

关于龙游石窟斜顶“设计”中工程科学问题的探讨

李丽慧¹, 杨志法¹, 张路青¹, 祁生文¹, 陆民², 郑舰²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 浙江省龙游县文化旅游局, 浙江 龙游 324400)

摘要: 浙江省西部龙游县的龙游大型古地下洞室群由24个洞室组成, 该洞室群开挖于2000年前。通过现场调查发现, 龙游石窟不仅以其独特的“设计”方式(斜顶、熨斗形岩柱以及斜墙等)及其所蕴藏的岩石力学信息, 闪烁着我国古人在地下工程科学和技术方面的智慧光芒, 而且充满待解的疑团。正因为如此, 它已引起许多岩石力学家和工程地质学家的关注。作者从现场工程地质调查和三维数值计算入手, 对龙游石窟的斜顶“设计”所蕴含的工程科学问题进行了分析。结果发现: (1) 从工程地质调查入手, 龙游石窟各洞室顶板的倾向和倾角基本与岩层的倾向和倾角一致, 这就说明斜顶“设计”是古人在满足某种建造目的的前提下巧妙运用地下结构的特点和地质条件的产物; (2) 三维数值计算结果表明, 斜顶“设计”可以有效地改善洞室围岩的应力条件, 减小顶板下沉量和边墙的侧向外鼓变形, 这对洞室的稳定都极为有利。由此可见, 古人所采用的斜顶设计是一种很好地解决超浅埋问题的方法, 从中可以看到古人的智慧。

关键词: 岩石力学; 龙游石窟; 斜顶“设计”; 工程科学问题; FLAC^{3D}数值计算

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)02-0336-07

A DISCUSSION ON THE INCLINED ROOF DESIGN OF LONGYOU CAVERNS FOR ENGINEERING SCIENCES

LI Li-hui¹, YANG Zhi-fa¹, ZHANG Lu-qing¹, QI Sheng-wen¹, LU Min², ZHENG Jian²

(1. *Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;* 2. *Culture and Tourism Administration of Longyou County, Zhejiang Province, Longyou 324400, China*)

Abstract: An ancient man-made near ground surface rock cavern group was found in Longyou County, Zhejiang Province. The 24 large caverns were excavated 2000 years ago. Its findings attract the attentions of the scholars in the world. Through the field investigation it is found that there are many highlights involved in the excavation of these caverns, such as the inclined roof, the iron-shaped pillars, and the inclined sidewalls and etc., in which the most noticeable is the inclined roof. In this paper, the detailed field investigation and 3D numerical analysis are carried out to show the engineering scientific problems contained in the inclined roof. The field investigation results reveal that the dip direction and dip angle of the roof are almost coincident with those of the bedding plane. That means the ancients knew very well how to control the direction and the dip angle of the cavern's roof to sustain the stability of them. The results of the 3D numerical analysis also provide the same conclusion of that. The design of inclined roof can not only improve the stress condition of the surrounding rock but also reduce the settlement of the roof and the lateral deformation of the sidewalls. So, the inclined roof is the best way to solve the shallow buried problem.

Key words: rock mechanics; Longyou caverns; design of inclined roofs; engineering scientific problems; FLAC^{3D} numerical analysis

收稿日期: 2003-06-23; **修回日期:** 2003-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40272112)

作者简介: 李丽慧(1976-), 女, 1998年毕业于长春科技大学(原长春地质学院)工程地质专业, 现为博士研究生, 主要从事工程地质学、岩土力学方面的研究工作。E-mail: lhli2942@sina.com.

1 引言

龙游石窟自 1992 年在浙江省龙游县被发现以来,因其带来的诸多谜团而备受人们关注。这些谜团不仅有许多至今难以解开的人文方面的谜(例如开凿目的、年代等问题)^[1],而且在工程“设计”、施工和得以保持长期稳定的原因等方面也存在着不少值得用岩石力学和工程地质学原理解释的悬念。

已经向旅游者开放的 1[#]~5[#]窟都具有南高北低的斜顶,即将洞室顶部的大部分围岩开凿为一个基本上向北倾的平面。问题是龙游石窟何以采取这种主要为斜顶的特殊“设计”。站在洞室南边墙附近,向北凝视刻有与边墙上连通的多组“等高线”和充满“等高线”之间的凿痕排列而成的 75°斜线的斜顶板时,通常会或多或少地感到一种震撼。也许上述斜顶“设计”出于当时龙游石窟修建组织者的某种人文需要。但由于迄今为止有关龙游石窟开凿目的研究尚处于猜想阶段,所以究竟为何将各洞室都凿成斜顶的人文方面的原因,目前也很难有定论。作者认为,之所以进行斜顶“设计”除上述人文方面的某种原因外,还有着工程地质和岩石力学方面的原因。换言之,古人在满足修建石窟基本目的条件下,较好地利用工程地质条件进行符合岩石力学原理的斜顶“设计”和施工以保持洞室的长期稳定性,并取得了成功^[2]。应当说,其中含有许多反映古人朴素的工程科学思想和与当时工艺水平相适应的高超施工技术的科学技术亮点。本文拟论述其中两点。

