

地震波效应与山体斜坡震裂机理深入分析

冯文凯, 黄润秋, 许 强

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

摘要:“5·12”汶川大地震造成了大量山体斜坡震裂变形和破坏现象,为深入研究其力学机理,通过实例详细调查及地震中体波效应和面波效应的深入分析,认为地震中地震波的作用使山体斜坡表部岩土体尤其是坡肩部位受到量值和方向不断变化的拉张应力作用,该作用在垂直平面内表现为全方位动态变化特点,导致坡肩岩土体具有旋转倾倒和正、反拉作用;与此同时在坡体内部伴随出现潜在剪动作力及岩土体的开裂和压碎现象,尤其在潜在滑动面上剪切作用力更为集中;此外坡体表面还受到鼓胀拉力和扭力的共同作用。据此可将地震波作用效应划分为4种重要表现形式,即拉—剪破裂效应、界面动应力效应、潜在的楔劈效应和超空(孔)隙水压力激发机制。分析结果与实例及振动模拟结果一致。研究成果可为灾后重建和防灾减灾提供参考。

关键词: 汶川大地震; 山体斜坡; 震裂变形; 地震波效应; 震裂机理

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)01-0020-06

In-depth Analysis of the Seismic Wave Effect and Slope Shattered Mechanism

FENG Wen-kai, HUANG Run-qi, XU Qiang

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

Abstract: On the basis of the phenomena of slope shattered deformation and failure after 5·12 Wenchuan great earthquake, the effects of body wave and surface wave in the earthquake are analyzed, and the mechanical mechanism of slope shattered deformation are studied. It is considered that the effect of seismic waves caused the alternate action of the tension stress with values and direction constantly changing acted on the rock and soil mass of slope surface layer, especially on the slope shoulder, the characteristic on perpendicular plane showed overall dynamic change and resulted in the rock and soil mass on shoulder appeared revolution-dump, positive and inverse tension action. Meanwhile, the following shear action, cracking and crushing occurred. The shear action was more concentrated on slide surface. In addition, the bulge tension and torsion forces acted together on the slope surface also. In this paper, seismic wave effect is divided into four kinds of forms: the tension-shearing rupture effect, the interface dynamic stress effect, the potential wedge splitting effect, and the super interstitial hydraulic or pore water pressure excitation mechanism. The analysis results are well in accordance with field phenomena and the result of vibration simulation model, provided an important guide for the post-disaster reconstruction and disaster prevention and mitigation.

Key words: Wenchuan great earthquake; Slope; Shattered deformation; Seismic wave effect; Shattered mechanism

收稿日期: 2009-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(青年)(40802073); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2008CB425801); “科技减灾、重建家园”专项基金(DZJK-0811)

作者简介: 冯文凯(1974—), 男(汉族), 河南原阳人, 博士, 副教授, 在站博士后, 主要从事区域稳定与岩体稳定以及地质灾害防治方面的教学与研究工作。

0 引言

2008年5月12日四川省汶川发生了世所罕见的M8.0大地震,不但造成大量建筑物破坏、人员伤亡和财产损失^[1-2],而且还诱发了众多的次生地质灾害,如崩塌、滑坡、泥石流等。还有一类分布范围广、规模和潜在威胁较大的次生潜在灾害——山体斜坡震裂变形体,是值得进一步关注和深入研究的重点。其基本特征是斜坡表面发育大量震裂裂缝,一般顺坡走向延伸且较长大,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,余震时有些裂缝还在继续扩展。震裂裂缝的发育使斜坡岩土体结构遭到了严重破坏,有利于雨水下渗,斜坡稳定性将逐渐恶化。这类普遍发育的震裂变形体,不但是抗震救灾应急排查时的重点,也是灾后重建所必须面对和解决的重点治理工程。因此切实掌握其稳定性变化发展趋势,深入分析其变形破坏机制模式及危险性是非常必要的。针对震裂变形机理的研究,众多文献资料主要反映的是震裂变形的分布规律^[1-10],斜坡坡面地震加速度的放大效应及分布^[3-10]等,真正意义上的震裂变形机理尤其是力学机理研究成果甚少。本文以“5·12”汶川大地震造成的震裂斜坡实例调查研究为基础,在结合作者前

