

# 硐室设计与分析的新思路与新方法

李 宁<sup>1,2</sup>, 罗俊忠<sup>1</sup>, 常 斌<sup>1</sup>, 张志强<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 岩土工程所, 陕西 西安 710048;

2. 中国科学院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 分析当前硐室设计与分析方法中存在的问题, 提出一套新思路和新方法, 其核心思路是以大量、系统的数值仿真试验结果为主样本群, 以专家经验为边界样本群, 以功能强大的神经网络方法, 构建地下硐室自动化分析平台。该平台主要考虑城门洞型隧洞或地下厂房的尺寸、埋深、围岩力学参数、围岩初始地应力及围岩附近一条主断层的位置、距离、与断层厚度及其强度对围岩应力场、变形场及支护结构内力的影响。经与大型数值分析结果、现场实测结果对比与验证, 发现该分析平台的误差为 10%~20%。可方便地为广大设计人员及监理、施工人员所应用。

**关键词:** 岩石力学; 地下硐室; 自动化分析; 神经网络; 数值分析

**中图分类号:** TU 458

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)10 - 2155 - 05

## NEW METHOD FOR DESIGN AND ANALYSIS OF UNDERGROUND CAVERNS

LI Ning<sup>1,2</sup>, LUO Junzhong<sup>1</sup>, CHANG Bin<sup>1</sup>, ZHANG Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;*

2. *State Key laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China*)

**Abstract:** Based on the discussion on some problems existing in the tunnel design and construction, a new method to build an automatic analysis platform for tunnels is proposed, which is based upon lots of numerical test results, expert experiences and the powerful artificial neural network method. In the platform, many factors impacting on the stress and deformation fields of the surrounding rock masses can be considered, such as the size of underground tunnels, the overburden, the mechanical parameters of rock masses, the initial stress and the main fault nearby, etc.. The proposed numerical platform has been compared with large scale numerical analysis and field measurement, with the error of less than 10% - 20%.

**Key words:** rock mechanics; underground cavern; automatic analysis; artificial neural networks; numerical analysis

## 1 引言

当前硐室设计与分析中存在如下几个主要问题<sup>[1~3]</sup>:

(1) 前期勘探资料普遍不足, 设计参数主要凭

经验, 设计方案、支护参数难以科学量化;

(2) 开挖后有了较充足的地质资料(通常揭示出岩层、节理等主要影响因素)却又无法快速分析, 常常在施工掌子面已通过分析断面后, 设计计算还未完成;

(3) 经验不足的设计人员对岩石力学、弹塑性

**收稿日期:** 2005 - 09 - 20; **修回日期:** 2005 - 11 - 11

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50479023); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1 - SW - Q4)

**作者简介:** 李 宁(1959 - ), 男, 博士, 1982年毕业于陕西机械学院水利水电工程建筑专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土力学与岩土工程数值分析与优化设计方面的教学与研究。E-mail: ningli@xaut.edu.cn

力学、隧道力学与有限元分析等相关知识储备不足的问题<sup>[2]</sup>,数值分析人员存在对隧道工程设计理念、施工方法与支护机制等实际知识不足的问题。

造成的现象是:分析人员对洞室围岩是否有控制性的节理、断层等结构面不甚了解,对超前注浆、二次挂网喷护的力学机制与工作条件了解不够深入<sup>[2, 3]</sup>,造成分析、设计、施工三者之间一定程度上的脱节。

## 2 解决思路

要解决这些难题,核心是将分析、设计与施工融为一体,所以本文的思路为是否开发一套满足以下 3 个条件的分析平台:(1) 适用于普通设计、施工人员的;(2) 既快速方便;(3) 又能够考虑主要地质不连续结构面影响与施工措施影响后的先进分析手段与分析平台。

要满足条件(3),则必须采用针对岩土工程特殊性的(如不连续结构面,复杂施工措施模拟等)大型有限元分析方法与平台;但要快速又方便,特别是适用普通设计与施工人员,最好不要从剖分网格开始,不要涉及过多的弹塑性、非线性求解方法、迭代方法及对施工措施的有限元模拟方法。这显然是难以直接实现的。

