

# 构皮滩水电站高拱坝建基面卸荷岩体 变形参数研究

李维树<sup>1</sup>, 周火明<sup>1</sup>, 陈 华<sup>2</sup>, 刘 洋<sup>1</sup>, 凌 魏<sup>2</sup>

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 长江工程地球物理勘测武汉有限公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 乌江构皮滩水电站高拱坝建基面开挖成型后, 在建基面上进行大量的声波测试, 通过不同高程、不同部位的声波测试, 根据波速沿坡距综合关系曲线确定卸荷深度, 并分析波速分布的规律及特征。在卸荷带内进行 35 点原位变形试验, 其加载路径和最大压力与拱坝作用于岩体的条件相似。通过 35 点变形试点的动静对比试验, 建立卸荷岩体变形参数与波速之间的关系, 利用大范围的声波测试结果评价卸荷带岩体变形参数。结合开挖前后波速和变形参数的变化规律, 分析研究该高拱坝建基面卸荷岩体变形参数的弱化程度。试验结果表明, 建基面卸荷深度为 6 m, 卸荷带岩体平均波速降低 7.0%, 平均变形模量由 29.1 GPa 降低至 16.2 GPa, 平均降低 43.6%。提出卸荷岩体的变形参数及取值方法。

**关键词:** 水利工程; 高拱坝; 建基面; 卸荷岩体; 波速; 变形试验; 弱化程度

**中图分类号:** TV 64

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2010)07 - 1333 - 06

## STUDY OF UNLOADING ROCK MASS DEFORMATION PARAMETERS FOR HIGH ARCH DAM FOUNDATION BASE OF GOUPITAN HYDROPOWER STATION

LI Weishu<sup>1</sup>, ZHOU Huoming<sup>1</sup>, CHEN Hua<sup>2</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, LING Wei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China; 2. Wuhan Yangtze River Engineering Geophysical Surveys Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430010, China)

**Abstract:** After the excavation and formation of high arch dam foundation base of Gupitan hydropower station in Wujiang River, a large amount of ultrasonic wave tests have been carried out on the foundation base. Through these tests with different elevations at different places, the unloading depth is determined according to the comprehensive relationship curve between wave speed and slope distance; and the wave speed distribution pattern and characteristics are also analyzed. In-situ deformation tests are made at 35 points in the unloading zone with conditions of loading path and the maximum pressure similar to that of the arch dam acting on the rock mass. According to dynamic and static comparative tests of the 35 deformation points, the relation curve between unloading rock mass deformation parameters and wave speed is established; and the rock mass deformation parameters in the unloading zone are evaluated based on results of large-scale acoustic tests. The weakening of rock mass deformation parameters in the unloading zone on the high arch dam foundation base is analyzed and studied in combination with the regularity for change of wave speed and deformation parameters before and after excavations. It is shown by experimental study that the foundation base unloading depth is 6 m; the wave speed of the unloading rock mass declines 7.0% on average; and the average deformation modulus reduces from 29.1 GPa

**收稿日期:** 2010 - 02 - 25; **修回日期:** 2010 - 03 - 29

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50639090, 40872192); 中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(YWF1019)

**作者简介:** 李维树(1963 -), 男, 1992 年毕业于武汉水利电力学院电力系统及自动化专业, 现任高级工程师, 主要从事岩石力学试验等方面的研究工作。E-mail: lws\_lwslws@163.com

to 16.2 GPa, down by 43.6% on average. Finally, the unloading rock mass deformation parameters and the calculating method are put forward.

