

高烈度地震区岩土体边坡崩塌动力学特性研究

杨庆华, 姚令侃, 邱燕玲, 刘兆生

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:“5·12”汶川特大地震引发的次生山地灾害中以山体崩塌数量最多。本文在对国道213线都江堰至映秀段以及水磨支线公路边坡地震崩塌调查研究的基础上,分析总结了岩土体边坡的崩塌成灾模式、崩塌作用机理以及崩塌自组织临界(SOC)动力学特性。调查范围包括Ⅸ~Ⅺ度地震区,工点105个。对崩塌体方量、崩塌深度进行统计分析后发现,在Ⅸ度区崩塌体方量和崩塌深度都符合负幂律分布,呈现出明显的自组织临界动力学特性;而Ⅹ、Ⅺ度地震区不呈现该崩塌特性,其崩塌动力学性质受地震的强扰作用控制。

关键词:高烈度地震区;汶川特大地震;岩土体边坡;崩塌;动力学特性;自组织临界性

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)01-0033-07

Research on Dynamical Characteristics of Collapse of Rock and Soil Slope in High Seismic Intensity Areas

YANG Qing-hua, YAO Ling-kan, QIU Yan-ling, LIU Zhao-sheng

(School of Civil Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: Among the secondary mountain disasters triggered by the “5·12” Wenchuan great earthquake, most were collapses of rock and soil slope. Based on the field investigation along State Road G213 from Dujiangyan to Yingxiu and its Shuimo branch road, the collapse disaster mode, failure mechanism and self-organized criticality (SOC) dynamical characteristics of rock and soil slope are analyzed and summarized in detail. The investigation area covers Ⅸ, Ⅹ, Ⅺ seismic intensity zones, and collapse site numbers are 105. By statistical analyzing the volume and depth of the collapses, it is found that in Ⅸ zone volumes and depths of collapses obey negative power law distribution, display self-organized criticality (SOC) dynamical characteristics, but in Ⅹ, Ⅺ zones the collapse dynamical characteristics does not show self-organized criticality, it is controlled by earthquake intensity.

Key words: High seismic intensity area; Wenchuan great earthquake; Rock and soil slope; Collapse; Dynamical characteristics; Self-organized criticality (SOC)

0 引言

岩土边坡地震滑动与崩塌是常见的地震灾害之一,特别在山区和丘陵地带地震诱发的岩土边坡崩滑往往分布广、数量多、危害大。汶川“5·12”强震诱发了严重的山体边坡崩滑灾害,据初步统计地震中共触发了15 000多处滑坡、崩塌、泥石流地质灾害,

估计直接造成2万多人死亡^[1]。研究发现,地震动力作用触发的边坡崩滑灾害的影响因素包括地震烈度、发震控制构造、边坡体岩性、水的作用、地形地貌、边坡坡度及相对高差、地震动强度和持时等^[2]。

在地震动力作用下边坡崩滑研究上,国内许多学者取得了可喜成果。周维垣^[3]认为地震等动荷载

收稿日期:2009-10-20

基金项目:国家重点基础研究计划(973计划)(2008CB425802)

作者简介:杨庆华(1976—),男(汉族),四川渠县人,讲师,博士研究生,主要从事道路与铁道工程防灾减灾理论技术方面的研究工作。

对岩质边坡的稳定影响主要表现在地震波通过岩层面及岩体结构面时发生的反射及折射作用导致的超压增大及地震荷载与其他因素(水的作用)对边坡体的共同破坏两个方面;张倬元等^[4]认为地震对边坡稳定性的影响表现为累积效应和触发效应两个方面;胡广韬^[5]等提出了边坡动力失稳机制的坡体波动振荡加速效应假说;毛彦龙等^[6]认为地震动对滑坡形成的影响主要是通过坡体波动振荡来产生,在边坡岩土体变形破坏过程中产生3种效应:累进破坏效应、启动效应和启程加速效应;祁生文等^[7]认为地震边坡的失稳是由于地震惯性力的作用以及地震产生的超静孔隙水压力迅速增大和累积作用两个原因造成的;杜晓丽^[8]认为地震动力作用下边坡岩体的崩滑破坏是受地震波拉剪共同作用的结果,其破坏程度与岩体力学参数、结构面空间展布等有着密切的关系。除了对地震崩滑的内在动力学方面的研究,地震学家、地质工程学家从地震与崩滑灾害的统计分析入手,对许多倍受关注的问题如:地震震级、地震烈度及地震其它参数与地震崩滑的关系、地震引起的崩滑分布、地震崩滑与地质条件等,做了大量的研究工作,也取得了一定的研究成果^[9-10]。