然而,如果能够让有经验的专业分析人员事先分析,应用专业分析平台分析足够多个有代表性的(不同洞室尺寸、不同围岩类别、不同断层或不连续结构面位置、不同埋深、不同支护措施等)隧洞位移场、应力场、支护结构内力分布等与这些主要影响因素的一一对应关系并建立关系数据库,以这些满足围岩应力下平衡条件、变形协调条件、弹塑性准则、支护结构强度条件的系统数值试验输入与输出结果关系数据库作为主样本群,辅以多个隧洞专家经验作为边界样本群,以功能强大的神经理论与方法重新构建适用于普通设计与施工人员的、快速方便的(更无需费时费力的有限元建模)隧洞分析自动化分析平台<sup>[4~6]</sup>。

## 3 数值试验的方案设计

根据本文数值仿真试验的研究思路与方法,以解析法无法求解而工程中广泛采用的城门洞型隧洞为对象,以源自奥地利的大型岩土工程数值分析平台 FINAL 为仿真试验工具,以系统仿真试验成果为

神经元智能分析的主样本群,利用自行开发的人工智能神经网络工具包,构建针对围岩受力、位移和喷层内力的智能化定量预测模型,并在此基础上进一步开发直接面向工程设计人员的智能化定量分析平台。

数值试验按平面应变问题处理,将围岩视作弹塑性介质,按工程中常用的莫尔-库仑准则分析其弹塑性状态。围岩采用六节点等参元模拟,喷层采用弯曲梁单元 BEAM6 模拟,软弱结构面采用 FINAL 程序独有的界面单元 COJO 来模拟,分段模拟初始地应力场、二次开挖应力场及支护应力场等。

作为构建智能模型的前提条件,根据岩质地下洞室专家经验,选定对围岩稳定性影响最为敏感,并且在实际工程中最为常见的四大类约 11~13 个主要参数<sup>[7, 8]</sup>,包括:

(1) 围岩地形地质参数:洞室埋深、构造地应力;

(2) 围岩力学参数:围岩变模、黏聚力、内摩擦角、泊松比;

(3) 围岩结构面参数:断层位置、距洞周距离、断层厚度、断层强度参数等;

(4) 洞室特征:洞跨、高跨比。

经专家分析论证,选取各参数取值区段及采样点如下:

(1) 埋深为 100~1000 m,采样点为 100, 500, 1 000 m。

(2) 侧压力系数= 0.38~3.00,采样点为 0.38, 1.00, 1.50, 2.00, 3.00。

(3) 围岩变形模量= 3~15 GPa,采样点为 3, 6, 10, 15 GPa。

(4) 黏聚力= 0.8~1.8 MPa,采样点为 0.8, 1.2, 1.8 MPa。

(5) 内摩擦角= 25°~45°,采样点为 25°, 35°, 45°。

(6) 泊松比= 0.22~0.32,采样点为 0.22, 0.28, 0.32。

(7) 断层倾角= 0°~90°,采样点 0°, 45°, 90° (3 种典型倾角状态如图 1 所示)。

(8) 断层距离= 0.2~1.0 倍洞径,采样点为 0.2, 0.5, 1.0 倍洞径。

(9) 断层厚度= 0~200 cm,采样点为 0, 10, 20, 50, 200 cm。

本文所说断层距离是指断层面与洞室开挖轮廓线的最短距离如图 1 所示。

本文采用改进后的前馈逆传播算法,作为智能模型的核心算法<sup>[9]</sup>。

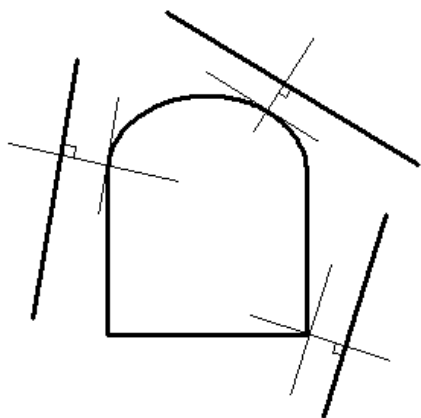


图 1 断层与硐室开挖轮廓线的最短距离示意  
Fig.1 Diagram of the shortest distance between fault and excavation outline of cavern