期力学机理初步研究^[5]的基础上,通过对地震波效应的进一步分析,对山体斜坡震裂的力学机理作深入总结和系统分析。

1 地震波作用效应分析

地震造成的山体斜坡变形破裂甚至破坏是与地震波的作用密切相关的^[11]。由于地震波的类型和特点不同,其对山体斜坡震裂变形破坏所起到的作用效果各异。

1.1 地震中的体波效应

体波包括纵波(P波)和横波(S波)。根据其各自特点^[11],地震中P波和S波到达时的振动将导致斜坡岩土体出现运动方向(或惯性力方向)相反的变化趋势,二者的组合方式决定了斜坡岩土体的整体运动趋势和未来破坏方式。其组合方式比较多。考虑到随坡高增加地震加速度的放大效应^[3-14],认为上部惯性力大于下部惯性力;为了充分认识地震波的作用效应此处暂不考虑重力场叠加。以此为前提,以S波初动向右,P波初动向下和向上两种组合方式为例对其造成的影响效应进行分析,可得如图1所示的地震波效应,具体详细分析可参见作者在文献^[11]中的论述。

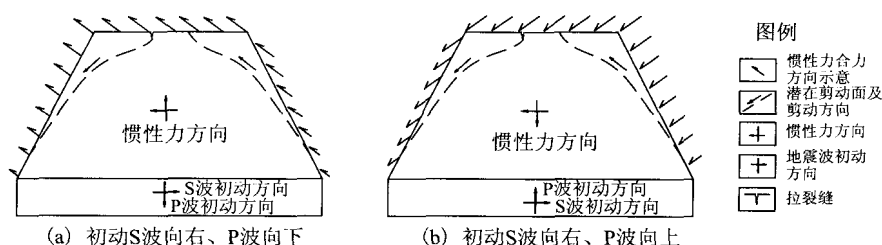


图1 地震中的体波效应示意图(暂不考虑重力场叠加)

Fig. 1 Schematic drawing of body wave effect in the process of earthquake (without regard to field of gravity).

最后需要强调的是,地震引起的水平和垂直加速度增量是一个瞬时动态过程,其量值也不同步,甚至会出现仅有水平增量或垂直增量的情况。由此可见其组合方式相当复杂。不过,总体上为上述模式应力大小和方向的瞬时动态变化,此处不再赘述。

1.2 地震中的面波效应(R波和Q波)

地震波中的面波由于其运动形式的复杂性往往不为众人所关注。但面波的传播方式及作用特点可能会为我们对山体顶部的破坏效应提供更好的解释,尤其是孤立山体、条形山脊的超强破坏,甚至可以为地震中完整岩体瞬间形成碎裂块体和破坏提供合理解释。

首先从能量汇集的角度考虑,由于面波是体波

传到地表生成的次生波,沿接触面和地表传播,也可以沿坡体表面向坡顶方向传播。而传到坡体内的体波到达坡面也生成面波并沿坡体表面向上和向下传播。这些面波在传递过程中虽然有相互干扰的情况,但由于下部坡体高程低,体波能量损耗相对较小,生成的面波能量相对较大,加之有沿地表传播而来的面波叠加,总体向坡上传播的面波强度大于向下传播的面波。能量将沿坡面向坡顶传播和逐渐积累,从而造成顶部振动强烈,地震加速度放大效应明显^[3-14],推测是造成坡顶碎裂的重要原因所在。