(1) 从石窟及其围岩情况分析,龙游石窟的修建者们已采用了所谓顺层开挖施工技巧^[3]。试图从现场地层产状量测结果出发,论证顺层开挖应满足的工程地质条件;

(2) 斜顶“设计”是古人面对着浅埋施工容易塌方等困难而提出的一种较好的解决对策^[2~5]。为此,本文借助于工程地质与岩石力学方法对此进行了较系统的研究,其中包括在数值分析的基础上对斜顶“设计”与假想的平顶“设计”之间的对比研究。另外,考虑到龙游石窟各洞室的关系较为复杂,所以在三维数值分析中仅选择有代表性的 5[#]洞作为分析对象,以简化计算。

2 龙游石窟概况

龙游石窟是一个在龙游凤凰山中由人工开挖而

成的 24 个洞室组成的大型古地下洞室群。但为了更有效地保护它们,目前仅开发出 1[#]~5[#]洞窟对游人开放,其余仍保持原状。

2.1 地质背景和岩体结构分析

龙游石窟开挖于白垩系上白垩统的衢县组(K₂q)地层中。据有关资料^[6],位于金衢盆地中部的这一地层在岩性上以泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主,夹钙质粉砂岩和少量细砂岩,偶含淡绿色或白色的石膏颗粒。由于具有 1 个有一定水深的相对较稳定的湖泊沉积环境,所以该地层为厚层沉积。凤凰山附近岩层的产状为 NW45°~65°, NE∠15°~20°,在石窟内未见到断层出露。由于岩体较为完整,因此在岩体结构分类上,可将之定为完整状结构^[7, 8]。

2.2 围岩力学参数

为对龙游石窟围岩力学参数作出估计,在现场取了若干岩样,进行了室内物理力学性质试验。表 1 给出了岩石的物理力学参数指标。

表 1 龙游石窟围岩岩石的物理力学性质指标

Table 1 Mechanical properties of the surrounding rock for the Longyou caverns

试件含水状态	容重 /kN·m ⁻³	弹性模量 /MPa	泊松比	单轴抗压强度 /MPa	c /MPa	φ / (°)
风干	22.0	4 500	0.266	31.61	-	-
饱水	23.0	3 030	0.269	18.13	5.6	26

由饱水和风干状态的单轴抗压强度,还可进一步计算得到岩石的软化系数为 57.4%。另外,由 3 个试件的劈裂试验结果得到平均抗拉强度为 1.63 MPa。

2.3 工程特点

龙游石窟各洞室有以下 3 个与本项研究有关的共同特点:

- (1) 洞室都具有浅埋特点;
- (2) 都按斜顶“设计”修建;
- (3) 各洞室都采用岩柱进行支撑。

3 关于石窟顺层开挖施工问题的分析

沿着层面开挖的方法通常具有加快施工速度、减少周围岩石破损等优点。对于现代工程技术人员来说,这是一种普通的施工技巧,但对古人来说,能认识和利用它却是很了不起的。为了确认这一点,作者在各洞窟内和洞外地表露头较好的部位量

测了岩层的产状，并列于表 2。

表 2 斜顶的倾向方向与岩层倾向对比表
Table 2 Comparison between the dip directions of cavern roof and the rock stratum

洞室顶板倾向		岩层倾向
洞号	倾向	
1 [#]	NE10°	
2 [#]	NE21°	NE20° NE42°
3 [#]	NE26°	
4 [#]	NE2°	NE42° NE30°
5 [#]	NE26°	NE5° NE15°
7 [#]	NE10°	
10 [#]	NE10°	NE45° NE25°
13 [#]	NE10°	NE7° NE25°
14 [#]	NE35°	
15 [#]	NE35°	NE12° NE5°

注：根据 1[#]~5[#] 洞的调查，可得出洞口朝向与斜顶倾向基本上相反的结论，故本表是以此为假定的。洞室顶板倾向的分布范围为 NE2°~35°，平均值为 NE17.6°；岩层倾向的分布范围为 NE5°~42°，平均值为 NE19°。

从表 2 可以看出，10 个洞的斜顶倾向的平均值为 NE17.6°，与作者量测的岩层倾向数据的平均值 NE19° 比较接近，且它们的分布范围也基本上重合。另外，在倾角方面，岩层的倾角分布范围为 15°~33°，平均为 24°；而 1[#]~5[#] 洞斜顶的倾角大约为 20°~26°。考虑到罗盘的量测误差，也可认为两者十分接近。通过以上工程地质调查和分析，可以得出如下结论：

- (1) 龙游石窟的斜顶“设计”和为实现这种“设计”所采用的顺层开挖方法，具有足够的地质基础；
- (2) 估计古人采取了通过选择洞口朝向的方式把握顶板顺层开挖的施工方法。这说明古人已认识并掌握了这一施工技巧^[2]。

