

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.02.035

地震条件下危岩崩塌运动特性的初步探讨

黄小福^{1,2}, 张迎宾^{1,3}, 赵兴权¹, 余鹏程¹, 邢 昊¹, 张 珏¹, 陈岩岩¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中铁隧道集团有限公司勘测设计研究院, 广东 广州 510000;
3. 九州大学 土木与建筑工程学院, 日本 福岡 819-0395)

摘 要: 危岩崩塌是一种常见且破坏性极大的地质灾害, 而地震是导致危岩崩塌的主要因素之一。数值模拟是研究危岩崩塌的重要手段。以概念危岩为例, 运用非连续变形分析 (DDA) 法研究了地震荷载对危岩体崩塌块体运动特性的影响。对无地震荷载和 3 种不同地震荷载输入方式的 4 种工况进行了模拟。研究表明: 地震荷载对危岩崩塌破坏有促进作用, 不同的地震荷载输入方式对崩塌块体的运动特性有着显著的差异。从算例来看, 竖向地震动对崩塌块体运动距离的影响程度甚至比水平地震动对其的影响程度更大, 这与人们的传统观念不同, 在今后的地震危岩崩塌防治措施设计中, 应对竖向地震荷载给予足够的重视。

关 键 词: 危岩崩塌; 地震荷载; 非连续变形分析 (DDA); 运动距离; 竖向地震动

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 02-0583-10

A preliminary study of kinetic characteristic of rock-fall under seismic loading

HUANG Xiao-fu^{1,2}, ZHANG Ying-bin^{1,3}, ZHAO Xing-quan¹, YU Peng-cheng¹,
XING Hao¹, ZHANG Jue¹, CHEN Yan-yan¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Survey, Design and Research Institute of China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China;

3. Department of Civil and Structure Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan)

Abstract: As is well-known, rock-fall is one of the most common geo-hazards and always causes serious damage to both lives and properties. There are many triggering factors that give rise to the occurrence of rock-fall disaster and earthquake is one of the main triggers, while often leading to a greater loss than other factors. As one of the methods to carry out researches of rock-fall, numerical simulation plays an important role in the study of movement characteristics. A conceptual rock-fall model with four cases, one without seismic loading and three with different seismic loading input modes, is used to simulate the effect of seismic loadings on the mobility characteristics by discontinuous deformation analysis (DDA). The simulation results show that the seismic loading prompts the collapse of potential rock-fall and different seismic loading input modes have different significant influences on the mobility characteristics of the collapse block. Another important conclusion is the vertical component of seismic loading has more significant influence on the movement distance of collapse block than the horizontal component, which differs from the traditional knowledge about the earthquake-induced rock-fall. Thus the vertical seismic loading should be given enough attention in the future prevention design of earthquake-induced rock-fall.

Keywords: rock-fall; seismic loading; discontinuous deformation analysis (DDA); movement distance; vertical ground motion

1 引 言

危岩是位于陡崖或陡坡上被岩体结构面切割的

岩石块体, 在重力、地震、裂隙水压力等诱发因素作用下, 其稳定性较差^[1]。危岩崩塌是我国山区一种常见的地质灾害, 地震是最主要的诱发因素之一。

收稿日期: 2015-02-27

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51408511, No. 41672286); 日本学术振兴会特别研究员奖励费 (No. 16F16056); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No. 2682014RC19, No. 2682015CX080, No. 2682016CY11)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51408511, 41672286), the JSPS KAKENHI Grant Number JP (16F16056) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2682014RC19, 2682015CX080, 2682016CY11).

第一作者简介: 黄小福, 男, 1990 年生, 硕士, 主要从事岩土工程抗震方面的研究工作。E-mail: xiaofuh021@163.com

通讯作者: 张迎宾, 男, 1983 年生, 博士, 副教授, 主要从事地震岩土工程及非连续数值方法研究。E-mail: yingbinz516@126.com

地震危岩崩塌往往具有突发性和毁灭性的特点,危岩崩塌落石坡面运动形式及轨迹复杂,难以预测,防治难度大,给人们造成巨大的损失。2008 年 5 月 12 日汶川发生 8.0 级特大地震,引发了 15 000 多处崩塌滑坡点,估计直接造成 2 万多人死亡,震后又发现以崩塌体为显著灾害的地质灾害点 12 700 多处,威胁近百万人的生命安全^[2]。危岩崩塌致灾能力强,危害程度大,课题研究性迫切。

20 世纪以来国内外学者围绕着危岩崩塌运动特性做了大量研究工作,主要研究方法有理论分析、现场调查、试验和数值模拟。在理论分析方面,胡厚田等^[3]根据崩塌落石运动形式,按运动性质与山坡坡角的关系,将边坡分为减速运动地带、加速运动地带和自由坠落地带;唐红梅等^[4]根据危岩体破坏特征,将危岩体破坏分为坠落式、倾倒式、滑塌式 3 种类型,并分别推导了 3 种类型危岩体破坏后的落石轨迹方程。在现场调查方面,裴向军等^[5]通过对汶川地震未扰动现场崩塌滚石痕迹的调查,得出了强震触发崩塌滚石的运动特征;程强等^[6]对 399 条汶川地震崩塌剖面进行现场调查分析,研究了崩塌滚石的坡面运动特征。在试验方面,黄润秋等^[7]采用正交试验理论,以滚石在坡面上的平均加速度为评价指标,分析滚石质量、形状和坡面特征对滚石运动特征的影响。在数值模拟方面,邬爱清等^[8]对 DDA 时间步和弹簧刚度取值进行研究,研究结果表明 DDA 适合崩塌滑坡等地质灾害的应用和分析。张迎宾等^[9-13]运用非连续变形分析(DDA)法,研究大光包滑坡,发现地震对滑坡的发展、滑移距离和破坏后的形态有显著影响;以东河口滑坡为例,采用 DDA 证明了地震荷载是导致高速远程滑坡的重要原因;考虑竖向地震动的蹦床效应,运用 DDA 提出了新的地震崩塌滑坡运动机制;以危岩崩塌为对象,运用 DDA 研究了地震条件下岩石崩塌块体的高速启动机制;结合 GIS 提出了崩塌落石 DDA 边坡建模新方法;增加边-边接触判断,精确模拟节理的破坏行为。

