

# 地下工程岩体参数场反演分析应用研究

郭凌云<sup>1,2</sup>, 肖明<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 山西潞安矿业集团 基建中心, 山西 长治 046204)

**摘要:** 在施工过程中, 由于开挖方式、爆破以及支护施作滞后等因素的影响, 洞周岩体会存在不同程度的“劣化”。一般而言, 受开挖施工影响, 离洞室表面越近的岩体劣化程度越严重; 支护施作滞后时间越长岩体劣化程度越严重。因此, 提出参数场的概念, 将洞周围岩物理力学参数看作受初始地质状态、施工影响而随空间变化的非稳定参数场。采用三维弹塑性损伤有限元及位移反演分析方法, 经敏感度分析确定恰当的待反演岩体参数, 使用局部断面模型快速反演计算方法获得各监测断面区域岩体参数场, 再通过插值方法得到三维整体模型参数场, 适当修正后即可用于洞室后期开挖围岩变形及稳定预测。结合瀑布沟水电站地下厂房工程, 建立有限元模型, 代入监测数据, 反演获得洞周围岩参数场, 并将计算结果用于预报后续洞室开挖的围岩变形趋势, 结果显示岩体计算预测反演参数与实际监测值符合较好。

**关键词:** 岩石力学; 地下工程; 有限单元法; 围岩参数场; 反演分析

**中图分类号:** TU 451

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)增 2 - 3822 - 05

## BACK-ANALYSIS AND APPLICATION STUDY ON SURROUNDING ROCK PARAMETER FIELD OF UNDERGROUND ENGINEERING

GUO Lingyun<sup>1, 2</sup>, XIAO Ming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Infrastructure Management Center of Lu'an Group, Changzhi, Shanxi 046204, China)

**Abstract:** The quality of rock mass become unfavorable by the influence of blasting explosion, opening and lag of anchorage and support. The closer the surrounding rock near cave surface is, the worse it becomes. The longer the time after opening without anchorage and support is, the worse it becomes. So it is thought that surrounding rock is heterogeneous, but a parameter-field of space distribution, which is varied with the geological conditions; and opening and support methods are presented. Adopting 3D elastoplastic damage FEM and displacement back-analysis method, the proper parameters of surrounding rocks are determined by sensitivity analysis. Adopting local cross section model, the local parameter-field can be calculated rapidly. Then, the parameter-field of whole 3D model can be built by interpolation. Finally, combined with Pubugou underground powerhouse, the 3D FEM model is built. When monitoring data are inputted, the surrounding rock parameter-field can be obtained. The calculation results are used to predict the displacement and stabilization of surrounding rock. The results show that the distribution of parameters of surrounding rock mechanics calculated agrees well with those measured.

**Key words:** rock mechanics; underground engineering; finite element method; surrounding rock parameter-field; back-analysis

**收稿日期:** 2007 - 05 - 07; **修回日期:** 2007 - 08 - 27

**基金项目:** 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90715042)

**作者简介:** 郭凌云(1979 - ), 男, 2008 年于武汉大学水利水电学院获博士学位, 主要从事岩石力学数值计算方面的研究工作。E-mail: gly99011@ tom.com

## 1 引言

地下工程数值模拟中, 有限元方法最为成熟, 是当前分析地下工程围岩稳定的主要工具<sup>[1]</sup>, 但数值计算成功的关键因素之一是岩体材料参数的正确确定<sup>[2~4]</sup>。室内试验只能得到岩石的物理力学参数, 大规模现场试验费用过高, 而且影响施工进度<sup>[5]</sup>。因此, 监测位移反演方法自 20 世纪 70 年代提出以来, 在岩土工程界取得了长足发展<sup>[6]</sup>。

水电站地下厂房规模庞大, 洞室纵横交错, 结构复杂, 在整个工程区域内的围岩很少是一种均一岩体; 洞室开挖后应力调整, 岩体劣化; 不同部位岩体受开挖爆破等因素影响不同, 且锚固支护滞后时间不同, 围岩劣化程度也各不相同<sup>[7]</sup>。传统的反演分析方法将洞周岩体看作一种或少数几种均一岩体材料, 显然不能很好地模拟工程实际情况。

