

文章编号: 1008-2786-(2015)1-81-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000011

# 西北某坝肩变形体成因机制的离散元数值模拟

吴龙科<sup>1</sup>, 任光明<sup>1</sup>, 郑秀红<sup>1</sup>, 陈超<sup>1</sup>, 沈启香<sup>2</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 王海涛<sup>2</sup>

(1. 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;

2. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院 陕西 西安 710065)

**摘 要:** 通过对西北某坝肩边坡勘探平硐的现场调查,综合分析边坡的基本特征、岩体结构特征、坡体结构特征、变形破坏特征,认为坡体为形成年代比较久远的变形体,在自重的作用下坡体发生缓慢的变形,地震的作用加速了坡体的变形,从而形成了现今的变形体,但坡体未发生整体的失稳。由于坡体变形年代比较久远,故采用离散元数值模拟对其成因机制进行研究。研究表明:自重作用下坡体有沿缓倾坡外层面缓慢滑移变形的趋势,在地震荷载的作用下最终诱发边坡发生比较大的变形。坡体在变形过程中经历了启动、高速变形和自稳 3 个阶段,在启动阶段坡肩位置首先出现拉张裂缝,然后坡体中部出现变形,最后坡脚位置剪出。通过坡体中监测点加速度、速度的研究发现随着高程的增加坡体的加速度、速度放大系数明显增加。

**关键词:** 地震; 顺层岩质边坡; 成因机制; 离散元数值模拟

**中图分类号:** P642.2, TU457

**文献标志码:** A

层状岩质边坡在自然界存在十分广泛。由于层面的存在,很大程度上降低了坡体自身的稳定性,在自重和外力作用下易发生变形破坏。本文研究的变形体位于西北某拟建水库左坝肩位置,坡体层面缓倾坡外,变形体的存在对水库的施工和后期的运营存在一定的威胁,故有必要对变形体的成因机制进行研究。

地震诱发边坡失稳的机制许多学者做过研究。郝建斌等通过室内振动试验,揭示了层状岩质边坡在受到动力扰动下的变形与破坏特征<sup>[1]</sup>;董金玉等通过大型振动台模型试验研究了地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式<sup>[2]</sup>;王来贵等通过有限元模拟了单一弱面斜坡强震作用下的拉张破裂过程<sup>[3]</sup>;郑颖人等采用 FLAC 动力强度折减法,结合具有拉和剪切破坏分析功能的 FLAC<sup>3D</sup> 软件对地震边坡破坏机制进行数值分析<sup>[4]</sup>。此外,国内许多学者通过模型试验对不同激震方向、不同波形、不同频率、不同振幅的地震波诱发的不同类型边坡的变形破坏模式、动力响应特征等进行了研究<sup>[5-10]</sup>。

以上方法中模型试验对于坡体运动规律的监测存在较大的误差,而有限单元法和有限差分法又受到介质连续的局限,故本文在定性分析的基础上,用离散单元法对边坡的变形破坏机制进行模拟。

## 1 变形体基本特征和成因

### 1.1 变形体的基本特征

变形体整体呈上小下大的“伞”形(图 1),前缘高程为 2 115 m,后缘高程 2 450 m,前后高程差 335 m,变形体平均坡度介于 28°~34°。变形体横向长 260~280 m,纵向长 320~570 m(图 2)。根据钻孔及平硐资料,变形体厚度介于 24~77 m,变形体平均厚度 45 m,总体积约  $715 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

岩层产状为 NW295°NE $\angle$ 25°~30°。通过对平硐中结构面精测,变形体中发育 5 组优势结构面:① 7°~28°/SE $\angle$ 7°~28°,主要分布在上游侧边界、变形体前缘。② 307°~344°/NE $\angle$ 68°~86°,主要分布在变形体中部、上游侧边界。③ 309°~45°/NE~NE

收稿日期(Received date): 2014-04-02; 改回日期(Accepted): 2014-05-22。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41072229)。[Supported by National Nature Science Foundation of China(41072229).]