另外,面波的波形特点,如蛇形扭动和椭圆形滚动作用,是建筑物破坏的重要因素,其在坡面传递过程中势必也会对坡面造成较强的振动破坏效应,甚

至会造成整个坡面的变形破裂和破坏(具体见后述分析)。

最后需要强调的是,面波效应仅仅使斜坡岩土体出现更强的振动破裂效应,从而成为斜坡震裂变形、甚至震裂破碎的重要因素,而要产生滑动变形,必须有体波效应的密切结合。

2 斜坡震裂的力学机理

根据前述地震波作用特点和效应分析可知,斜坡尤其是表部风化卸荷严重的斜坡体^[15],在地震过程中受地震波的作用,将导致坡体上部岩土体尤其是坡肩部位出现动态变化的拉张应力,其大小和方向根据地震波的作用特点是在垂直平面内全方位动态变化,导致坡肩岩土体具有旋转倾倒和正、反拉作用;同时在坡体内部伴随出现潜在剪作用力及岩土体的开裂和压碎现象,尤其是潜在滑动面上剪切

作用力更为集中。由此可见,空间分布位置不同,时间上同时出现的拉张、剪切和压碎作用是导致斜坡首先产生变形破裂的主要原因。下面根据前述地震波效应,对山体震裂变形破坏的力学机理进行深入分析。

2.1 拉一剪破裂效应

此效应为地震中体波到达时产生的拉动和剪切作用,导致斜坡出现拉张开裂和剪切滑动,是造成山体斜坡破裂的重要因素之一。作者在参考文献[11]中以双面斜坡为例进行了详细分析,并根据其作用特点和实际山体斜坡条件将产生震裂的拉一剪破裂效应进一步划分三种类型,即初动拉剪加速破裂效应、重复拉剪破坏效应和双坡共剪破裂效应。此处仅给出拉一剪破裂效应的基本示意图(图2)。

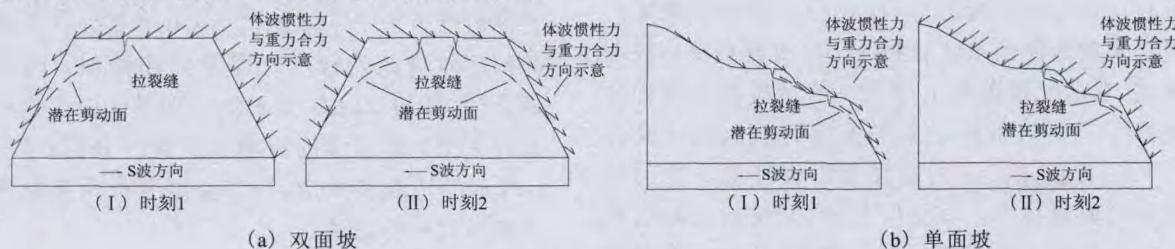


图2 拉一剪破裂效应示意图

Fig. 2 Schematic drawing of tension-shearing rupture effect.

振动台试验及“5·12”汶川地震中震裂斜坡实例均充分证明了这种类型破裂的存在(图3)。图3(a)振动台试验实例为上软下硬类型的双面坡体,模型顶宽20 cm,底宽69 cm,高40 cm,上部软层高20 cm,可近似代表地表风化卸荷强烈的均质或非均质自然斜坡体;而图3(b)则为中陡倾孤立或双面斜坡

(位于都江堰漩口镇岷江左岸),岩性为花岗岩,构造作用强烈,表部风化卸荷严重,5·12地震过程中造成左右坡面出现大规模的崩滑破坏;图3(c)为单面覆盖层斜坡振动台模拟实验成果;图3(d)为青川县骑马乡民主村董家梁单面波震裂变形体。