鉴于上述分析, 本文提出围岩参数场的概念, 认为洞室开挖后岩体参数是一个随空间、时间变化的参数场, 并结合三维弹塑性损伤有限元分析, 提出快速反演三维参数场的计算方法, 最后应用于一个工程实例, 验证了该方法的可行性, 并成功预报了洞室后续开挖的变形及稳定性情况, 取得了较好效果。

## 2 基本思路

### 2.1 参数场的概念

由于初始地质条件, 如断层、节理裂隙的影响, 洞周岩体往往是非均一的; 开挖爆破过程中, 不同部位岩体受扰动程度也各不相同<sup>[8]</sup>; 洞室开挖后, 不同部位岩体锚固支护滞后时间往往各不相等, 导致岩体劣化程度各不相同; 一般情况下, 由于开挖卸荷, 应力释放, 洞室表面岩体受力条件最为不利, 劣化程度最严重, 越远离洞室, 岩体受扰动越小, 劣化程度也越小。

设  $\mathbf{a}$  为地层材料的物理力学参数, 并描述为包含  $E, \mu, c, \varphi \dots$  的  $n$  维向量:

$$\mathbf{a} = \{E, \mu, c, \varphi, \dots\} \quad (1)$$

则  $\mathbf{a}$  为随空间、时间变化的非稳定场, 即

$$\mathbf{a} = f(x, y, z, t) \quad (2)$$

参数反演问题可简化为求解:

$$\min f(\mathbf{a}^{i+1}) = \|u(\mathbf{a}^i, \mathbf{b}^i) - \bar{u}\| \quad (3)$$

约束条件为

$$k u(\mathbf{a}^i, \mathbf{b}^i) = F \quad (4)$$

式(3), (4)中:  $\bar{u}$  为实际位移值;  $k$  为有限元刚度矩阵;  $F$  为由初始地应力计算得到的等效节点力;  $\|\cdot\|$  为定义在数值空间的某种范数;  $u(\mathbf{a}^i, \mathbf{b}^i)$  为计算位移值,  $\mathbf{a}^i$  为受  $i-1$  期开挖工程因素影响后的地层材料物理力学参数,  $\mathbf{b}^i$  为开挖、爆破等工程影响因素;  $\mathbf{a}^{i+1}$  为受  $i$  期开挖工程因素影响后的地层材料物理力学参数。显然,  $\mathbf{a}^i, \mathbf{a}^{i+1}, \mathbf{b}^i, u(\mathbf{a}^i, \mathbf{b}^i), F, \bar{u}$  皆为非稳定场。

在实际工程和有限元计算中,  $\bar{u}$  为有限个测点值,  $t$  为工程开挖分期时间点,  $\mathbf{a}$  为每个单元被赋予一个参数向量  $\alpha_n$  构成的参数场。将监测数据代入有限元模型, 正演迭代计算得到局部模型每个单元的  $\alpha_n$  值, 最后插值形成整个工程区域内岩体的参数场。 $\alpha_n$  是一个反映了岩体初始地质状况及开挖施工影响的表示当前岩体实际质量的综合参向量。

### 2.2 快速反演计算

位移反演分析计算主要分为逆反分析和正反分析 2 大类, 逆反分析法一次计算即可获得确定解, 但目前主要应用于弹性有限元, 尚少有应用于弹塑性损伤有限元的成功先例<sup>[9]</sup>; 正反分析可以方便地应用于弹塑性损伤有限元, 缺点是需要多次计算, 反复迭代, 花费时间较长。因此, 在目前必须使用正演反分析方法的前提下, 如何提高计算速度成为主要矛盾所在<sup>[10]</sup>。

在反演计算中, 待反演参数越多, 范围越大, 计算时间越长。对  $E, \mu, c, \varphi$  做荷载一位移敏感度分析, 变形模量  $E$  对岩体变形影响比其他 3 个参数大一个数量级以上, 根据试验提供值将  $\mu, c, \varphi$  限定在一个较小区间内<sup>[11]</sup>, 主要搜索  $E$  值, 在满足工程精度要求下, 可以极大提高反演计算速度。