作者简介(Biography): 吴龙科(1987-),男,在读硕士,工程地质专业[Wu Longke, master degree candidate, major in engineering geology.] E-mail: wulongke1202@163.com

$\angle 22^{\circ} \sim 47^{\circ}$ , 下游侧边界分布较多。④ $58^{\circ} \sim 66^{\circ} / \text{SE}$   $\angle 53^{\circ} \sim 72^{\circ}$ , 主要分布在变形体前缘。⑤ $32^{\circ} \sim 11^{\circ} / \text{NE} \sim \text{SE} \angle 45^{\circ} \sim 52^{\circ}$ , 坡体中部分布较多(图3)。

通过对边坡的现场调查,变形体上发育3条规模较大的冲沟,生长有直径约1 m的树木,且地表裸露的岩石风化比较严重,查阅相关河谷下切的资料、树木生长速度、岩石风化速率,认为变形体形成年代比较久远。由于很难单独通过地表的变形破坏现象来查明变形体的边界,故边界主要结合勘探平硐和钻孔资料确定。变形体的结构比较特殊,表部1~10 m发育崩坡积的块碎石土,2~60 m薄层状-中

厚层状、碎裂结构-镶嵌结构岩体比较发育,原岩的层面保留比较完整。55~75 m散体结构的岩体和碎石土比较发育,为变形体形成过程中的研磨挤压带。向内为岩体结构比较完整的基岩。

通过勘察平硐的调查,坡体表部0~40 m平硐中的支撑架空现象比较明显,局部未支护的平硐硐顶发生坍塌,坍塌高度最大可达3 m。坡体表部岩体层状结构保存比较好,层间的挤压错动带发育,且产状主要以 $34^{\circ} \sim 85^{\circ} \angle 21^{\circ} \sim 66^{\circ}$ 为主,个别平硐中坡体追踪倾外的结构面拉裂架空。边坡坡脚发育有变形体发生变形破坏形成的松散堆积物(图4)。