“5·12”汶川地震中大部分的崩塌、滑坡灾害都体现为浅表面动力过程,但又确实存在诸如大光包滑坡、王家岩滑坡、东河口滑坡等特大型的灾害现象。这些规模差异巨大的灾害在空间、能量之间是否仍存在着某些确定性的分布规律?巨型崩滑灾害和小规模坍滑现象是否遵从不同的形成机理?这些基本问题都需要得到更深物理层面的解释。

自组织临界性(Self-organized Criticality)理论是当代非线性物理学中的前沿理论。它是Per Bak等人为解释无序的、非线性复杂系统的行为特征提出的新概念^[11]。这类系统包含着众多的发生短程相互作用的组元,并自发地向着一种临界状态进化。在临界状态下小事件引起的连锁反应可能对系统中大量数目的组元发生影响,从而导致大规模事件的发生,这时所有的时空关联函数都是幂次(Power-law)的,故幂律可以作为自组织临界性(SOC)的证据。SOC理论首先在地球物理学领域形成研究热点,如於崇文院士认为崩塌的动力学机制是一种连锁反应(chain reactions)或“分枝过程”(branching processes),并以完整和独立的命题提出了“固体地球系统的复杂性与自组织临界性”^[12]。

山地灾害系指滑坡、崩塌、泥石流(含边坡失稳)等灾害,它们都属于边坡物质主要在重力作用下失

稳的一种地表过程,它们的共同特征是能量的耗散是以边坡物质失稳下滑实现的。我们已发现降雨扰动下边坡重力作用类地表过程所形成的堆积地貌单元的规模与频率之间服从分形关系,提出SOC是重力地貌分形特征形成机制的观点;此外又利用离心模型开展了地震扰动下的沙堆模型实验,发现边坡堆积体(按照重力相似准则高度达20.4 m),在用拟静力法方式模拟地震力的扰动下,仍能依靠自组织作用保持系统的鲁棒性,边坡崩塌的动力学特性可以用幂律描述^[13-16]。

1 研究区概况

“5·12”汶川大地震后,我们对强震区域的公路边坡进行了现场踏勘,主要包括国道213线紫坪铺—汶川段三级公路、都江堰—映秀高速公路、映秀—汶川二级公路,此外还包括213线水磨支线、映秀镇城区道路、紫坪铺水利枢纽重载公路等。本文介绍的主要是国道213线都江堰至映秀段以及水磨支线的公路边坡震害调查情况。该区域位于四川盆地西北侧,龙门山地中南段,海拔一般在1 000~3 000 m,地势自西北向东南倾斜。岷江干流至北向南过漩口后折向北东流经该区域。该区域覆盖层以粘性碎块石土、漂卵砾石土为主;基岩以砂岩、砂页岩夹煤层、灰岩为主,强风化层3~15 m。区内断裂基本构造格架为龙门山构造带,安县—灌县断裂;茅亭、龙溪断裂;发育断裂主要有:平武断裂—茂汶断裂、北川—映秀断裂、寿溪河断裂、纸厂沟断裂。主要公路为国道213线,为三级公路,全长32 km。从都江堰到马鞍石隧道进口为绕紫坪铺大坝绕坝公路,2003年建成运营。从马鞍石隧道出口到映秀为2005年竣工修建的三级路。公路抗震设计按场地基本烈度为Ⅶ度考虑。调查区示意如图1所示。

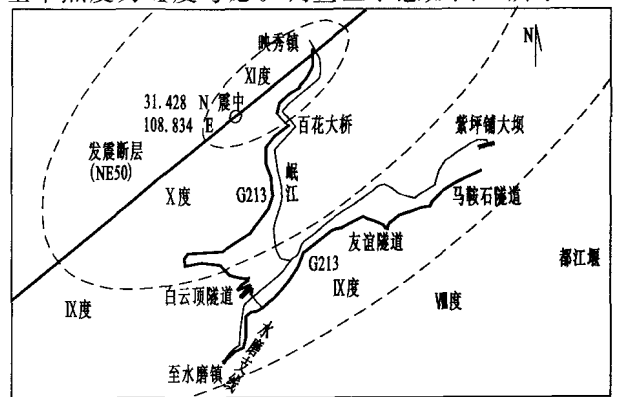


图1 研究区概况

Fig. 1 The general situation in the study area.

