

龙滩水电站左岸边坡二维位移反分析

张勇慧, 盛 谦, 冷先伦, 朱泽奇

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 论述了考虑开挖卸荷效应的二维位移反分析方法。对龙滩水电站左岸岩质边坡 1-1 剖面进行地质概化、施工开挖分区和开挖扰动分区, 建立有限元计算模型。根据试验和现场实测资料, 确定待反演得参数和取值范围, 通过二维弹塑性有限元方法与神经网络-遗传算法相结合反分析出岩体力学参数。基于该参数的正分析计算结果表明, 计算位移与监测位移趋势一致, 量值吻合。开挖面附近最大压应力约为 1.0 MPa 左右, 开挖面附近基本上没有拉应力区。开挖完成后的塑性区主要分布在坡顶和开挖面及大断层附近, 而且基本上发生在开挖损伤区和部分卸荷影响区。

关 键 词: 边坡工程; 开挖卸荷效应; 位移反分析; 神经网络-遗传算法

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Two dimensional displacement back analysis of left bank slope of Longtan hydropower station

ZHANG Yong-hui, SHENG Qian, LENG Xian-lun, ZHU Ze-qi

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: A method of slope displacement back analysis considering excavation unloading effect is presented. In the stability analysis of section 1-1 of left bank of Longtan hydropower station, the geology generalization, excavation step and disturbing zone are analyzed to establish the computing model of finite element method. The mechanical parameters of rock masses are solved by using finite element method with neural network-genetic algorithm. The results of forward analysis with these parameters show that the displacements are reasonable and very agreement with the monitoring results. The maximum compressive stress is 1.0MPa and no tension stress at the excavation zone. The plastic zones are distributed at the slope top, excavation zone and near the big fault.

Key words: slope engineering; excavation unloading effect; displacement back analysis; neural network-genetic algorithm

1 前 言

龙滩水电站枢纽工程为一等工程, 主体建筑物包括碾压混凝土重力坝、左岸地下引水发电系统和右岸通航建筑物等。坝址区除自然边坡外, 根据枢纽建筑物布置的需要, 在左岸地下厂房进水口、尾水渠、地面开关站和右岸坝头、上游航道边坡、通航建筑物沿线, 以及两岸导流洞的进口和出口都将开挖 80 m 以上的高边坡。边坡最大开挖深度达 200 m, 最大组合开挖高度为 420 m, 并且边坡内断层节理较发育。边坡地质条件复杂, 开挖边坡表面呈不规则形貌特征。边坡群中, 既有典型的反倾向边

坡, 又有顺向边坡和斜向边坡。施工期边坡的变形与稳定将直接影响整个工程的施工进度和安全, 并对未来运行期的安全构成威胁。

在岩质边坡稳定性分析中, 如何获取合理、准确的岩体物理力学参数是计算分析成败的关键。由于岩体结构的复杂性, 地质选点的代表性差及实验方法本身不足等原因, 造成了岩体实验结果的发散、可信度差。另外, 传统的岩体力学现场实验往往周期长、花费大, 而位移量测系统较易建立, 相对宏观的位移测值更可靠, 所以, 根据现场位移量测数据反分析岩体力学参数的方法——位移反分析法自20世纪70年代问世以来发展很快^[1]。神经网络是

一种智能技术, 它可以通过网络学习、推理建立输入输出量的非线性映射关系^[2]。遗传算法是近年来得到广泛关注的一种新型优化算法, 具有智能性搜索、并行式计算和全局优化等优点, 特别适合于求解目标函数的多极值点问题^[3]。

岩质边坡大规模的开挖造成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, 在表浅部形成卸荷松弛带。

本文以岩体力学参数和初始应力场为基本变量, 以量测位移为已知量, 考虑边坡开挖卸荷效应, 将弹塑性有限元法与神经网络-遗传算法相结合, 对龙滩水电站左岸坝肩边坡 1-1 剖面进行二维位移反分析。

