

# 三峡工程永久船闸三闸首区开挖变形特征的智能分析\*

冯夏庭<sup>1,2</sup> 张治强<sup>2</sup> 盛谦<sup>3</sup> 徐平<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院武汉岩土力学研究所 LRSM 开放研究实验室 武汉 430071) (<sup>2</sup> 东北大学 沈阳 110006)

(<sup>3</sup> 长江科学院岩基研究所 武汉 430010)

**摘要** 针对三峡工程永久船闸三闸首区闸室开挖诱发的岩体变形特征,提出了一种复杂岩体变形、应力及损伤状态的智能分析方法。分析过程中所涉及的岩体力学参数和本构模型利用现场监测到的位移进行智能识别,然后利用所确定的参数和模型,考虑动态施工和环境诱发岩体损伤的影响,对复杂岩体的变形、应力及损伤状态特征进行分析。结果表明,由智能计算得出的中隔墩顶面和两侧边坡直立墙的变形趋势与实测情况较吻合,而且开挖区表层附近出现较大区域的塑性区,直立墙和中隔墩的中上部出现拉应力区,直立墙底部拐角处出现压应力集中现象。

**关键词** 三峡工程永久船闸,卸荷效应,智能位移反演,模型识别,变形特征,智能分析

**分类号** TU 457, TP 18

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2001)05-0633-05

## 1 前言

三峡工程永久船闸三闸首区边坡开挖深度最大,地质条件复杂,F<sub>215</sub>断层恰好在此穿过,致使岩体完整性相对较差,因而成为永久船闸安全监测与稳定性评价的重中之重。开挖引起或长期处于交变载荷作用下的闸室与高边坡的变形行为特征是令人十分关注的问题。

国内许多岩石力学研究单位,都对如此复杂的高边坡稳定性问题进行了系统而深入地研究<sup>[1~15]</sup>,这些研究成果对于指导工程设计与施工起到了重要的作用。然而,要取得令人满意的成果,岩体力学参数和本构模型的正确选取是关键<sup>[16,17]</sup>。本文将提出一种新的分析方法,主要是指分析过程中所涉及的岩体力学参数和本构模型利用现场监测到的位移进行智能识别<sup>[18]</sup>,然后利用所确定的参数和模型,并考虑动态施工诱发岩体损伤、加卸荷的影响,对永久船闸三闸首区岩体的变形、应力及损伤状态特征进行分析研究。

## 2 变形特征的智能分析方法

变形特征的智能分析方法的主要思路(如图1所示)可以概括为:

(1) 对被分析体,获取一些特征点的变形信息(表面位移、深部位移等)。

(2) 根据工程和岩石力学分析经验,选择几种代表性的模型作为基本模型,对模型中的参数进行敏感度分析,以确定待定参数的确定方法。对于位移敏感的参数可用反演方法确定,否则只能采用其他方法,如工程经验类比法。

(3) 用此模型和参数进行被分析体的变形、应力及损伤状态分析,比较计算出的特征点的位移值与实测值的差别。

(4) 如果误差不能满足要求,则需要进行模型和参数的进化,进化方法参见文[6~8],转(3);否则,转(5)。

(5) 用所获得的模型和参数进行被分析体的数值分析,评价岩体的变形、应力及损伤状态。

2000年3月31日收到初稿,2000年5月16日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金(59939190)资助项目,霍英东青年教师基金(T1048)和教育部优秀青年教师教学与科研奖励计划资助项目。

作者 冯夏庭 简介:男,1964年生,博士,1986年毕业于东北大学,现任教授、博士生导师,中国科学院“百人计划”入选者,主要从事智能岩石力学与工程研究及教学等方面的工作。