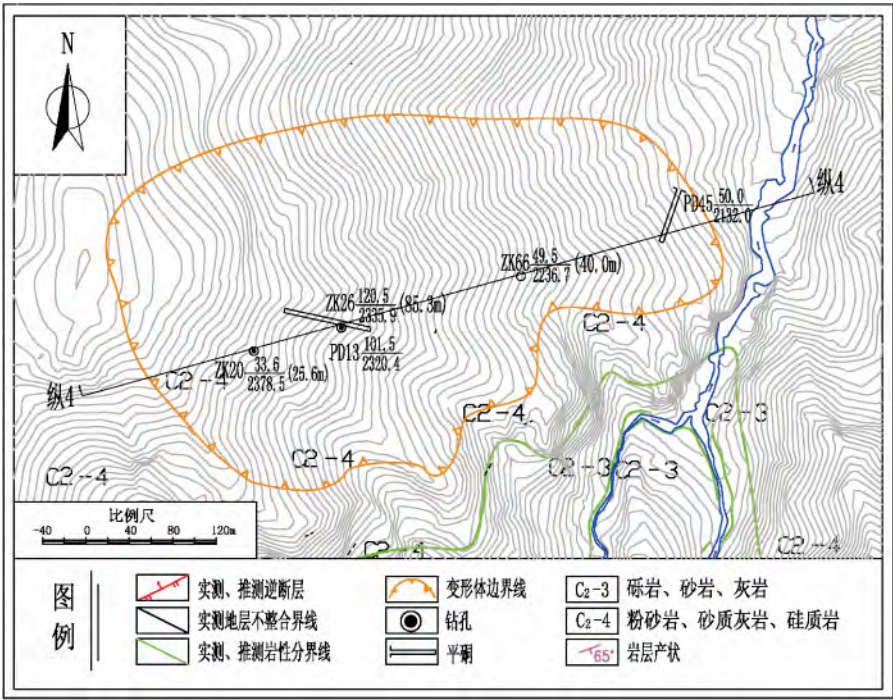


图1 变形体平面图

Fig. 1 Plan geological Sketc of deforming slope

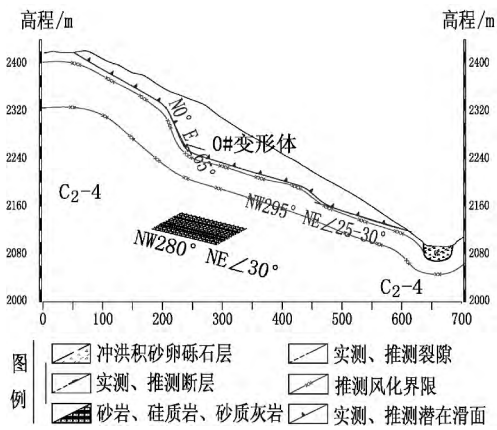


图2 变形体纵4工程地质剖面图

Fig. 2 Geological section of deforming slope

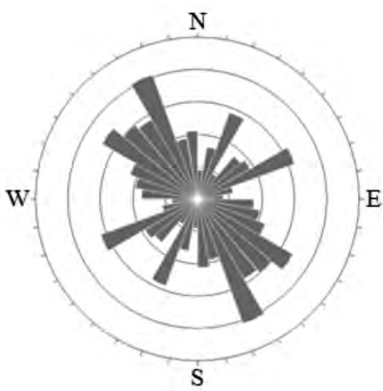


图3 上水库库坝区岩体裂隙玫瑰花图

Fig. 3 Trend rose diagram of deforming slope

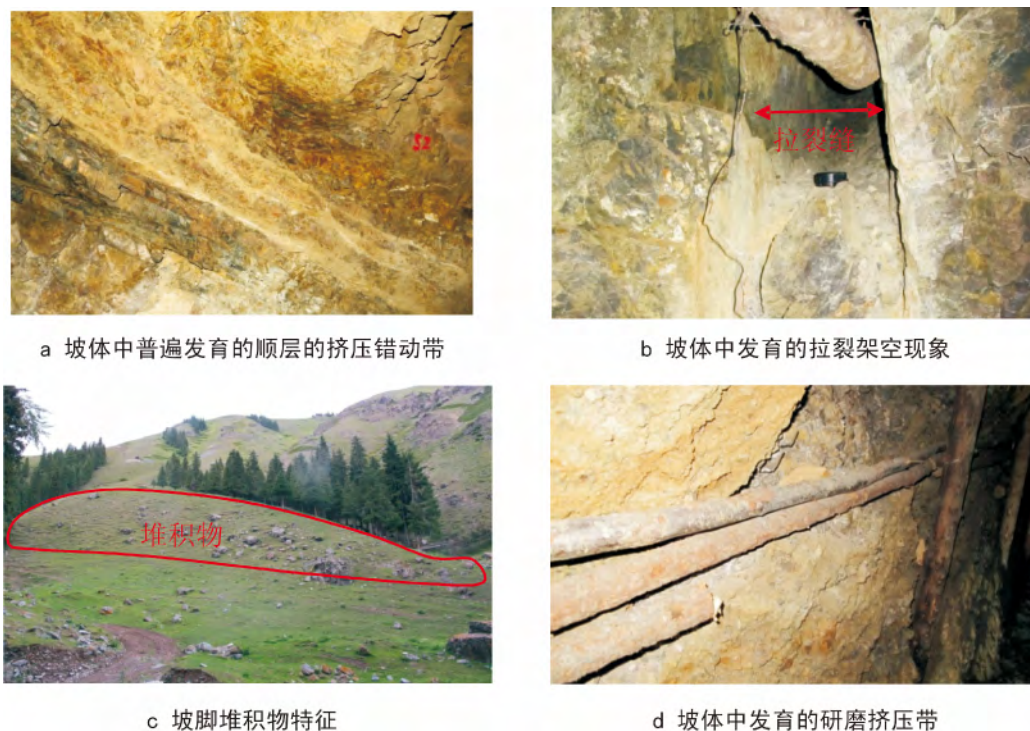


图4 坡体变形破坏特征

Fig.4 The deformation of deforming slope

## 1.2 变形体的成因机制

通过对坡体的地貌、边界特征、结构特征、变形破坏特征的现场调查,认为变形体的成因机制如下。

1. 应力重分布阶段: 通过前面对库坝区优势断裂的调查,说明历史上该地区受到 NE 向的构造应力的作用,产生了  $307^{\circ} \sim 344^{\circ}/NE \angle 68^{\circ} \sim 86^{\circ}$  组结构面,后期河谷下切速度比较快,形成了陡立的地形,为坡体变形创造了较好的临空条件。

2. 缓慢变形阶段: 在自重的作用下,边坡沿着缓倾外的层面、软弱结构面 ( $NW295^{\circ}NE \angle 25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ) 缓慢的滑移,同时追踪陡倾外的裂隙、软弱结构面 ( $N0^{\circ}E \angle 65^{\circ}$ ) 拉裂,直到坡体内部应力产生新的平衡,此阶段边坡变形比较小,没有产生大的变形,但在外力的作用下存在整体失稳的可能。

