

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0052

聂柏松, 沈振中, 侯冰铃, 等. 基于离散单元法的锚固岩质边坡动力响应研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 202-208.  
NIE B S, SHEN Z Z, HOU B L, et al. Dynamic processes of anchored rock slope with discrete element method[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 202-208. (in Chinese)

# 基于离散单元法的锚固岩质边坡动力响应研究

聂柏松<sup>1</sup>, 沈振中<sup>2</sup>, 侯冰铃<sup>3</sup>, 江 婷<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310000; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098;  
3. 浙江省钱塘江管理局设计院 萧山分院, 杭州 300170)

**摘要:**采用离散单元法和动力时程法,应用 UDEC 程序,计算某水电站厂房后方顺层块状岩体边坡动力响应,计算结果表明:动力荷载作用下未支护岩质边坡的破坏可划分成:未滑动、缓慢发展、加速发展和破坏 4 个阶段;边坡在地震荷载下的破坏是一个累积的过程;锚杆单元的轴力响应曲线与该单元附近的岩体的相对位移时程曲线相关性很好,表明锚杆周边单元之间相对位移是导致锚杆发挥加固作用的原因之一。研究了锚杆轴力分布规律,并据此提出了边坡加固优化方案,该加固方案对相似工程具有参考意义。

**关键词:**边坡;离散单元法;地震;动力稳定性;锚杆

中图分类号: TU43 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Dynamic processes of anchored rock slope with discrete element method

NIE Baisong<sup>1</sup>, SHEN Zhenzhong<sup>2</sup>, HOU Bingling<sup>3</sup>, JIANG Ting<sup>3</sup>

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310000, China; 2. The College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Xiaoshan Distribution, Reconnaissance and Design Institute, Qiantang River Administration of Zhejiang, Hangzhou 311202, China)

**Abstract:** The dynamic failure processes of a block of rock behind the powerhouse of a hydro-power plant was investigated using the universal distinct element code (UDEC), which is based on discrete element method (DEM), and the dynamic time-history method. The result showed that the failure processes of rock slope without support can be divided into four stages; namely un-sliding stage, slow sliding stage, accelerating stage and failure stage. That is to say the failure of rock slope under seismic load is a cumulative process. The axial force response curve of anchor showed a good correlation with the relative displacement of element around the anchor element, which indicated that the latter could be one of factors of the anchor reinforcement effects under earthquake. The optimal proposals for slope strengthening was suggested based on the cable axial force distribution pattern, and it could be used as a reference for the similar projects.

**Key words:** rock slope; discrete element method; earthquake; dynamic stability; cable

我国许多水利水电工程位于高山峡谷的地震频发区,其岩体边坡存在抗震稳定性问题。岩体由结

构面和岩石块体组成,结构面对边坡动力响应有重要影响。锚杆已广泛应用于边坡加固工程中,但其

收稿日期: 2018-07-22 修回日期: 2018-12-29 网络出版时间: 2019-01-30

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190125.1713.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51179062); 江苏省自然科学基金青年基金(BK2012410)

作者简介: 聂柏松(1990—),男,安徽安庆人,工程师,主要从事水工结构研究。E-mail: niebaisong@126.com

通信作者: 沈振中(1968—),男,江苏苏州人,教授,博士生导师,主要从事水工结构与岩土工程研究。E-mail: zhzhshen@hhu.edu.cn

对边坡动力响应的机理尚未完全清楚<sup>[1-4]</sup>。

目前岩质边坡动力稳定性评价方法有理论解析法、数值模拟计算法和物理实验模拟法 3 大类<sup>[5-9]</sup>。朱宏伟等<sup>[10]</sup>基于数值计算,表明锚杆可以降低坡面加速度放大系数,锚固边坡坡顶的水平位移最大,并提出锚固边坡动力作用下潜在滑动面的确定方法。叶海林等<sup>[11-12]</sup>基于振动台试验研究发现锚杆轴力从坡外向坡内方向传递,地震强度较小时边坡中下部锚杆的轴力最大,地震强度较大时后边坡顶部锚杆的轴力增长较快,其轴力值与边坡中下部锚杆的轴力接近。Wullschlager 等<sup>[13]</sup>、朱维申等<sup>[14]</sup>认为锚杆效果主要体现在提高被锚固的岩土体的材料强度方面。杨双锁等<sup>[15]</sup>提出锚杆发挥加固作用的前提是其与周围岩体间产生相对位移或者相对位移趋势,锚杆可以增大锚固体的弹模、黏聚力,同时使其泊松比降低。彭宁波等<sup>[16]</sup>建立了锚固单结构面边坡动力模型,提出边坡岩体的弹模及泊松比对锚杆的锚固能力影响很小。