上述几种研究方法中,以非连续介质力学为基础的数值法将软弱面切割的岩土体视为复杂的块体系统,允许各个块体之间平移和转动,甚至相互分离,模拟大变形和大位移是研究岩体崩塌滑坡的理想方法。

危岩崩塌危害程度大,影响范围广,而由地震导致的危岩崩塌致灾情况尤其严重。了解地震危岩崩塌破坏特点和破坏后块体的运动特性对危岩体防治有重要意义。然而,现有工作主要研究崩塌的分

类、破坏机制、影响因素以及稳定性等,关于危岩体在地震作用下崩塌体的破坏特性和运动特性研究相对较少。本文以概念危岩为例,运用非连续变形分析(DDA)方法和实测地震波模拟了危岩在天然与强震条件下的稳定状态和可能的破坏过程,分析崩塌块体倾倒破坏后速度、位移,得出了一些重要结论,为地震危岩崩塌的防治提供建议和参考。

2 DDA 方法概述

2.1 DDA 基本原理

DDA 是由石根华博士^[14]于 20 世纪 80 年代后期在极限平衡、有限元法以及离散元法基础上提出的一种新的数值模拟方法。它从块体系统出发,研究块体单元之间的相互作用,块体单元为事先存在的被不连续结构面包围的实际隔离块体,形状任意。块体未知数为块体自由度之和,运动和变形用位移、转角、应变表示。块体之间允许分离和接触,接触时库仑定律作用于接触面,运用开闭迭代,严格遵守“不嵌入、不张拉”的准则,由边界条件和接触条件建立刚度方程。刚度方程以位移为未知数,对每一荷载或时间增量选择求解,通过最小势能原理求解刚度方程得出位移,然后由位移求出块体的速度、加速度、应力、应变和相互作用力。变形的不连续性是 DDA 方法的一大特点,它可以模拟块体平动、转动以及变形,因此,适合对边坡崩塌滑坡等大变形问题进行数值模拟。DDA 方法在计算过程中引入质量和时间因素,考虑变形和时间的关系,因此,它可以用于静力问题,也可对动力问题求解。

DDA 法的各个块体是相互连接的, n 个单独的块体单元连通过边界条件和接触条件后的总体方程如下形式:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $[K_{ij}]$ 为 6×6 的总体刚度矩阵(因为每个块体有 6 个自由度); $[D_i]$ 为 6×1 的总体位移矩阵,代表第 i 个块体的变形变量; $[F_i]$ 为 6×1 的总体荷载矩阵,代表第 i 个块体的荷载变量。

2.2 DDA 地震荷载的输入方法

DDA 地震荷载输入包括加速度时程输入、速度时程输入和位移时程输入,其中常见的输入方式有

3种,即位移时程输入到基岩(方法1)、加速度荷载当作体积力施加到破坏块体(方法2)以及加速度荷载当作体积力施加到基岩(方法3)。Kamai等^[15]建立滑块模型,运用方法1对底座滑块输入地震荷载,研究地震动特性,得到了与理论解较吻合的数值结果;Nishiyama等^[16]采用基于方法1模拟日本一砌石挡土墙在地震荷载下的动力响应,并与监测数据对比分析,证明了方法1的正确性。虽然从理论解和实际监测数据均证明方法1是一种可行的地震荷载输入方式,但地震荷载下场地的时刻位移难以精确监测以及方法1还有待完善,因此,现阶段DDA地震荷载的输入更倾向于通过方法2和方法3来实现。Hatzor等^[17]通过对倾斜平面施加不同形式的正弦波形的水平加速度,研究其上块体滑移特性,证明DDA可以模拟地震崩塌滑坡。方法3要求将基岩块重力加速度设置为0,基岩质量远远大于其表面破坏块体的质量,忽略基岩惯性力和基岩边坡对地震的放大作用,破坏块体的动力特点主要由破坏块体自身重力和基岩对破坏块体的作用力决定。针对以上方法,Wu^[18]进行对比研究,发现方法2违背了达朗贝尔原理,由方法2得出的块体之间的相对运动刚好与方法1、方法3、理论解相反,另外,危岩崩塌破坏后,落石脱离基岩在空中运动阶段不受地震荷载作用,若采用方法2输入地震荷载将明显不符合实际情况。综合对比3种地震荷载输入方法,方法3是简单切实可行的地震荷载输入方法。本文采用方法3输入地震荷载。

3 危岩崩塌破坏模型

为了正确评价危岩在天然状态和地震荷载下的破坏类型以及危岩破坏后落石块体的运动特性,本文建立了概念危岩,并运用DDA法对其进行数值模拟和分析。

3.1 危岩及模型建立

3.1.1 地质背景

危岩位于西南山区,地形高程为1250~1550 m,地形相对高程差300 m,为低中山陡崖地貌,地形坡脚 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。出露二叠系上统吴家坪组石灰岩,基岩表层风化程度低,岩体完整性好,地下水水位较深,大气降水为其主要补给源,根据《建筑抗震设计规范》^[19],该区域抗震设防烈度为IX度。

3.1.2 危岩特征

危岩带延伸长度约为350 m,危岩平均高为65 m,危岩带岩体主要为灰岩,落差约为100 m,危岩临空条件好,卸载裂隙发育,危岩带后有宽

度为0.8~2.0 m的卸荷裂隙,属于大型高位危岩,危岩底部有优势软弱结构面,剖面图如图1所示。

危岩处于地震频发区域,而潜在破坏节理面是危岩可能性最大的潜在灾害点,因此,在DDA的数值模拟中,将基岩底座的划分为一个块体单元。危岩为潜在的不稳定结构,石灰岩为块状构造,潜在破坏节理面为主要的软弱结构面,危岩体内存在节理,因此,优势结构面以上的危岩划分成相对较小的块体单元,危岩的DDA计算模型如图2所示。