3. 地震诱发阶段: 根据现场调查研究,岩层倾角较缓,在自重条件下整体变形的可能性小,分析认为边坡最终在地震的诱发下,边坡沿着缓倾外的层面、软弱结构面滑移,追踪陡倾外的裂隙、软弱结构面拉裂,产生大的变形,形成现有的变形体。

## 2 边坡变形机制数值模拟

### 2.1 离散元模型的建立

根据变形体周围地貌恢复变形前地形,建立模型。计算中对模型进行概化,材料参数主要分为强风化和弱风化两种,通过对变形体中勘探平硐的研究,控制边坡变形的两组结构面分别为:缓倾外的层面 ( $NW295^{\circ}NE \angle 25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ),陡倾外的软弱结构面 ( $N0^{\circ}E \angle 65^{\circ}$ ),详见图2。故模型中结构面主要生成了一组倾外  $25^{\circ}$  的层面和一组倾外  $65^{\circ}$  的裂隙(图5)。

#### 2.1.1 材料参数及边界条件的选取

根据勘察单位现场平硐的抗剪(断)实验、岩体变形实验,工程类比和经验相结合的方法,确定了本边坡的岩体物理力学参数和岩体结构面的力学参数(表1、2)。

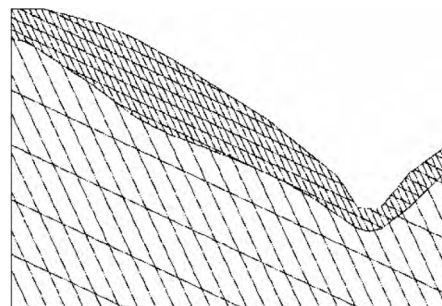


图5 变形体数值模拟概念模型

Fig.5 The concept model of deformed slope



表 1 变形体边坡结构面力学参数  
Table 1 Mechanical parameters of structural planes

结构面 类型	法向刚度 Normal stiffness	剪切刚度 Shear stiffness	内摩擦角 Internal friction angle/°	粘聚力 Cohesion / MPa	抗拉强度 Tensile strength / MPa
Structural surface	/( GPa/m)	/( GPa/m)			
层面	2.32	1.73	38	0.23	0.41
裂隙	1.81	0.92	32	0.18	0.02

表 2 变形体边坡岩体物理力学参数  
Table 1 Physico-mechanical parameters of slop rock mass

风化 类型	天然密度 Natural density	粘聚力 Cohesion	内摩擦角 Friction angle/°	体积模量 Bule modulus	剪切模量 Shear modulus/GPa
Weathering	/( Kg/m <sup>3</sup> )	/MPa		/GPa	
强风化	2500	0.36	32	2.78	32
弱风化	2650	1.56	55	5.94	5.91

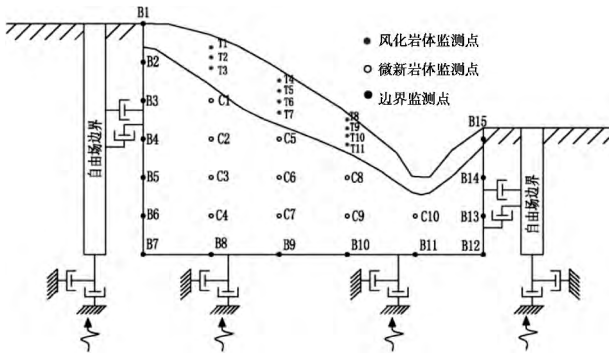


图 6 模型监测点及边界条件效果图  
Fig.6 Numerical model and distribution of monitoring points of deforming slope

2.1.2 边界条件的建立

在静力计算的过程中,边界条件的设置与一般的有限元计算边界条件相同。由于在动力分析中,计算模型的区域边界有可能造成外传波的反射,给数值分析结果的准确性造成一定影响。本次模拟中在模型四周生成自由场边界,主体网格的侧边界通过阻尼器与自由场网格进行耦合,自由场网格的不平衡力施加到主体网格的边界上。由于自由场边界提供了与无限场地相同的效果,因此向上的面波在边界上不会产生扭曲。模型底部使用粘滞边界。同时在坡体中设置监测点,监测坡体中加速度、速度的变化情况(图6)。

