地震行波作用下山脊震裂现象的物理机制探讨*

张祖武[1,2]，林余辉[2]，姚令侃[1]

（1. 西南交通大学，四川 成都 610031；2. 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司，重庆 410047）

摘　要：地震作用下的场地反应及其破坏机理一直是地震学和地震工程学的研究热点，汶川大地震发生后高海拔山区产生的独特地质灾害现象已经超出了我们传统理论范围。针对汶川地震极震区和强震区普遍发生的山体“溃崩”及上部“震裂”现象，运用波动理论进行理论推导，在线弹性假设下将行波应力方程在临空面的反射和入射波叠加，推导出总应力表达式在距坡顶 $\lambda/4$ 处会出现应力放大一倍的结论，为高烈度地震山区中出现的“溃崩”、“震裂”现象提供一种理论解释。同时结合汶川地震极震区监测台站记录和现场面波测试结果，根据本文理论对汶川地震中山体“溃崩”、“震裂”的具体范围进行预测，该理论结果可为高烈度地震山区公路、铁路的选线提供建议。

关键词：地震行波；应力叠加；溃崩；震裂；地质灾害

中图分类号：U416. 1 + 4；X43　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000 - 811X(2013)02 - 0161 - 05

2008 年的汶川大地震发生在地质条件及其复杂的龙门山断裂带，地处青藏高原边缘地带，艰险的地形产生了一系列地质灾害现象，如独特的失稳机理、超强的动力特性、大规模的高速抛射与远程运动[1-2]，这些现象和问题已超出了人们原有的认识和知识范围。

在正常重力作用情况下，山区边坡由于山沟的逐渐下切会使其重力势能增大，其后谷坡动力效应导致原有的内应力释放会使山体逐渐失稳[3]。大量的事实表明，在重力作用下，边坡的失稳都是沿着坡脚剪出[4]，然而在汶川地震中发现，在地震动作用下，有大量的崩坍滑坡发生在山脊线附近，我们称这种现象为高位剪出现象。本文主要针对这一现象进行研究，深入现场进行调查，在充分借鉴他人成果的前提下，对地震波传播到山顶部时的应力放大应用波动方程进行了理论推导，最终针对这一现象的产生机理得到了理论解析解，并结合汶川地震中极震区的 8 个台站记录和面波测试数据资料，对汶川地震高烈度地震区山体震裂和崩坍范围进行预测。

1　震害调查

黄润秋总结汶川大地震中强震条件下的斜坡失稳机制地质—力学分类[5]，将强震条件下斜坡失稳分为 5 大类：溃滑型、溃崩型、抛射型、剥皮型、震裂型。其中溃崩型，是指坡体在强震作用下松弛、破裂，并以倾倒、溃曲、溃散、溃喷等形式崩塌破坏。这种破坏形式在山区普遍出现，其主要特征是在地震的作用下山脊前缘首先产生张拉裂缝，然后由于惯性力的作用使得山体逐渐失稳，最终以溃崩甚至抛射的方式破坏。震裂型是指斜坡在强震作用下，沿山脊破裂，但没有进一步产生滑动或崩塌，斜坡因震裂稳定性降低。

在自然状态下，山体斜坡处于由自重形成的应力场中，虽然经常受到风化、卸荷等因素的影响而出现应力场的调整，但这一过程的产生是逐渐的、缓慢的。然而在地震的作用下，地震应力波场将使山体斜坡内部的应力场瞬时改变[6]，而且使斜坡处在一个不断变化的应力场中，不仅大小在改变，而且在方向上也是正负交替、不断变化。以 P 波作用为例，将引起斜坡中最大主应力分布形式、量值及方向随时发生变化，从而导致山体斜坡尤其是山脊处位于正拉和反拉交替反复作用状态，该部位有可能产生被拉断和压碎的现象。同时在 S 波的作用下，反复交替的方向相反剪应力重复作用也有可能使山体产生被剪碎的情况[7]。

图 1 所示的是汶川地震中老虎嘴山体溃崩的现象，这不过是这次地震中数以千计溃崩中的一例。老虎嘴位于国道 213 线都汶路 28 km 处，该山体在岷江右岸，山顶据底部高度 110 m，崩溃区高度为 65 m，宽 96 m，在现场可以看到溃裂区后壁陡直。通过分析，认为山体在地震波作用下山体在后援产生拉裂缝，然后在惯性力作用下裂缝不断向内部发展，最后岩体失稳破坏。图 2 所示为汶川地震