正演反分析计算需要多次调用有限元, 而有限元计算的特点之一是随着自由度的增加, 耗费计算时间成急剧的非线性增长, 由于工程规模巨大, 建立的有限元模型往往达数万至数十万单元, 直接调用整体 FEM 模型计算, 速度过慢, 失去计算意义。

分析大量的工程监测资料以及相关文献, 可得出如下结论: 地下洞室开挖过程中, 掌子面开挖对 2~3 倍洞径范围内岩体影响较大, 之外的岩体受影响极小<sup>[12~14]</sup>。另外, 在大型地下工程中都会设计系统的监测断面。因此, 可以根据监测资料将整体模

型划分为数个包含一个或一个以上监测断面的局部模型，分别反演计算获得各监测断面的岩体变形模量参数场，再整合到整体模型中，经过插值计算获得整个区域内的参数场。由于反演计算中调用的是局部 FEM 模型，可以实现多个局部模型多台电脑同时计算，极大地提高了计算速度。

### 3 实现方法

设某局部模型包含一个监测断面，主要洞室及位移计布置如图 1 所示。搜索洞周单元，每一主洞室形成一张存储受扰动岩体单元编号的二维表  $T_L$  如图 2 所示，表中第一行存储  $L$  洞室环向表面岩体单元，每一列存储对应由洞室表面向岩体深部延伸的单元编号。

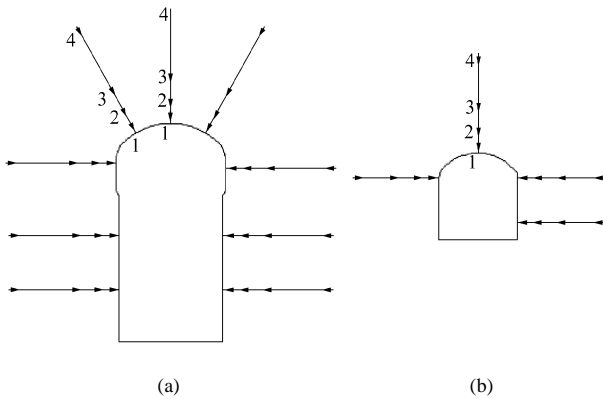


图 1 洞室监测断面位移计布置图

Fig.1 Extensometers on the monitoring section of caves

	$M_{L1}$	$M_{L2}$	$M_{L3}$	$M_{LM}$
xxx	△	xxx	△	△
xxx	xxx	xxx	xxx	
	△		△	△
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	△		△	△

△—位移计测点；xxx—单元编号

图 2  $L$  洞室二维表  $T_L$  与位移计关系图

Fig.2 Relation of  $L$  cave's  $T_L$  and extensometers

将位移计编号为  $M_{Lk}$ ， $L$  表示模型内洞室编号， $k$  表示第  $L$  个洞室内沿顺时针方向完整封闭圈内位移计编号。搜索与各位移计相关的单元，找出每支位移计与表  $T_L$  内相应列的对照关系，找出位移计上各测点与  $T_L$  表内对应列的对应单元的逻辑关系，如

图 2 所示。

在反演计算中，代入初值，调用有限元，计算完成后求得计算值与监测值误差  $f$ ，若误差较大，则根据位移计测点监测数据，首先整体调整  $T_L$  表内位移计对应列岩体单元的  $\alpha_n$  值；再根据同一位移计上锚点间的相对位移调整同一列内不同锚点间岩体单元  $\alpha_n$  值；重复上述步骤，完成  $T_L$  表内所有位移计对应列单元的  $\alpha_n$  值调整，然后根据已调整值横向插值形成一个完整的洞周岩体参数表。完成该模型中所有主要洞室洞周岩体参数表插值后再统一形成该局部模型中受洞室开挖扰动的岩体参数场。再次调用 FEM 计算，计算后再次根据监测值调整参数表。如上反复迭代计算，直至计算值与监测值误差满足精度要求，即完成了该局部模型的反演计算。