国道 213 线都江堰至映秀段沿线场地地震烈度分布有Ⅸ、Ⅹ、Ⅺ度,水磨支线场地位于汶川—映秀断裂与安县—灌县断裂之间相对稳定的地块上,区内无控震、发震断裂,无强震发生记录,场地烈度受外围强震影响,基本烈度为Ⅸ度。

我们的调查以东面平原和山区交界处为起点,向西沿岷江河谷逆流而上,直至发震断层,包括了Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ、Ⅺ度四个地震烈度区,震中距均在 20 km 里范围内。工作内容有对震区公路边坡工程震前相关资料的收集;震害调查包括成灾模式的判别、变形测量以及震害成因分析等;以及关于震后修复抢通措施的记录等。

2 崩塌类型与成灾模式

2.1 岩质边坡

(1) 崩塌性滑坡:在震中区以及位于龙门山中央大断裂区域,地震造成山体大规模崩塌,通过崩塌山体的路基、桥梁和隧道洞口被崩塌物质掩埋。该灾害类型在 G213 都江堰至映秀段最为突出,路基被崩塌性滑坡群掩埋(图 2)。在其他处于龙门山中央大断裂的区域,发现相当多的堰塞湖也是由崩塌性滑坡所致。



图 2 213 国道 K1019~1020 处崩塌性滑坡

Fig. 2 Collapse-landslide at K1019~1020 on G213 highway.

(2) 崩塌:边坡崩塌普遍发生于地震区及地震影响区岩质高边坡,地震造成岩土体结构面张开,岩土体松动,部分岩块已经沿着结构面垮塌,但仍有大量岩块停留在边坡上,稳定性很差,稍有扰动极有可能再次崩塌(图 3)。

(3) 落石:落石是总体稳定性较好的岩质高边坡个别危岩顺结构面垮塌。汶川地震极震区建构筑物和崩滑体的破坏特征表明,极震区除遭受过强烈的地震竖向作用力外,还遭受过强大水平力的作用。强大的水平作用力使极震区绝大多数高位崩滑灾害



图 3 213 国道 K1031+450 处砂岩崩塌体

Fig. 3 Sandstone collapse at K1031+450 on G213 highway.

均呈现出临空抛射的动力特征,多处重达数十、数百吨的岩块已被临空抛射达数十米甚至数百米。其中最具代表性的为汶川地震震中区映秀镇一重约 300 t 的块石,从 G213 公路内侧坡体陡壁顶部直接临空抛射到公路外侧,其水平抛射距离达 61.9 m,竖直下落高度 64.4 m(图 4)。



图 4 震中映秀的巨大落石

Fig. 4 Huge rock falling at epicenter Yingxiu town.

2.2 基覆边坡(基岩与厚覆盖层)

(1) 崩坡积体

崩坡积体斜坡自然坡度一般在 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 之间,岩性以硬塑状含亚黏土和中密状含黏性土碎石、块石为主,崩坡积层厚一般在 2.0~25.5 m。崩坡积体下伏基岩,基岩上部分布全~强风化晶屑凝灰岩,节理、裂隙非常发育,岩体呈块石、碎石状镶嵌结构,岩体稳定性和整体性很差。地震作用下破坏表现形

式为表层局部破坏,后部坍滑覆盖。其危害程度很严重,崩塌掩埋支挡防护结构;崩塌覆盖下部线路(图5)。



图5 213国道 K1021+270 崩坡积体

Fig. 5 Debris deposit at K1021+270 on G213 highway.

(2) 残坡积体

残坡积体是一种岩、土混合体,由岩石经剧烈的地质构造作用和风化作用而形成。从本质上讲,残坡积土是一种非均质材料,但其力学性质及应力—应变本构关系却呈现出明显的连续介质材料特性。地震作用下破坏表现形式为表面局部坍滑,破坏深度一般小于1 m。其危害程度严重,溜滑方量小,分布面积大,线路清理难度大(图6)。



图6 213国道 K 1017+300 处残坡积体

Fig. 6 Dilapidated and residual soil at K1017+300 on G213 highway.

(3) 滑坡堆积体

滑坡堆积体地震破坏也是常见的山地次生灾害。堆积体中分布有一定数量的剪裂面,在空间上分布不连续,没有发现统一的滑裂面或剪裂带存在。堆积体微观结构大体上可以划分为非定向性的松散结构、树枝状结构和粒状堆积结构,以及定向性的线

型擦痕结构和矿物定向排列结构。破坏表现形式为表层局部破坏,整体稳定,没有发现老滑坡复活的证据。其危害程度不严重,较少方量掉落到线路(图7)。



图7 国道 213 K1032+850 处滑坡堆积体

Fig. 7 Accumulation landslide at K1032+850 on G213 highway.