**Key words:** hydraulic engineering; high arch dam; foundation base; unloading rock mass; wave speed; deformation test; weakening degree

### 1 引言

我国高拱坝建设已经向西部转移, 建设规模和坝高位居世界前列, 如在建的锦屏一级、处于详勘阶段的乌东德、白鹤滩水电站等。这些高拱坝位于峡谷中, 都存在大规模边坡开挖问题。在开挖过程中由于边坡岩体的应力状态急剧变化, 边坡表部岩体应力释放、降低, 岩体向临空面回弹, 岩体发生松弛、卸荷, 岩体变形模量降低, 在表浅部形成新的卸荷松弛带。卸荷带不仅破坏了边坡岩体结构的完整性, 卸荷带内的陡倾卸荷裂隙还可能构成边坡失稳的边界条件, 从而增大了潜在破坏的可能性<sup>[1]</sup>。对大坝工程而言, 还可能构成边坡的集中渗漏带或坝肩失稳的控制边界。因此, 对卸荷带的研究一直为岩土工程地质界所重视<sup>[2, 3]</sup>。

在边坡开挖松弛卸荷问题的理论研究方面, 哈秋龄等<sup>[4~7]</sup>用弹塑性理论、本构模型等数值分析方法分析了岩质高边坡卸荷带的形成机制及卸荷区的力学特征。然而许多研究工作一般也只限于找到坡体开挖后的应力场与位移场<sup>[8]</sup>, 并没有继续去寻找坡体开挖后的影响范围及卸荷岩体的力学特征<sup>[9]</sup>。在试验研究方面, 赵晓彦等<sup>[10~12]</sup>从试验和数值模拟方面研究了边坡卸荷松弛特征及其范围的划分标准、工程地质力学性质等, 提出不仅需要了解边坡卸荷带的分布特点, 更需要了解卸荷带的工程地质及力学性质, 以便对边坡的变形及稳定性作出合理的预测。三峡船闸高边坡松弛卸荷问题引起了国内外的关注, 推动了边坡开挖松弛卸荷区的理论和试验研究, 周火明等<sup>[13]</sup>结合原位试验研究了三峡船闸边坡卸荷扰动区范围及岩体力学性质弱化程度。

卸荷岩体力学作为一新的研究领域, 尽管在过去的研究中做了一定数量的物理和数值模拟研究, 已经取得了重大的科研成果, 在一些重大的技术问题上取得了较大的突破, 但大多还停留在定性的认识阶段, 有待于试验研究的验证和完善。因此现已建立的理论和方法离工程应用还有相当的距离。

卸荷力学理论及方法尚处于研究阶段, 受到试验条件的限制, 目前还难于很好地应用于工程实际。

如何利用常规的岩石力学试验与研究方法及手段快速准确地确定高拱坝基础开挖卸荷范围及卸荷岩体的工程力学特性, 是目前我国水电工程值得关注的课题。

乌江构皮滩水电站大坝为双曲拱坝, 坝顶高程 640.5 m, 最大坝高 232.5 m。两岸边坡最大开挖高度在 280 m 以上。坝基以 P<sub>1m</sub><sup>1-1</sup> 厚~中厚层微晶生物碎屑灰岩为主, 少量为 P<sub>1m</sub><sup>1-2~3</sup> 中厚~薄层。自然地貌下风化卸荷带深度一般 15~30m, 局部达 40 m<sup>[14]</sup>。

### 2 试验研究方法

本文主要以大量的声波测试和承压板法变形试验为依托, 通过不同高程、不同部位的声波测试, 得出波速沿坡距的综合关系曲线, 划分卸荷带厚度, 分析波速分布的规律及特征。在卸荷带内开展 35 点原位变形试验及试点的声波对比测试, 其加载路径与拱坝作用于岩体的方向一致, 最大压力与各高程拱坝作用于岩体的压力接近, 建立卸荷岩体变形参数与波速之间的关系, 利用大范围的声波测试结果评价了卸荷带岩体变形参数。结合开挖前后波速和变形参数的变化规律, 研究建基面卸荷松弛区变形参数的弱化程度。研究技术路线见图 1。