离散单元法可以模拟有结构面、断层、节理等非连续面。尤其对于块状岩质边坡动力响应计算,其非连续性的破坏特征是有限单元法等连续性方法所难以模拟的<sup>[17-18]</sup>。本文采用离散单元法,对某水电站厂房后部顺层块状岩质边坡在未支护和支护条件下的动力响应进行了对比计算研究,研究了其位移、加速度及轴力响应,并根据研究成果提出了支护优化方案。

### 1 工程概况及计算模型

某水电站主厂房后部边坡为块状岩质边坡,最大开挖高度约 30 m,边坡发育多条结构面及节理,可能对厂房造成安全隐患,分析工程地质资料并研究其破坏型式后,计算采用的典型剖面如图 1,相应离散元模型见图 2。采用 M-C 准则<sup>[19]</sup>,边坡的结构面和节理面采用面接触的 Coulomb 滑动模型模拟,相关参数见表 1、2。锚杆横向间距 2.5 m,布置及编号见图 3。表 3 为锚杆布设角度和长度,锚杆物理力学参数见表 4。混凝土护坡厚度为 100 mm,相关参数见表 5。

为研究边坡的地震下的动力响应,在边坡坡面及坡体内部布设一系列考察点,见图 3。坡面共布置 24 个测点,编号为 P1 至 P24。

静力计算中,左右边界为法向约束,模型底部边界为上下、左右双向约束;动力计算中,截取边界采用黏性边界条件来吸收边界上的入射波,在模型底部施加静态边界,在模型四周施加人工边界,临界阻



图 1 边坡典型剖面  
Fig. 1 Typical section of slope

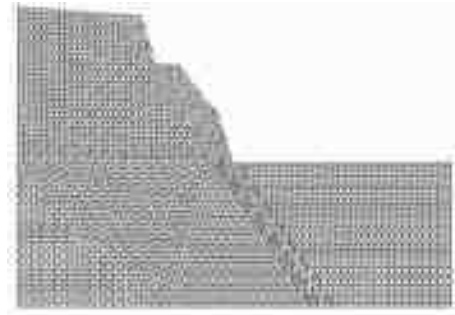


图 2 边坡离散元网格模型  
Fig. 2 Discrete element model of slope

表 1 岩体物理力学参数

Tab. 1 Physico-mechanical parameters of rock mass

参数名称	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ MPa
参数值	2 880	21. 32	14. 52	21	2. 5

表 2 结构面物理力学参数

Tab. 2 Physico-mechanical parameters of structural plane

参数名称	法向刚度/ (GPa · m <sup>-1</sup> )	切向刚度/ (GPa · m <sup>-1</sup> )	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa
岩层面	15	10	35	50
节理面	20	16	30	9

表 3 锚杆角度及长度

Tab. 3 Angle and length of cable

部位	角度/(°)	长度/m
一级边坡	20	12
二级边坡	30	12
三级边坡	20	10

表 4 锚杆物理力学参数

Tab. 4 Physico-mechanical parameters of bolt

锚杆面积/ m <sup>2</sup>	弹性模量/ GPa	极限抗拉 强度/N	砂浆黏结刚 度/N	砂浆黏聚力/ (N · m <sup>-1</sup> )
0. 001	100	106	109	106

表 5 喷射混凝土物理力学参数

Tab. 5 Physico-mechanical parameters of shotcrete

厚度/ m	密度/ (kg · m <sup>-3</sup> )	杨氏模量/ GPa	泊松 比	抗拉屈服 强/MPa	残余屈服 强/MPa	抗压屈服 强/MPa
0. 1	2 500	21	0. 15	2	1	10