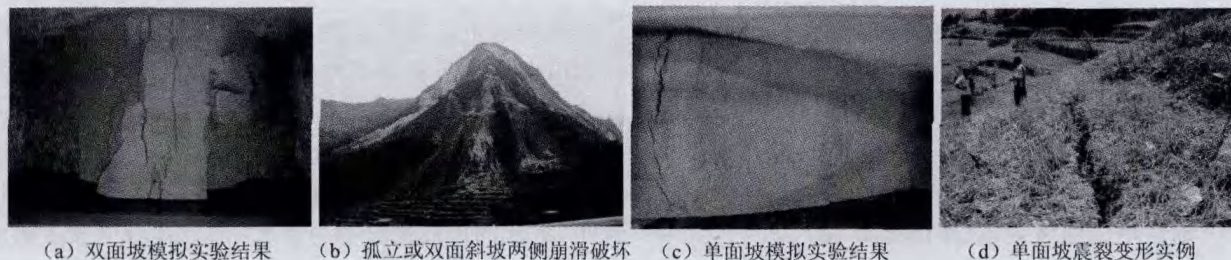


图3 拉一剪破坏振动台实验及实例

Fig. 3 The experiment results of shaking table and field examples for tension-shearing rupture effect.

2.2 界面动应力效应

当地震波在传播过程中遇到介质性质突变界面时将发生反射和绕射现象,振幅发生明显改变。这

种突变将引起斜坡应力调整,影响斜坡稳定性。地震波在界面处产生的这种效应可统称为界面动应力效应,可从应力波的反射和透射获得进一步认识。

应力波在穿过某些地质界面时,由于两侧介质特性的差异,将产生反射波,因此在界面处造成反射波应力(σ_r)和透射波应力(σ_t),它们与入射波应力(σ_i)之间存在如下关系:

$$\sigma_t = 2\sigma_i / (1 + n) \quad \sigma_r = \sigma_i (1 - n) / (1 + n)$$

式中: $n = (\rho_1 E_1 / \rho_2 E_2)^{1/2} = \rho_1 V_{P1} / \rho_2 V_{P2}$, ρ_1 、 ρ_2 、 E_1 、 E_2 、 V_{P1} 、 V_{P2} 分别为界面两侧岩体的密度、弹性模量和 P 波传播速度。

应力波的上述反射机制,使得在各类结构面附近出现了复杂的动应力分异。根据上述公式,可概

括以下两种:

(1) 当应力波从相对坚硬的岩体传入较软弱的岩层中,即 $E_1 > E_2$ 时,由于 $n > 1$,此时产生的反射波为拉伸波,将在界面处产生拉应力。并且两介质的 E 值相差愈大,拉应力值愈高。另外,S 波在反射产生拉应力的同时还产生较强的剪切作用力。很显然这些情况对岩体稳定性是很不利的。这种界面效应的反射机制根据地震波的反射和透射原理可用图 4 来简单示意表示。

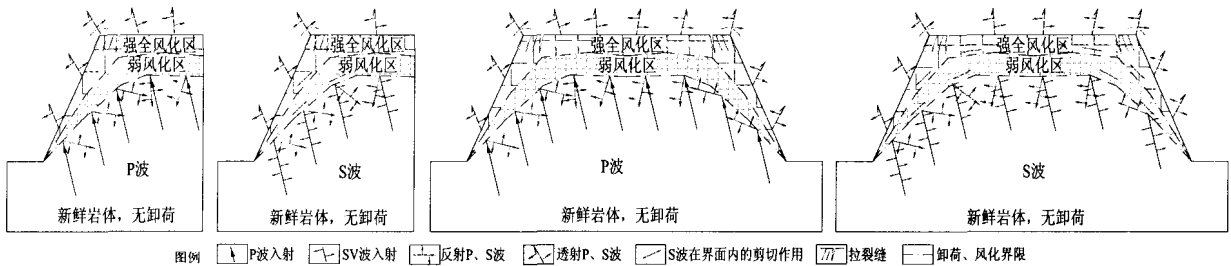


图 4 地震波入射界面时产生的反射和透射界面效应示意图

Fig. 4 Schematic drawing of interface dynamic stress effect from reflection and transmission when seismic wave arrives.