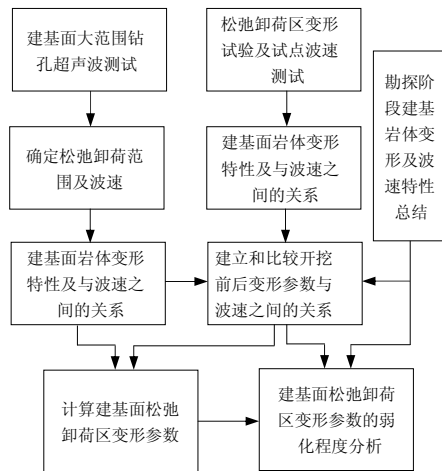


图 1 研究技术路线框图

Fig.1 Technical process of the research

### 3 卸荷松弛范围及波速特征

建基面开挖形成后, 在两岸不同高程及河床建基面上进行钻孔超声波测试, 其中孔深 5~6 m 的钻孔 304 个, 孔深 20 m 的钻孔 18 个。测试方法按相关的规范执行, 波速沿孔深分布曲线见图 2。

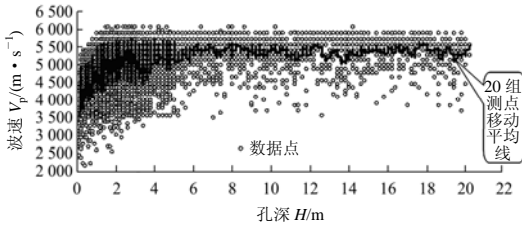


图 2 乌江构皮滩水电站建基面波速沿孔深分布曲线

Fig.2 Relationship between wave speed and drilling depth in Goupitan Hydropower Station

由图 2 可知, 在整个深度范围内, 波速变化幅度较大, 且随着深度的增大, 低波速点减少且量值增大, 反映了在 20 m 深度范围内坡体内的岩体结构及裂隙的发育特征。在 0~6 m 范围, 波速变化幅度较大, 为 2 170~6 060 m/s, 表明开挖扰动和卸荷松弛使岩体的波速降低较为严重; 在 6 m 以后, 波速基本上稳定在 3 500~6 060 m/s 范围, 且小于 4 500 m/s 的点相对较少, 平均波速在 5 400 m/s 左右。10~50 点和 150 点移动平均线见图 3, 可以明显看出在 6 m 处有明显的分界点。

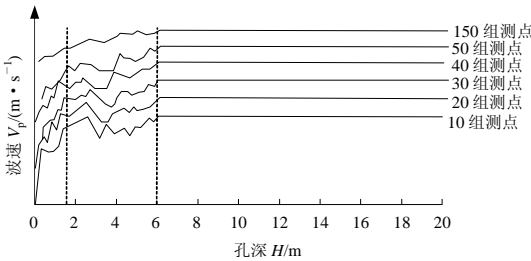


图 3 不同统计数量的移动平均线

Fig.3 Moving mean lines of different statistics magnitudes

为了便于分析, 按照测试间隔深度(0.1 和 0.2 m)逐点统计波速的平均值, 绘制波速平均值沿孔深分布曲线见图 4。可见在 6 m 处波速大小有明显的分界, 0~6 m 范围波速平均值范围为 3 809~5 428

m/s。6~20 m 范围波速平均值范围为 5 109~5 616 m/s。在 0~1.2 m 范围波速变幅较大, 表明开挖扰

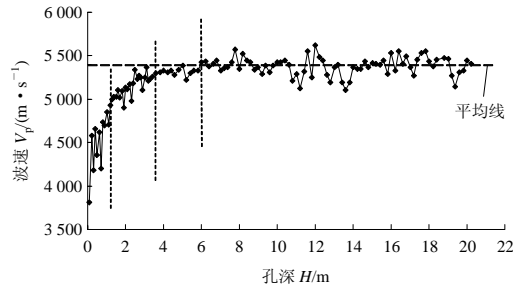


图 4 建基面纵波波速平均值沿孔深分布曲线

Fig.4 Relationship between foundation base standard average longitudinal wave speed and the drilling depth

动或卸荷使原生裂隙张开, 为较破碎岩体。1.2~3.6 m 深度范围波速变化幅度相对较小, 表明该深度范围内由于卸荷后产生新的裂隙或者既有裂隙性状劣化, 3.6~6 m 范围波速变化幅度较小, 但波速低于 6~20 m 的平均值, 表明该深度范围内仍然受到一定的卸荷影响。