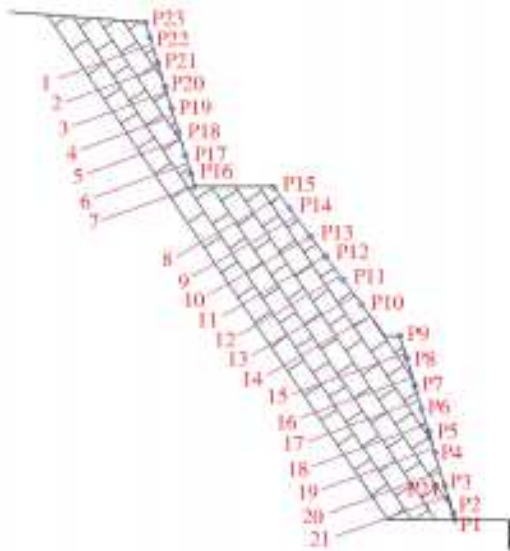


图 3 锚杆及边坡考察点布置

Fig. 3 Locations of cable and observation points of slope

尼比为 5%，则局部阻尼比的阻尼系数为  $0.1571^{[20]}$ 。

地震波时程见图 4，加速度峰值为  $2 \text{ m/s}^2$ 。由于模型底部为黏滞 (Viscous Boundary) 边界，故在底部输入应力时程，应力时程计算公式如下。

$$\sigma_n = 2(\rho C_p) v_n \quad (1)$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s) v_s \quad (2)$$

式中： $\sigma_n$  为边界上施加的法向应力； $\sigma_s$  为边界上施加的切向应力； $C_p$  为纵波的波速； $C_s$  为横波的波速； $\rho$  为岩体密度； $v_s$ 、 $v_n$  为边界上的节点振动速度在切向和法向的分量。

## 2 边坡动力响应分析

### 2.1 边坡响应过程分析

未采取支护措施情况下，边坡最大位移变化曲线见图 5，6 为  $t=2\text{s}$ 、 $12\text{s}$ 、 $14\text{s}$ 、 $16\text{s}$  时刻边坡位移矢量图。根据边坡最大位移时程曲线的曲率和是否有块体发生分离，未支护边坡破坏过程可划分成 4 个阶段。

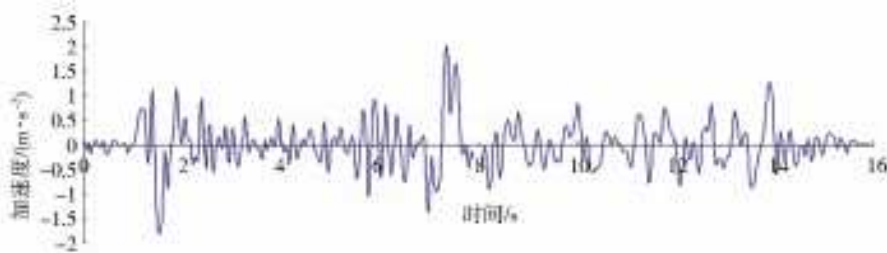


图 4 水平向地震加速度时程曲线

Fig. 4 Horizontal seismic acceleration series of seismic wave

(1)  $0 \sim 2 \text{ s}$ 。边坡整体位移均较小，岩块主要表现为水平方向位移，靠近坡脚处的块体有向下滑动的趋势，但位移很小。

(2)  $3 \sim 12 \text{ s}$ 。缓慢发展阶段，位于第一级和二级边坡，且在坡面出露的三个结构面上的岩块滑动距离较大。第一级边坡表面块体移动方向为顺结构面方向，块体间没有分开。

(3)  $13 \sim 14 \text{ s}$ 。加速发展阶段，随着  $0 \sim 12 \text{ s}$  内岩块位移的增大和累积，第一级边坡部分岩块开始发生分离，沿结构面方向的速度突然增大，坡脚处块体明显移动。