三维反演计算流程如图 3 所示。

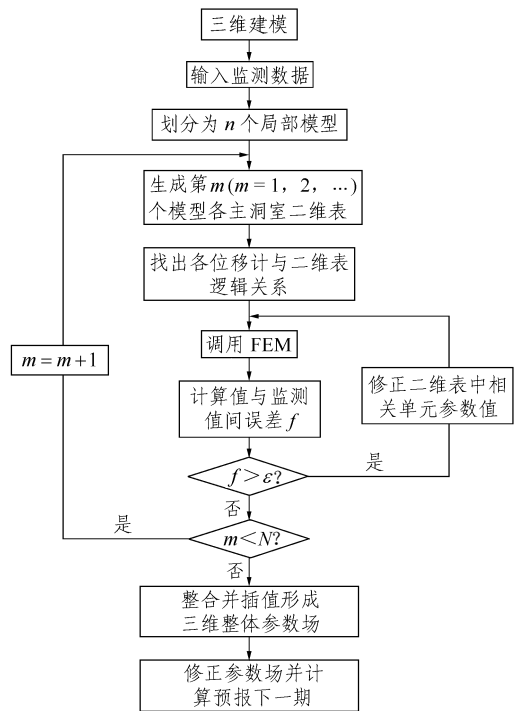


图 3 反演计算流程图

Fig.3 Flow chart of back-analysis

## 4 工程实例

### 4.1 工程简介

瀑布沟地下水电站位于四川省大渡河上，装机容量  $3.3 \times 10^6$  kW。地下厂房洞室群埋于 200~360 m 深的左岸山体内，主要由主厂房、主变室、尾水闸门室、6 条引水隧洞和 2 条尾水隧洞组成。地下洞室

结构纵横交错, 规模巨大, 主厂房尺寸 294.10 m×30.70 m×70.15 m(长×宽×高), 吊车梁以上的宽度达到 32.40 m。主变洞尺寸 250.30 m×18.30 m×25.58 m(长×宽×高), 尾水闸室尺寸 178.87 m×17.40 m×53.35 m(长×宽×高)。

地下厂房洞室群岩体属中粗粒花岗岩, 厂区岩体主要有两大区: F<sub>12</sub>, F<sub>13</sub> 断层以西区域, 小断层发育, 岩体完整性较差, 大多属 III 类岩体; F<sub>7</sub> 以南区域, 岩体弱风化, 围岩质量多属 II, III 类。区域岩体分类见表 1, 地质勘探物理力学指标建议值见表 2。

表 1 地下厂房岩体分区

Table 1 Rock mass regionalization of underground powerhouse

桩号里程	围岩类别
0-60~0-50	II
0-50~0+100	III
0+100~0+125	II
0+125~0+210	III
0+210~0+234	II

表 2 地下厂房岩体物理力学参数建议取值

Table 2 Suggested values of rock mass mechanical parameters around underground powerhouse

岩体类别	密度 $\rho$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	变形模量 $E$ /GPa	泊松比 $\mu$	强度指标		弹性抗力系数 $K_0$ ( $kN \cdot cm^{-3}$ )
				$\tan \phi'$	$c'/MPa$	
II	2.61	15~20	0.21	1.35	2.0	5~7
	3.07	12~18	0.23	1.35	2.0	5~7
III	2.61	8~13	0.25	1.10	1.2	4~5
	2.88	6~10	0.27	1.10	1.2	4~5

### 4.2 模型及计算

根据地下厂房布置及尺寸, 建立了包括主厂房、主变洞、母线洞、尾水闸室、引水洞、尾水洞等洞室的三维有限元网格。模型共剖分了 19 773 个八节点空间等参单元。三维计算坐标原点位于 6# 机组中心点, X 轴为 NE132°, 与厂房纵轴线垂直, 指向下游为正; Y 与厂房纵轴线重合, 指向左端墙为正; Z 轴与大地坐标重合。模型沿 X 轴方向计算范围从厂房上游 -220.00 m 到下游 335.43 m, 沿 Y 轴方向计算范围为 -90.00~275.00 m, 沿 Z 轴方向高程计算范围为 421.38~1 115.23 m。计算模型包括 F<sub>14</sub>, F<sub>9</sub>, F<sub>13</sub>, F<sub>9-1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>18</sub>, F<sub>28</sub>, F<sub>29</sub> 共 8 条断层, 断层位置和三维有限元网格剖分如图 4 所示。