以双面斜坡为例,室内震动模拟实验上软下硬类型斜坡也是界面效应的一种体现^[16],见图 3(a)。

应该指出,裂隙面尤其是有一定张开度的或被充填的裂隙其本身就是介质特性突变部位,也将产生反射波应力,促进其被拉裂,同时剪切作用力还可促进其剪切变形。

由此可见,地震波的界面动力效应对山体斜坡震裂变形的影响实际上是很复杂的,图 4 仅能示意性表示。相比之下面波在界面处产生的界面动力效应比体波产生的界面动力效应要复杂得多,针对这方面还有待进一步深入研究。

(2) 应力波穿过软弱夹层或断层破碎带时,由于应力波的反射机制和低强度岩石吸收了大量的能量,这些软弱带成为一个阻挡动应力的屏障,使传入的动应力显著削弱(图 5)。这也可能是地震中为什么在土质斜坡体中很少发生大规模破坏的原因。

2.3 潜在的楔劈效应

地震作用下山体斜坡在地震波的拉-剪重复作用过程中形成变形破裂现象,破裂一旦产生可能会有岩块的掉入。掉入的岩块在斜坡被反压时一方面提供楔劈效应,使裂缝进一步向下扩展;另一方面由于坡顶加速度一般大于坡体下部,一定程度上也将起到杠杆作用,使裂缝端部向下扩展的同时产生向坡向方向的一个剪切作用,从而使裂缝向坡下弯转,形成潜在的滑移-剪裂面。其变形破裂示意图图

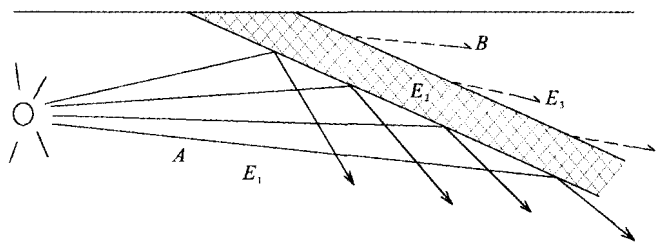


图 5 软弱夹层对应力波传播的影响示意图

Fig. 5 Schematic drawing of soft interlayer influenced on stress wave propagation.

6. 该效应与拉-剪作用相互配合,将使斜坡稳定性不断恶化。“5·12”汶川地震中也不乏实例。

2.4 超空(孔)隙水压力激发机制

岩质边坡在地震当中形成的拉剪裂缝如果延伸到地下水位之下,斜坡在重复拉-剪过程中拉剪裂缝瞬时的闭合趋势将激发很高的空隙水压力^[17],其作用类似于楔劈效应,这种作用将会成为斜坡失稳和高速滑动破坏的重要机制。某些季节性冲沟在 5·12 地震后由季节性流水变为长流水即是例证。

土质边坡或碎裂结构岩体在地震力的瞬时或反复作用下坡体有压密固结趋势,孔隙体积变小、孔隙水原有通道被堵塞,孔隙水压力出现瞬时或迅速激增,有效应力降低,坡体稳定性大大恶化,出现拉裂和滑动变形,甚至出现塑性流动。地震后较高的孔隙水压力随着变形的继续扩展和新的孔隙通道的逐

渐形成,逐渐消散,下滑力减弱,稳定性增强。由于该过程一般比较缓慢,加之伴随土体的软化甚至流体化,因此,这种变化发展过程一般是渐进性的,形成的土质滑坡也以塑流、蠕滑变形为主要特点。如青川县桥楼乡八角村石拱坪滑坡,滑坡宽约 100 m,

长约 500 m,厚约 10 m,体积约 50 万 m^3 ,见图 7(a)。也有孔隙水压力激增导致液化而出现迅速流动破坏实例,如青川县庙底下地震导致坡体迅速转化为泥流破坏,见图 7(b)。