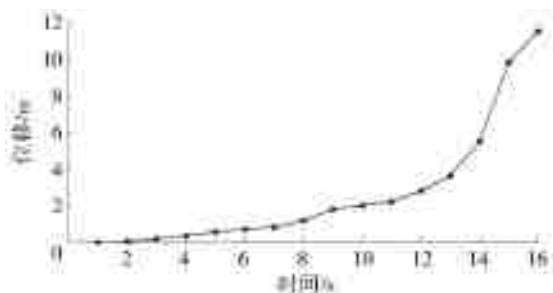


图 5 未支护边坡地震过程中最大位移变化曲线

Fig. 5 The maximum displacement of unsupported slope

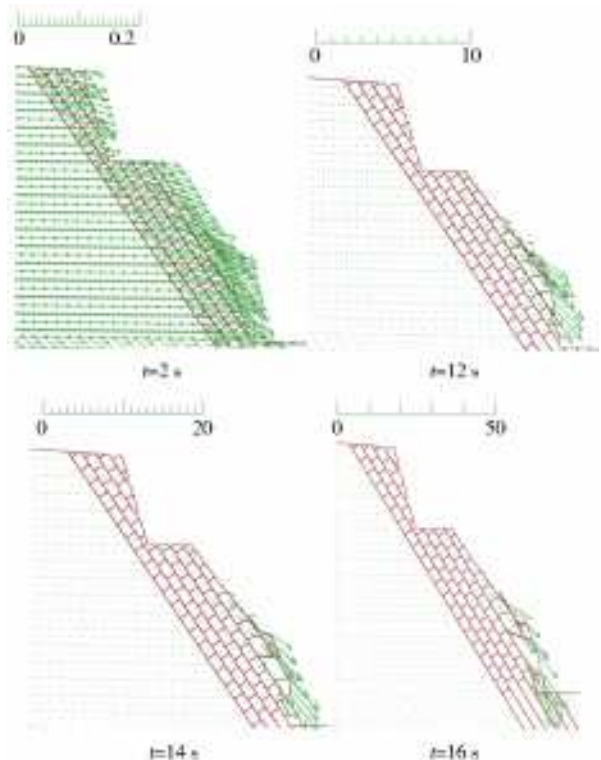


图 6  $t=2 \text{ s}$ 、 $12 \text{ s}$ 、 $14 \text{ s}$ 、 $16 \text{ s}$  时刻未支护边坡位移矢量图

Fig. 6 Displacement vectors of unsupported slope at  $t=2 \text{ s}$ 、 $12 \text{ s}$ 、 $14 \text{ s}$  and  $16 \text{ s}$

(4)15~16 s。破坏阶段,坡脚处的岩块继续高速滑动,坡脚处块体已滑落至地面,第一级边坡坡面的岩块分离,岩块松散地堆积在一起,形成不稳定岩体,危及水电站厂房的安全。

地震加速度最大的时刻并不是边坡最危险时刻,12 s末边坡开始发生破坏,此时地震加速度并不大(1.56 s输入地震波出现最大负向加速度,7.36 s输入地震波正向加速度最大)。边坡地震情况下的破坏是积累的过程,当位移积累到某个临界值,边坡就可能破坏。

采取喷混凝土及锚杆支护后,边坡坡面块体位移主要沿水平方向,沿结构面的滑动位移较小。地震结束时刻边坡最大位移为 18.9,出现在第三级边坡坡面。图 7 为  $t=2$  s、16 s 时刻采取支护措施后边坡位移矢量图。

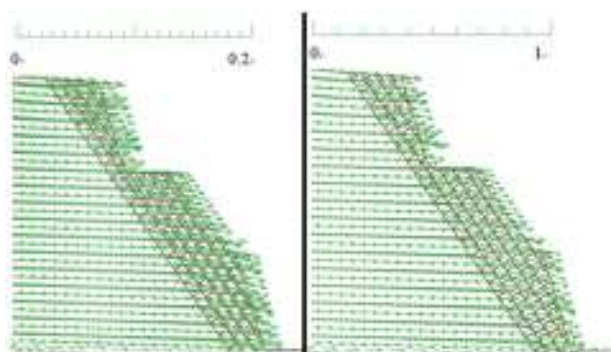
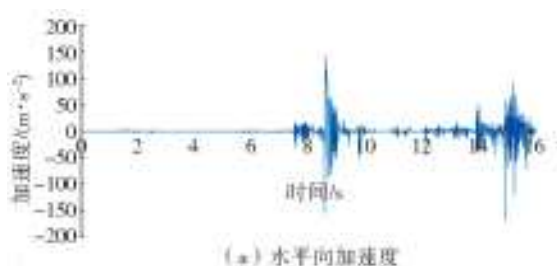


图 7  $t=2$  s、16 s 时刻支护边坡位移矢量图  
Fig. 7 Displacement vectors of supported slope at  $t=2$  s and 16 s

图 8 和 9 为未支护和支护条件下考察点 P9 位移时程曲线,采取加固措施处理后的边坡在地震下的位移主要发生水平方向,而未加固边坡在地震荷载下由于岩块滑落,竖直方向和水平方向的位移均较大的位移。整体上看,采取支护措施后边坡位移时程有阶梯型增长的趋势,两次阶梯型增长的时刻分别为 1.5 s 和 7.5 s 左右,这两个时刻也是输入地震加速度相对比较大的时刻,表明较大的地震加速度是导致位移“阶梯”型增长的原因之一。

