

黄龙滩电厂扩建工程进场边坡有限元分析

郭永成^{1, 2}, 李建林^{1, 2}, 王兴霞³

(1. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

3. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 简要地介绍了黄龙滩电厂扩建工程概况以及该工程进场边坡坍塌情况, 指出维护该边坡稳定性要进行治理的必要性。根据工程卸荷特点和相关资料, 绘制了边坡岩体卸荷量与变形模量的关系图。分析进场边坡的工程特点, 采用了卸荷岩体力学理论与方法对该边坡进行有限元分析, 分为初始应力场、边坡开挖、边坡开挖卸荷、边坡加固等4种工况进行计算, 得出边坡变形的相关规律, 运用卸荷岩体力学理论计算所得的最大水平和竖直位移比常规计算的位移值都要大, 且其在各个剖面的变化规律基本是一致的。加固措施对边坡开挖面水平位移的约束不明显, 但对开挖面附近区域的应力状态有较大的改善, 利于边坡的稳定。研究结果可为边坡的加固设计提供参考。

关键词: 扩建工程; 卸荷; 有限元; 位移

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S2-0202-05

作者简介: 郭永成 (1980-), 男, 湖北咸宁人, 博士, 讲师, 主要从事水利工程、土木工程领域中岩土力学方面的教学与科研工作。E-mail: ych_guo@126.com。

Finite element analysis of entrance slope of expansion project of Huanglongtan Power Plant

GUO Yong-cheng^{1, 2}, LI Jian-lin¹, WANG Xing-xia³

(1. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University Yichang 443002, China; 2 Key Laboratory of Geological

Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 3. College of Hydraulic and Environmental

Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The collapse situation of entrance slope of expansion project of Huanglongtan Power Plant is introduced. The maintenance of the stability of the slope to the need for governance is pointed out. According to the characteristics of unloading rock mass and the related documents, the relation graph between the unloading quantity and the deformation modulus of slope rock mass is displayed. According to the characteristics of the entrance slope, by using the mechanics theory of unloading rock mass and the finite element method, four kinds of conditions for slope analysis are adopted, that is, the initial stress field, excavation, unloading excavation and reinforcement. The values of the maximum horizontal and vertical displacement calculated by use of the unloading rock mass mechanics theory are larger than those by the conventional methods. The variation is substantially the same for each profile. The constraint of the reinforcement measures to the horizontal displacement of excavation face of slope is not obvious, but the stress state of the surrounding area of the excavation face is greatly improved and the stability of the slope is strengthened. The results may provide a reference for the design of slope reinforcement.

Key words: expansion project; unloading; finite element method; displacement

0 引言

边坡开挖后, 岩体初始应力场会发生变化, 卸荷后岩体质量进一步劣化, 受到损伤, 抗拉强度降低, 其力学参数也会发生较大变化。依据卸荷岩体力学的原理与方法, 边坡岩体卸荷后的变形模量也会相应地降低。根据相关文献资料^[1-2], 对卸荷岩体边坡进行稳定分析, 在具体计算时, 可以将初始应力场与开挖完成后的应力场进行比较, 得到各岩体的卸荷百分比,

进而调整岩体的变形模量。边坡在开挖形成过程中, 其应力应变的变化是动态的, 不断调整的。在开挖过程中这种调整使得岩体的受力不断变化, 这种变化导致岩体的受力历程的复杂性。因此, 对于此类开挖边

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50708093, 50909052, 90610029);
“十一五”国家科技支撑计划重点项目 (2008BAB29B03-4); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2012CB426502)

收稿日期: 2013-06-07

坡来讲, 必须寻找与之应力路径相适应的本构关系及其力学参数和计算方法等, 才会与实际情况相一致。因卸荷岩体力学的本构关系及其自身考虑了开挖所致的岩体质量劣化等动态因素, 故采用卸荷岩体力学理论来进行分析与计算, 与以往的常规算法相比, 比较符合工程实际状态。