2.1.3 地震动力条件的输入

据门玉明、彭建兵、许强等学者的研究结论,水

平地震力对层状岩质边坡造成的危害是主要的<sup>[11-12]</sup>。故本次数值模拟不考虑竖直方向的动力荷载,仅考虑水平方向的动力荷载。综合考虑各种因素本次计算模型底部输入的动力荷载采用“5·12”汶川地震时离变形体较近的文县台网监测到的地震波。地震的加速度时程曲线如图7所示。

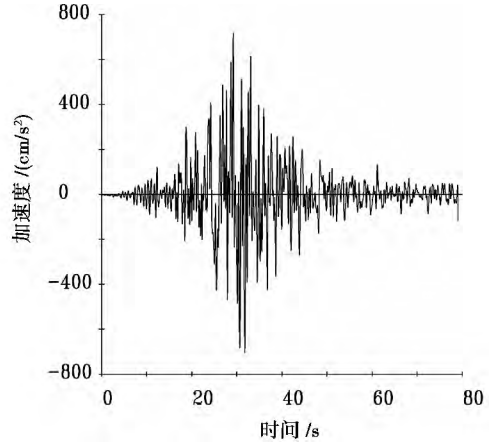


图 7 施加在模型底部的加速度时程曲线  
Fig.7 Time-history curves of horizontal velocities input in numerical model

2.2 数值模拟结果分析

2.2.1 自重作用下边坡数值模拟结果

图8~9分别为最大不平衡力曲线和位移矢量图,计算结束后坡体水平最大位移为80 cm,变形较小,且多集中在坡体上部,变形主要表现为沿缓倾层面的缓慢滑移和陡倾结构面的微小拉裂,计算结果与定性分析一致。

2.2.2 地震作用下边坡数值模拟结果

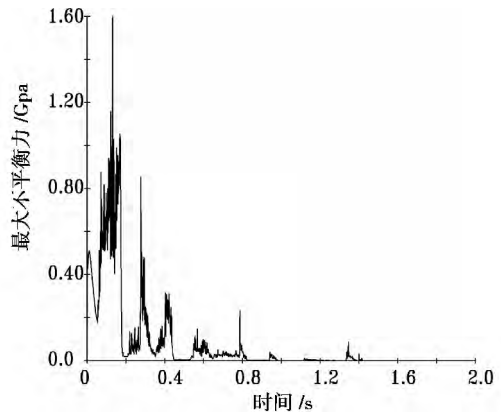


图 8 自重条件下最大不平衡力曲线  
Fig.8 Variation of the maximum unbalanced force with time under gravity

### 1. 最大不平衡力检验

通过离散元程序监测模型的最大不平衡力和底部边界的加速度、速度时程曲线后发现,最大不平衡力在地震结束后120 s内逐渐收敛(图10),底部边界输出的速度、加速度时程曲线与输入的地震速度时程曲线形态基本吻合,故计算收敛,动力条件输入正确,变形体实际的变形情况和数值模拟结果一致,故计算结果正确。

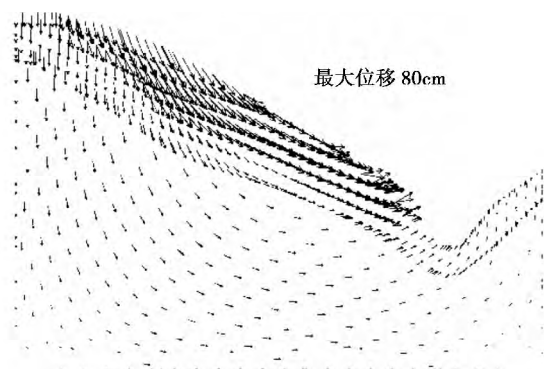


图9 计算收敛后模型位移矢量图

Fig. 9 The displacement vector of numerical model after convergence

### 2. 地震作用下坡体变形特征

图11为模型单元运动状态图,通过对模型动力条件下计算结果的分析,0~10 s主要为模型运动的启动阶段,在此阶段坡体震裂、松弛解体。启动阶段坡肩位置首先发生拉裂,分析认为,由于边坡高陡,地形放大效应比较明显,坡肩有比较大的地震加速