3.2 参数选取

本模型控制参数如表1所示,依据文献^[20]岩体物理参数和节理参数取值如表2、3所示。本文首先将5.12汶川地震051MZQ台站所记录的东西向和竖向地震时程基线校正,然后作为体积力作用于基岩,由于波的起始阶段幅值较小,对数值模拟结果影响很小,因此,选用波的中强段输入,地震加速度时程曲线如图3所示。

3.3 工况介绍

为细致研究不同地震条件对危岩稳定性和运动特性的影响,本文选择4种工况对危岩进行数值模拟,分析危岩在地震工况和非地震工况下的动力效应。天然工况模拟危岩没有地震荷载作用情况,地震波以水平向、竖向和横-竖向3种情况输入到基岩,分别用以模拟危岩在水平地震波、竖向地震波和横-竖向地震波耦合作用3种地震工况。工况如下:工况1(GK1),天然工况(无地震波);工况2(GK2),水平地震波;工况3(GK3),竖向地震波;工况4(GK4),横-竖向地震波耦合作用。

4 危岩崩塌破坏模拟结果和分析

4.1 天然工况

如图4所示,天然工况下危岩只受重力作用,危岩在重力作用下应力-应变不断调整,产生临空向的变形,原有竖向卸荷裂缝宽度变大,但由于危岩优势结构面的内摩擦角大于结构面的倾角和黏聚力的作用,另外没有外荷载的扰动,危岩的应力-应变调整到一定程度后趋于稳定状态,危岩整体处于相对平衡状态。

4.2 地震工况

4.2.1 危岩破坏过程分析

3种地震工况下危岩崩塌破坏过程如图5所示,危岩在重力和地震荷载的共同作用下,危岩起初均是应力-应变调整,裂隙扩张,不断产生临空向变形,

原有竖向卸载裂缝不断扩大,最后倾覆力矩大于抗倾覆力矩时,危岩整体以软弱结构面临空向一侧的端部发生转动,从而发生崩塌破坏,不管地震波是

何种方式输入,危岩的破坏方式均是倾倒破坏,即在一定条件范围内,地震荷载不改变危岩崩塌破坏的类型。

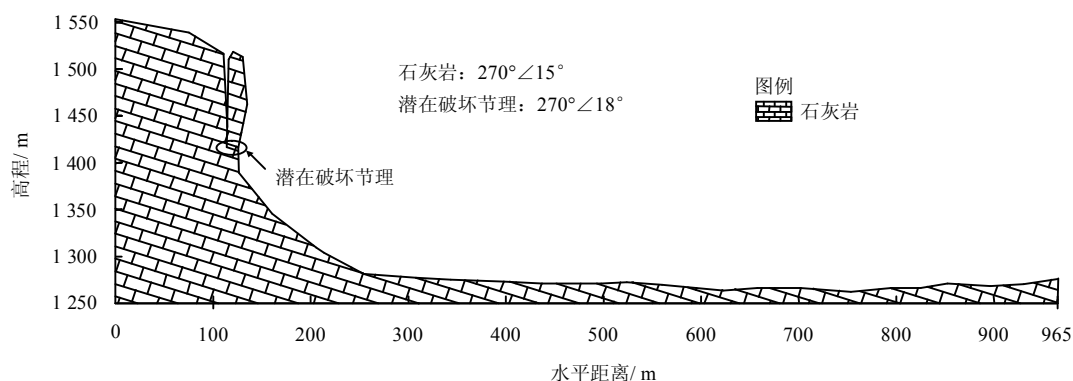


图1 概念危岩

Fig.1 A conceptual rock-fall



图2 概念危岩 DDA 计算模型

Fig.2 DDA model of the conceptual rock-fall

表1 模型控制参数

Table1 Control parameters of model

动力系数	单步允许最大位移率	时间步 /s	弹簧刚度 / GPa	超松弛系数	时步数
1.0	0.001	0.001	400	1.3	7×10^4

表2 模型物理参数

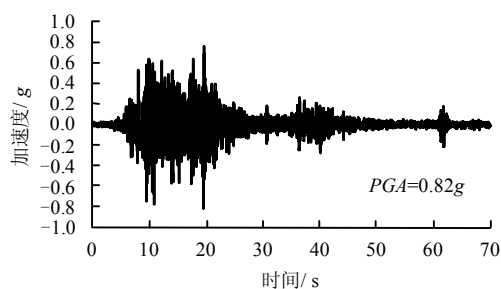
Table2 Physical parameters of model

材料	密度 ρ / (g/cm ³)	重度 γ / (kN/m ³)	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ
基岩	2.5×10^7	0	30	0.25
危岩	2.5	-25	30	0.25

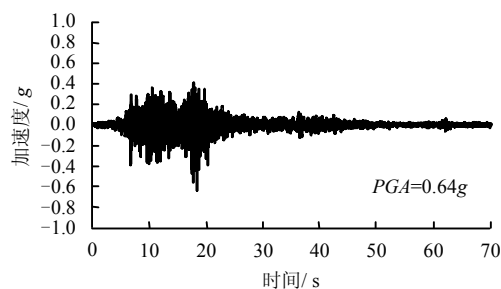
表3 模型节理参数

Table3 Joint parameters of model

节理	凝聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)	抗拉强度 / kPa
危岩体内节理	10 000	35	0
潜在破坏节理	50	20	0



(a) 水平加速度时程曲线



(b) 竖向加速度时程曲线

图3 地震加速度时程曲线(051MZQ 台站记录)
Fig.3 Time histories of acceleration in earthquake
(record by station 051MZQ)