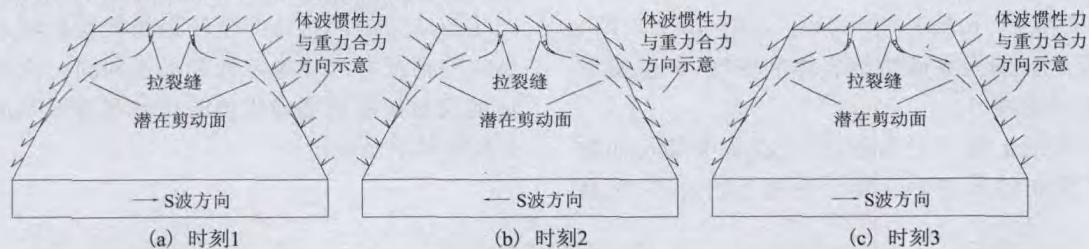


图 6 潜在的楔劈效应示意图

Fig. 6 Schematic drawing of potential wedge splitting effect.



(a) 青川县石拱坪滑坡(后缘全貌(房屋随坡滑动百余米)、中前部地下水冒出及强烈鼓胀变形) (b) 青川县庙底下滑坡塑流破坏

图 7 超空(孔)隙水压力激发机制实例

Fig. 7 The examples of super interstitial hydraulic or pore water pressure excitation mechanism.

2.5 其它破坏效应

面波传到地表时还会使坡面出现蛇形扭力和椭圆形顶托力,从而使坡面岩土体发生扭动和鼓胀开裂,推测也是导致坡体破碎和破坏的重要原因。汶川地震中这类现象在震中区及外围的强震区均有不

同程度的发育。例如面波中勒夫波的蛇形扭力和瑞利波的椭圆形顶托力所造成的破坏分别见图 8(a)和(b)。相对而言瑞利波的破坏现象最为常见,说明其破坏力比勒夫波强。



(a) 勒夫波的蛇形扭力造成的破坏现象 (b) 瑞利波的椭圆形顶托力造成的破坏现象

图 8 面波导致的破裂效应实例

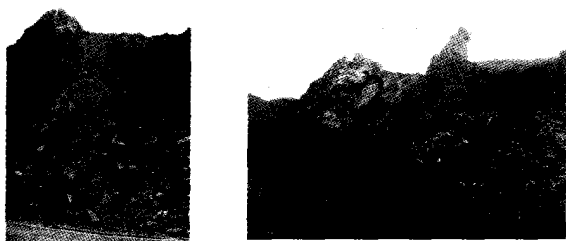
Fig. 8 The examples of rupture effect under the action of surface wave.

3 值得进一步思考的现象

根据上述对地震波效应的深入分析以及山体斜坡震裂机理较系统的研究,结合常识,基本上可对地震中山体震裂变形甚至破坏的现象、过程、发展趋势等多方面有一个基本认识。比如高陡斜坡、孤立边

坡地震时很容易发生破坏,尤其是距震中较近时。但现场调查发现也有一些令人按常规无法理解的情况,比如在距震中较近的理县蒲溪乡蒲溪沟沟口陡立斜坡体上矗立的危岩孤立柱状块体(靠近 317 国道),高>5 m,结构面发育,风化较强,为危险性较

高的危岩,然而5·12地震中并未如常规想象的那样失稳破坏(图9(b));但其旁侧的坡面却发生了滑塌破坏,造成8人伤亡(图9(a))。与之类似,震前高陡的高危险滑坡,变形强烈,距震中也比较近,但地震中变形破坏并未明显加大(如理县望月寨滑坡,欢喜坡一将军碑滑坡等)。诸如此类现象运用上述机理一时也很难解释,也是值得进一步深思的问题,比如其影响程度与地震波传播方向、传播途径接触面大小等是否有关。



(a) 崩塌体 (b) 孤立的危岩(圆圈内为崩塌破坏部位)

图9 理县蒲溪沟口的崩塌与矗立的孤岩柱

Fig. 9 The collapse hazard and still standing rock mass after 5·12 earthquake at Puxi valley, Lixian county.