1 工程概况

黄龙滩水电站为堵河开发的第一期工程, 于 1976 年建成发电, 总库容 12.28 亿 m³, 装机容量 15 万 kW。2002 年 2 月 16 日国家经贸委批复同意黄龙滩水电站在不改变水库原有功能的前提下, 增加两台 17 万 kW 水轮发电机组。该电站扩建工程是湖北省“十五”规划电源建设重点项目, 扩容后, 年可增加发电量 2.72 亿 kW 时, 水量利用率由 70% 提高到 94.87%。扩建工程于 2002 年 6 月 28 日开工, 2005 年 6 月首台机组投产发电, 2005 年 8 月 7 日第二台机组投产发电^[3]。扩建工程进场公路边坡出现垮塌, 如下图 1 所示。



图 1 扩建工程进场公路边坡状貌图

Fig. 1 Slope of entrance road of expansion project

该边坡是扩建的电站厂房边坡的一部分, 其稳定与否不仅会影响厂坝区的对外交通, 而且会影响厂房边坡的整体稳定性, 进而影响扩建的电站厂房的正常运营管理, 扩建工程厂区布置如图 2 所示。因此, 对该边坡进行研究具有十分重要的工程意义。

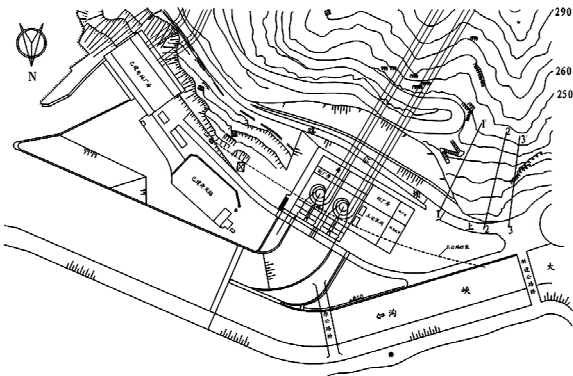


图 2 黄龙滩水电站扩建工程厂区布置图

Fig. 2 Layout of expansion project of Huanglongtan power plant

2 计算参数及工况

2.1 计算参数的选取

对边坡进行有限元计算的初始力学参数, 是根据黄龙滩水电站扩建区的基本地质条件以及其它的地质资料, 并根据现场考察分析有关资料后作适当调整而选取的。初始力学参数如表 1 所示。

依据卸荷岩体力学的原理与方法, 参考相关文献资料^[1, 4-6], 绘制了边坡岩体卸荷量与变形模量的关系图, 如图 3 所示。具体计算时, 以初始应力场与开挖完成后的应力场进行比较, 得到各岩体的卸荷百分比, 进而调整岩体的变形模量。

2.2 计算工况

选取图 2 中所示的 3 个剖面进行计算, 限于篇幅, 本文仅列出离电站厂房最近的 B1-1' 剖面进行分析, 其剖面开挖的地层图如图 4 所示。根据边坡当前的情况, 本研究分别考虑了 4 种工况进行计算分析。分为初始应力场 (工况 1)、边坡开挖 (工况 2)、边坡开挖卸荷 (工况 3)、边坡加固 (工况 4) 等 4 种工况。工况 1 和工况 2 按常规弹塑性有限元方法计算。工况 3 按卸荷岩体力学理论与方法进行计算。

表 1 边坡岩体初始力学参数

Table 1 Initial mechanical parameters of rock slope

| 序号 | 层位 | 岩性 | 变形模量/GPa | 重度/(kN·m ⁻³) | 泊松比 | 黏聚力/MPa | 摩擦角/(°) | 抗拉强度/MPa |
|----|---------------------------------|------------------|----------|--------------------------|------|---------|---------|----------|
| 1 | y ₃ ^{3ml-2} | 糜棱岩化片状石英岩夹石英片岩 | 3 | 26.8 | 0.28 | 0.3 | 30.0 | 0.18 |
| 2 | y ₃ ^{3ml-1} | 糜棱岩化石英片岩糜棱岩 | 4 | 26.8 | 0.26 | 0.3 | 32.0 | 0.18 |
| 3 | y ₃ ^{2y} | 富云母石英钠长片岩 | 2 | 26.8 | 0.33 | 0.2 | 24.2 | 0.10 |
| 4 | y ₃ ^{2g} | 硅化云母石英钠长片岩 | 5 | 27.5 | 0.21 | 0.4 | 38.7 | 0.20 |
| 5 | y ₃ ² | 局部含石榴子石白云母石英钠长片岩 | 4 | 26.8 | 0.28 | 0.3 | 35.0 | 0.15 |
| 6 | v ₂ ^{ly} | 绿泥阳起钠长片岩 | 4 | 27.5 | 0.26 | 0.6 | 36.0 | 0.30 |
| 7 | v ₂ ^{ln} | 绿泥钠长片岩 | 5 | 28.0 | 0.24 | 0.8 | 43.5 | 0.40 |