2 考虑开挖卸荷效应的二维位移反分析方法

本文进行位移反分析的基本思路为: 以大量的试验、监测、前期分析结果为基础, 以基本力学参数和初始应力场为基本变量, 借助于正交设计方法设计一定数量规模的计算方案, 采用考虑开挖卸荷效应的有限单元法进行开挖模拟计算, 以计算结果为基础训练人工神经网络, 建立基本变量与岩体开挖位移非线性映射关系, 并在此关系的基础上, 采用遗传算法进行全局优化, 在位移目标函数为最小的条件下得到基本变量的最优解。

2.1 开挖与卸荷效应数值分析方法

求解反分析问题的基础是相应的正分析问题已经获得解决, 对于高边坡的施工开挖, 既能够模拟开挖又能考虑卸荷效应的分析方法是问题的关键。本文所采用的是二维弹塑性有限元程序——PHASE2, 它主要用于计算地面、地下开挖的应力场和位移场, 也可解决采矿和土木工程中更广泛的问题, 包括平面应变和轴对称、弹性或塑性材料、分步开挖(最多50步)、多种材料、支护(锚杆/衬砌)、常应力场或重力场、节理等。该程序在计算过程中, 能随意中断与进行, 随意改变计算参数与边界条件, 非常适合处理复杂的非线性岩体开挖卸荷效应问题。根据该程序的特点, 在考虑开挖卸荷效应的计算分析中, 损伤区与影响区随开挖卸荷形成。对边坡的某一区域, 在当前开挖步, 主要为应力开挖释放模拟; 在下一开挖步, 主要模拟岩体卸荷效应即形成损伤区与影响区, 降低力学参数, 同时保存历史开挖步形成的损伤区与影响区, 直至最终开挖步。

2.2 岩体力学参数与开挖位移非线性映射关系的确定

岩土结构的复杂性决定了岩体力学参数与岩体位移之间的关系很难用显式数学表达式来描述, 而人工神经网络特别适用于参数变量和目标函数值之间无数学表达式的复杂工程问题, 一个简单的神经网络模型甚至可以反映一个非常复杂的映射关系。本文的研究中, 采用了广为流行的前馈网络模型来描述岩体力学参数与岩体位移之间的映射关系, 并应用遗传算法搜索最佳的神经网络。通过对网络结构的反复进化操作, 最终总能找到较为理想的网络模型。

为了建立各边坡岩体力学参数与各测点位移的映射关系, 需要事先给定一定数量的样本对神经网络进行训练。样本应能够涵盖全部可能发生的输入输出状态, 即网络空间应该足够大。由于不可能试验所有的输入输出状态, 因此必须结合适当的试验设计方法确定参数组合作为输入, 并进行相应的正分析作为输出, 如此构造样本, 既能保证网络预测的准确性, 又减少了试验的次数。

最常见的试验设计方法——正交设计法是依据正交性原则来挑选试验范围(因素空间)内的代表点。若试验有 x 个因素, 每个因素有 n 个水平, 则全面试验的试验点个数为 n^x 个, 而正交设计仅有 n^2 个。依据正交性原则来选择试验的正交试验设计可大大减少试验次数, 并且具有“均衡分散性”和“整齐可比性”, 非常适用于多因素、多水平的试验情况。

2.3 位移反分析的神经网络-遗传优化算法

用神经网络建立起岩体力学参数与岩体位移之间的映射关系之后, 对于任一组给定的岩体力学参数, 均可以通过网络的推广预测能力求出其相应的位移值, 如果某一位移值和实际位移值相比其误差为最小, 则此位移值所对应的岩体力学参数即为所求值。应用遗传算法结合神经网络对岩体力学参数进行搜索寻优, 其中每个个体代表一组可能的岩体力学参数。神经网络-遗传优化算法既利用了神经网络的非线性映射、网络推理和预测功能, 又利用了遗传算法全局优化特性, 在处理变量与目标函数值之间无明显的数学表达式的复杂工程问题中, 具有较高的应用意义。