(4) 冲洪积体

由泥灰岩等组成的冲洪积体,块碎石土中泥质含量较高,块石含量较多,风化较强,分选性差,结构较紧密,由斜坡至坡顶平台洪坡积体厚度呈增大趋势。冲洪积体在地震作用下破坏表现形式为坡面局部破坏,整体稳定;较少方量掉落到线路;危害程度很小,分布区域为河流两岸的边坡,在震中及近震区未发现整体破坏(图8)。



图8 213国道 K1030+350 处冲洪积体

Fig. 8 Diluvial deposit at K1030+350 on G213 highway.

3 崩塌体方量和深度研究

3.1 研究方法与数据来源

通过对国道213线都江堰至映秀段以及水磨支线的岩土体边坡崩塌灾害点调查,着重对崩塌体方

量和崩塌深度进行了统计分析,其中,崩塌方量、深度数据来源主要有:

- (1) 灾后抢险现场的统计估算量;
- (2) 震后现场测量。地震过后经过一个半雨季的冲刷作用(1 年后),崩塌床面极度松散物质已基本被冲刷干净,裸露出较完整的崩塌床面。根据崩塌结构面形状将其崩塌床面划分为无数的网格,依据 1:2000 地形图,现场利用全站仪对每个崩塌体网格长度、深度、高度进行测量。最后再根据测量的崩塌体床面坐标值由计算程序生成崩塌体数字图形(图 10),计算出崩塌体方量。
- (3) 根据原有国道 213 线的公路边坡防治工程图纸,对锚杆护坡的工点震后裸露的锚杆长度估算崩塌体深度,再利用测距仪测量崩塌体的长度和高度,由此计算所得。

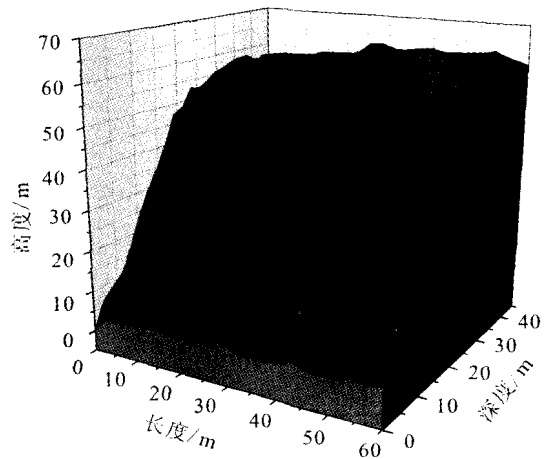


图 9 213 国道 K952+773 处崩塌体数字图形
Fig. 9 Digital map at K952+773 on G213 highway.

3.2 分析结果及解释

调查区范围包括Ⅸ、Ⅹ、Ⅺ度地震区,水磨支线全段属于Ⅸ度地震区。共调查岩土体边坡崩塌工点数目 105 个,其中Ⅸ度地震区 61 个,Ⅹ度地震区 29 个,Ⅺ地震区 15 个。本文着重对崩塌体方量和崩塌体深度与地震烈度关系进行分析。

3.2.1 塌方量

所有调查区 105 个工点的崩塌体方量统计见图 10(a);平均崩塌方量达 989.9 m³;崩塌方量按从大到小的规模排序,在双对数图上作图,见图 10(b)。

从图 10(b)可看出,调查区Ⅸ、Ⅹ、Ⅺ度地震区崩塌方量与崩塌工点数目在双对数图上近乎一直线关系,在数学上这意味着它们之间存在负幂律关系,拟合方程为

$$y = 170\,713x^{-1.868\,7} \quad (1)$$

其中, x 表示大于某一崩塌规模的崩塌点数目; y 表示崩塌方量。

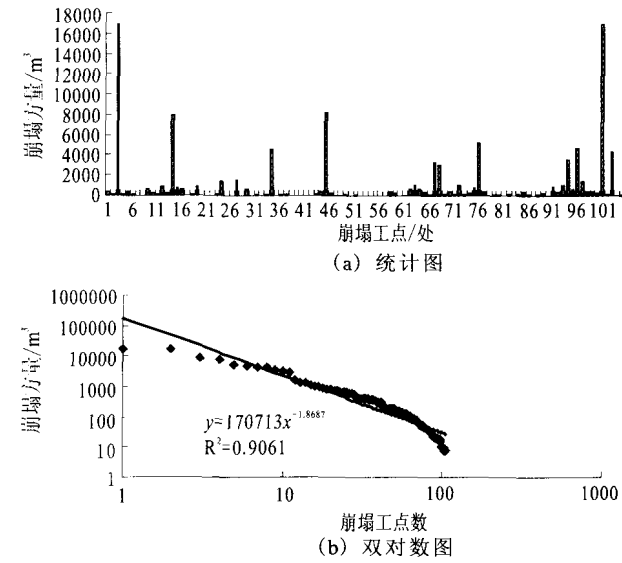


图 10 崩塌工点数与崩塌方量的统计和双对数图
Fig. 10 The statistical diagram and logarithmic curve for collapse site numbers and cubic metres of collapses.