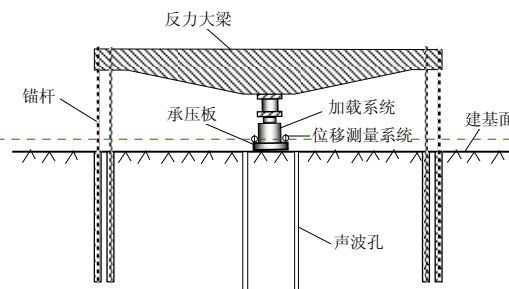
可见, 该拱坝开挖后的卸荷松弛范围为 6 m。0~6 m 段波速平均值为 5 029 m/s, 平均降低了 7.0%。

### 4 卸荷区岩体变形试验

#### 4.1 岩体变形试验

获得岩体变形参数最直接、最可靠的方法是原位承压板法, 由于反力原因, 一般情况下都是在平洞内进行, 因此用于建基面上需要解决反力系统问题, 且在斜坡上难度较大, 所以, 对于高拱坝而言, 在建基面直接进行试验的实例很少。

建基面上变形试验安装方法见图 5(图中建基面为平面, 实际有平面和斜面)。在建基面上, 人工凿



批注 [雨林木风1]: 补充该图的纵坐标。

图5 建基面上变形试验方法示意图

Fig.5 Sketch of deformation test method on foundation base  
制成满足规范要求的平面, 直接将承压板贴于建基面上, 用大梁和锚杆提供足够的反力, 应力大小和方向与各高程拱坝的应力及方向一致。为了减少试验难度, 利用灌浆平洞进行部分变形试验, 所有变形试点周围布置4个钻孔进行超声波测试。试验方法按照水利水电相关规程进行。

在河床底面410 m、左右岸413~610 m高程表面布置22点, 在部分高程的灌浆平洞内布置13点<sup>[15]</sup>。试验成果见表1, 2<sup>[14, 15]</sup>。

表1 建基面卸荷岩体变形及声波试验成果

Table 1 Unloading rock mass surface deformation of foundation base and ultrasonic wave test results

高程/m	地层代号	变形模量 $E_0$ /GPa	弹性模量 $E_e$ /GPa	单孔波速 $V_p$ /(m·s <sup>-1</sup> )
410	$P_{1m}^{1-1}$	4.57~35.03 14.57(11)	6.23~41.13 18.60(11)	3 093~6 000 5 093(11)
413~415	$P_{1m}^{1-1}$	11.51~33.08 21.85(6)	19.20~41.13 29.42(6)	4 546~6 000 5 177(3)
435	$P_{1m}^{1-1}$	13.80~38.94 22.72(3)	18.90~46.24 30.85(3)	3 448~5 882 5 095(3)
460~480	$P_{1m}^{1-1}$	14.70~18.69 16.15(3)	28.94~31.92 30.56(3)	2 941~6 061 5 174(3)
500	$P_{1m}^{1-2}$	13.06~31.71 22.20(4)	16.69~43.52 28.67(4)	3 333~5 882 4 969(4)
560	$P_{1m}^{1-3}$	6.14~6.45 6.30(2)	8.63~9.37 7.62(2)	2 632~5 263 3 558(2)
581	$P_{1m}^{1-3}$	7.15~37.31 20.97(3)	8.27~42.10 23.88(3)	3 261~6 000 5 093(3)
610	$P_{1m}^{1-3}$	1.26~4.70 2.96(3)	3.12~9.18 6.70(3)	2 174~5 882 4 131(3)

注: 横线上方为范围值, 下方为平均值, 括号内为试点数量, 下同。

#### 4.2 卸荷区岩体变形试验成果

建基面和灌浆平洞内各高程岩体变形试验成果见表1。 $P_{1m}^{1-1}$ 层各高程变形模量平均值为14.6~22.7 GPa;  $P_{1m}^{1-2}$ 层的变形模量平均值为22.2 GPa;  $P_{1m}^{1-3}$ 层的变形模量平均值为2.96~20.97 GPa。可见, 相同层位岩体变形模量和波速变化幅度较大, 反映了开挖扰动及卸荷作用对各个部位岩体的损伤