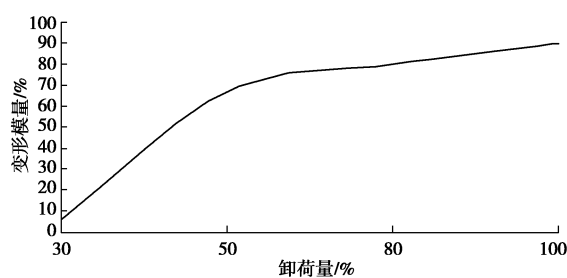


图 3 卸荷量与变形模量的关系图

Fig. 3 Relationship between unloaded quantity and deformation modulus

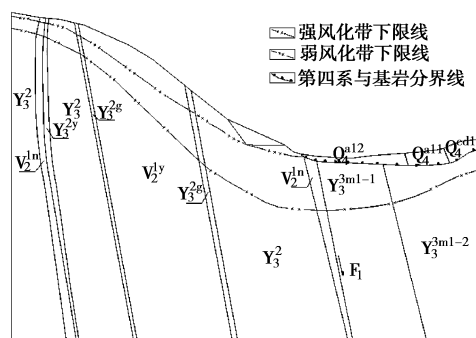


图 4 B1-1'剖面开挖的地层图

Fig. 4 Excavation stratigraph of profile B1-1'

工况 4 在边坡坍塌充分卸荷后进行, 主要研究岩体的加固效果。材料分区图如图 5 所示。B1-1'剖面计算区域的单元剖分图如 6 所示。

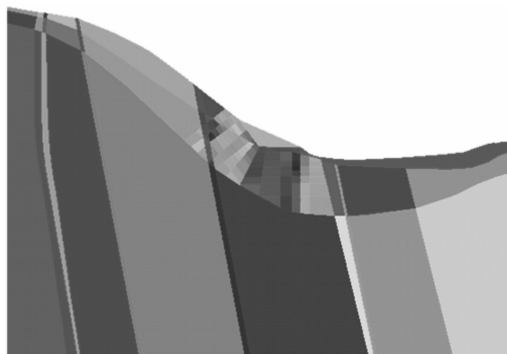


图 5 B1-1'剖面材料分区图

Fig. 5 Material zoning of profile B1-1'

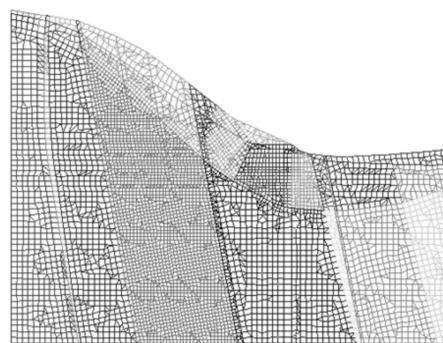


图 6 B1-1'剖面单元剖分图

Fig. 6 Elements of profile B1-1'

2.3 锚索与锚杆的模拟

理论和实践表明, 在岩体中加入锚杆或锚索可以提高裂隙岩体的整体性, 从而提高岩体和边坡的稳定性。锚杆、锚索一般为钢材, 通常在岩体中是发挥它的弹性部分, 故在计算中采用线弹性模型。锚索的预应力通过在预应力锚索两端施加外荷载来实现。在用有限元分析中, 锚索和锚杆都采用杆单元模拟, 这是因为锚杆为细长杆, 其抗弯刚度较小, 在开挖边坡中, 锚杆和锚索主要承受拉应力。根据锚杆及锚索布置条件, 按弹模等效原理, 在锚杆布置区域增加变形模量, 按抗拉强度等效, 提高岩体的强度。

3 计算结果及分析

3.1 工况 1 计算结果及分析

工况 1 为初始阶段, 计算边坡开挖前的初始应力场。岩体力学参数均采用初始力学参数, 参数的选取依据表 1。根据弹塑性有限元分析计算, 得到该工况的计算结果见图 7。