度,故首先发生破坏。随着地震荷载的继续,变形进一步向坡体中部延伸,坡体中上部出现拉裂架空现象。10~80 s随着边坡的松动和地震加速度的增加,开始进入高速变形阶段,坡体变形速率加大,同时地表岩体松动脱落,并在坡脚堆积,形成地表的松散堆积体。80~120 s随着地震荷载的结束,坡体碰撞堆积进入自稳阶段,模型收敛计算结束。整个过程边坡没有形成贯通的滑面,未发生整体的失稳。变形体形成之后由于地表径流等作用,坡体发育几条规模比较大的冲沟,坡体形态发生很大改变(图4),很难单独通过地貌形态判断变形体的基本特征。

### 3. 速度加速度放大效应

通过对比输入加速度速度时程曲线,得到T1~C4的加速度、速度放大系数如表3所示。监测点C3~

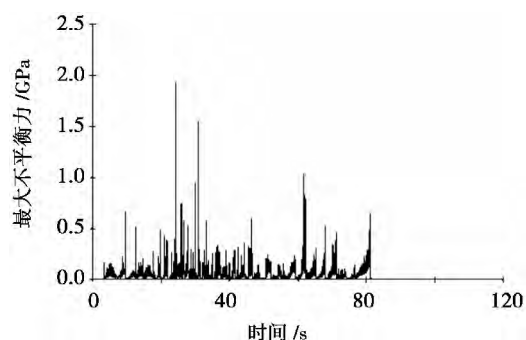


图10 地震条件模型最大不平衡力曲线

Fig. 10 Variation of the maximum unbalanced force with time under seismic loading

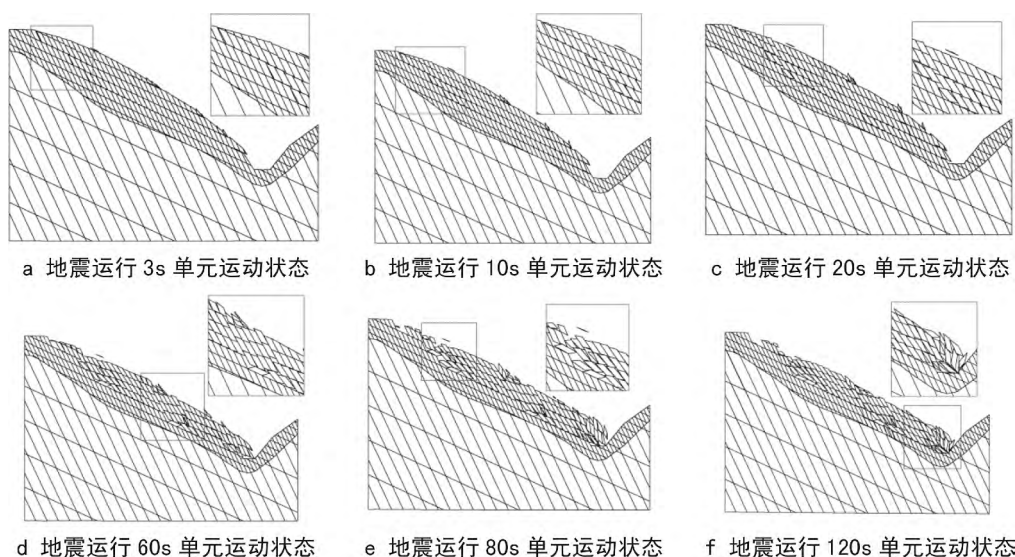


图11 模型单元运动状态图

Fig. 11 Movement states of deformation element at different running time of numerical model

C4 的水平向加速度和速度时程曲线如图 12 ~ 13 所示。

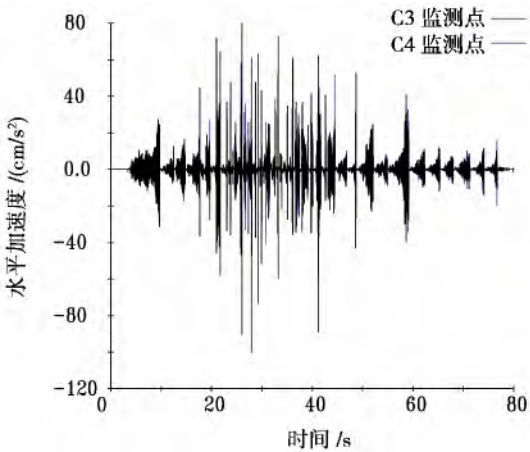


图 12 监测点水平加速度程曲线  
Fig. 12 Time-history curves of acceleration of monitoring point C3 and C4