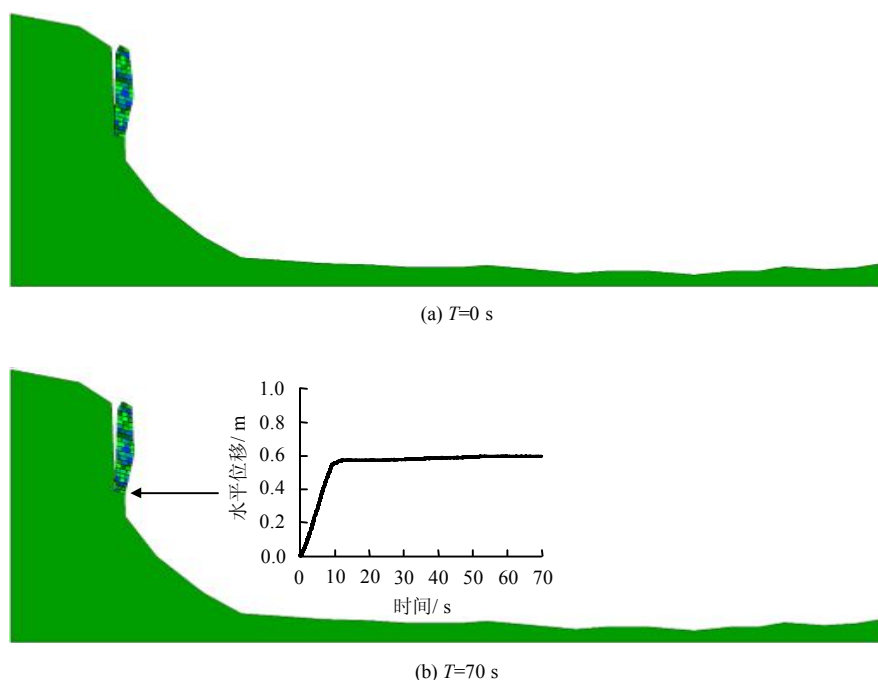


图4 天然工况下危岩变形情况

Fig.4 Deformation of rock-fall under natural condition without seismic loading

如图5所示,根据运动特点,危岩在3种不同的工况下,从稳定到破坏的运动过程可以分为3阶段:裂隙扩张贯通及危岩倾倒阶段、抛射阶段、停积阶段。危岩从稳定状态到脱离母岩之前的阶段称为裂隙扩张贯通危岩倾倒阶段,工况2、3、4下危岩在此阶段的作用时间分别为0~26.10、0~33.26、0~22.60 s,该阶段内危岩在重力和外荷载的共同作用下,裂隙扩展,不断向临空方向变形,最后当倾覆力矩大于抗倾覆力矩时,危岩整体以坡脚的某点为转点开始转动,从而导致危岩倾倒崩塌的发生。危岩脱离母体到坠落至坡体之前的阶段为危岩抛射阶段,工况2、3、4下危岩抛射阶段的运动时间分别为26.10~30.96、33.26~38.10、22.60~27.20 s,该阶段内危岩完全脱离母体后,只受重力作用,以一定的初始速度在空中坠落,此阶段中块体相对位置变化不大。停积阶段为危岩坠落到坡体至最后全部静止不动的运动阶段,此阶段内为危岩倾倒破坏的最后阶段,全部块体从运动到静止,大部分崩塌块体呈扇形倒石堆堆积在坡脚,只有少数几个块体脱离块体堆,运动距离较其他块体远很多。

4.2.2 崩塌块体运动特性分析

图6为监测块体1、2、3在3种地震工况下的水平位移和水平速度时程曲线。在水平位移时程曲线图中,监测块体的曲线形态总体呈先上凹,到达拐点处后下凹,但始终保持上升的形状,直到达到最大位置后保持水平。其中,拐点是指位移时程曲

线中凸凹转折点。拐点对应的水平位移值的含义是:在重力和地震荷载耦合作用下,危岩块体从裂隙扩张贯通、危岩整体倾倒、抛射、坠落至地表接触碰撞时的水平运动距离,文中将其定义为危岩块体的临空抛射距离。经分析发现,块体运动的水平位移与相对高程呈正相关,监测块体的相对高程越高,其临空抛射距离和最终水平位移就越大。模拟结果还发现,条件一定时,在一定范围内,地震波幅值越大,其临空抛射距离就越远。在工程实践中,临空抛射距离常常是评判落石影响范围的重要指标,其值愈大,其可能造成的损失就愈大。

在水平速度时程曲线图中,3种工况下监测块体的水平速度时程曲线有着相同的发展趋势。水平速度的大致变化过程包括:①加速上升阶段(上凹形);②阶梯状上升和下降阶段。水平速度加速上升阶段对应于危岩块体从裂隙扩张贯通、危岩整体倾倒到抛射前的过程。在重力和地震荷载耦合作用下,块体动能不断增大,同时由于裂隙贯通,块体运动所受阻碍作用减弱,块体水平运动速度加速增大;水平速度阶梯状上升和下降阶段对应于块体抛射、坠落及在地面运动的过程。其中阶梯中竖直向直线上升和下降代表的意义是块体在运动过程中与其他块体或地面相撞,造成水平速度瞬时增大或减小阶梯中水平向直线不变段代表的意义是块体在两相邻碰撞时间段内,水平速度保持不变。