表2 对比试验成果表<sup>[14, 15]</sup>  
Table 2 Comparative test results<sup>[14, 15]</sup>

高程/m	地层	开挖前(勘探平洞)		开挖后(建基面及灌浆平洞)		降低幅度/%	
		变形模量 $E_0$ /GPa	弹性模量 $E_e$ /GPa	变形模量 $E_0$ /GPa	弹性模量 $E_e$ /GPa	$E_0$	$E_e$
460~506	$P_{1m}^{1-1}$	10.37~50.62 31.45(5)	14.03~57.00 36.68(5)	14.70~18.69 16.42(3)	28.94~31.92 30.56(3)	47.79	16.68

程度有较大的差别。

根据表1中的数据, 建立变形模量与波速之间的关系如下:

建基面开挖前(勘探阶段), 对整个坝区  $P_{1m}^1$  层进行了29点承压板法变形试验, 并对所有的变形试点进行了超声波测试<sup>[14, 15]</sup>。变形、弹性模量与波速之间的关系为:

$$\left. \begin{aligned} (1) \text{ 开挖前 } (n=27): \\ E_0 = 0.708 1e^{0.000 69V_p} \quad (R^2 = 0.82) \\ E_e = 1.500 7e^{0.000 60V_p} \quad (R^2 = 0.74) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} (2) \text{ 开挖后 } (n=33): \\ E_0 = 0.066 8e^{0.001 07V_p} \quad (R^2 = 0.62) \\ E_e = 0.212 8e^{0.009 91V_p} \quad (R^2 = 0.62) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $E_0$  为变形模量(GPa),  $E_e$  为弹性模量(GPa),  $V_p$  为单孔法纵波波速(m/s)。

$E_0$ - $V_p$  关系曲线见图6( $E_e$ - $V_p$  关系曲线略)。可见, 开挖前后, 变形参数与波速之间具有较好的指数函数关系。

### 5 建基面岩体变形参数弱化程度分析

#### 5.1 开挖前后岩体变形参数比较

在本地试验过程中, 有针对性地结合开挖前的试验部位, 进行了几点对比试验, 分析结果见表2。由表中可见在不考虑岩体结构差异的条件下, 开挖后  $P_{1m}^{1-1}$  和  $P_{1m}^{1-3}$  层岩体变形模量降低了47%~48%,  $P_{1m}^{1-2}$  层岩体降低了约12%。

#### 5.2 变形模量与波速的关系

由图6可知, 波速在2 000~4 800 m/s段, 开挖前  $E_0 < 20$  GPa, 开挖后岩体的变形模量比开挖前降低了42%~80%, 岩体为较破碎~较完整, 裂隙密度相对较大, 开挖卸荷容易引起裂隙性质劣化; 波速在4 800~5 500 m/s段, 开挖前  $E_0$  在20~30

500~506	$P_{1m}^{-1-2}$	19.64~30.68 25.16(2)	26.53~38.75 32.64(2)	13.06~31.71 22.20(4)	16.69~43.52 28.67(4)	11.76	12.16
560~610	$P_{1m}^{-1-3}$	7.53~44.12 20.63(3)	9.72~60.03 28.61(3)	1.26~18.44 10.55(8)	3.12~42.10 13.72(8)	48.86	52.05

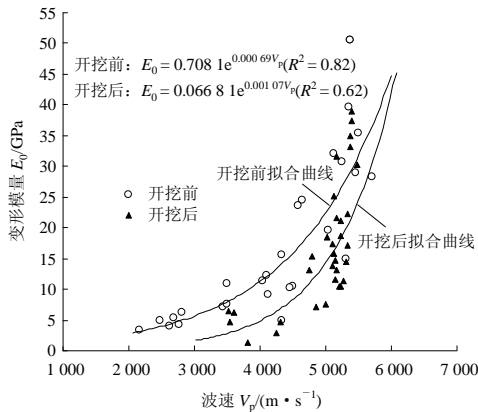


图 6 建基面开挖前后岩体  $E_0$ - $V_p$  关系曲线  
Fig.6 Rock  $E_0$ - $V_p$  relationship curves before and after foundation base excavations