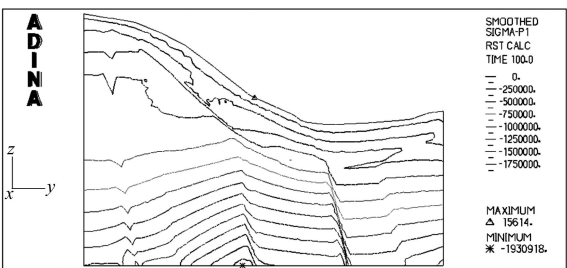


图 7 初始应力场下的第一主应力等值线图

Fig. 7 Contours of first principal stress under initial stress field

本工况计算的是指在自重作用下的应力应变。从应力等值线图可以看出, 边坡在自重作用下主要处于受压状态, 拉应力较小, 最大拉应力为 0.016 MPa, 出现在边坡高程为 202.25 m 的位置; 压应力随高程的降低逐渐增大, 最大压应力为 1.93 MPa, 出现在底部。

3.2 工况 2 计算结果及分析

工况 2 模拟施工开挖过程, 以便了解边坡在开挖过程中的应力应变变化情况。在开挖过程中, 岩体力学参数均采用初始力学参数。计算结果见图 8, 9。

开挖完成后, 边坡的最大水平位移为 1.087 cm, 出现在边坡底部; 边坡开挖面的最大水平位移约为 0.263 cm, 位于 211.05 m 高程。竖直方向的位移随高程的增加而减小, 边坡开挖面的最大竖直位移发生在 197.1 m 高程处, 约为 6.35 cm。第一主应力与初始应力场相比, 变化不大, 边坡主要处于压应力状态, 最大压应力为 1.93 MPa, 出现在边坡底部; 最大拉应力是 0.011 MPa, 出现在边坡高程为 197.1 m 的位置。

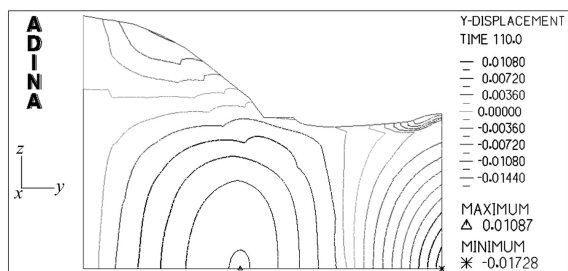


图 8 开挖后水平方向位移分布等值线图

Fig. 8 Contours of horizontal displacement after excavation

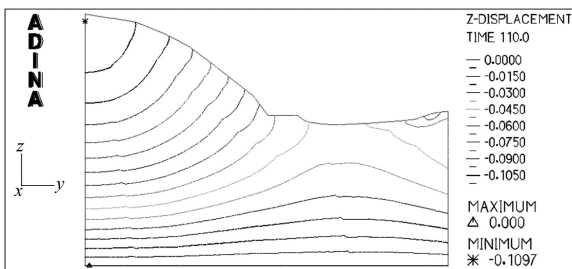


图 9 开挖后竖直方向位移分布等值线图

Fig. 9 Contours of vertical displacement after excavation

3.3 工况 3 计算结果及分析

上述 2 个工况均按常规弹塑性有限单元法计算的。B1-1' 剖面开挖结束后, 考虑到岩体的卸荷损伤与岩体质量劣化, 工况 3 应用卸荷岩体力学原理与方法进行计算。结合表 1 及图 3 进行计算参数的选取。计算的结果见图 10, 11。边坡的最大水平位移出现在开挖临空面高程为 191.65 m 的位置, 最大位移为 1.315 cm; 开挖面的最大竖直位移为 8.55 cm, 出现在高程为 199.9 m 的位置。第一主应力为拉应力, 约为 0.144 MPa。边坡开挖面上部出现小范围的拉应力区; 最大压应力为 1.923 MPa, 出现在边坡底部。