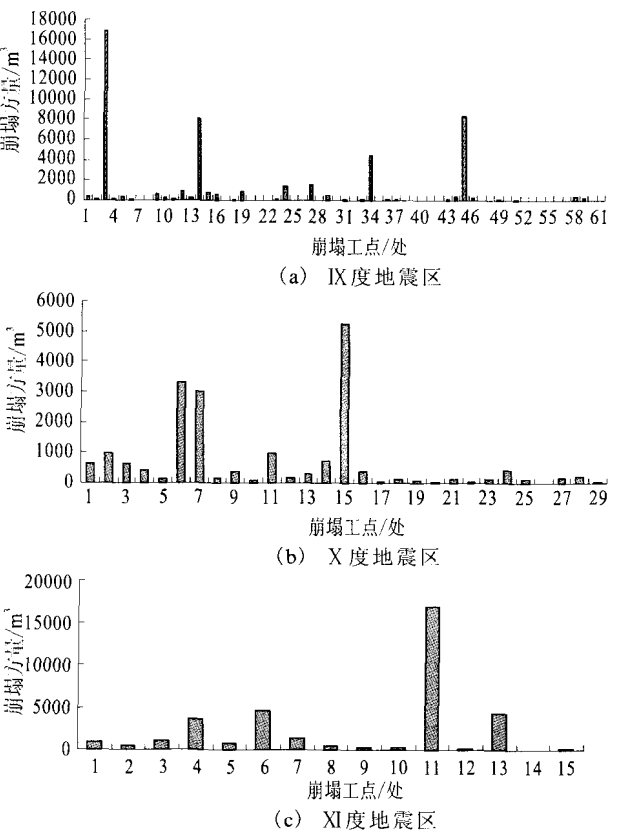


图 11 不同烈度区崩塌工点数与崩塌方量统计
Fig. 11 The statistical diagrams of collapse site numbers and cubic metres of collapses in different seismic intensity areas.

分别对Ⅸ、Ⅹ、Ⅺ度地震区调查的崩塌体方量进行统计,见图11。再将各地震烈度区崩塌方量按从大到小的规模排序,在双对数图上作图,见图12。

从整个调查区域的崩塌方量结果来看(图11(b)),高烈度地震区岩土体边坡崩塌呈现明显的自组织临界崩塌动力学特性,与於崇文院士提出的地质作用的演化过程是自组织临界过程的结论一致^[12]。从各个烈度区域来看,Ⅸ度地震区崩塌工点与崩塌方量双对数图拟合方程相关系数 R^2 值达到了0.9639,说明崩塌方量呈现较为明显的自组织临界动力学特性,是边坡在地震动作用下的主动调整,属于临界状态下的触发效应;而Ⅹ度地震区相关系数 R^2 值为0.894,具有近似自组织临界特性,处于从自组织临界性向地震强扰动作用破坏的过渡状态;Ⅺ度地震区相关系数 R^2 值仅为0.7921,说明对崩塌规模起主导作用的是地震的强扰作用而非自组织作用,已不再表现出显著的自组织临界动力学特性,是破坏的累积效应和触发效应共同作用的结果,即先在强地震动的作用下造成岩土体结构的松动变形使其处于临界状态,继而再通过触发效应成为中大规模的崩塌破坏。

3.2.2 塌方深度

调查中还发现不同崩塌体的崩塌深度也存在很大区别,对调查的所有崩塌体崩塌深度按3.1节方法进行统计,见图13(a)。看出崩塌深度也存在明显的自组织临界动力学特性。从各烈度区来看,在Ⅸ度地震区调查的61个崩塌体中崩塌深度在0.5 m以下的占了27个,0.5~1.0 m的占了15个,1.0~2.0 m的占了11个,2.0~5.0 m的占了4个,5.0~10.0 m

的占了3个,10.0 m以上仅占1个,其平均崩塌深度达1.2 m;在Ⅹ度地震区29个崩塌体中崩塌深度0.5 m以下占2个,0.5~1.0 m的占了8个,1.0~2.0 m的占了13个,2.0~5.0 m的占了5个,5.0 m以上