为大幅减少试验次数，本文对仿真试验的方案进行了均匀试验方案设计。

分析区域取 80 m(8D)×60 m(6D)(长×宽)的有限元网格剖分范围。选用莫尔 - 库仑破坏准则，考虑竖向地应力与水平地应力作用。各断面的初始地应力与各断面的位置、埋深及其所处的地层构造应力有关；开挖地应力释放荷载因开挖步序、支护时机及掌子面与分析断面之间的距离而各不相同。

施工中掌子面附近岩体应力和变形，一部分是因掌子面开挖卸荷引起的，一部分是由于掌子面向前推进地应力逐步释放引起的。本文数值仿真分析中通过逐步减小开挖岩体单元的变形模量从而释放开挖岩体单元应力来模拟隧洞开挖的施工过程。

为便于进行统一化建模，本文根据断面两侧端点的位置不同，将不同的断面倾角大致分为 3 种情况<sup>[10]</sup>：断面两侧端点分别在左边界和右边界上，属于“拱顶”；断面两侧端点分别在上边界和右边界上，属于“拱肩”；断面两侧端点分别在上边界和下边界上，属于“边墙”。

根据专家经验，在这 3 种不同的断层位置上，分别将分析区域的有限元网格进一步离散为各自的 25 个特征点。通过对这 25 个特征点的状态值进行内插，就可以再现完整的场量信息，从而极大地简化对各种状态场量的预测。

### 4 自动化分析平台的构建

在上述系统数值试验的基础上，本文采用大规模分区神经网络建模思路，经试算确定网络结构为 12 - 25 - 1，开发了相应的智能分析软件系统。其建模流程概要如图 2 所示<sup>[11]</sup>。

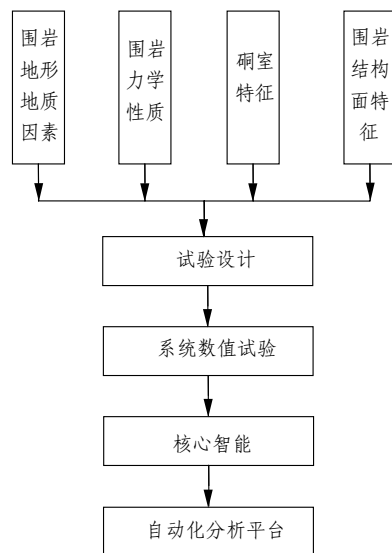


图 2 神经网络建模思路  
Fig.2 Idea of the artificial neural network modelling

对埋深为 120 m、洞跨为 10 m、高跨比为 1.2 时，不同断层倾角下的断层距离、侧压力系数对洞壁围岩位移的影响进行举例分析。

(1) 断层倾角为 0°

侧压力系数对右边墙中点水平位移的影响(见图 3)。

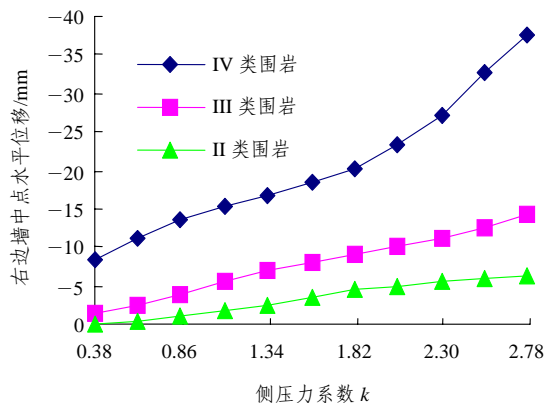


图 3 断层距离为 0.5D、断层倾角为 0°，断层厚度为 0 mm 时右边墙中点水平位移随侧压力系数变化的规律  
Fig.3 Variation regularity of the horizontal displacement at mid-point of sidewall with the lateral coefficient under the condition of fault distance 0.5D, dip 0° and thickness 0 mm