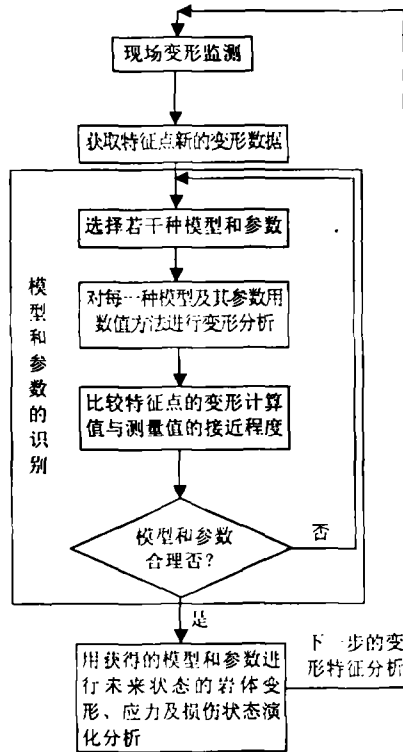


图 1 复杂岩体变形特征的智能分析方法

Fig.1 Intelligent approach to recognize deformation behavior of complex rockmass

这种方法可以实现利用现场监测到的被分析区域的某些特征点的变形信息反演识别的参数和本构模型,估计被分析区域的变形、应力及损伤状态;也可以估计被分析区域未来的变形、应力及损伤演化状态。例如,后期监测到的变形数据重新作为输入或加入原输入集,进行重新或类似的参数与模型的识别。然后用反演得出的参数和模型估计闸区岩体在类似条件下的未来一段时间内的变形行为。这样,新监测到的位移数据不断地更新,用于参数和模型反演的信息,可以使反演结果得以更新,及时抓住岩体的变形特征。如此继续下去,可以根据监测到的局部变形信息对岩体的未来或长期变形特征进行合理的识别。

### 3 计算概况

#### 3.1 计算条件

计算模型在  $x$  方向(朝南、垂直船闸轴线方向)取 1 200 m,以中隔墩为中心向南北各延伸 600 m。地面最高标高为 260 m 左右,闸室底部高程为 92.2 m,开挖最大高度约为 170 m,计算模型顶部取到地表,底部高程取为 -250 m,模型在垂直方向( $y$ 向)

上的最大高度为 510 m。这样,计算模型的宽度和高度均分别超过了船闸最大开挖宽度(约 350 m)和高度(约 170 m)的 2 倍。

在模型的两测(即  $x$  轴左边界和右边界)和底边采用位移约束条件,地表采用自由边界。计算过程中,将岩体按风化程度由上至下分为全强风化岩体、弱风化岩体和微新岩体考虑,其边界线根据现场测得的地质资料确定。由于开挖引起周边岩体损伤和扰动,故将微新岩体分为微新开挖损伤区、微新卸荷区、微新未扰动区(图 2)。在计算中考虑  $F_{215}$  断层。损伤卸荷带岩体随开挖步不断弱化的性态通过改变网格单元的性质来实现。

在网格划分时对较为关心的部位和可能出现应力集中现象的部位进行了局部加密。最后,网格划分为  $161 \times 101$  个网格节点,  $160 \times 100$  个单元。

#### 3.2 开挖过程的模拟

由于初始地应力的存在,岩石的开挖将导致部分岩体卸载,从而使一定范围内的应力场发生变化,通常采用沿开挖面作用着与初始地应力等价的等效荷载的方式来模拟,把由此所得的位移作为由工程开挖产生的岩体位移。根据实际开挖进度,17-17 剖面闸室岩体开挖共分 12 步。考虑开挖卸荷效应,对当前开挖步认为卸荷过程是逐步完成的,即卸荷带与过渡带岩体力学参数随开挖卸荷逐步降低。下一步开挖时考虑上一步开挖的岩体卸荷效应,并保存历史开挖步的卸荷带和过渡带,直至全部开挖完成。不考虑全强风化和弱风化岩体的开挖卸荷效应。

### 4 参数与模型的识别

6 个测点(TP/BM26GP02, TP/BM27GP02, TP/BM28GP02, TP/BM29GP02, TP/BM10GP01 和 TP/BM11GP01)在船闸第 8 步开挖终了时(1997 年 5 月~1999 年 4 月)测得的累计位移增量用于参数和模型的识别。

