] [S]. ]

## Deformation Characteristics and Failure Mechanism of Shatter Unstable Slope of Thick Layer Accumulative Formation

——Taing one Shatter unstable Slope in Xiaojin County as an Example

HOU Weilong<sup>1,2</sup>, JU Nengpan<sup>2</sup>, QU Ke<sup>1</sup>, YANG Hongbing<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>

(1. Second Hospital of China Railway Engineering Group Co Ltd, Chengdu 610071, China;

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

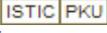
**Abstract:** "5. 12" Wenchuan earthquake in the formation of a large earthquake shattered unstable slopes, most of which occurred in the thick layer of accumulative formation, the pattern of secondary geological disasters has a special theor of physical destroy. A case study of unstable slopes in Xiaojin County, research the elevation, terrain slope, soil structure conditions on the dynamic response of slopes, preliminary analysis of the thick layer of colluvial slopes shattered deformation and failure mechanism. Deemed, under the action of the earthquake dynamics, the thick layer of seismic slope deposits are often a potential phenomenon of multi-level sliding surface, and the fracture plane more than some of the layers along the slip surface damage occurred. This is related of the depth and extension of seismic fractures on the slope, formed by the earthquake instantaneous tensile failure. Total, the shattered unstable slope instability can be considered earthquake physical parameters of soil decreased slope after the earthquake ground water under the action of softening the cumulative damage results.

**Key words:** thick layer of accumulative formation; shatter unstable slope; dynamic response; deformation and failure mechanism

## 斜坡为例

作者: [侯伟龙](#), [巨能攀](#), [屈科](#), [杨红兵](#), [王科](#), [HOU Weilong](#), [JU Nengpan](#), [QU Ke](#), [YANG Hongbing](#), [WANG Ke](#)

作者单位: [侯伟龙, HOU Weilong\(中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都610071; 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都610059\)](#), [巨能攀, JU Nengpan\(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都, 610059\)](#), [屈科, 杨红兵, 王科, QU Ke, YANG Hongbing, WANG Ke\(中国中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都, 610071\)](#)

刊名: [山地学报](#) 

英文刊名: [Journal of Mountain Science](#)

年, 卷(期): 2011, 29(4)

### 参考文献(5条)

1. [冯文凯; 许强; 黄润秋](#) 斜坡震裂变形力学机制初探[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2010((增)1)
2. [祁生文; 伍法权; 刘春玲](#) 地震边坡稳定性的工程地质分析[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2010(16)
3. [巨能攀; 侯伟龙; 赵建军](#) 安县雎水河流域地质灾害发育、分布及影响因素[期刊论文]-[山地学报](#) 2010(06)
4. [丁秀美](#) 西南地区复杂环境下典型堆积(填)体斜坡变形及稳定性研究[学位论文] 2005
5. [滑坡防治工程勘查规范\(DZ/T0218-2006\)](#)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_sdx201104014.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_sdx201104014.aspx)