## 2.2 加速度响应

未支护条件下,观察点 P9 的水平方向及竖直



方向加速度时程曲线见图 10,8.50 s 时加速度值较大,水平向及竖直向加速度均达到  $150 \text{ m/s}^2$  左右;15 s 左右,考察点 P9 两个方向加速度值突然增大,此时边坡开始发生破坏。

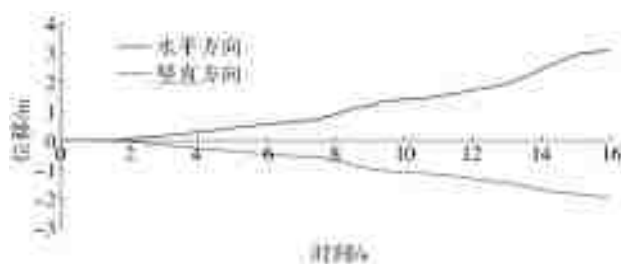


图 8 未支护边坡地震过程中 P9 位移时程曲线  
Fig. 8 Displacement curve of P9 (unsupported slope)

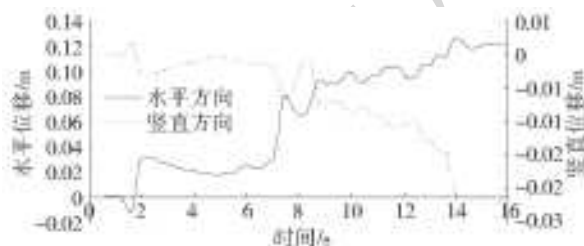


图 9 支护边坡地震过程中 P9 位移时程曲线  
Fig. 9 Displacement curve of P9 (supported slope)

支护边坡观察点 P9 的水平方向及竖直方向加速度时程曲线见图 11,与未加固边坡不同的是,加固处理后的边坡坡面考察点水平方向最大加速度大于竖直方向最大加速度,水平方向加速度最大为  $29.40 \text{ m/s}^2$ ,方向水平向右,竖直向加速度最大为  $-8.58 \text{ m/s}^2$ ,方向竖直向下;7~8 s,加速度达到峰值,这也是输入地震波加速度最大的时段,地震临近结束时刻 P9 加速度趋近于  $0 \text{ m/s}^2$ ,边坡是稳定的。

## 2.3 支护边坡锚杆轴力分析

锚杆编号按从上到下分别为 1~21, $t=16$  s 时锚杆轴力最大,表 6 列出了  $t=16$  s 各锚杆最大轴力值,图 12 为  $t=16$  s 时锚杆轴力分布图,以拉为负,以压为正。锚杆的最大轴力单元位置均在结构面附近,且该结构面满足以下两个条件。

(1)结构面在坡面出露。

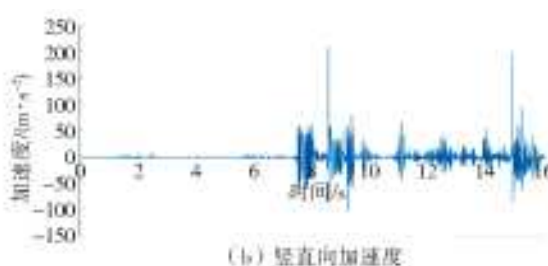


图 10 未支护边坡地震过程中 P9 加速度时程曲线  
Fig. 10 Acceleration curve of P9 (unsupported slope)



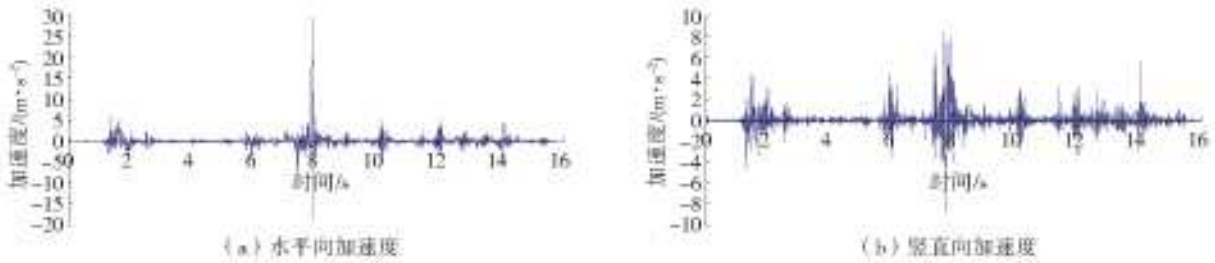


图 11 支护边坡地震过程中 P9 加速度时程曲线  
Fig. 11 Acceleration curve of P9 (supported slope)