* 收稿日期：2012 - 09 - 08　　修改日期：2012 - 11 - 26
基金项目：国家重点基础研究发展计划“九七三计划”(2008CB425802)；中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU09ZT04)
作者简介：张祖武(1987 -)，男，湖北荆州人，硕士研究生，从事铁路公路工程灾害防治技术研究工作.
E-mail：zhangzuwu710@126. com

中坡体高位震裂现象，这种震害现象在强震区也是较为常见的。

图 1　汶川地震老虎嘴高位坍塌

图 2　汶地震中坡体震裂

调查中发现汶川地震中所产生的崩坍、震裂现象十分普遍，这些山体斜坡多数不是分布在地震震中的部位，而是距离地震中心一定范围以外的区域，尤其以余震较少的北部及西部分布最多[5]。距有限的资料统计发现，震裂变形主要分布在斜坡上陡缓变化的部位，尤其是坡顶靠近坡肩部位最为发育，如果该处坡顶面较宽，受地震波的影响，距陡缓变化的坡肩部位 3～5 m 范围内最易发生崩坍、震裂现象。距陡缓变化部位 5～10 m范围内发育次之；10～20 m 也有发育；20 m 外发育最少[8]。调查显示，斜坡面上的震裂裂缝主要为张拉裂缝，总体上为垂直向下延伸，呈上宽下窄的楔形，逐渐尖灭。地表裂缝可见长度一般在 30～300 m 不等；张开宽度一般至里面至几米，平均约 0.3 m 左右。

2　物理机制探讨

地震波是运动在介质中的传播、衍射、叠加，这一运动在介质中的传播过程可以用经典力学原理建立的运动微分方程来描述。介质中任何一点在任意时刻应满足动力平衡条件和应力与应变需要符合的物理关系，也就是波动方程的建立是在运动状态和受力状态之间通过本构关系来实现的。因此严格来说，任何动力过程都是波动过程，都是位移、应变、速度、加速度、应力等众多动力元素在介质结构里面的传递过程[9]。

根据波动理论，平面行波在不同介质介面附近会发生反射与透射，其位移势函数表示如下

$$\phi_P^i = A_{ip}\exp\left[i\omega\left(\frac{\sin\theta_{ip}}{c_{p1}}x - \frac{\cos\theta_{ip}}{c_{p1}}z - t\right)\right], \tag{1}$$

$$\phi_P^r = A_{rP}\exp\left[i\omega\left(\frac{\sin\theta_{rP}}{c_{P1}}x + \frac{\cos\theta_{rP}}{c\,P1}z - t\right)\right], \tag{2}$$

$$\phi_P^t = A_{tP}\exp\left[i\omega\left(\frac{\sin\theta_{tP}}{c_{P2}}x - \frac{\cos\theta_{tP}}{c_{P2}}z - t\right)\right]。 \tag{3}$$

式中：ϕ_P^i、ϕ_P^r、ϕ_P^t 分别为入射波、反射波、透射波的位移势函数；A_{iP}、A_{rP}、A_{tP} 分别为入射波、反射波、透射波的振幅。

为了研究地震行波在介质中的应力场传播、反射、叠加现象，现做如下三项假设：

（1）地震波传播是一维的；

（2）岩体介质是均匀弹性；

（3）地震波垂直入射向临空面。

地震波在地层中传播所形成的振动十分复杂，但是在理论研究中可以将其简化为稳态波考虑[10]。简化后可以将地震行波在地层中传播时的应力变化表示出来，现建立以地震震源源为原点、垂直地表方向为 X 轴一维空间坐标系，则空间坐标为 X 某的点在 t 时刻的应力表达式为：

$$\begin{cases}\sigma_I = \sigma_m \sin\left(2\pi\dfrac{C_0 t - x}{\lambda}\right), & \text{当 } C_0 t - x > 0; \\ \sigma_I = 0, & \text{当 } C_0 t - x < 0。\end{cases} \tag{4}$$

根据波的传播理论，入射波与反射波的相位差为 π，可推的正弦脉冲波在自由面反射时形成的应力方程为：

$$\sigma_r = \sigma_m \sin\left(2\pi\frac{\lambda + 2X - c_0 t - x}{\lambda}\right)。 \tag{5}$$

由于弹性波的控制方程是线性的，因而叠加原理必定成立，将入射波与反射波相叠加得到空间某点在某时刻的应力为：

$$\sigma_u = \sigma_m\left[\sin\left(2\pi\frac{c_0 t - x}{\lambda}\right) + \sin\left(2\pi\frac{\lambda + 2X - c_0 t - x}{\lambda}\right)\right]。 \tag{6}$$

在最大应力处，根据上述方程组解得 $\begin{cases} t = \dfrac{2X+\lambda}{2c_0} \\ x = X - \dfrac{\lambda}{4} \end{cases}$，此时 $\sigma_u = -2\sigma_m$ 得到最大负值。