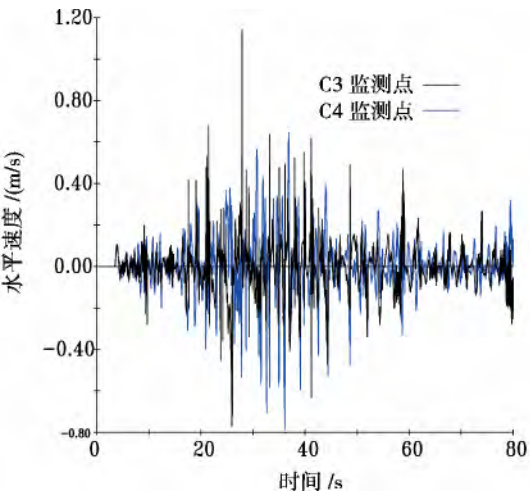


图 13 监测点水平速度时程曲线  
Fig. 13 Time-history curves of velocity of monitoring point C3 and C4

表 3 T1 ~ C4 加速度速度放大系数

Table 3 Amplification factors of velocity and acceleration of monition points T1 ~ C4

监测点号 Monitoring point No.	h/H	加速度放大系数 Acceleration amplification factor		速度放大系数 Velocity amplification factor	
		水平 Level	竖向 Vertical	水平 Level	竖向 Vertical
T1	1.00	3.00	2.00	3.17	2.33
T2	0.97	2.88	1.93	3.00	2.25
T3	0.94	2.75	1.85	2.75	2.00
C1	0.72	1.69	1.81	2.17	1.58
C2	0.54	1.56	1.75	1.83	1.50
C3	0.36	1.44	1.63	1.17	1.25
C4	0.18	1.13	1.63	1.00	1.00

从表 3 可以看出 ,坡体中加速度和速度的放大效应比较明显 随着高程的增加 ,加速度、速度放大系数呈递增的趋势。这种地形放大效应有力的解释了坡肩位置首先出现比较大的拉裂变形 ,随着高程的增加变形破坏显著增加这一现象。

3 结论

结合实际调查资料 ,利用离散元数值模拟 ,对西北某抽水蓄能电站左坝肩变形体形成机制全过程进行了模拟 ,得到以下主要认识:

1. 在沟谷岸坡形成演化过程 ,受临空条件及坡体内软弱结构面的控制 ,岩体在自重作用下有沿层间弱面发生向下游方向缓慢滑移变形的趋势。
2. 动力计算中边坡在地震的诱发下 ,沿顺层的夹层断层或者挤压带发生滑移变形 ,在坡肩追踪陡倾坡外的结构面发生拉裂变形 ,整体呈滑移 - 拉裂特征。
3. 坡体在滑动过程中经历了启动、高速变形、和自稳 3 个阶段 ,且启动阶段坡肩首先出现拉张裂缝并在坡表一定深度内向下发展贯通 ,然后坡面中部出现裂缝 ,最后坡脚位置剪出。
4. 沿一竖直剖面 ,随着高程的增加坡体加速度和速度的放大系数呈现递增的趋势 ,加速度和速度放大效应比较明显 ,变形体变形破坏过程的模拟很好的验证了这一点。

参考文献( References)

[1] Hao Jianbing ,Men Yuming ,Peng Jianbing. Research on dynamic stability [J]. Rock and Soil Mechanical 2005 22( 6) : 72 ~ 75 [郝建斌 ,门玉明 ,彭建兵. 层状岩体边坡动力稳定性模型试验研究 [J]. 公路交通科技 2005 22( 6) : 72 ~ 75]

[2] Dong Jinyu ,Yang Goxiang ,Wu Faquan ,et al. The large-scale shaking table test study of dynamic response and failure mode of bedding rock slop under earthquake [J]. Rock and Soil Mechanical , 2009 32( 10) : 2977 ~ 2983 [董金玉 ,杨国香 ,伍法权 ,等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究 [J]. 岩土力学 2009 32( 10) : 2977 ~ 2983]

[3] Wang Laigui ,Zhao Na ,Li Tianbin ,et al. Finite element simulation of collapse and sliding of slop with signal weak plane induced by strong earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and engineering. 2009 28( Suppl. 1) : 3163 ~ 3167 [王来贵 ,赵娜 ,李天斌 ,等. 强震诱发单一弱面斜坡塌滑有限元模拟 [J]. 岩石力学与工程学报 2009 28( 增 1) : 3163 ~ 3167]