3 龙滩水电站左岸边坡计算模型

3.1 地质概化

针对龙滩水电站左岸边坡工程地质特征和结

构形态,二维剖面计算区域内包含了砂岩组: T_{2b}^{14-17} 、 T_{2b}^{25} 、 T_{2b}^{28-30} 、 T_{2b}^{38-47} , 砂岩、泥板岩互层组: T_{2b}^{19-24} 、 T_{2b}^{26-27} 、 T_{2b}^{31-37} 、 T_{2b}^{48} , 泥板岩: T_{2b}^{2-4} 、 T_{2b}^{18} , 罗楼组: T_{1L} 等地层; 计算中应考虑的断层, 主要包括 F2、F31、F35、F46、F53、F60、F65、F66、F86、F88、F89、F136、F139 等。1-1 剖面的地质概化模型见图 1。

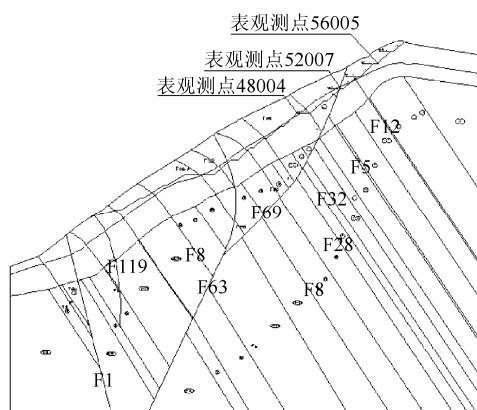


图 1 左岸边坡 1-1 剖面地质概化模型
Fig.1 Geology generalization of section 1-1 of left bank slope

3.2 初始地应力场

工程地应力测量结果表明,该地区地应力场主要为 NNW-NW 向,以水平应力为主。电站进水口边坡在高程为 356.5 m 的 D7 平洞处的最大主应力方向为 $20^\circ \sim 40^\circ$, 应力平均量值约为 5~10 MPa。通过对测量应力值的分析,本文近似假定:在工程围岩体范围内,近地表的全强风化带应力场取为自重应力场;微新岩体和弱风化带岩体初始地应力场在垂直方向按自重施加,在水平方向按侧压力系数施加,其侧压力系数通过反演获得。

对于强风化岩体,地应力采用自重应力场,即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= -\gamma h \\ \sigma_x &= \sigma_z = -\frac{\mu}{1-\mu} \gamma h \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: γ 为岩体重度; μ 为泊松系数。

3.3 计算模型

龙滩左岸进水口边坡 1-1 剖面方位约为 NE42°, 因此取坐标系 X 轴方向约为 NE42°, Y 方向铅直向上为正。计算范围为: X 方向取 1 300 m, Y 向自地表至高程 0 m 止。计算域的底部用固定约束, 两侧采用法向约束。为了消除边界效应, 将边坡向左右各延伸 300 m。岩体模型均采用弹塑性 Mohr-Coulomb 模型, 节理采用节理单元。有限元计算模型如图 2 所示。

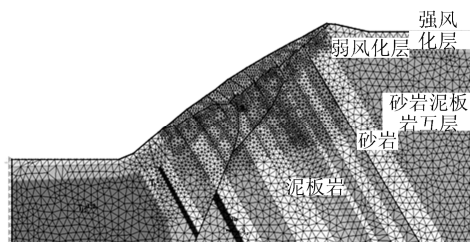


图 2 左岸边坡 1-1 剖面计算模型
Fig.2 Computing model of 1-1 section of left bank slope

3.4 开挖分步

计算开挖步根据施工进度和监测点的安装时间确定, 左岸 1-1 剖面共分为 14 个开挖步如图 3 所示。开挖步与开挖高程的对应关系见表 1。

表 1 左岸 1-1 剖面开挖步一览表

Fig.1 Excavation step of section 1-1 of left bank slope

开挖步	开挖高程/ m	开挖步	开挖高程/ m
1	▽580~597	8	▽440~460
2	▽560~580	9	▽425~440
3	▽540~560	10	▽406.5~425
4	▽520~540	11	▽382~406.5
5	▽500~520	12	▽365~382
6	▽480~500	13	▽345~365
7	▽460~480	14	▽311~325