(2)沿该结构面滑动时,滑动范围最大,如图中第一级边坡坡面有多个岩层出露,但以出露点最低的结构面为潜在滑动面的滑动体体积最大,该结构面附近的锚杆单元轴力也最大。

整体上看,地震结束时刻,第一级边坡的锚杆轴力较大,第三级边坡次之,第二级边坡上较小,且对于受同一个滑动面控制的各锚杆中,处于滑动面下部的锚杆轴力较大,高程越高,其最大轴力越小。其原因可简要分析如下。

(1)第一级边坡有三个结构面出露,滑动体体积最大,因而第一级边坡上锚杆单元最大轴力最大。

(2)第二级边坡坡面无结构面出露,出露点都在第一级边坡,这样可将第二级边坡上的锚杆视为布设在滑动体中上部的锚杆,这些锚杆布设位置以上的滑动体范围较小,同时位于滑动体中下部的第一级边坡的锚杆抗滑作用发挥较为充分,提供了大部分的抗滑力,因而锚杆轴力相对较小。

(3)第三级边坡坡面有两个结构面出露,仅在该级边坡范围内形成滑动体,虽然滑动体范围较小,但由于布设于该级边坡的 7 支锚杆中,能发挥抗滑作用的主要为上部的编号为 1、2、3、4 的 4 支锚杆(最下面的 3 支锚杆不在滑动体范围内,抗滑作用很小),因而锚杆 1、2、3、4 的最大轴力单元的轴力值也较大。

表 6  $t=16\text{ s}$  时锚杆最大轴力值

Tab. 6 The maximum axial force of cable at  $t=16\text{ s}$

位置	锚杆编号	轴力/N	位置	锚杆编号	轴力/N	位置	锚杆编号	轴力/N
第三级边坡	1	-39 677	第二级边坡	8	-29 759	第一级边坡	15	-145 860
	2	-46 246		9	-26 753		16	-117 580
	3	-49 417		10	-27 163		17	-136 190
	4	-56 402		11	-21 622		18	-144 610
	5	-14 783		12	-25 114		19	-159 660
	6	-14 565		13	-26 369		20	-198 210
	7	-15 675		14	-34 419		21	-243 210

为研究锚杆轴力和锚杆附近单元相对位移的关系,图 13 绘出了锚杆 21 最大轴力单元的轴力时程及坡面考察点 P3 相对于 P24 的相对位移时程曲

线,两者在 1~2 s 和 7~8 s 均有较大的增长,其他时段内相对稳定,两者相关性较好。这也说明相对位移为激发锚杆抗震加固作用的主要因素。

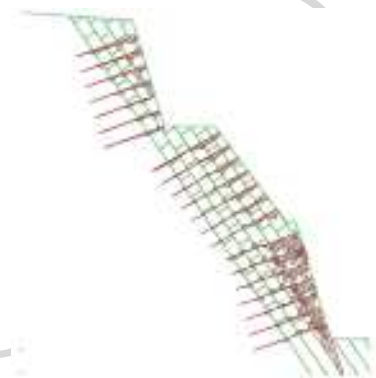


图 12  $t=16\text{ s}$  时锚杆轴力分布  
Fig. 12 Cable axial force distribution at  $t=16\text{ s}$

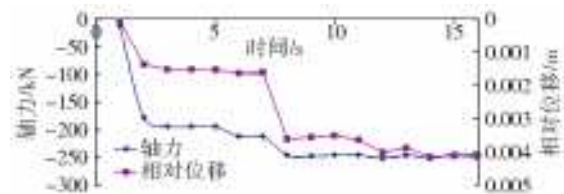


图 13 锚杆 21 最大轴力时程与考察点 P3 相对位移曲线  
Fig. 13 The maximum axial force curve for cable 21 and relative displacement curve of P3