由上诉解可得出结论：在弹性应力波在一维均匀介质中传播时，通过 $t = (2X + \lambda)/C_0$ 时间的传播，在距自由面 $\lambda/4$ 处产生最大的应力，其绝对值是入射波峰值的 2 倍。需要说明的是，应力波在传播的过程中会逐步衰减，但由于地震波的波速及波长是由岩石介质的本构性质决定的，与动力过程无关，所以最大拉应力位置不会随着波的衰减而发生变化，简谐波反射产生的最大拉应力就在距自由面 $\lambda/4$ 处，不会发生变化。另外，最

大拉应力处的应力值也是变化的，并不总是拉应力，在此也会形成最大压应力(当以拉伸波为波阵面进行计算时)，在该点只是对应力进行放大，而其幅值依然随着周期变化。

3　汶川震区坡体应力集中及震裂预测

上文对地震作用下山体在山脊线坡肩附近产生张拉裂缝的现象运用地震应力波传播特性进行解释，认为地震应力波在山体临空面附近发生发射后形成的拉应力会与入射应力波叠加，在离临空面 1/4λ 处达到最大应力。下面将结合汶川地震中高烈度地震区的台站记录，以及地震后的现场波速实验，得出汶川地震中地表波长范围，并以此估算理论上坡肩拉裂缝距离。

3.1　震区场地频率分析

根据中国地震局公布的汶川地震烈度区域分布图，结合四川省各台站经纬度查找出位于Ⅸ度及以上烈度区的台站共有 8 座，分别是 051AXT 安县塔水、051JYD 江油地震台、051JYH 江油含增、051MXN 茂县南新、051MXD 茂县地办、051MZQ 绵竹清平、051SFB 什邡八角、051WCW 汶川卧龙。

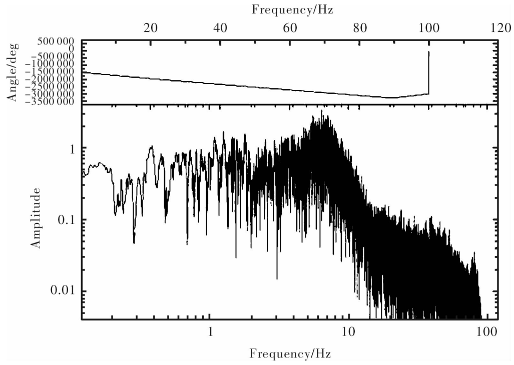

图 3　江油地震台 E-W 频谱

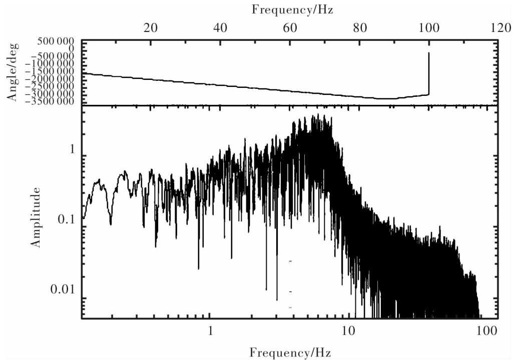

图 4　江油地震台 N-S 频谱

根据对汶川地震中Ⅸ度及以上烈度区中的台站记录进行傅里叶变换(图 3、图 4)，统计出个场地的卓越频率如表 1 所示。

根据表 1 的统计结果，将汶川地震Ⅸ度及以上烈度区台站记录的卓越频率求取平均，在东西方向的卓越频率为 4.2 Hz，在南北方向的卓越频率为 6.3 Hz。

3.2　震区山体表层波速分析

2008 年汶川大地震后，我们利用瑞利波法对处在 213 国道都汶段的地震烈度Ⅸ和Ⅹ不同强震区的两类工点进行了面波测试，通过面波方法获得面波速度反演成剪切波速度，介质剪切波速度是介质剪切模量的函数 。因此通过非扰动的面波方法获得边坡或滑坡体中的低剪切模量带(即软弱层带)和探查滑动面形态是直接有效的方法。本文主要利用面波测试的结果确定在汶川大地震的强震区山体表面和基岩的剪切波速，并以此为基础确定汶川大地震强震区岩质山体表层的纵波波速。在此选用了三个测段，均为自然边坡，其中 site 1 和 site 2 位于Ⅸ度烈度区，site 3 位于Ⅹ度烈度区。3 个测段的概况如表 2 所示。