对于微新区岩体的初始地应力场,考虑自重应力与构造应力的共同作用。根据三峡船闸区的实测资料,取  $\sigma_x = a_x + 0.01168H$ ,  $\sigma_y = a_y + 0.03039H$ ,  $\sigma_z = 1.6628 + 0.01184H$ ,  $\tau_{xy} = 0$ ,  $\tau_{yz} = 0$ ,  $\tau_{zx} = 0.0$ 。对于全强风化区岩体,仅考虑自重应力场,取  $\sigma_x = \mu \gamma H / (1 - \mu)$ ,  $\sigma_y = \gamma H$ ,  $\sigma_z = \mu (\sigma_x + \sigma_y)$ ,  $\tau_{xy} = 0$ ,  $\tau_{yz} = 0$ ,  $\tau_{zx} = 0.0$ 。其中,  $\gamma$  为岩体容重;  $a_x$ ,  $a_y$  为待反演的常数项。在弱风化花岗岩中,初始应力场按埋深由微风化带花岗岩上边界处的初始应力值与

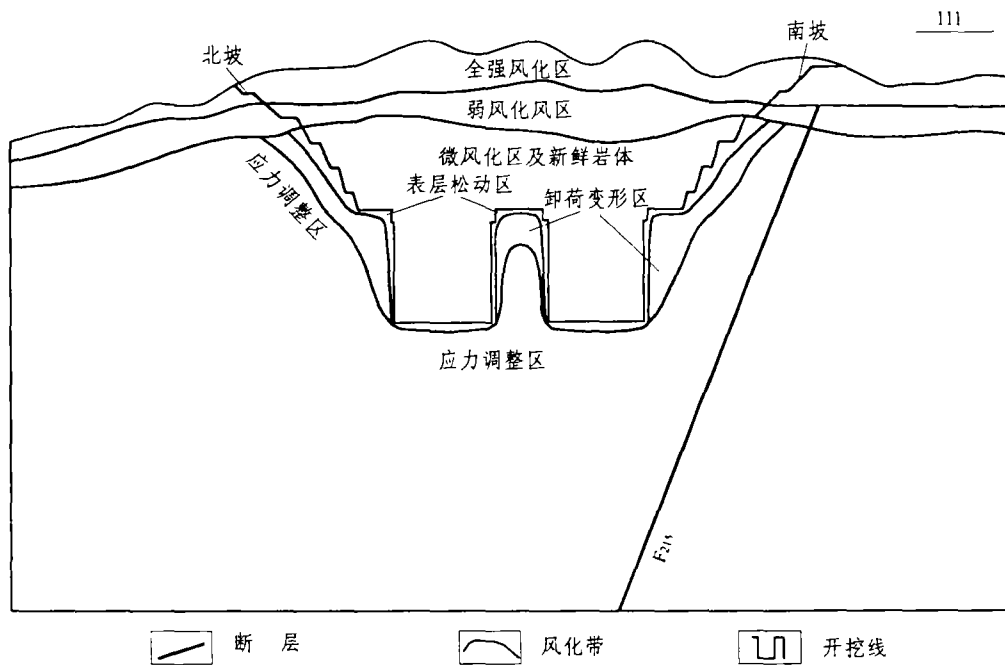


图 2 岩体分区图, 损伤区、卸荷区是随着其附近的开挖逐渐形成的。

Fig.2 Rockmass zones, damage zone and stress relaxation zone generated with excavation of their close rockmass

全强风化带下边界处的初始应力值的插值给定。

输入表 1 中的参数, 用上述的智能方法识别的模型为德鲁克-普拉格模型, 弹性模量分别识别为 32.1 GPa(弱风化区)、18.95 GPa(微新开挖损伤区)、9.683 GPa(微新卸荷区)、7.515 GPa(微新未扰动区)。构造地应力常数  $a_x$ ,  $a_y$  分别为 4.793 和 1.599, 这接近于现场测量回归出的值: 4.40 和 1.66。