(2) 断层倾角为 45°

断层距离对拱顶位移的影响(见图 4)。

(3) 断层倾角为 90°

侧压力系数对右边墙中点水平位移的影响(见图 5)。

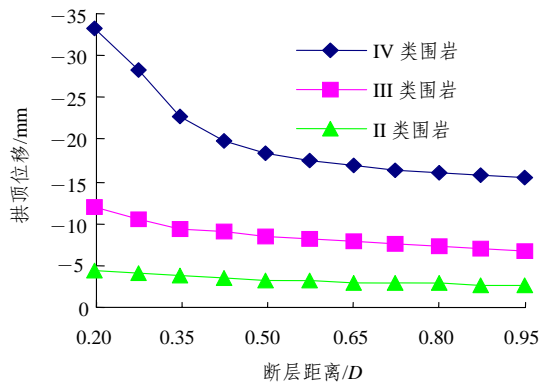


图4 侧压系数为0.38、断层倾角为45°、断层厚度为0 mm时拱顶位移随断层距离变化的规律

Fig.4 Variation regularity of displacement at vault with different distances of fault under condition of lateral pressure coefficient 0.38, fault dip 45° and thickness 0 mm

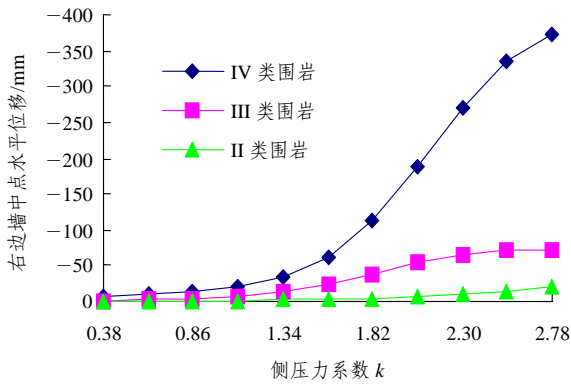


图5 断层距离为0.5D、断层倾角为90°、断层厚度为0 mm时右边墙中点水平位移随侧压力系数变化规律

Fig.5 Variation regularity of displacement on right sidewall with lateral pressure coefficient under condition of fault distance 0.5D, dip 90° and thickness 0 mm

### 5 自动化分析平台的验证

黄河积石峡水电站是黄河上游龙一青段规划的第五个大型梯级电站，其导流洞布置在左岸，为城门洞型，断面尺寸11 m×15 m(宽×高)。该洞段有软弱夹层Pjn33穿过洞顶，离开挖轮廓约1 m左右，倾角17°，对洞室的稳定性影响很大。研究人员为此进行了专门的大型数值分析。本文应用其结果检验本文提出的自动化分析平台的可靠度与精度。

紫坪铺水利枢纽工程是大型水利枢纽工程，其导流洞在不同洞段和不同高程穿越了L<sub>9</sub>层间剪切破碎带、F<sub>3</sub>断层破碎带、向斜轴部和旧煤洞采空区上

百米的断层地段，洞室围岩十分破碎，地下水丰富，施工期围岩稳定性极差。项目组在现场进行了4 a的变形与应力监测，其监测结果可用来检验本分析平台。

本文选用了以上两工程中的几个典型断面进行对比分析，结果如表1所示。

表1 导流洞施工期典型断面关键点位移值

Table 1 Displacements at the key points of a diversion tunnel at construction stage

工程名称	关键点位置	奥地利 FINAL 分析结果/mm	现场收敛监测结果 /mm	本文自动化分析平台结果/mm	相对误差/%
黄河积石峡工程	拱顶	-26.12	-	-25.45	3
	左边墙中点	2.58	-	2.89	12
	右边墙中点	-1.31	-	-1.44	10
紫坪铺工程 (断面1)	拱顶	-	-24.13	-26.62	9
	左边墙中点	-	35.01	30.51	13
	右边墙中点	-	-13.59	-16.03	18
紫坪铺工程 (断面2)	拱顶	-	-17.91	-16.25	10
	左边墙中点	-	24.39	28.40	14
	右边墙中点	-	-11.17	-9.23	21

注：(1) 表中仅列出了拱顶竖向位移和边墙水平向位移；(2) 竖向以向上为正，水平向以向右为正。

### 6 结论

针对当前地下洞室设计人员面临的困境，本文首次提出了以系统数值试验结果作为主样本群，以专家经验作为边界样本群来构建面向设计与施工人员的多功能神经网络分析平台的思路与方法，开发了一套方便、快捷、有效的洞室自动化分析平台，并初步通过了工程实践的检验。进一步开发完善检验此平台，以期推广应用，达到指导地下洞室设计和施工的目的，是今后工作的重点。