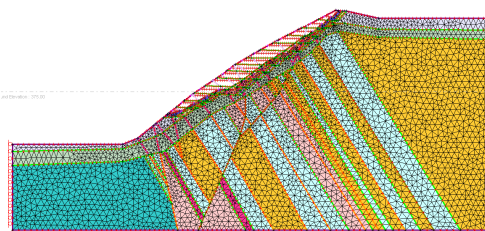
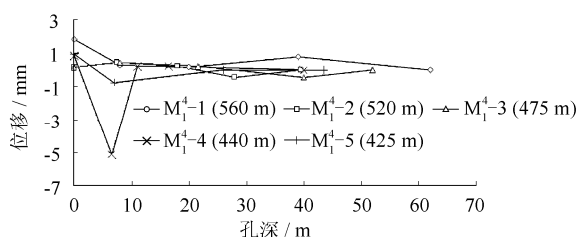


图 3 左岸边坡 1-1 剖面开挖模型
Fig.3 Excavation model of section 1-1 of left bank slope

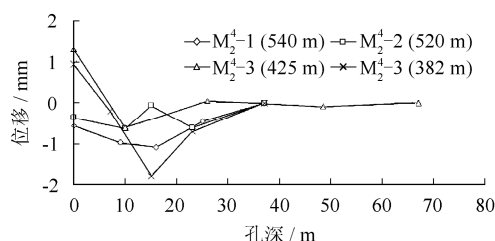
3.5 开挖卸荷分区

由于缺乏现场岩体力学参数及声波特征的试验数据, 本文参照三峡工程边坡稳定性分析中关于边坡岩体松弛特征及分区的研究成果^[5-6], 根据龙滩水电站边坡多点位移计监测结果进行综合分析(图 4): 在坡面到孔深约 15 m 之间, 位移最大; 在 15~30 m 之间坡体有一定的变形发生, 但变化已很小; 30 m 以后坡体基本上没有变形。因此, 可将边坡岩体划分成 3 个区(带): ①开挖损伤区(表层松动带): 距离坡面 0~15 m。岩体受爆破卸荷影响较明显, 变形明显大于局部岩体, 岩体受到损伤, 力学参数明显降低, 本文取原参数的 33%; ②卸荷释放区(应力调整带): 距离坡面 15~30 m。

受卸荷及地应力释放影响, 岩体产生松弛变形, 力学参数也明显降低, 本文取原参数的 55%; ③轻微或未扰动区: 距离坡面 30 m 后。该带受开挖卸荷影响轻微, 岩体形状基本未受影响, 力学参数与开挖前基本相同。开挖后卸荷带分区如图 5 所示。



(a) 左岸 1-1 剖面



(b) 左岸 2-2 剖面

图 4 左岸多点位移计监测位移与孔深曲线图
Fig.4 Displacement curves of multipoint displacement meters in left bank slope

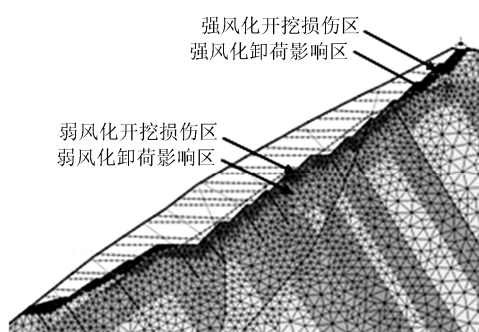


图 5 左岸边坡 1-1 剖面开挖卸荷带分区
Fig.5 Unloading area of section 1-1 of left bank

4 计算结果及分析

4.1 反分析求解

因测斜仪累计位移系统误差达 $\pm 7 \text{ mm}/30 \text{ m}$, 而多点位移计的最大变形值偏小, 且孔内各测点间变形复杂, 变形与开挖步关系不明显。所以选择开挖步与变形间具有明显的对应关系、变形规律明显的外观监测点 48004、52007 作为反演所用的监测位移。