考虑边坡开挖卸荷后, 边坡岩体的应力场与位移场均发生了较大变化, 尤其是最大位移出现的位置和大小均有较大的变化。这一点在施工与运行过程中应引起足够的重视。

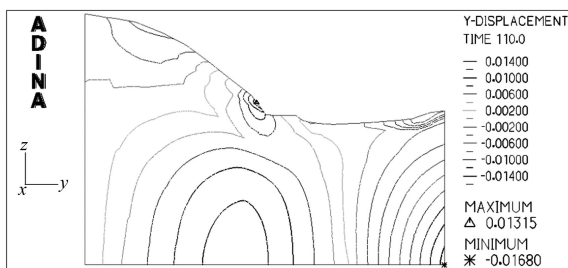


图 10 开挖卸荷后水平方向位移分布等值线图

Fig. 10 Contours of horizontal displacement after unloading excavation

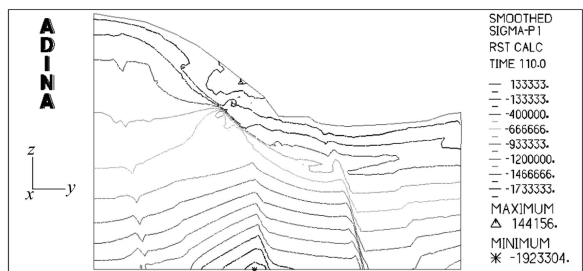


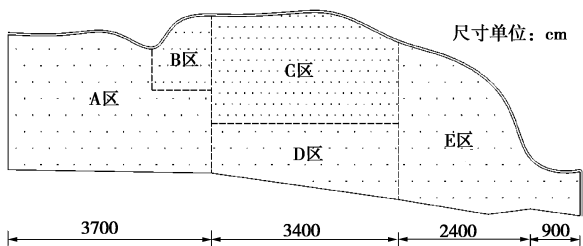
图 11 开挖卸荷后第一主应力等值线图

Fig. 11 Contours of first principal stress after unloading excavation

3.4 工况 4 (边坡加固) 计算结果及分析

工况 4 主要研究进行加固措施后边坡应力应变的变化情况, 以及加固后边坡开挖临空面位移的变化, 在边坡开挖卸荷后进行, 采用弹塑性有限元法计算。

加固方案为中南勘测设计院的设计方案, 如图 12 所示。根据图 2 可知有限元计算分析选取的 3 个剖面均可以按照 E 区的加固措施进行加固。



注: A区、B区设置6 m锚杆, 锚杆间距为3×3 m; B区设置6 m锚杆, 锚杆间距为1.5×3 m; C区设置9 m锚杆, 锚杆间距1.5×2 m; D区设置9 m锚杆, 锚杆间距为3×3 m。所有锚杆梅花型布置锚孔直距100 m。

图 12 进场公路边坡防护工程布置图

Fig. 12 Layout of protection structures of entrance road slope

计算结果见图 13~15。加固后边坡开挖面的最大水平位移为 1.135 cm, 位于 189.07 m 高程。与开挖卸荷工况最大水平位移值 (1.315 cm) 相比, 减小了 0.18 cm; 竖直方向的位移随高程的增加而减小, 边坡开挖面的最大竖直位移发生在 199.9 m 高程处, 约为 8.25 cm。第一主应力与开挖卸荷工况相比, 变化不大, 拉应力最大值减小, 为 0.135 MPa, 出现在高程 216.59 m 的位置, 且出现在该位置的拉应力区范围大大缩小。