### 3 边坡加固方案优化

由前述分析可知,该水电站厂房后缘边坡采用前述混凝土护坡和锚杆加固后,在地震荷载下边坡能保持稳定。但从前述计算分析尤其是锚杆轴力分布看,加固措施可以进行优化。

(1)第二级边坡坡度不大,坡面范围没有结构面出露,锚杆轴力较小,可考虑取消。

(2)第三级边坡底部 3 根锚杆所穿过的结构面没有在边坡坡面出露,结构面间的相对滑动较小,这三支锚杆的抗震加固作用也没有充分发挥,可考虑取消这三根锚杆。

综上,加固措施优化方案为:不布置第三级边坡最下部的 3 支锚杆和第二级边坡的 7 支锚杆,锚杆布置见图 14。地震结束时刻边坡位移矢量图见图

15,最大位移为 18.9 cm,与原加固方案中地震结束时刻边坡最大位移值基本一致;位移方向主要为水平方向,沿结构面滑动位移较小。据此可判断采用优化方案支护的边坡能在地震荷载下保持稳定。

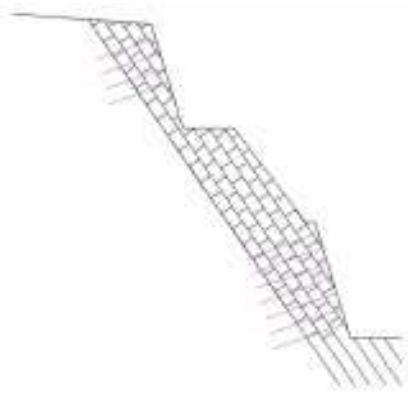


图 14 锚杆布置  
Fig. 14 Layout of cable

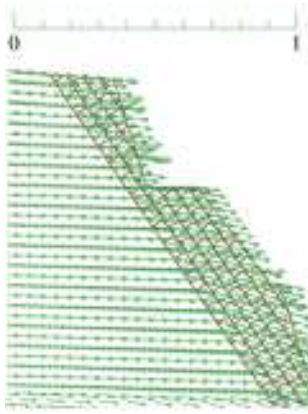


图 15  $t=16\text{ s}$  时刻边坡位移矢量图  
Fig. 15 Displacement vector slope at  $t=16\text{ s}$

#### 4 结 语

(1)未采取支护措施时,缓倾角顺层块状岩质边坡的破坏过程分为 4 个阶段,即未滑动阶段、缓慢发展阶段、加速发展阶段和破坏阶段;地震荷载下边坡破坏是累积的过程,地震加速度最大的时刻不一定是边坡破坏的时刻;采取支护措施后,边坡位移呈阶梯型增长,较大的地震加速度是其阶梯型增长的原因之一。

(2)采取支护措施后,边坡坡面岩体的加速度响应与输入地震波有一定的一致性,地震结束时刻边坡坡面加速度接近于零,而未采取支护措施时,结束时刻坡面岩体加速度仍较大。

(3)受同一个滑动面控制的各锚杆中,处于滑动面下部的锚杆轴力较大,高程越高,其最大轴力越小。锚杆单元轴力呈阶梯型增加趋势,锚杆周边单元之间相对位移为激发地震荷载下锚杆加固力的主

要因素。

(4)支护措施优化后,边坡仍能保持稳定,说明对于缓倾角顺层块状岩质边坡,若锚杆穿过的结构面未在坡面出露,可考虑取消锚杆。该支护优化思路对类似工程边坡支护方案有借鉴意义。

#### 参考文献(References):

- [1] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 173-180. (ZHENG Y R, YE H L, HUANG R Q, et al. Study on seismic stability analysis of a slope[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 173-180. (in Chinese)) DOI: 10. 13197/j. eeev. 2010. 02. 026.
- [2] HAMMAH R E, CURRAN J H, YACOUB T, et al. Stability analysis of rock slopes using the finite element method[C]// Schubert. EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, 2004.
- [3] 刘红帅. 岩质边坡地震稳定性分析方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2006. (LIU H S. Study on analysis method of rock slope seismic stability [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics Earthquake Administration, 2006. (in Chinese))
- [4] 言志信,张森,张学东,等. 顺层岩质边坡地震动力响应及地震动参数影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(s2): 3522-3528. (YAN Z X, ZHANG S, ZHANG X D, et al. Study of dynamic response of bedding rock slope under earthquake and influence of ground motion parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(s2): 3522-3528. (in Chinese))
- [5] LI A J, LVAMIN A V, MERIFIELD R S. Seismic rock slope stability charts based on limit analysis methods [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1): 135-148. DOI: 10. 1016/j. compgeo. 2008. 01. 004.
- [6] 吕擎峰,殷宗泽,王叔华,等. 拟静力法边坡稳定分析的改进[J]. 岩土力学, 2005, 26(s1): 35-38. (LYU Q F, YIN Z Z, WANG S H, et al. Improvement of pseudo-static method for slope stability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(s1): 35-38. (in Chinese)) DOI: 10. 16285/j. rsm. 2005. s1. 008.
- [7] NEWMARK N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. Geotechnique, 1965, 15(2): 139-160. DOI: 10. 1680/geot. 1965. 15. 2. 139.
- [8] WILSON R C, KEEFER D K. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote Lake, California, earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73(3): 863-877.
- [9] NG C W W, LI X S, VAN LAAK P A, et al. Centrifuge