根据试验和现场实测资料, 确定左岸 1-1 剖面待反演的 9 个参数的取值范围: 弱风化层变形模量 $E1=2\sim 9 \text{ GPa}$, 砂岩变形模量 $E2=16\sim 30 \text{ GPa}$, 砂岩与泥板岩互层变形模量 $E3=14\sim 28 \text{ GPa}$, 泥板岩变形模量 $E4=10\sim 24 \text{ GPa}$, T1L 岩层变形模量 $E5=9\sim 23 \text{ GPa}$, T2b~T2b5 岩层变形模量 $E6=10\sim 24 \text{ GPa}$, T1L3~8 岩层变形模量 $E7=9\sim 23 \text{ GPa}$, 弱风化层侧压系数 $K_1=1.1\sim 1.8$, 微新岩体侧压系数 $K_2=1.3\sim 2.0$ 。在样本“试验”阶段, 对每个参数取其取值区间内的 8 个水平。不参与反分析的物理力学参数包括全强风化带、岩体重度、泊松比等。

依据正交试验设计原理, 给出 64 组试验方案。对于每一组试验组合作正分析计算, 找出对应于所选用 2 个监测点的 X 向位移计算值, 将其与对应的参数组合在一起, 作为一个学习样本。共得到 64 个样本, 分别用于神经网络的训练和检验。将其中 54 组样本用于训练神经网络, 10 组样本用于网络训练过程中的预测检验 (检验样本是在所有样本中随机选取的), 采用有限元程序计算各种试验组合, 运用神经网络-遗传优化算法搜索最优岩体力学参数组合, 得到结果如下: 弱风化层变形模 $E1=4.2 \text{ GPa}$, 砂岩变形模量 $E2=21.0 \text{ GPa}$, 砂岩与泥板岩互层变形模量 $E3=16.0 \text{ GPa}$, 泥板岩变形模 $E4=20.0 \text{ GPa}$, T1L 岩层变形模量 $E5=16.0 \text{ GPa}$, T2b~T2b5 岩层变形模量 $E6=20.0 \text{ GPa}$, T1L3~TIL8 岩层变形模量 $E7=15.0 \text{ GPa}$, 弱风化层侧压系数 $K_1=1.4$, 微新岩体侧压系数 $K_2=1.9$ 。

4.2 正分析结果

根据以上反分析得到的参数进行开挖模拟正向计算, 所获得监测点的位移值和神经网络外推预测值及实际监测位移值 (水平向) 对比如图 6 所示。从图中可以看出, 三者在量值上基本相当, 表明本文在地质与施工的概化方面是基本合理的, 所采用的神经网络-遗传优化的反分析方法在工程上是可行的。

图 7 为计算所得开挖完成后边坡位移矢量图。开挖完成后的总体变形在 $\nabla 540 \text{ m}$ 高程平台以下表现出明显的卸荷回弹, 最大位移达 48.0 mm , 在 $\nabla 540 \text{ m}$ 高程平台以上表现为较明显的下滑变形, 最大位移达 $8.0\sim 10.0 \text{ mm}$ 。由于在 $\nabla 540 \text{ m}$ 高程附近有一条反倾向大断层 F12 存在, 使得在此处位移变化较大。整体变形表现为回弹, 局部 (上部) 为下滑变形。依据监测时间来查看监测点相对应的开挖步位移, 位移的变形形态与监测结果基本一致, 量级相当。