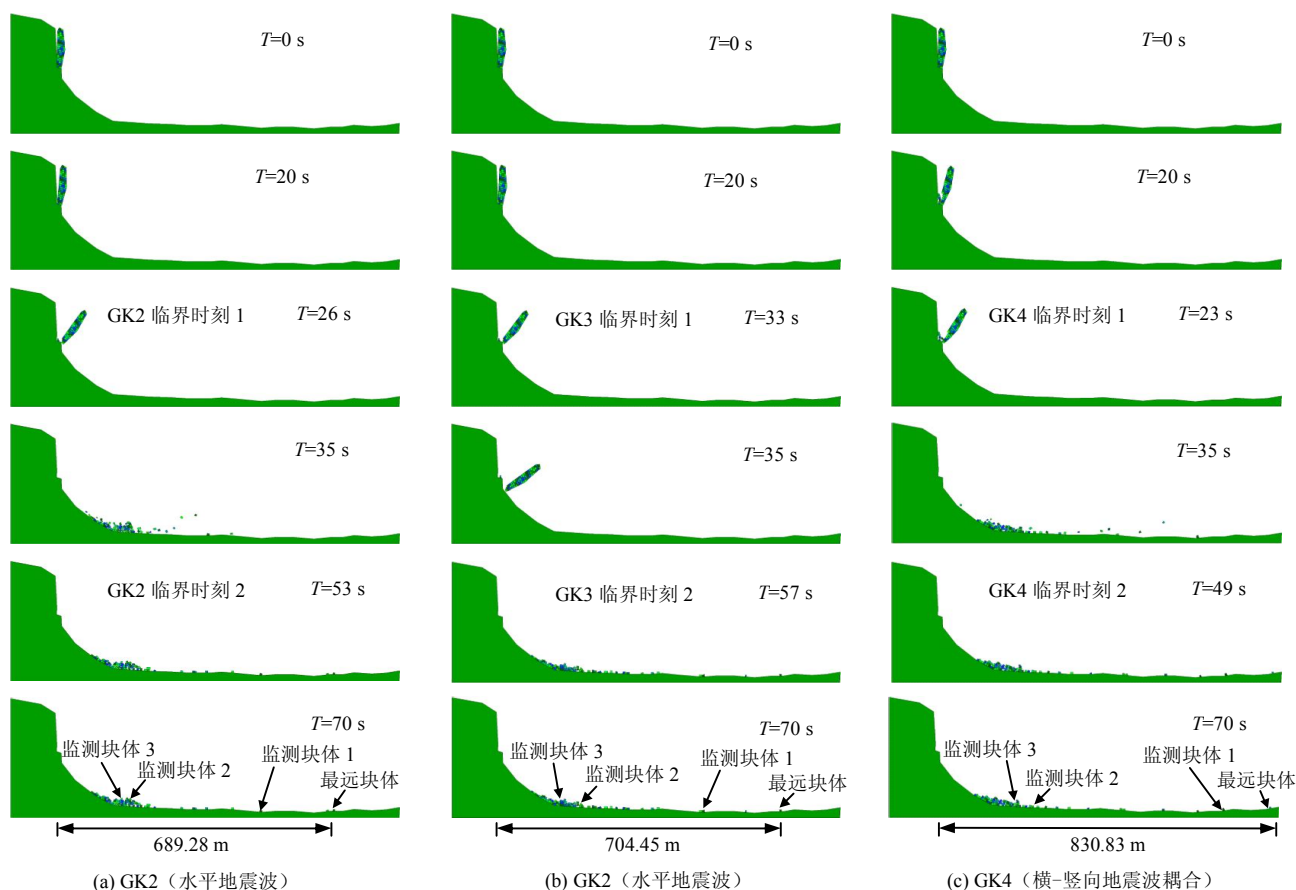


图5 不同地震工况下危岩崩塌破坏过程

Fig.5 Failure processes of perilous rock under different seismic conditions

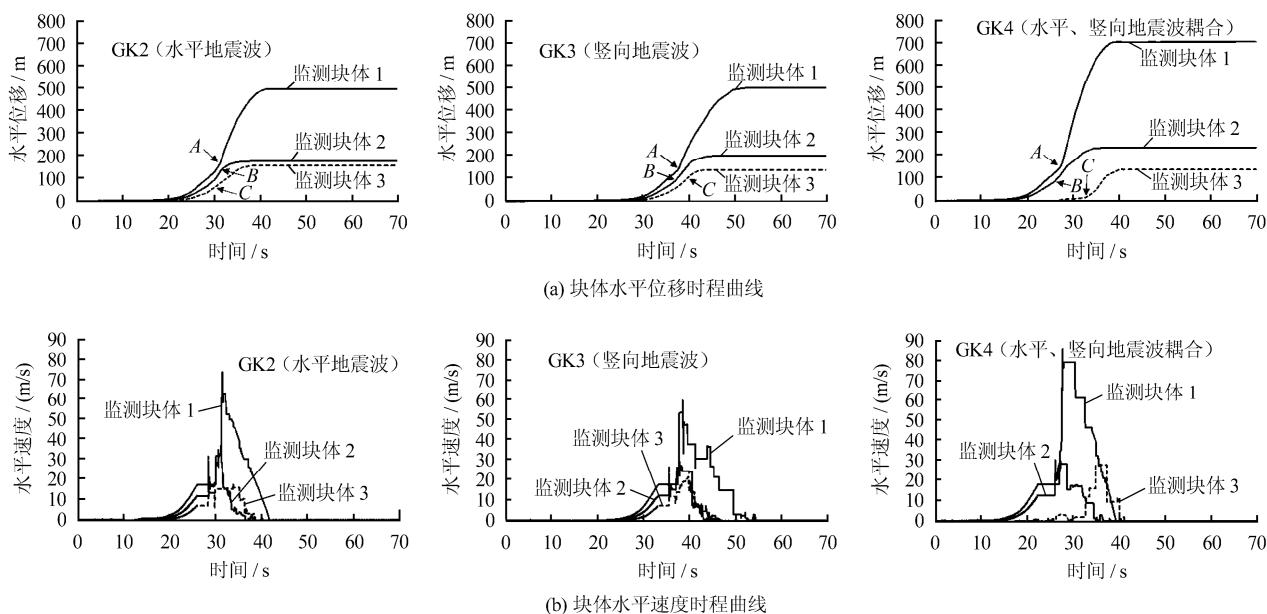


图6 不同地震工况下监测块体位移时程曲线和水平速度时程曲线

Fig.6 Time histories of velocity and displacement of three monitored blocks under different seismic loadings

4.2.3 不同地震工况崩塌块体运动特性对比分析

表4为概念危岩3种地震工况的计算结果,为评价崩塌块体的运动距离大小,使其具有普适性,在此定义位移比,其意义为崩塌落石块体的最终水

平位移和最终竖向位移之比。地震工况下崩塌块体位移比分别为1.01、1.07、1.10,明显大于非地震条件下的0.50^[21],可以看出,地震荷载不但促进危岩崩塌破坏的发生,而且也对崩塌块体的运动距离有