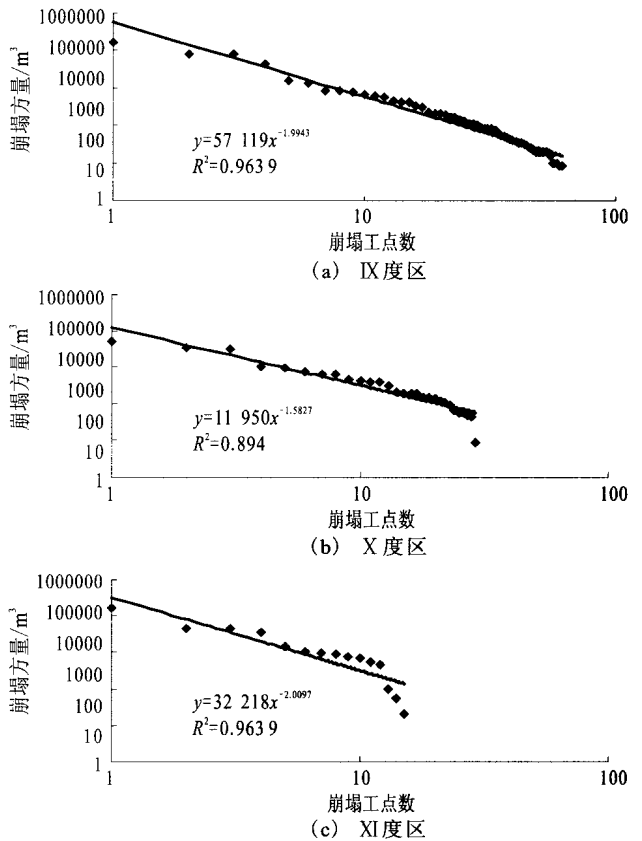


图12 不同烈度区崩塌工点数与崩塌方量双对数图

Fig. 12 The logarithmic curves of collapse site numbers and cubic metres of collapse in different seismic intensity areas.

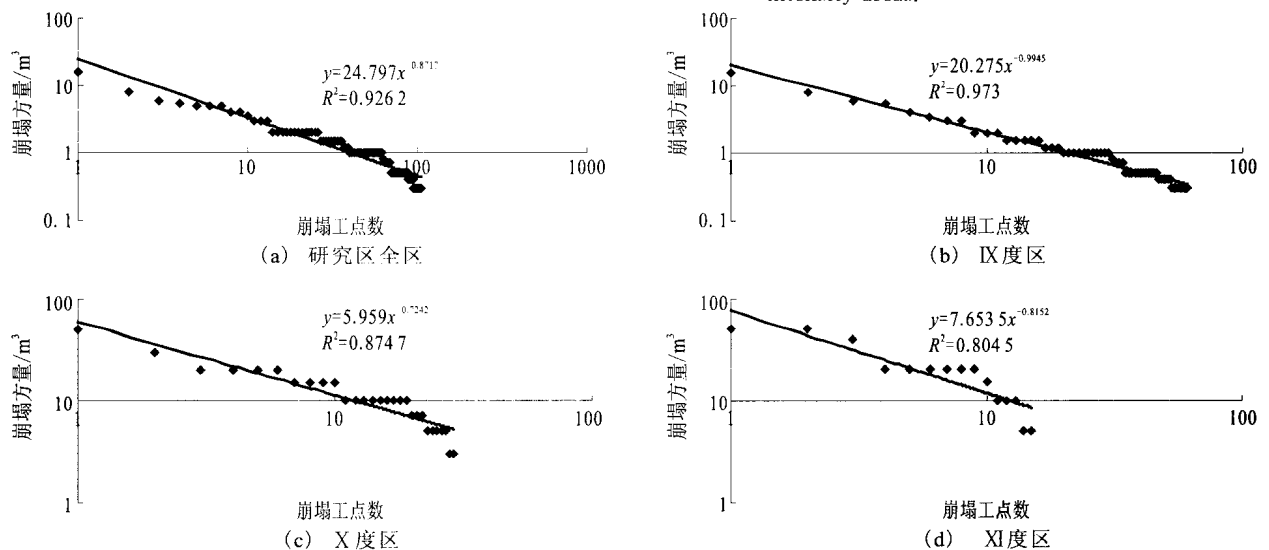


图13 不同烈度区崩塌工点数与崩塌深度双对数图

Fig. 13 The logarithmic curves of collapse site numbers and depths of collapses in different seismic intensity areas.