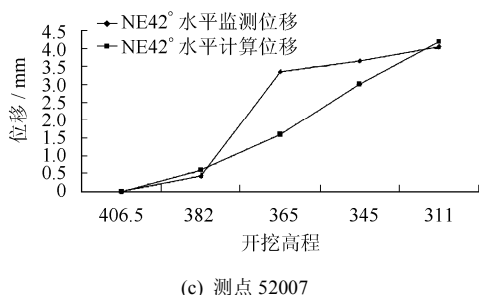
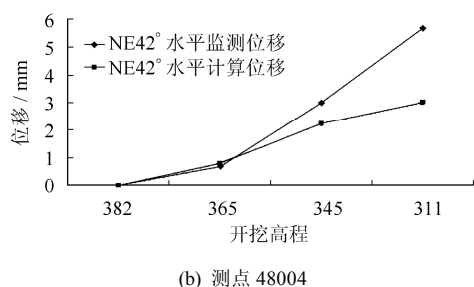
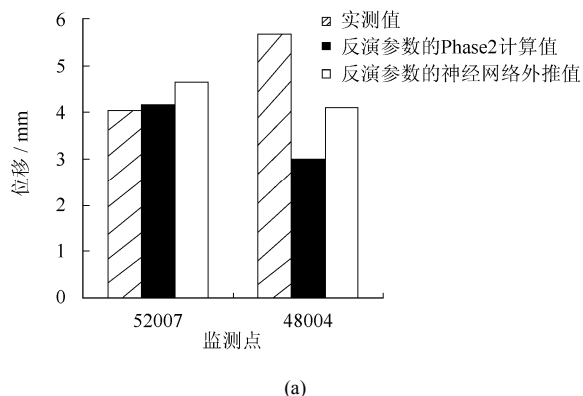


图 6 计算位移和监测位移对比

Fig.6 Comparison between computing and monitoring results

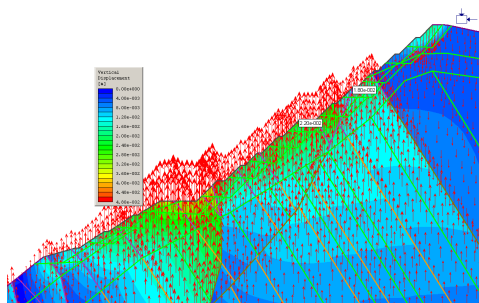


图 7 开挖完成后计算位移矢量图 (单位: m)
Fig.7 Displacement vector diagram after excavation (unit: m)

图 8~10 分别为由反演参数作正向计算得出的 1-1 剖面开挖后的主应力迹线图、拉应力区图和塑性区图。

在开挖过程中, 初始应力场不断受到扰动与调整, 开挖面附近大主应力方向接近平行开挖面方向, 次主应力方向接近于垂直开挖面方向, 局部由压应

力变为拉应力。全部开挖完成后, 沿坡面弱风化区应力状态趋近于 0; 左岸坡背存在一片拉应力区; 开挖面附近最大压应力出现在▽382 m 马道拐角处, 约为 1.0 MPa 左右, 在开挖面附近基本上没有拉应力区。

计算结果表明, 开挖完成后的塑性区主要分布在坡顶和开挖面及大断层附近, 而且基本上发生在开挖损伤区和部分卸荷影响区。岩体深部没有产生大面积塑性区, 边坡不会产生深层滑动, 其整体是稳定的。