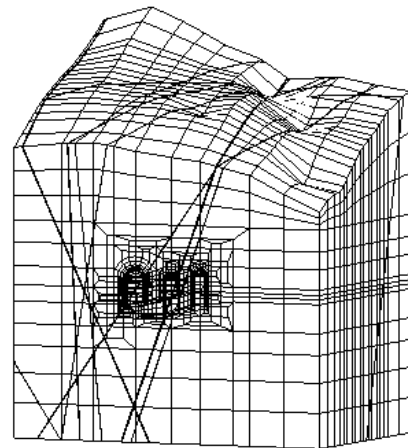


图 4 三维有限元模型

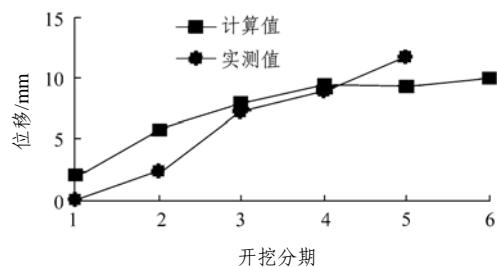
Fig.4 3D finite element model

工程中共布置了 7 个系统监测断面, 形式与图 1 类似, 因此在计算中设置划分出 7 个局部反演计算模型。

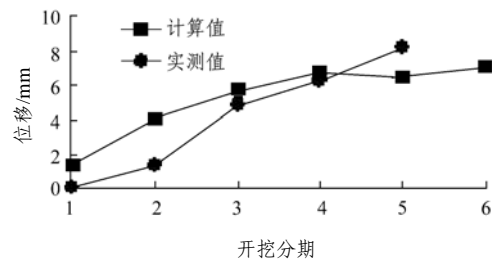
本工程共分 9 期开挖, 在 5 期开挖后监测位移计位移值较大, 部分位移计累积变位值达 40 mm, 由于洞周位移计间测值相差较大, 反分析计算中设置控制误差  $\epsilon = 5$  mm。

### 4.3 结果分析

C1 - C1(桩号 0+016.6)断面的 M16 位移计, 其测点 1, 2 的计算值与实测值按开挖分期对照如图 5 所示, 位移计算值与实测值较为接近, 误差在 3 mm 以内, 各分期开挖计算变形趋势与实测规律一致。



(a) 测点 1



(b) 测点 2

图 5 M16 位移计计算与实测值对照

Fig.5 Comparison between calculated and measured displacements of extensometers M16

计算结果显示,本工程中厂房上游边墙及拱角位移较大,破坏区比下游边墙及拱角要大;洞室拱顶稳定性良好,位移值较小。这与监测到的情况一致。将部分区段反演所得岩体材料变形模量值列于表3,对照表2,3,反演计算所得岩体材料参数值大体上反映了工程区域内岩体质量变化情况,同时可以看出,反演洞周围岩参数值普遍比初始提供值小,反映了由于施工扰动、围岩应力调整而引起岩体质量劣化的现象。

表3 反演计算所得岩体变形模量

Table 3 Rock mass deformation moduli of back-analysis calculation GPa

桩号里程	上游边墙	上游拱座	拱顶	下游拱座	下游边墙
0+16.6	3.0~4.6	3.0~4.8	10.0	5.0~8.0	3.0~5.0
0+115.6	12.0~16.0	8.0~10.0	9.0~12.0	10.0~11.0	7.0~8.0
0+181.6	5.0~6.0	8.0~9.0	8.0~10.0	8.0~9.0	5.0~6.0

## 5 结 论

(1) 本文提出的岩体材料参数场可反映地下工程中不同部位岩体的差别,还能反映由于开挖等工程因素引起的岩体质量劣化效果,为更加真实地模拟地下工程提供了一种有效方法。