表 1 17-17 剖面各介质参数的取值

Table 1 Mechanics parameters of section 17-17 obtained with intelligent method

介质类型	$E$ GPa	$f$ /MPa	$c$ /MPa	$\mu$	$R_t$ /MPa	$\gamma$ /kN·m <sup>-3</sup>
全强风化区	0.3	0.7	0.1	0.32	0.2	25.0
$F_{215}$	3.0	1.0	0.5	0.35	0.5	26.5
弱风化区	1.3	1.0	0.24	1.0	1.0	26.5
微新开挖损伤区	1.4	1.0	0.22	1.0	1.0	27.0
微新卸荷区	1.5	1.6	0.23	1.5	1.5	27.0
微新未扰动区	1.7	2.0	0.23	1.2	1.2	27.0

### 5 分析结果与讨论

由闸区高边坡上部的 6 个监测点(TP/BM10GP01, TP/BM11GP01, TP/BM26GP02, TP/BM27GP02,

TP/BM28GP02, TP/BM29GP02)的表面位移监测值, 通过反向识别, 用得出的参数与模型进行整个三闸首闸区岩体在开挖过程中岩体变形情况的智能分析, 获得如下认识:

(1) 从开挖完成后的位移矢量图来看, 边坡岩体变形总体表现为卸荷回弹, 闸室直立墙和南北边坡的岩体水平方向变形朝着闸室方向进行, 并随着开挖深度的下降略有增大。开挖完成后, 中隔墩岩体的顶部略向北侧倾倒, 而随着深度的延伸, 变形转向两侧闸室。这与现场监测到的结果是一致的, 中隔墩顶部的南侧(TP/BM97GP02 监测点)处单步开挖引起的位移方向背离南侧闸室, 而中隔墩顶部的北侧(TP/BM70GP02 监测点)处单步开挖引起的位移方向指向北侧闸室。由图 3 还可以看出, 对于闸室两侧连接边坡的直立墙顶点(TP/BM71GP02 监测点和 TP/BM98GP02 监测点), 由智能分析方法计算出的变形趋势也与监测结果相一致。由此可以看出, 本文所识别的模型及计算方法是合理的, 能反映实际工程的开挖效果。

(2) 从计算结果可以看出, 开挖区表层附近出现较大区域的塑性区, 随着开挖深度的增加, 中隔墩顶部的塑性区范围逐渐扩大, 两侧边墙的塑性区也随着开挖深度的增加逐渐向下部发展, 而两侧斜