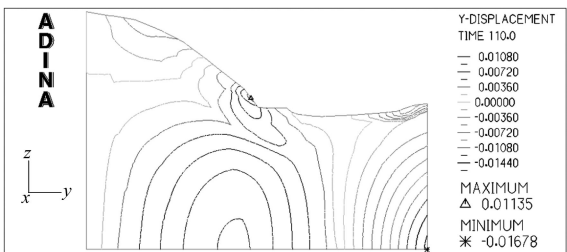


图 13 加固后水平方向位移分布等值线图

Fig. 13 Contours of horizontal displacement after reinforcement

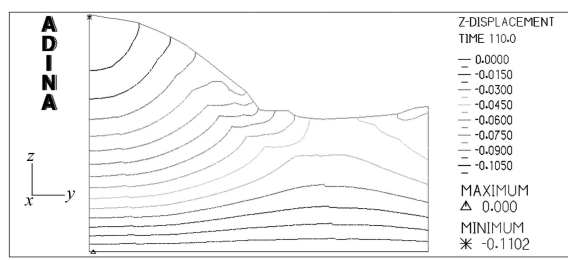


图 14 加固后竖直方向位移分布等值线图

Fig. 14 Contours of vertical displacement after reinforcement

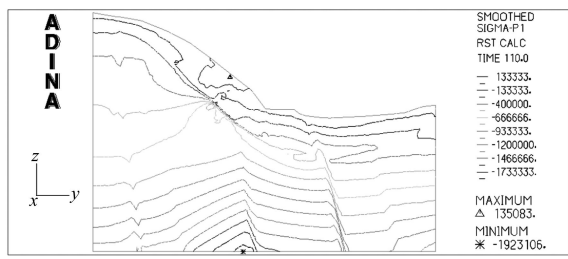


图 15 加固后第一主应力等值线图

Fig. 15 Contours of first principal stress after reinforcement

由此可知边坡加固措施有利于改善边坡开挖面附近区域的应力状态,有利于开挖边坡的稳定;边坡主要处于压应力状态,最大压应力为 1.92 MPa,出现在边坡底部。

3.5 4 种工况计算结果比较

根据前面的计算结果,B1-1'剖面在 4 种工况下计算的应力、位移值如下表 2 所示。

由表 2 可知,B1-1'剖面在开挖工况的最大水平位移较小。可运用卸荷岩体力学理论与方法计算时,最大水平位移要大几倍,而最大竖直位移这 2 个工况相差不是太大。

表 2 应力与位移的统计表

Table 2 Statistical values of stress and displacement

| 工况 | 主应力/MPa | | 位移最大值/cm | |
|----|--------------|---------------|----------|------|
| | 第一 | 第二 | 水平 | 竖直 |
| 初始 | -1.93~0.016 | -2.307~-0.013 | — | — |
| 开挖 | -1.93~0.011 | -2.307~-0.013 | 0.263 | 6.35 |
| 卸荷 | -1.923~0.144 | -2.258~0.023 | 1.315 | 8.55 |
| 加固 | -1.92~0.135 | -2.258~0.022 | 1.135 | 8.25 |

4 结 语

通过计算软件 ADINA 对扩建工程进场公路边坡进行了二维有限元数值计算分析,以 B1-1' 剖面为重点。根据边坡实际运行情况,分 4 种工况进行了计

算,并对各工况的计算结果进行分析。通过常规计算(工况 2)和本研究中的卸荷计算方法计算(工况 3)比较可知,运用卸荷岩体力学理论计算所得的最大水平和竖直位移值比常规计算的位移值都要大,但其在各个剖面的变化规律基本是一致的。加固措施对边坡开挖面水平位移的约束不明显,但对开挖面附近区域的应力状态有较大的改善,有利于边坡的稳定。

参考文献:

[1] 李建林, 王乐华, 刘 杰, 等. 岩石边坡工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006. (LI Jian-lin, WANG Le-hua, LIU Jie, et al. Rock slope engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006.(in Chinese))

[2] 哈秋龄, 李建林, 张永兴, 等. 节理岩体卸荷非线性岩体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (HA Qiu-ling, LI Jian-lin, ZHANG Yong-xing, et al. Nonlinear mechanics of jointed rock during unloading[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese))

[3] 邓正鹏, 高海生. 黄龙滩电厂扩建工程建设优化方案[J]. 湖北电力, 2005, 29(6): 4 - 6. (DENG Zheng-peng, GAO Hai-sheng. Optimized plan for the construction of expansion project of huanglongtan power plant[J]. Hubei Electric Power, 2005, 29(6): 4 - 6. (in Chinese))

[4] 李建林, 胡兴娥, 熊俊华, 等. 三峡地下电站进水口边坡稳定分析及加固优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 676 - 679. (LI Jian-lin, HU Xing-e,XIONG Jun-hua,et al. Analysis of slope stability and optimizing of anchor on the entrance slope of underground water power station in the three gorges project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 676 - 679. (in Chinese))

[5] 邓华锋, 李建林, 王乐华. 考虑卸荷的加锚裂隙岩体力学参数研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1027 - 1030. (DENG Hua-feng, LI Jian-lin, WANG Le-hua. Study on mechanic parameters of bolted fractured rock mass under unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1027 - 1030. (in Chinese))

[6] 易庆林, 邓华锋, 王乐华. 某公路边坡开挖卸荷变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 139 - 143. (YI Qing-lin, DENG Hua-feng, WANG Le-hua. Study on unloading deformation of one highway slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 139 - 143. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)