(2) 本文提出的快速反演计算方法在满足工程精度条件下,极大提高反演计算速度,使大型地下工程反演分析计算变得可行。

(3) 将该方法应用于工程实际,取得较好效果,并成功预报了后续开挖围岩变形及稳定情况。

(4) 反演分析是一个复杂的系统工程,涉及到岩体本构关系、材料弹塑性损伤、爆破扰动、锚固支护等因素影响,实现一次计算获得正确解的逆反分析还有待岩土工作者的长期努力。

### 参考文献(References):

[1] 徐干成,白洪才,郑颖人,等. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.(XU Gancheng, BAI Hongcai, ZHENG Yingren, et al. Underground engineering and support structure[M]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))

[2] YANG Z F, LEE C F, WANG S J. Three-dimensional back-analysis of displacements in exploration adits—principles and application[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 525 - 533.

[3] 杨志法,张路青,曾庆利,等. 可用于确定水平地应力分量和围岩弹性模量的 TBA 位移反分析法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4 000 - 4 005.(YANG Zhifa, ZHANG Luqing, ZENG Qingli, et al. TBA method of displacement back-analysis used to determine horizontal in-situ stress component and elastic modulus of surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

Engineering, 2004, 23(23): 4 000 - 4 005.(in Chinese))

[4] 贾超,刘宁,肖树芳. 洞室岩体参数的位移正演反分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 450 - 454.(JIA Chao, LIU Ning, XIAO Shufang. Application of direct displacement inverse analysis to rock mass parameters of caverns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 450 - 454.(in Chinese))

[5] ZHANG L Q, YUE Z Q, YANG Z F, et al. A displacement-based back-analysis method for rock mass modulus and horizontal in-situ stress in tunneling—illustrated with a case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(6): 636 - 649.

[6] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996.(YANG Linde. Theory of back analysis of geotechnical engineering problem and its engineering practice[M]. Beijing: Science Press, 1996.(in Chinese))

[7] 肖明. 地下洞室施工开挖三维动态过程数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 421 - 425.(XIAO Ming. Three-dimensional numerical model of construction process for underground opening[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(4): 421 - 425.(in Chinese))

[8] 朱合华,张晨明,王建秀,等. 龙山双连拱隧道动态位移反分析与预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 67 - 73.(ZHU Hehua, ZHANG Chenming, WANG Jianxiu, et al. Dynamic displacement back analysis and prediction of Longshan two-arcade twin tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 67 - 73.(in Chinese))

[9] 李宁,段小强,陈方方,等. 围岩松动圈的弹塑性位移反分析方法探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1 304 - 1 308.(LI Ning, DUAN Xiaoqiang, CHEN Fangfang, et al. A back analysis method for elastoplastic displacement of broken rock zone around tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1 304 - 1 308.(in Chinese))

[10] 茹忠亮,冯夏庭,李洪东,等. 大型地下工程三维弹塑性并行有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1 141 - 1 146.(RU Zhongliang, FENG Xiating, LI Hongdong, et al. 3D elastoplastic parallel finite element analysis of large-scale underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1 141 - 1 146.(in Chinese))

[11] 刘世君,徐卫亚,王红春. 不确定性岩石力学参数的区间反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 885 - 888.(LIU Shijun, XU Weiya, WANG Hongchun. Interval back analysis of uncertain parameters in rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 885 - 888.(in Chinese))

[12] 周扬,张志斌. 三峡工程右岸地下电站主厂房施工期安全监测[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(6): 70 - 74.(ZHOU Yang, ZHANG Zhibin. Safety monitoring for the main powerhouse of Three Gorges project right bank underground hydropower station at construction stage[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2006, 30(6): 70 - 74.(in Chinese))

[13] 王军,夏才初,朱合华,等. 不对称拱隧道现场监测与分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 267 - 271.(WANG Jun, XIA Caichu, ZHU Hehua, et al. Site monitoring and analysis of non-symmetrical multi-arch highway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 267 - 271.(in Chinese))

[14] 夏才初,龚建伍,唐颖,等. 大断面小净距公路隧道现场监测分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 44 - 50.(XIA Caichu, GONG Jianwu, TANG Ying, et al. Study on site monitoring large-section highway tunnels with small clear spacing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 44 - 50.(in Chinese))