影响。这是因为危岩破坏前随地表不断震动获得能量,储备的能量在崩塌块体的运动过程中转化为动能,体现在崩塌块体的平均运动距离上。另外,危岩崩塌破坏后,块体的运动形式有滑动、滚动、坠落、碰撞,但碰撞是最主要的运动类型,崩塌块体下落过程中在与坡体碰撞的同时,地表在不停地震动,且坡体的质量远远大于崩塌块体的质量,因此,块体在与坡体进行碰撞的过程中仍不断地获得能量,从而与地表碰撞后被弹起的高度较大,运动距离较远。

表4 3种地震工况危岩破坏计算结果
Table 4 Calculation results of perilous rock under three seismic conditions

工况	脱离母岩时间 / s	最大水平位移 / m	平均水平位移 / m	最大位移比	最小位移比	平均位移比
GK2	26.10	684.53	189.93	2.89	0.68	1.01
GK3	33.26	699.70	204.64	2.96	0.69	1.07
GK4	22.60	826.08	205.90	3.51	0.71	1.08
$\frac{GK4-GK2}{GK2} / \%$	-13.4	20.6	8.4	21.5	4.4	6.9
$\frac{GK4-GK3}{GK3} / \%$	-32.1	18.1	0.6	18.6	2.9	0.9
$\frac{GK3-GK2}{GK2} / \%$	2.7	2.2	7.7	2.4	2.9	5.9

注:位移比=某块体的最终水平位移/最终竖向位移;最大位移比为所有崩塌块体最终水平位移与最终竖向位移之比的最大值;最小位移比为所有崩塌块体最终水平位移与最终竖向位移之比的最小值;平均位移比为所有崩塌块体最终水平位移与最终竖向位移之比平均值。

观察图5不同地震工况下危岩崩塌后的块体堆积情况,虽然大部分块体都是堆积在坡脚,部分块体运动至远处,但工况2与工况3、4相比,块体堆纵向延伸长度较小,脱离块体堆运动至较远处的块体数量较少。工况2、3、4下危岩脱离母岩破坏分别需要26.10、33.26、22.60 s,工况4破坏时间明显少于其他2种工况破坏所需时间;工况4下块体的最大水平位移分别较工况2、3增大20.6%和18.1%,其块体的平均水平位移为205.90 m,分别较工况2的189.93 m、工况3的204.64 m增大8.4%和0.6%,另外无论是块体最大位移比、最小位移比还是平均位移比,工况4的数值都是最大的,由此可见,危岩在工况4最容易发生破坏,破坏后崩塌块体的影响范围最大,可能的危害程度最高,是最值得注意的情况。

对比工况2、3计算结果,工况3虽然破坏时间较工况2多7 s,但破坏后块体的最大水平位移和块体的平均水平位移分别比工况2增大了2.2%和7.7%,再者块体的最大位移比、最小位移比以及平均位移比都大于工况2下的相应数值,由此可见,

在某些情况下竖向地震荷载对崩塌块体的影响程度大于水平向地震荷载对其的影响程度。类似现象之前也有发现,例如,崔芳鹏等^[22]研究北川唐家村斜坡体在地震纵-横波耦合作用下产生崩滑破坏时,发现地震纵波产生的竖向加速度对斜坡的崩塌破坏起到了优势破坏作用。近几十年来,人们监测世界范围内发生的主要地震,记录到许多不同寻常的显著竖向加速度,发现了大量强烈竖向地震动引起的震害现象,这种情况在5.12汶川地震中尤为突出。由此看来,人们平常所认为的竖向地震动的破坏程度小于水平向地震动的破坏程度在某些条件下是不太合理的,危岩体防护工程计算中主要考虑水平地震力的影响,而轻视竖向地震力的作用是不太妥当的。因此,在地震危岩崩塌防治措施的设计中,应给予竖向地震动足够地重视,只有这样,才能有效达到抗震设防和灾害防治的目的。

5 不同地震工况下的冲击力分析

在危岩崩塌防护工程中,确定崩塌块体对工程结构物的冲击力是评价崩塌灾害危害程度的前提和防护措施设计的基础,冲击力的大小决定着防护等级的高低,冲击力越大,防护等级越高,所需防护强度就越大。另外,冲击力的大小还是防护结构位置选择、尺寸选择以及材料选择等的重要参考指标。因此,为研究地震条件下崩塌块体的冲击力特性,在危岩体下发方即坡脚处增加一构筑物,如图7所示。

构筑物的水平应力是构筑物所受冲击力的反映,本文通过水平应力的变化来分析冲击力。由图8可知,3种不同地震工况下,构筑物的水平应力时程曲线有着大致相同的变化趋势,起初水平应力约为0,随着崩塌块体先后与构筑物进行碰撞,水平应力出现波动,并在此期间达到最大值,最后崩塌块体与构筑物相对静止,构筑物的水平应力趋于一恒定值,由于3种工况下崩塌块体最终堆积形态不同,构筑物最终水平应力略有差异。比较崩塌块体对构筑物的最大冲击应力与最终稳定时的应力,两者相差很大。对于防护结构而言,冲击过程中最大冲击力是防护措施安全与否的决定性因素,因此,地震崩塌防护设计时不但要注重崩塌块体最终稳定时对防护结构的作用力,更要重视最大冲击力的作用。

崩塌防护设计中,拟静力法是一种崩塌防护设计的重要手段,它往往用一种水平恒定力代替全部的地震荷载作用。比较图8中3种地震工况下的最

大水平应力, 工况 4 最大, 工况 3 次之, 工况 2 最小, 其中, 工况 4 的最大水平应力约是工况 2 的 2.3 倍, 由此看来, 用一简单的水平恒定力代替全部的地震力作用是不太合理的, 地震崩塌防护设计不但要重视水平地震荷载的作用, 更应综合考虑横-竖向地震耦合作用。