占1个,其平均崩塌深度达1.5 m;在Ⅺ度地震区15个崩塌体中崩塌深度0.5 m以下占2个,0.5~1.0 m的占了3个,1.0~2.0 m的占了7个,2.0 m以上占3个,其平均崩塌深度达2.1 m。

调查区所用崩塌工点数与崩塌深度在双对数图上拟合方程为

$$y = 24.797x^{-0.8717} \quad (2)$$

其中, x 表示大于某一崩塌规模的崩塌数目; y 表示崩塌体深度。

调查区Ⅸ、Ⅹ、Ⅺ度地震区崩塌深度与崩塌数目在双对数图上作图,见13(b)、(c)、(d)。Ⅸ度地震区崩塌工点与崩塌深度双对数图拟合方程相关系数 R^2 值达到了0.973,而Ⅹ度地震区相关系数 R^2 值为0.8747,Ⅺ度地震区相关系数 R^2 值仅为0.8045。基本得到与崩塌方量一致的结论。

在Ⅺ度地震区调查统计发现呈现中大崩塌规模的崩塌数目居多,基本有三分之二的山体面积出现了“山剥皮”的现象,很难从中找出一些具体的崩塌工点,因此Ⅺ度地震区的崩塌方量和深度基本全是中大规模的统计数据,在双对数图上不会明显存在负幂律分布。与Ⅸ、Ⅹ度地震区相比,Ⅺ度地震区的崩塌特性完全受地震强烈的震动作用控制,而非系统内部的自组织作用。

4 地震波对岩土体变形崩塌破坏的作用机理

地震以波的形式在岩土体介质中传播,具有周期性,地震波分压缩与剪切波—纵波、横波和表面波,其中以表面波的振幅最大,破坏能力最强。岩土体传播地震波时,在同一时刻地震波传播方向上各部位必处于压缩、拉伸或左旋、右旋剪切中;随着地震时间的延续,每个部位都经受周期性拉压或剪切^[5]。

(1) 地震压缩波作用于岩土体结构的变形破裂。在水平地震压缩波作用下,岩土体可以形成结构面张开,细小颗粒下坠,大结构体上抬。水平振动下细颗粒下沉而粗颗粒上浮的现象就是振动效应,可以使岩土体在水平和垂直两个方向上的结构疏松化即变形破裂。

(2) 地震剪切波作用下岩土体结构的变形破裂。对于分离岩土体来说剪切作用下结构面仅有发生相对错动可能。而结构上单纯的剪切虽不能形成张开,但脆性岩土体的剪切错动都伴随着扩容即拉张。结构面很少是平滑的,一般都具有不同级别、不

同类型的起伏;在起伏的表面若有剪切错动,便出现爬坡;只要爬坡后结构面上都会产生剪胀。问题的实质在于结构面剪切应变能否累积起来成为剪切位移。

(3) 山体临空面的变形破裂效应。越接近山体临空面,结构体分离程度越高,地应力越小,分离体可位移性越强,结构面越容易开张。临空面附近的岩土体受到震动后瞬时抗力减少,容易产生滑动破坏,这与振动反应的垂直向和水平向放大效应也是相联系的。

(4) 多期次震动的变形破裂效应。历史上多期次震动或者是主震余震各次地震作用下的变形破裂不仅仅是复合与叠加,更重要的是每次变形破裂以同等变形破裂机制模式发生、发展或延续而加剧,以致最终破坏失稳。这在震区调查时可见到节理错动方式的统一性、地裂缝的等间距性等。

地震力的作用将直接导致边坡应力场的瞬时改变,这种变化其实是一个动态过程,也就是说边坡处于一个不断变化的应力场当中,其变化不但是量值上的反复调整,而且方向上也是正负交替反复变化。其中拉动和剪动应力的正负交替反复作用,是导致边坡震裂变形破坏的重要控制因素。

5 结论

(1) 高烈度地震区岩土体边坡崩塌成灾模式主要分为岩质边坡崩塌和基覆边坡(基岩与厚覆盖层)崩塌。其中岩质边坡崩塌包括崩塌性滑坡、崩塌、落石3种成灾模式;基覆边坡包括崩坡积体、残坡积体、滑坡堆积体、冲洪积体崩塌4种成灾模式。