**致谢** 感谢马玉扩、陈方方、康佳梅等在地下洞室数值分析方面的前期工作。感谢西安理工大学紫坪铺现场监测组提供的实测资料！

### 参考文献(References):

[1] 李 宁, 程国栋, 谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题[J]. 岩土

- 工程学报, 2001, 23(3): 268 - 272.(Li Ning, Cheng Guodong, Xie Dingyi. The rock and soil mechanics problem on the exploitation in the western of China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 268 - 272.(in Chinese))
- [2] 李 宁, Swoboda G. 当前岩石力学数值方法的几点思考[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 502 - 505.(Li Ning, Swoboda G. Several thoughts of numerical analysis method about rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(5): 502 - 505.(in Chinese))
- [3] 李 宁, 张 平. 地下硐室工程设计与计算中的几个误区[J]. 地下空间, 2000, 20(2): 122 - 159.(Li Ning, Zhang Ping. Several mistakes in the design and calculation of underground tunnel engineering[J]. Technology of Underground Engineering, 2000, 20(2): 122 - 159.(in Chinese))
- [4] 自 兴, 徐光佑. 人工智能及其应用(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.(Zi Xing, Xu Guangyou. Artificial intelligence and Its Application(the Second Edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.(in Chinese))
- [5] 冯夏庭, 王泳嘉. 关于智能岩石力学发展的几个问题的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 705 - 710.(Feng Xiating, Wang Yongjia. Discuss of several problems in the development of the intelligence rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(1): 705 - 710.(in Chinese))
- [6] 冯夏庭, 林韵梅. 岩石力学与工程专家系统研究新进展[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(1): 85 - 91.(Feng Xiating, Lin Yunmei. New development on the research of expert system of rock mechanics and engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(1): 85 - 91.(in Chinese))
- [7] 兰恒星, 伍法权. 岩土力学数值模拟中力学参数的确定方法[J]. 世界地质, 2001, 20(1): 66 - 71.(Lan Hengxing, Wu Faquan. The method of determining the mechanical parameters in the rock and soil mechanics numerical simulation[J]. The World Geology, 2001, 20(1): 66 - 71.(in Chinese))
- [8] Heok E, Carranza C T, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[A]. In: Proc. North American Rock Mechanics Society Meeting in Toronto[C]. Toronto: [s. n.], 2002. 64 - 68.
- [9] 常 斌, 李 宁. 前馈逆传播算法优化及其在岩土工程中的应用[J]. 岩土工程技术, 2002, (5): 249 - 251, 264.(Chang Bin, Li Ning. The feedback re-transmit arithmetic optimization and its application in the geo-technique engineering[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2002, (5): 249 - 251, 264.(in Chinese))
- [10] 张志强. 软弱夹层对地下硐室稳定性影响的数值试验研究[硕士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2003.(Zhang Zhiqiang. The numerical test research on the stability infection of fault acting on underground opening[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003.(in Chinese))
- [11] 常 斌. 基于数值仿真试验的岩土工程智能化方法及其应用研究[博士学位论文][D]. 西安: 西安理工大学, 2005.(Chang Bin. The research on the intellectualization method based on numerical analysis test and its application to geotechnical engineering[Ph. D. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2005.(in Chinese))

## 沉痛悼念沈珠江先生

中国科学院院士、著名岩土力学与工程专家沈珠江先生因病医治无效, 于 2006 年 10 月 2 日 18 时 45 分在北京逝世, 享年 73 岁。

沈珠江先生为我国土力学研究与发展、岩土工程方面的教学与科研活动贡献了毕生精力。他的一生是追求科学的一生, 是坚持真理的一生。他以渊博的学识和深厚的造诣赢得岩土工程界的普遍爱戴和尊敬。

先生的人品学识为我们所敬仰, 先生的治学风范是学者的楷模。先生的一生光明磊落, 他的离去, 是我国岩土工程界的一大损失!

在此, 我们谨代表《岩石力学与工程学报》编辑委员会及编辑部全体同仁对沈珠江先生的逝世表示深切怀念!

(本刊编辑部)