[4] Zheng Yingren ,Ye Hailin ,Huang Runqiu. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slop under earthquake

- [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2009 28 (8): 1714 – 1723 [郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (8): 1714 – 1723]
- [5] Cui Fangpeng, Hu Ruilin, Yin Yaoping. Numerical simulation of slop collapsing and sliding due to single or combined actions of seismic P – and – S waves with time difference [J]. Journal of Engineering Geology. 2009, 17(4): 455 – 462 [崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 地震纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应研究 [J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 455 – 462]
- [6] Be Zhongwei, Zhang Ming, Jin Feng, et al. Dynamic response of slops under earthquakes [J]. Rock and Soil Mechanics. 2009, 30 (Suppl. 1): 180 – 183 [毕忠伟, 张明, 金峰, 等. 地震作用下边坡的动态响应规律研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(增1): 180 – 183]
- [7] Liu Hanxiang, Xu Qiang, Fan Xuanmei. Effects of seismic parameters on acceleration responses of slopes [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(2): 441 – 447 [刘汉香, 许强, 范宣梅. 地震动参数对斜坡加速度动力响应规律的影响 [J]. 地震工程与工程震动, 2012, 32(2): 441 – 447]
- [8] Liu Hanxiang, Xu Qiang, Fan Xuanmei, et al. Influence of ground motion intensity on dynamic response laws of slope accelerations [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1357 – 1365 [刘汉香, 许强, 范宣梅, 等. 地震动强度对斜坡加速度动力响应规律的影响 [J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1357 – 1365]
- [9] Seed H B, Clough R W. Earthquake resistance of sloping core dam [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1963, 89(1): 209 – 241
- [10] Kuhlem R L, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problem [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973, 99(5): 421 – 417
- [11] Men Yuming, Peng Jianbing, Li Xunchang, et al. Research on vibration testing of models for dynamic stability of rock slope with layered structures [J]. World earthquake engineering, 2004, 20(4): 0131 – 0136 [门玉明, 彭建兵, 李寻昌, 等. 层状结构岩质边坡动力稳定性试验研究 [J]. 世界地震工程, 2004, 20(4): 131 – 136]
- [12] Hou Hongjuan, Xu Qiang, Liu Hanxiang, et al. Dynamic response characteristics of horizontal slopes subjected to seismic ground motions in different directions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(2): 0214 – 0220 [侯红娟, 许强, 刘汉香, 等. 不同方向地震动作用下水平层状边坡动力响应特性 [J]. 地震工程与工程震动, 2013, 33(2): 214 – 220]

## Formation Mechanism of the Deforming Slope in Left Dam Abutment of a Hydroelectric Power Station in Northwest China with and Discrete Element Simulation Method

WU Longke<sup>1</sup>, REN Guangming<sup>1</sup>, ZHENG Xiuhong<sup>1</sup>, CHEN Chao<sup>1</sup>,  
SHENG Qixiang<sup>2</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, WANG Haitao<sup>2</sup>

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

2. Northwest Investigation & Design Research Academy, State Power Corporation, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Through the investigation of deformed slope in left dam in northwest china by Exploration adits, the article research the basic characteristics, rock mass structure characteristics, structural characteristics of slope, deformation characteristics of slop. Come to a conclusion that the deformed slop formed for a long time. The deformation occurs slowly in the action of gravity, then, Earthquake accelerated the deformation of slop. Thus the deformed slop was formed, the slop had no overall instability. Due to the deformed slop formed in a long time, the article research formation mechanism of the deformed slope in left dam abutment of a hydroelectric power station in northwest China with discrete element simulation method. The results show that deforming slope inclined gently by the low-angle rock level under the action of gravity and was instability under seismic loads. The simulation of the subsequent movement of the slope shows that the movement mode of deformable body is starting-up → high-speed sliding → self-stabilized. Slop shoulder position first appear tensile crack in the start-up phase, then the middle of slop deformed, finally cut out in the bottom of slop. Topographic amplification effects are also observed from both acceleration and velocity of the monitoring points of the slope.

**Key word:** earthquake; rock bedded slope; genetic mechanism; discrete element numerical simulation