GPa, 开挖后变形模量降低了 24%~37%, 岩体为较完整~完整, 裂隙密度相对较小, 开挖卸荷对变形模量仍然有一定的影响。波速在 5 500 m/s 以后, 对应的变形模量大于 30 GPa, 开挖后变形模量降低了 15%。

### 5.3 卸荷区岩体变形参数

根据图 2 中对卸荷带的划分结果, 结合开挖前后建立的动静对比关系, 计算卸荷区岩体的变形模量, 并绘制建基面计算变形模量沿孔深分布曲线见图 7。由图 7 可知, 在 6~20 m 段,  $E_0$  稳定在 29 GPa 左右。从 6 m 到坡面,  $E_0$  近似呈直线下降至约 4 GPa。0~6 m 段  $E_0$  平均值为 16.41GPa, 平均降低了 43.6%。其中 0~1.5 m 段平均变形模量降低了 65.6%, 坡面上降低了 86.5%。且有

$$\lambda = E_{0r} / E_{0w} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为弱化系数,  $E_{0r}$  为卸荷岩体变形模量(GPa),  $E_{0w}$  为未卸荷岩体变形模量(GPa)。

根据图 7, 按照式(3)计算不同卸荷深度  $E_0$  弱化系数, 计算结果见表 3。

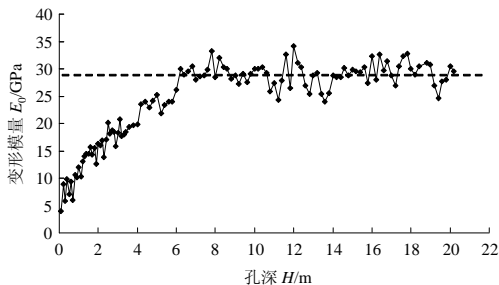


图 7 建基面计算变形模量沿孔深分布曲线  
Fig.7 Relationship between foundation base standard deformation modulus and the drilling depth

表 3 构皮滩坝基岩体不同深度  $E_0$  的弱化系数  
Fig.3 Weakening coefficients of  $E_0$  of dam foundation rock mass at different depths in Goupitan hydropower station

卸荷深度/m	弱化系数 $\lambda$	卸荷深度/m	弱化系数 $\lambda$
0~1	0.27	3~4	0.65
1~2	0.47	4~5	0.79
2~3	0.49	5~6	0.81

坝基岩体变形参数已在技术设计阶段确定, 开挖完成后产生了卸荷松弛, 在 6 m 范围内岩体的性质发生了变化, 需要根据试验研究结果对大坝的变形稳定进行复核, 并修正和调整基础处理参数。

具体应用时, 根据各个部位或者各地层的设计采用值按表 3 进行修正取值。

## 6 结 论

(1) 研究表明, 乌江构皮滩水电站高拱坝建基面岩体深度为 6 m, 根据大量的变形试验及声波对比测试, 建立了卸荷岩体的动静关系, 得出了建基面卸荷岩体的变形模量。

(2) 卸荷区内, 变形模量从未卸荷区的 29.1 GPa 近似呈线性下降至约 4 GPa, 平均变形模量降低了 43.6%, 其中 0~1.5 m 段平均变形模量降低了 65.6%, 坡面附近降低了 86.5%。