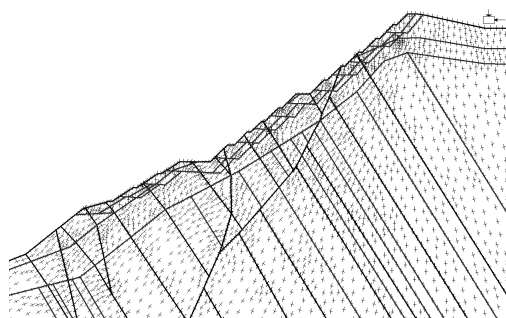


图 8 开挖完成后主应力迹线图
Fig.8 Stress vector diagram after excavation

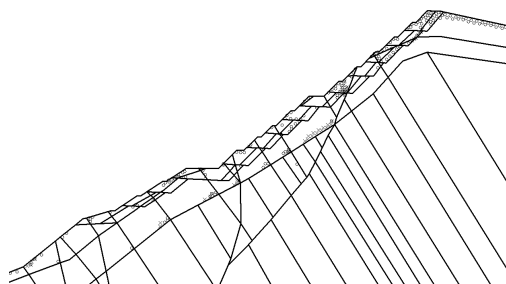


图 9 开挖完成后拉应力区图
Fig.9 Tension stress zone after excavation

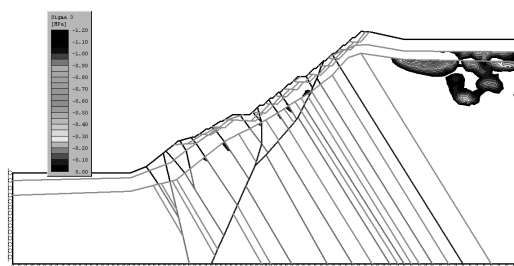


图 10 开挖完成后塑性区图 (单位: MPa)
Fig.10 Plastic zone after excavation(unit: MPa)

5 结 论

(1) 根据边坡现场量测位移, 通过数值方法和优化技术的结合进行反分析, 可以获得较为合理的岩体力学参数。运用神经网络-遗传优化算法可以较快地搜索到全局最优解, 提高网络学习的效率和

网络预测的能力。

(2) 边坡岩体开挖后, 由于应力释放和开挖爆破的双重作用, 在开挖面附近形成卸荷松动区, 从而导致岩体力学性状的弱化。基于有限元方法的 PHASE2 程序, 可以方便地模拟边坡开挖过程中岩力学参数的降低, 非常适合于处理非线性岩体的卸荷效应问题。

(3) 本文将正交设计方法与人工神经网络、遗传算法结合在一起, 对龙滩水电站左岸坝肩边坡岩体进行二维位移反分析, 以岩体力学参数和初始应力场为基本变量, 成功地实现了边坡非线性系统的多参数反演。用反演获得的参数经正分析得到的计算位移与实测位移相比在量值及位移变化规律上均比较吻合, 这表明本文所采用的位移反分析方法在工程上是可行的, 在对地质与施工的概化方面也是基本合理的。

(4) 基于反演参数的正分析计算结果表明, 左岸坝肩边坡 1-1 剖面计算位移与监测位移趋势一致, 量值吻合。开挖完成后整体变形表现为卸荷回弹, 最大位移达 48.0 mm, 局部 (∇ 540 m 高程平台以上) 为下滑变形, 最大位移达 8.0~10.0 mm。开挖面附近最大压应力约为 1.0 MPa 左右, 开挖面附近基本上没有拉应力区。开挖完成后的塑性区主要分布在坡顶和开挖面及大断层附近, 而且基本上发生在开挖损伤区和部分卸荷影响区。岩体深部没有产

生大面积塑性区, 边坡不会产生深层滑动, 其整体是稳定的。

参 考 文 献

- [1] 杨志法, 王思敬, 冯紫良, 等. 岩土工程反分析原理及应用[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [2] SIMON Haykin. 神经网络原理[M]. 叶世伟, 史忠植译. 北京: 机械出版社, 2004.
- [3] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [4] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [5] 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(增刊): 987—993.
SHENG Qian, DING Xiu-li, FENG Xia-ting, et al. Displacement back analysis for the high alope of the Three Gorges Project considering the effect of excavation unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Supp.): 987—993.
- [6] 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, 2000.