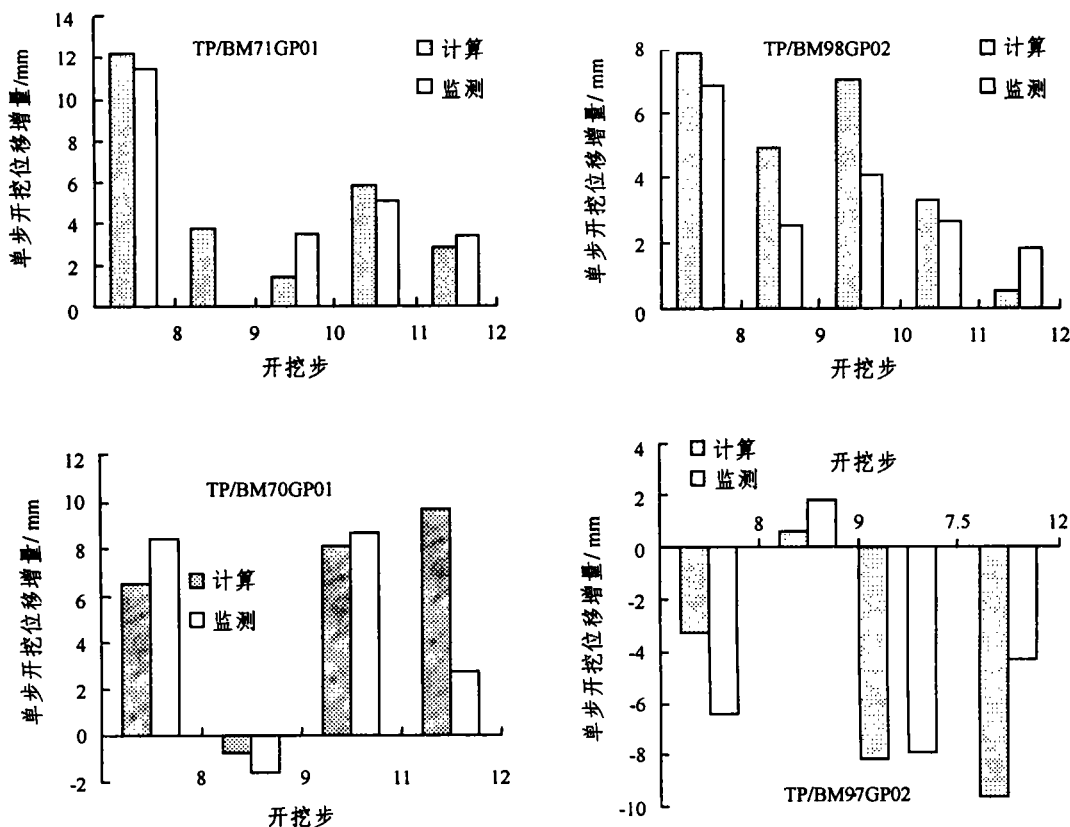


图3 永久船闸直立墙及中隔墩岩体顶板两侧单步开挖引起的位移预测值与监测值的比较, 此数据未用作模型和参数的识别

Fig.3 Deformation of the isolated rockmass induced by each step of excavation of shiplock rockmass, it isn't used for recognition of parameters and model

面边坡塑性区则比较小。从对应力等值线进行分析可见, 由于模型下部的初始应力场较大, 在开挖后产生的应力释放也就相对较大, 随着开挖深度的增加, 中隔墩及两侧边墙顶部产生的卸荷作用也相对增加, 故破坏作用相对较大。

(3) 全强风化和弱风化上部岩体几乎没有塑性区分布, 闸室以上南北边坡均有由开挖面向坡内延伸至过渡带岩体的塑性区, 部分过渡带岩体也进入了塑性区。闸室直立墙自顶部宽平台至闸室底存在开挖面向岩体内延伸较大的塑性区, 且上部较宽, 下部较窄。中隔墩的大部分都已进入塑性区, 仅在接近闸室底部的中间部分岩体尚处于弹性状态。

(4) 在闸室开挖过程中, 随着开挖的进行, 普遍产生应力松弛现象, 但在开挖底部时, 尤其在开挖闸室底部时, 出现应力集中现象, 应力集中部位随开挖的不断进行而不断下移, 集中程度也不断加重。闸室开挖完成后, 局部部位将出现拉应力区, 主要集中在中隔墩的中上部和直立墙的中上部, 中隔墩顶部最大拉应力为 0.465 MPa, 南、北直立墙

最大拉应力分别达到 0.574 MPa 和 0.68 MPa。左、右闸室底部拐角处压应力集中, 其中, 南、北直立墙底部拐角处压应力最大值分别达 -27.3 MPa 和 -19.14 MPa。这是因为中隔墩岩体在闸室开挖后三向卸荷、局部四向卸荷, 岩体由受压转向受拉、裂缝由压剪转为拉剪的趋势更为明显, 裂缝扩展的可能性大。1999 年 2 月曾对二闸室至三闸首中隔墩顶面找平混凝土面裂缝进行过统计, 共发现裂缝 140 条。采用测缝计观测, 裂缝开度一般为 3~5 mm(占总数的 76%), 少量开度为 5~10 mm, 开度大于 10 mm 有 4 条, 最宽者达 23 mm。

(5) 以上仅对三闸首区开挖引起的岩体变形特征进行了智能分析。然而, 三闸首区在运行期的长期变形行为又是怎样的呢? 这可采用本文提出的智能分析方法继续进行研究, 即可以采用运行期监测到的变形数据重新进行类似的参数与模型的反演。然后用反演得出的参数和模型估计闸区岩体未来的变形行为。这样, 新监测到的位移数据不断地更新用于参数和模型反演的信息, 可以使反演结果