6 讨论

为了解模型块体大小对计算结果的影响程度,

将模型分别划分为 62 块和 89 块, 然后用同样的模型控制参数、物理参数以及节理参数对模型进行重新计算。图 9 和表 5 是不同块体数目情况下模型计算的结果, 由图可见, 无论是崩塌块体的最终停积形态还是最大水平位移、最小水平位移、平均水平位移都基本一致, 这说明当块体数目划分到一定数量后, 块体大小的划分对于计算结果的影响是很小的, 张迎宾等^[12]中也得到相似结论。另外, 增加模型块体数目会增加计算压力, 延长计算时间。



图 7 不同地震工况下冲击力研究模型

Fig.7 Research model of impact force under different seismic conditions

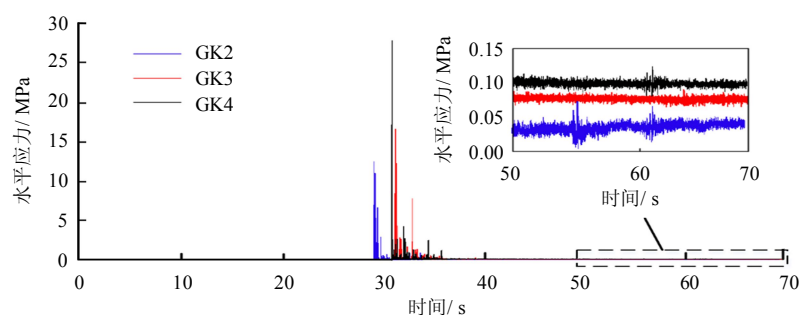


图 8 不同地震工况下构筑物水平应力时程曲线

Fig.8 Time histories of horizontal stress of structures under different seismic conditions

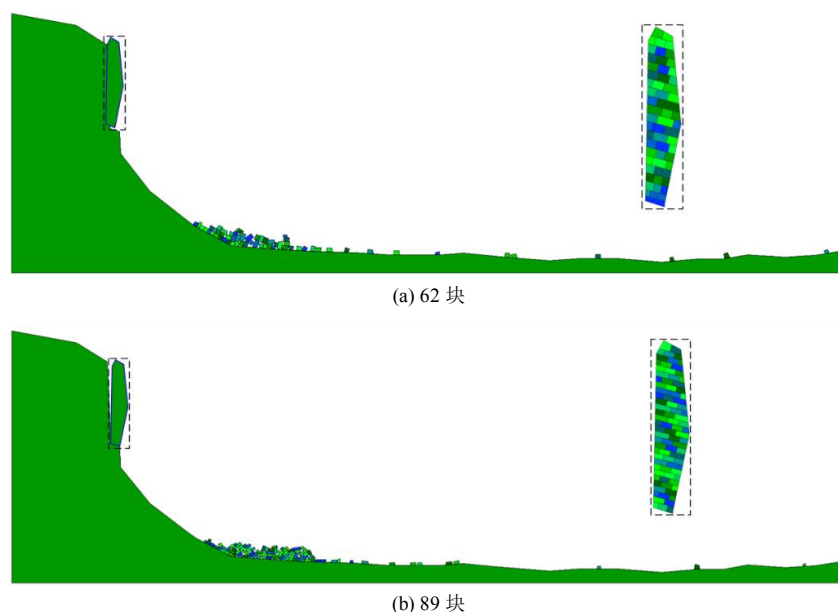


图 9 不同块体数目时崩塌模型计算结果简图

Fig.9 Result diagrams of models with different blocks

表5 不同块体数目时崩塌模型计算结果
Table 5 Results of models with different blocks

项目	崩塌块体最大 水平位移 / m	崩塌块体平均 水平位移 / m	崩塌块体 最大位移比	崩塌块体 平均位移比
M1	826.08	205.90	3.51	1.08
M2	801.05	203.47	3.43	1.08
$\frac{M1-M2}{M1} / \%$	3	1	2	0

注：M1 表示模型块体数目为 61 的情况；M2 表示模型块体数目 89 的情况；最大位移比为所有崩塌块体最终水平位移与最终竖向位移之比的最大值；平均位移比为所有崩塌块体最终水平位移与最终竖向位移之比的平均值。

7 结 论

(1) 本文概念危岩在天然工况下处于稳定状态，但在竖向地震波、水平地震波和横-竖向地震波耦合作用时均发生破坏，且破坏方式皆为倾倒式崩塌，说明地震荷载对危岩崩塌有促进作用，在一定条件下地震荷载的输入方式不改变危岩的破坏形式。

(2) 危岩倾倒崩塌破坏后，块体的水平位移时程曲线为先上凹后上凸最后水平的曲线形状，拐点位移和最终水平位移与高程存在着正相关的关系；水平速度时程曲线先增大最后减小为 0，其间因为坠落、碰撞、弹跳等原因，水平速度时程曲线会出现突变和阶梯形状。

(3) 地震崩塌块体运动距离较大，这是因为危岩破坏前随地表不断震动获得能量，储备的能量在崩塌块体的运动过程中转化为动能，体现在块体的平均运动距离上。另外，碰撞是崩塌块体最主要的运动形式，且崩塌块体的质量远远小于坡体的质量，崩塌块体与坡体碰撞过程中，崩塌块体仍然可以不断地从地面震动获得能量。

(4) 不同地震条件下的崩塌块体运动特性不同。其中，横-竖向地震波耦合作用时，崩塌块体运动距离最远，影响范围最大。

(5) 本文最大的亮点是通过对文中地震危岩崩塌算例的计算，从计算角度发现，竖向地震荷载对崩塌块体的影响程度甚至比水平地震荷载对其的影响程度还大，这与人们关于地震对危岩崩塌的传统认识不同。虽然此结论有待进一步验证和完善，但此种现象在实际工程中也越来越多地引起了人们的注意。为了达到灾害防治的目的，在地震危岩崩塌防治措施设计中，应引起注意并给予竖向地震动足够的重视。