表 1　　汶川地震极震区台站记录及场地卓越频率

台站编号	台站名称	台站经纬度		场地	观测对象	场地烈度	卓越频率/Hz		峰值频率/Hz	
		经度	纬度				E-W	N-S	E-W	N-S
51AXT	安县塔水	104.3	31.5	土层	自由地表	Ⅹ	1.2	1.4	1	1.3
51JYD	江油地震台	104.7	31.8	土层	自由地表	Ⅹ	7.5	7	8	6.7
51JYH	江油含增	104.6	31.8	土层	自由地表	Ⅺ	11	7.2	7.5	8.2
51MXN	茂县南新	103.7	32.0	土层	自由地表	Ⅸ	2	1.8	2.2	2.2
51MXT	茂县地办	103.9	31.7	基岩	自由地表	Ⅸ	3	6.5	2.3	6.5
51MZQ	绵竹清平	104.1	31.5	土层	自由地表	Ⅹ	2	12	1.8	6.1
51SFB	什邡八角	104.0	31.3	土层	自由地表	Ⅹ	4.2	8	2.5	5.1
51WCW	汶川卧龙	103.2	31.0	土层	自由地表	Ⅹ	2.5	7	2.6	4.5
平均值							4.2	6.3	3.5	5.1

表 2 自然边坡不同深度的剪切波速和底层特性

工点名称	地震烈度	深度部位/m	平均剪切波速/(m/s)	地层特性
Site1：国道 K1021 + 800 ~ K1022 +500 段滑坡体中部	Ⅸ	0 ~ 5	300	松散的碎石土层
		5 ~ 23	475	密实的碎石土层
		23 ~ 30	650	砾岩层
Site2：国道 K1021 + 800 ~ K1022 +500 段滑坡体上部	Ⅸ	0 ~ 3	250	松散的砂砾层
		3 ~ 18	475	密实的碎石土层
		18 ~ 30	630	风化基岩
Site3 蒙子沟桥头长边坡的无支护段	Ⅹ	0 ~ 5	250	松散的碎石土层
		5 ~ 20	550	密实的碎石土层
		20 ~ 30	650	风化基岩

表 3 汶川地震中应力行波计算参数

纵波波速 V_P/(m/s)	卓越频率 f_t/Hz		纵波波长 λ/m		入射角影响系数 n	最大拉应力位置 d/m	
	E-W	N-S	E-W	N-W		E-W	N-S
835	4.3	6.2	203.5	141.1	0.2 ~ 0.25	40.7 ~ 50.1	28.2 ~ 37

根据汶川地震强震区自然边坡剪切波速与地层的关系，我们可以确定当剪切波速大于 500 m/s 时的地层为基岩。据此我们判断汶川地震岩质山体表层的剪切波速与土质边坡基岩的剪切波速一致，亦确定为 500 m/s。结合纵波波速与横波波速的比值为 1.75，可以得出汶川地震强震区岩质山体表层的纵波波速为 875 m/s。

3.3 山体拉裂缝距离的估计

汶川地震后我们根据极震区的现场波速实验和岩土工程勘察规范中的规定确定出汶川地震极震区岩质山体表层剪切波速为 500 m/s，然后通过理论上及计算，统计出 7 种常见岩石的纵横泊松比为 1.75，由此计算出汶川地震极震区岩质山体表层纵波波速为 875 m/s。另外我们通过汶川地震Ⅸ度及以上烈度区的台站加速度时程记录，通过傅里叶变换，得到 8 个地震台站场地的频谱图，取其平均的卓越频率作为计算岩质山体表层地震波长的地震行波频率。

我们由场地卓越频率和纵波波速得出汶川地震中岩质山体表层地震行波的波长 λ。另外，拉应力最大处还与地震行波相对于临空面的入射角有关，当地震行波相对于临空面斜入射时，其入射角影响系数 n 为 0.2 ~ 0.25。根据上述计算，我们得出了如表 3 所示的计算结果。

通过表 3 中的计算结果，我们可以得出，由于本次地震中台站场地在南北方向上振动的卓越频率大于在东西方向上振动的卓越频率，因此根据此频率计算出的最大拉应力位置在南北方向上的数值要小于东西方向的数值。

4 结论

地震波以应力、位移、加速度的形式在地层中传播，从震源触发的地震应力波在传播过程中遇到自由面会发生反射，运用地震应力波方程进行计算后发现反射波与入射波互相叠加后的总应力在 $\lambda/4$ 处达到最大，当介质的极限抗拉强度小于最大拉应力时，将在最大拉应力产生之前发生介质被拉裂现象，拉应力集中位置与场地的卓越频率、表层介质的纵波波速及地震波入射角大小相关[11]。这一结论解释了汶川地震中为数众多的山脊崩坍和拉裂现象，拉裂缝位置的确定也可以为高烈度地震山区线路工程避让高陡地形提供些许建议。