得以更新。实际上,在运行期的长期交变载荷作用下,闸区岩体和支护结构(混凝土、锚杆、锚索等)的强度和变形行为将会有所改变,新监测到的位移数据将是其具体的体现。这种思想就是本文智能方法所持有的特点。

### 参 考 文 献

- 1 张有天,周维垣. 岩石高边坡的变形与稳定[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999
- 2 Zhu W, Zhang Y. Effect of reinforcing the high jointed slopes of Three Gorges flight lock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1998, 31(1): 63~77
- 3 周维垣, 杨若琼, 剡公瑞. 岩体边坡非线性卸荷及流变分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(3): 210~216
- 4 陆培炎. 三峡永久船闸陡高边坡直墙顶的水平位移估计及意见[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(1): 120~125
- 5 陈胜宏. 三峡工程船闸边坡的弹粘塑性自适应有限元分析[J]. *岩土力学*, 1998, 19(1): 13~19
- 6 张家发, 张伟, 朱国胜等. 三峡工程永久船闸高边坡降雨入渗实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(2): 137~141
- 7 朱维申, 张强勇. 节理岩体脆弹性断裂损伤模型及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(3): 245~249
- 8 肖洪天, 强天弛, 周维垣. 三峡船闸高边坡损伤流变及实测分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(5): 512~515
- 9 卢文波. 三峡工程临时船闸与升船机开挖中的爆破方案优化和爆破振动控制[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(5): 516~519
- 10 张有天, 陈平, 赛铁生. 三峡永久船闸混凝土边坡极端不利外水压力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(2): 186~192
- 11 朱维申, 程峰. 能量耗散本构模型及其在三峡船闸高边坡稳定性分析中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 261~264
- 12 朱焕春. 三峡临时船闸及升船机高边坡岩体变形特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 281~284
- 13 章青, 卓家寿. 三峡船闸高边坡稳定分析的界面元法与评判准则[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(3): 285~288
- 14 徐平, 周火明. 高边坡岩体开挖卸荷效应流变数值分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(4): 481~485
- 15 盛谦, 丁秀丽, 冯夏庭等. 三峡船闸高边坡考虑开挖卸荷效应的位移反分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(增): 987~993
- 16 冯夏庭, 杨成祥. 智能岩石力学(2)——参数与模型的智能辨识[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(3): 350~353
- 17 冯夏庭, 张治强. 位移反分析的进化神经网络方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(5): 529~533
- 18 Feng Xiating, Zhang Zhiqiang, Sheng Qian. Identifying rockmass mechanical parameters of Three Gorges Project permanent shiplock using intelligent displacement back analysis method[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2000, (37): 1 039~1 054

## INTELLIGENT ANALYSIS OF DEFORMATION BEHAVIORS OF PERMANENT SHIPLOCK OF THE THREE GORGES PROJECT

Feng Xiating<sup>1,2</sup>, Zhang Zhiqiang<sup>2</sup>, Sheng Qian<sup>3</sup>, Xu Ping<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> LRM Laboratory, Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)

(<sup>2</sup> Northeastern University, Shenyang 110006 China)

(<sup>3</sup> Yangtze Institute of Science Research, Wuhan 430010 China)

**Abstract** To the question of deformation, stress and damage behaviors of complex rockmass induced by excavation of shiplock rooms in the Three Gorges Project, a new method for analyzing deformation, stress and damage behaviors of complex rockmass is proposed. The monitoring displacement for key positions is used to recognize parameters and model. The recognized results are used to analyze deformation, stress and damage behaviors of complex rockmass in future. The results indicate that displacement change tendency of the isolated rockmass and straight walls of slope are consistent with the monitoring results. Tensile stress zone exists at top of the isolated rockmass and stand wall of slope.

**Key word** the Three Gorges Project, permanent shiplock, unloading effect, intelligent back analysis, model recognition, deformation behaviors, intelligent analysis