(2) 研究区调查发现,在高烈度地震区岩土体边坡崩塌整体上呈现出自组织临界动力学特性,其中在Ⅸ度地震区崩塌方量与崩塌深度呈现较为明显的自组织临界动力学特性,是边坡在地震动作用下的主动调整,属于临界状态下的触发效应;而Ⅹ度地震区为具有近似自组织临界特性,处于从自组织临界性向地震强扰动作用破坏的过渡状态;Ⅺ度地震区对崩塌规模起主导作用的是地震的强扰作用而非自组织作用,已不再表现出显著的自组织临界动力学特性,是破坏的累积效应和触发效应共同作用的结果,即先在强地震动的作用下造成岩土体结构的松动变形使其处于临界状态,继而再通过触发效应成为中大规模的崩塌破坏。

(1) 基坑分步开挖过程中,第5、6、7步的开挖引起的不平衡力较大,即对土体扰动也较大;

(2) 对于土质基坑,最大水平位移一般都发生在基坑边壁表面,远离基坑边壁的基坑介质内部水平位移相对较小。

(3) 预应力锚杆+土钉支护结构的土钉轴力呈中间大两头小的枣核形或抛物线状,每排土钉的轴力最大值自上而下逐步向基坑边壁方向偏移。预应力锚杆最大轴力值在自由段,且在自由段轴力相同,在锚固段逐渐减小,锚杆末端的轴力很小。而土钉和锚杆轴力最大点的连线基本为基坑土体的潜在失稳破坏面,其最大轴力点位置的变化反映了基坑内部土体的位移变化趋势。

[参考文献]

[1] 曾宪明,黄久松,王作民,等.土钉支护设计与施工手册[S].北

京:中国建筑工业出版社,2003.

[2] 贾金青.深基坑预应力锚杆柔性支护法的理论与实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.

[3] 王明龙,万林海,黄志全,等.基于FLAC^{3D}的土钉内力分析[J].工程地质学报,2006,14(3):411-418.

[4] 刘波,韩彦辉(美国).FLAC原理、实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社,2005.

[5] 吴忠诚,汤连生,廖志强,等.深基坑复合土钉墙支护FLAC-3D模拟及大型现场原位测试研究[J].岩土工程学报,2006,28(增刊):1460-1465.

[6] 丁秀丽,盛谦,等.预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):980-988.

[7] 李志刚,秦四清,张冰峰.土钉支护现场测试及三维竖向模拟[J].工程地质学报,2004,12(1):69-73.

[8] 卢萌盟,沈俊,曾宪桃.预应力锚索加固基坑的三维数值分析[J].岩土工程学报,2005,27(10):1198-1202.

[9] 唐益群,崔振东,王兴汉.密集高层建筑群的工程效应引起地面沉降的初步研究[J].西北地震学报,2007,29(2):105-108.

(上接 39 页)

[参考文献]

[1] 殷跃平.汶川八级地震地质灾害研究[J].工程地质学报,2008,16(4):433-444.

[2] 胡广韬,毛彦龙,程谦恭,等.地震时滑坡体波动震荡的启程加速动力学问题[R].西安:西安工程学院,1997.

[3] 周维垣.高等岩石力学[M].北京:水利电力出版社,1990.

[4] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1993.

[5] 胡光韬.滑坡动力学[M].北京:地质出版社,1995.

[6] 毛彦龙,胡广韬,毛新虎,等.地震滑坡启程剧动的机理研究及离散元模拟[J].工程地质报,2001,9(1):74-80.

[7] 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):2792-2796.

[8] 杜晓丽.地震荷载作用下岩质边坡稳定性研究[D].西安:西安科技大学,2008.

[9] 辛鸿博,王余庆.岩土边坡地震崩滑及其初判准则[J].岩土工程学报,1999,21(5):591-594.

[10] 鲍叶静,高孟潭.地震诱发崩塌滑坡危险区初步预测[J].中国地震,2004,20(1):89-94.

[11] Per Bak, Chao Tang, Kurt Wiesenfeld. Self-organized Criticality[J]. Physical Review A, 1988, 1(1):364-374.

[12] 於崇文.地质系统的复杂性[M].北京:地质出版社,2003.

[13] Yao Lingkan, Huang Yuan, Lu Yang. Self-organized criticality and its application in the slope disasters under gravity[J]. Science in China /Ser. E Technological Sciences, 2003, 46(Supp):20-30.

[14] Yao Lingkan, Qi Ying. Fractal characteristics of gravity landform and its SOC mechanism[J]. Wuhan University Journal of Natural Science, 2007, 12(4):577-768.

[15] 姚令侃,方铎.非均匀沙自组织临界性及其应用研究[J].水利学报,1997,(3):26-32.

[16] 杨庆华,姚令侃,齐颖.散粒体离心模型自组织临界性及地震效应分析[J].岩土工程学报,2007,29(11):1630-1635.