通过本文理论公式，结合汶川地震中Ⅷ度及以上烈度区台站记录和面波测试数据，计算出汶川地震中山体临空面发生拉应力集中的范围为：E-W方向 40.7 ~ 50.1 m，N-S 方向 28.2 ~ 37 m。由于地震中拉裂缝产生的位置会小于理论上拉应力最大的位置，故可以确定一个最大的崩坍范围，为高路堑工程的防护加固范围提供建议。

参考文献：

[1] 张祖武，姚玲侃. 土岩界面地震波能量传递与耗散特性研究—以汶川 8.0 级地震为例[J]. 灾害学，2011，26(1)：5 - 9.

[2] 刘洪兵，朱晞. 地震中地形放大作用的观测和研究进展[J]. 世界地震工程，1999，15(3)：20 - 25.

[3] AkiK. Local site effects on weak and strong groundmotion[J]. Tectonophysics，1993，218：93 - 111.

[4] Steild JH. Site response in southern California for probabilistic seismic hazard analysis[J]. Bull Seism. Soc. Am.，2000，90(6B)：149 - 169.

[5] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩土力学与工程学报，2009，28(6)：1239 - 1249.

[6] Broili - Luciano. New knowledges on the geomorphology of the vaiom slide slip surfaces[J]. Felsmechanik and Ingenieurgeolo - gie，1967，5(1)：38 - 88.

[7] 徐龙军，谢礼立. 竖向地震动加速度反应谱特性[J]. 地震工程与工程振动，2007，27(6)：17 - 23.

[8] 冯文凯，许强，黄润秋. 斜坡震裂变形力学机制初探[J]. 岩土力学与工程学报，2009，28(1)：3124－3130.
[9] Bard P Y. Effects of surface geology on groundmotion：recent results and remaining issues[C]// Proc. 10th European Conference On Earthquate Engrg. Vienna，1994：305－323.
[10] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京：冶金工业出版社，2002：58－67.
[11] 徐光兴，姚令侃，李朝红，等. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J]. 岩土工程学报，2008，30(6)：918－923.

Discussion on the Physical Mechanism of Ridge Shatter Phenomenon under Traveling Seismic Wave Load

Zhang Zuwu[1,2], Lin Yuhui[2] and Yao Lingkan[1]
(1. *Southwest Jiaotong University*, *Chengdu* 610031, *China*; 2. *China Southwest Architectural Survey and Design Institute Limited*, *Chongqing* 401147, *China*)

Abstract: Site response and its damage mechanism under earthquake effect is the research focus of seismology and earthquake engineering. Unique geological hazards phenomenon of high altitude mountain after the Wenchuan earthquake is beyond the traditional theory. According to the mountain body collapse and mountain top shattering phenomenon that are generally occurred in Wenchuan epicentral and meizoseismal earthquake areas, theoretical derivation by wave theory is conducted. By stacking the stress equation of traveling seismic wave in the free surface which reflect and incident under linearly elastic hypothesis, conclusions are derived that the expression of the total stress will appear double amplification at $\lambda / 4$ from the top of the hill, which provide a theoretical explanation for the 2 phenomenon in high intensity earthquake areas. Combined with the record of monitoring stations in the epicentral area of Wenchuan earthquake, and based on theories in this paper, the specific scopes of mountain body collapse and mountain top shattering are predicted, and the theoretical results may provide advice for the road and railway line selection among high intensity earthquake mountain areas.

Key words: traveling seismic wave; stress superposition; collapse; shattering; geological disaster

《灾害学》连续第 3 次评为“RCCSE 中国权威学术期刊”

《灾害学》编辑部近日收到中国学术期刊评价委员会、武汉大学中国科学评价研究中心颁发的荣誉证书，在第三届《中国学术期刊评价研究报告》(2013－2014)中，《灾害学》被评为“RCCSE 中国权威学术期刊”。这是《灾害学》连续第 3 次获此殊荣。

《灾害学》在安全科学技术学科中综合考评指标继续排名第一名，再次荣列权威学术期刊之称号。这项荣誉的获得，离不开主办单位、各协办单位的大力支持，离不开编委会各位编委和审稿专家的热心帮助，更离不开广大作者和读者的信任、关心和支持。此项荣誉的获得，将提升《灾害学》杂志在灾害研究领域的学术地位。《灾害学》会一如既往的为广大作者提供最好的服务，努力为我国的防灾减灾事业做出应有的贡献。

《灾害学》编辑部