4 结论

针对地震中的山体斜坡破裂现象,结合实例调查并通过地震波效应分析,对其形成机理有了较系统的认识,具体如下:

(1) 地震中的地震波作用根据其特点总体可分为体波效应和面波效应两种类型。其中体波效应尤其是S波效应,与重力场的组合将使坡体处于拉一剪应力和反压应力交替重复作用的动态过程当中,从而引起斜坡应力场的随时调整,不但是量值上而且方向上也在随时变化。而面波效应则主要是其蛇形扭动和椭圆形滚动作用导致坡体出现扭裂和鼓裂现象,进而使坡体破裂、破碎甚至崩滑破坏。其中体波的重复拉一剪应力作用和面波的椭圆形顶托鼓胀作用对斜坡稳定性恶化作用较强,是导致斜坡震裂变形破坏的重要控制因素。

(2) 斜坡震裂变形与地震波的作用效应是密切相关的,主要包括拉一剪破裂效应、界面动力效应、潜在的楔劈效应以及超空(孔)隙水压力激发机制。这些破裂效应是斜坡震裂变形破坏的主要力学机理。

(3) 针对面波效应来说,其作用效果是使斜坡表面出现蛇形扭裂和椭圆形鼓胀拉裂现象。但需要强调的是,面波效应一般仅使斜坡面出现网状的破

裂和破碎现象,斜坡的破坏尤其是大规模破坏更大程度上还是依赖于体波效应。

(4) 地震中斜坡体还存在一些超乎想象的现象,这些现象运用常识及上述理论还无法给予较为合理的解释,也是值得进一步深思的问题。

[参考文献]

- [1] 石玉成,卢育霞. 汶川8.0级地震甘肃灾区震害特点及恢复重建对策[J]. 西北地震学报,2009,31(1):1-7.
- [2] 王爱国,杨晓鹏,李明永,等. 汶川 M_s 8.0地震对甘肃陇东地区的破坏影响与特征分析[J]. 西北地震学报,2009,31(1):80-85.
- [3] Sujoy Ghose, Robert J Mellors, Andrei M Korjenkov, etc. The $M_s=7.3$ 1992 Suusamy, Kyrgyzstan, Earthquake in the Tien Shan: Aftershock Focal Mechanisms and Surface Deformation[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997,87(1):23-38.
- [4] 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):279-2797.
- [5] 何丽君,石玉成,杨惠林,等. 地震动作用下黄土边坡稳定性分析[J]. 西北地震学报,2009,31(2):142-147.
- [6] 安永林,彭立敏,黄娟. 地震时隧道衬砌受力敏感性的简化理论分析[J]. 西北地震学报,2008,30(3):261-265.
- [7] Richard R, Elms D G. Seismic behavior of gravity retaining walls[J]. J. Geotech. Engng. Div., 1979,105(GT4):449-464.
- [8] Lin J S, Whitman R V. Earthquake induced displacements of sliding blocks[J]. J. Geotech. Engng. Div., 1986,112(1):44-59.
- [9] 任自铭,冯仲林,殷世林. 土质边坡剖面上动力响应异常点与潜在滑动面位置的关系研究[J]. 西北地震学报,2009,31(1):21-25.
- [10] 梁庆国,韩文峰. 强震区岩体地震动力破坏特征[J]. 西北地震学报,2009,31(1):15-20.
- [11] 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,2009,28(增1):3124-3130.
- [12] 许向宁. 高地震烈度区山体变形破裂机制地质分析与地质力学模拟研究[D]. 成都理工大学,2006.
- [13] 秋仁东,石玉成,付长华. 高边坡在水平动荷载作用下的动力响应规律研究[J]. 世界地震工程,2007,23(2):131-138.
- [14] 杨明,姚令侃,王建,等. 斜坡堆积体抗震加固措施离心模型试验[J]. 西南交通大学学报,2008,43(3):335-340.
- [15] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1525-1544.
- [16] 高广运,彭争光,张梦芳,等. 层状地基空沟被动隔振分析[J]. 西北地震学报,2009,31(2):115-120.
- [17] 张悼元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994.