(6) 最大冲击力是决定防护措施安全与否的控制性因素，地震崩塌防护设计不但要重视水平地震

荷载的作用，更应综合考虑横-竖向地震耦合作用。

致谢：本研究也得到了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开放基金资助项目(No.SKLG2014K015)和第 48 批教育部留学人员回国科研启动基金项目的支持，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 唐红梅. 群发性崩塌灾害形成机制与减灾技术[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
TANG Hong-mei. Developing mechanism and mitigation technique of massive collapse[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [2] 崔芳鹏, 殷跃平, 许强, 等. 地震纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑响应研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1266—1273.
CUI Fang-peng, YIN Yue-ping, XU Qiang, et al. Collapsing and sliding response of slopes triggered by single and combined action with time difference of P and S seismic waves[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(8): 1266—1273.
- [3] 胡厚田. 崩塌与落石[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
HU Hou-tian. Collapse and rockfall [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989.
- [4] 唐红梅, 易朋莹. 危岩落石运动路径研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(1): 17—23.
TANG Hong-mei, YI Peng-ying. Research on calculation method of volley-unstable rock retaining wall[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 2003, 25(1): 17—23.
- [5] 裴向军, 黄润秋, 裴钻, 等. 强震触发崩塌滚石运动特征研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 498—504.
PEI Xiang-jun, HUANG Run-qiu, PEI Zuan, et al. Analysis on the movement characteristics of rolling rock on slope caused by intensive earthquake[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2011, 19(4): 498—504.
- [6] 程强, 苏生瑞. 汶川地震崩塌滚石坡面运动特征[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 772—776.
CHENG Qiang, SU Sheng-rui. Movement characteristics of collapsed stones on slopes induced by Wenchuan earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(3): 772—776.
- [7] 黄润秋, 刘卫华, 周江平, 等. 滚石运动特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1296—1302.
HUANG Run-qiu, LIU Wei-hua, ZHOU Jiang-ping, et al. Rolling tests on movement characteristics of rock blocks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1296—1302.

- [8] 郭爱清, 冯细霞, 卢波. 非连续变形分析中时间步及弹簧刚度取值研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 891—897.
WU Ai-qing, FENG Xi-xia, LU Bo. Parametric research on time step and spring stiffness in DDA [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 891—897.
- [9] ZHENG L, CHEN G Q, LI Y G, et al. The slope modeling method with GIS support for rockfall analysis using 3D DDA[J]. **Geomechanics and Geoengineering: An International Journal**, 2014, 9(2): 142—152.
- [10] ZHANG Y B, XU Q, CHEN G Q, et al. Extension of discontinuous deformation analysis and application in cohesive-frictional slope analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2014, 70(10): 533—545.
- [11] ZHANG Y B, XING H, CHEN G Q, et al. Engineering geology for society and territory[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
- [12] ZHANG Y B, WANG J M, XU Q, et al. DDA validation of the mobility of earthquake-induced landslides[J]. **Engineering Geology**, 2014, 194: 38—51.
- [13] ZHANG Y B, CHEN G Q, ZHANG L, et al. Effects of near-fault seismic loadings on run-out of large-scale landslide: A case study[J]. **Engineering Geology**, 2013, 166(11): 216—236.
- [14] SHI G H. Discontinuous deformation analysis a new numerical model for the statics and dynamics of block systems[D]. California: University of California, 1988.
- [15] KAMAI R, HATZTOR Y H. Numerical analysis of block stone displacements in ancient masonry structures a new method to estimate historic ground motion[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2008, 32(11): 1321—1340.
- [16] NISHIYAM S, OHNISHI Y, YANAGAWA T, et al. Study on stability of retaining wall of masonry type by using discontinuous deformation analysis[C]// Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS. Rotterdam: Millpress, 2004.
- [17] HATZTOR Y H, FEINTUCH A. The validity of dynamic block displacement prediction using DDA[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(4): 599—606.
- [18] WU J H. Seismic landslide simulations in discontinuous deformation analysis[J]. **Computers and Geotechnics**, 2010, 37(5): 594—601.
- [19] 中华人民共和国建设部. GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
The Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50011-2001 Code for seismic design of building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [20] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊, 等. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
GU Xiao-lu, QIAN Hong-jin, LIU Hui-shan, et al. Ground and foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [21] 袁志辉. 延长县崩塌的数值模拟和运动机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
YUAN Zhi-hui. Numerical simulation and movement mechanism of collapse In the Yanchang county [D]. Xian: Chang'an University, 2008.
- [22] 崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应离散元分析——以北川唐家山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 319—327.
CUI Fang-peng, HU Rui-lin, YIN Yue-ping, et al. Discrete element analysis of collapsing and sliding response of slope triggered by time difference coupling effects of P and S seismic waves: Taking Tangjiashan landslide in Beichuan county for example[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 319—327.

上接第 582 页

- [16] 刘晓燕, 赵军, 石成, 赵波. 土壤恒温层温度及深度研究[J]. 太阳能学报, 2007, (5): 494—498.
LIU Xiaoyan, ZHAO Jun, SHI Cheng, et al. Study on soil layer of constant temperature[J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**, 2007, (5): 494—498.
- [17] 奥兰多·B·安德斯兰德, 布兰科·洛达尼. 冻土工程[M]. 杨让宏, 李勇, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Orlando·B·Anderslander, Blanco·ladany. Permafrost engineering[M]. Translated by YANG Rang-hong, LI Yong. Beijing: China Building Industry Press, 2011.
- [18] 杨小利, 王劲松. 西北地区季节性最大冻土深度的分布和变化特征[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 238—243.
YANG Xiao-li, WANG Jing-song. The change characteristics of maximum frozen soil depth of seasonal frozen soil in northwest China[J]. **Chinese Journal of Soil Science**, 2008, 39(2): 238—243.
- [19] 高大钊, 袁聚明. 土质学与土力学[M]. 第 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2004.
GAO Da-zhao, YUAN Ju-ming. Soil mechanics and soil science[M]. Third edition. Beijing: China Communications Press, 2004.