(3) 提出了不同卸荷深度岩体变形模量的弱化系数, 为稳定计算和建基面基础处理提供了参数修正方法。

(4) 本文提出的卸荷岩体试验方法及结果是否具有普遍意义, 还有待于深入研究和其他工程及地质条件的验证。

### 参考文献(References):

批注 [雨林木风2]: 排版时对该图做了调整, 请核实。

- [1] 黄润秋, 林峰, 陈德基, 等. 岩质高边坡卸荷带形成及其工程性状研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(3): 227 - 232.(HUANG Runqiu, LIN Feng, CHEN Deji, et al. Formation mechanism of unloading fracture zone of high slopes and its engineering behaviors[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(3): 227 - 232.(in Chinese))
- [2] 王瑞红, 李建林, 刘杰, 等. 考虑岩体开挖卸荷动态变化水电站坝肩高边坡三维稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3 515 - 3 521.(WANG Ruihong, LI Jianlin, LIU Jie, et al. Three-dimensional stability analysis of dam abutment high slope dynamic behaviors considering rock mass unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 515 - 3 521.(in Chinese))
- [3] 李建林, 王乐华, 刘杰. 岩石边坡工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.(LI Jianlin, WANG Lehua, LIU Jie. Rock slope engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 哈秋龄. 三峡工程永久船闸陡高边坡各向异性卸荷岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 603 - 618.(HA Qiuling. Analysis of the anisotropy unloading rock mechanics of permanent shiplock high slope of Three Gorges Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 603 - 618.(in Chinese))
- [5] 盛谦. 深挖岩质边坡开挖扰动区与工程岩体力学性状研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2002.(SHENG Qian. Excavation disturbed zone of deep cutting rock slopes and mechanical behaviour of engineering rock mass[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2002.(in Chinese))
- [6] 肖世国, 周德培. 开挖边坡松弛区的确定与数值分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(3): 318 - 322.(XIAO Shiguo, ZHOU Depai. Determination and numerical analysis method of relaxation region for cutting slope[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(3): 318 - 322.(in Chinese))
- [7] 王浩, 廖小平. 边坡开挖卸荷松弛区的力学性质研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(增1): 5 - 10.(WANG Hao, LIAO Xiaoping. Research on the mechanical character of relaxing zone of slopes due to excavation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(Supp.1): 5 - 10.(in Chinese))
- [8] GRIFLITH D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387 - 403.
- [9] 沈军辉, 王兰生, 王青海, 等. 卸荷岩体的变形破裂特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 2 028 - 2 031.(SHEN Junhui, WANG Lansheng, WANG Qinghai, et al. Deformation and fracture features of unloading rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(12): 2 028 - 2 031.(in Chinese))
- [10] 赵晓彦, 胡厚田, 庞烈鑫, 等. 类土质边坡开挖的卸荷作用及卸荷带宽度的确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 708 - 712.(ZHAO Xiaoyan, HU Houtian, PANG Liexin, et al. Study of excavation effect of high soil-like slope by centrifugal model test and numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 708 - 712.(in Chinese))
- [11] 邓建辉, 李焯芬, 葛修润. 岩石边坡松动区与位移反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 171 - 174.(DENG Jianhui, LEE C F, GE Xiuru. Disturbed zones and displacement back analysis for rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 171 - 174.(in Chinese))
- [12] 聂德新. 岩质高边坡岩体变形参数及松弛带厚度研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 472 - 477.(NIE Dexin. Study of rock mass deforming parameters and relaxig thickness of high rock slope[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 472 - 477.(in Chinese))
- [13] 周火明, 盛谦, 李维树, 等. 三峡船闸边坡卸荷扰动区范围及岩体力学性质弱化程度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 078 - 1 081.(ZHOU Huoming, SHENG Qian, LI Weishu, et al. Excavation disturbed zone and weakening degree of mechanical properties for rock mass of TGP ship lock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1 078 - 1 081.(in Chinese))
- [14] 李维树, 彭朝全, 何沛田. 乌江构皮滩水电站技施阶段坝基及拱座岩体工程力学性质试验研究综合报告[R]. 武汉: 长江水利委员会长江科学院, 2002.(LI Weishu, PENG Chaoquan, HE Peitian. Comprehensive report on foundation and abutment rock mechanics property test and research in the technical construction phase of Wujiang Goupitan Hydropower Station[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, 2002.(in Chinese))
- [15] 李维树, 王法刚. 乌江构皮滩水电站大坝建基岩体质量标准研究试验成果报告[R]. 武汉: 长江水利委员会长江科学院, 2006.(LI Weishu, WANG Fagang. Report on rock mass standard test results of Wujiang Goupitan Hydropower Station dam foundation base[R]. Wuhan: Yangtze River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, 2006.(in Chinese))