- modeling of loose fill embankment subjected to uni-axial and bi-axial earthquakes [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, 24(4): 305-318. DOI: 10.1016/j.soildyn.2003.12.002.
- [10] 朱宏伟, 项琴. 锚杆支护边坡动力响应规律及锚固参数影响[J]. *公路交通科技*, 2011, 28(7): 30-34. (ZHU H W, XIANG Q. Dynamic response of anchored slopes and influence of anchoring parameters [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28(7): 30-34. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.07.006.
- [11] 叶海林, 郑颖人, 陆新, 等. 边坡锚杆地震动特性的振动台试验研究[J]. *土木工程学报*, 2011(21): 152-157, 176. (YE H L, ZHENG Y R, LU X, et al. Shaking table test on anchor bars of slope under earthquake [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011(21): 152-157, 176. (in Chinese)) DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.s1.004.
- [12] 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等. 地震作用下边坡预应力锚索振动台试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012(21): 2847-2854. (YE H L, ZHENG Y R, LI A H, et al. Shaking table test studies of pre-stressed anchor cable of slope under earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012(21): 2847-2854. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.z1.032.
- [13] WULLSCHLAGER D, NATAU O. The bolted rock-mass as an anisotropic continuum; Material behaviour and design suggestion for rock cavities [A]. *Proceedings of the 6th ISRM Congress [C]*. Montreal, 1987: 245-248.
- [14] 朱维申, 张玉军, 任伟中. 系统锚杆对三峡船闸高边坡岩体加固作用的块体相似模型试验研究[J]. *岩土力学*, 1996, 17(2): 1-6. (ZHU W S, ZHANG Y J, REN W Z. Similar model block tests for reinforcing effects of systematic bolts on rock mass of high slope of three gorges flight lock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1996, 17(2): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.1996.02.001.
- [15] 杨双锁, 张百胜. 锚杆对岩土体作用的力学本质[J]. *岩土力学*, 2003(22): 279-282. (YANG S S, ZHANG B S. The influence of bolt action force to the mechanical property of rocks [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003(22): 279-282. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2003.s2.064.
- [16] 彭宁波. 锚固岩质边坡地震动力响应及锚固机理研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2014. (PENG N B. Study on seismic responses and anchoring mechanism of anchored rock slope [D]. Lanzhou: Lanzhou University. (in Chinese))
- [17] 卓家寿, 赵宁. 离散单元法的基本原理、方法及应用 [J]. *河海科技进展*, 1993, 13(2): 1-11. (ZHUO J S, ZHAO N. The basic principle, method and application of discrete element method [J]. *Advances in Science and Technology of Hohai*, 1993, 13(2): 1-11. (in Chinese))
- [18] 江婷, 沈振中, 聂柏松, 等. 基于离散元法的顺层岩质边坡的地震响应分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(4): 136-141. (JIANG T, SHEN Z Z, NIE B S, et al. Analysis of seismic response of bedding rock slope based on DEM [J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2017, 15(4): 136-141. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.022.
- [19] 夏小娟, 赵冰华, 沈振中, 等. 水电站堆积体边坡稳定性分析与评价 [J]. *中国水运月刊*, 2015, 15(4): 160-162. (XIA X J, ZHAO B H, SHEN Z Z, et al. Stability analysis and evaluation of accumulation slope of hydroelectric power station [J]. *China Water Transport*, 2015, 15(4): 160-162. (in Chinese))
- [20] 聂柏松, 沈振中, 仲良, 等. 基于强度折减动力分析法的岩体边坡稳定性分析 [J]. *水电能源科学*, 2013(9): 131-134. (NIE B S, SHEN Z Z, ZHONG L, et al. Rock slope stability by strength reduction dynamic analysis method [J]. *Water Resources and Power*, 2013(9): 131-134. (in Chinese))