4 关于古人利用斜顶“设计”解决浅埋问题的研究

4.1 龙游石窟的浅埋问题

作者对 1[#]~5[#] 洞室调查发现，各洞上覆岩层厚度通常仅为相应洞室宽度的 3/100~14/15，见表 3。由表 3 数据可以明显看出龙游石窟具有浅埋的特点^[2, 9]。显然在浅埋条件下(若不采用斜顶“设计”，

则其上覆岩层的厚度很可能靠近 h_{min} 分布)，因上覆岩层过薄，无法开挖成受力条件更好的拱形结构。加之岩体仅为中等坚硬(见表 1)，且易风化，所以过薄的上覆岩层很难经受长期风化。显然，如果不采取有力的措施则不仅难以安全渡过施工期，也很难维持长期稳定。

表 3 1[#]~5[#]洞窟上覆岩层厚度与相应洞室宽度对比表
Table 3 Comparison between the thickness of superincumbent stratum and the width of corresponding cavern from No.1 to No.5

洞号	洞室宽度/m	上覆岩层厚度 h/m	
		最小值 h_{min}	最大值 h_{max}
1 [#]	20	0.6	8
2 [#]	34	4.0	16
3 [#]	15	6.0	14
4 [#]	27	7.0	20
5 [#]	23	6.0	16

4.2 克服浅埋难题的两项措施

斜顶“设计”和设置岩柱是古人所采取的两项措施。于是，形成了现今所看到的带柱的斜顶结构。关于斜顶“设计”的直接效果，可从表 3 数据看出。如果假想成一般平顶设计，其上覆岩层的厚度可能靠近 h_{min} ，但斜顶“设计”可使上覆岩层厚度增加，使之变成 $h_{min} < h < h_{max}$ 。

另外，设置岩柱措施显然是必要的，根据推想，如果龙游石窟不设置岩柱，则不可能安全地渡过施工期和维持长期稳定。

4.3 现实斜顶“设计”与假想平顶“设计”的对比分析

为了进一步探索古人所采用的斜顶“设计”的优越性，作者以 5[#] 洞为例进行了斜顶与平顶“设计”的对比计算。通过对比两者之间的应力和开挖位移来揭示古人的工程科学亮点。

4.3.1 三维计算模型的建立

考虑到龙游石窟各洞室分布和每个洞室的结构都相当复杂，所以在斜顶“设计”研究中，仅取其中 5[#] 洞为分析对象。图 1 给出了本文研究的对象——5[#] 洞的地形、平面几何形状和 3 根鱼尾形岩柱的具体位置。

研究中，按照真实的 5[#] 洞具体条件建立三维计算模型，并简称为斜顶模型，具体如图 2 所示。

别为 183 和 189 m。地表最高处到模型底边界高度为 68 m。由于洞室结构较为复杂,需用较多单元,所以,本文采用 FLAC^{3D} 进行计算^[10, 11]。两模型所用的单元和结点数分别为 51 750 和 54 821,计算参数取自表 1。

4.3.2 斜顶与平顶模型的位移计算结果分析

虽然石窟开挖引起的位移对现在来说意义不大,但在古人开挖过程中却有较大影响,故仍列为对比对象。因篇幅所限,这里只讨论部分计算成果。

(1) 洞窟上方地表沉降量对比分析

表 4 列出了 5[#] 洞两种模型洞上地表 20 个点的开挖沉降量,并进行了对比。经对比发现,该表所列的斜顶模型所有地表点的沉降量都小于平顶模型的相应点的沉降量。前者仅为后者的 70%~82% 左右。

(2) 柱间顶板中部沉降量对比分析

表 5 列出两种模型各岩柱间顶板中部附近各点的沉降量,并进行了对比。不难看出,表 5 所列的

所有斜顶模型顶板柱间中部点的沉降量都小于平顶模型相应点的沉降量。前者仅为后者的 84% 左右。

(3) 边墙及后端墙中部外鼓位移对比分析

表 6 列出两种模型边墙中部各点的水平向变形,并进行了对比。为了节约篇幅,这里不再讨论西边墙。表 7 则列出了两种模型后端墙(见图 1)中部各结点水平向的位移值,以作对比分析。

上述两表可以看出:第一,有关斜顶模型与平顶模型各点基本上都表现出向洞内鼓出(即外鼓)的特征,但位于东墙的 33 759[#] 点(即表 6 的第 1 个点)例外,这可能由于它紧靠南墙的特殊位置有关;第二,平顶“设计”的东墙和后端墙的外鼓值均大于斜顶“设计”的外鼓值。

4.3.3 斜顶模型和平顶模型的应力比较

由于斜顶“设计”事实上使石窟从 5-1 柱到后端墙多数部位的上覆岩层厚度有着不同程度的增加,所以许多部位应力状态有所改善。通过 2 模型应力分布的比较,可证实这一结论。

表 4 斜顶与平顶模型地表点的沉降量对比

Table 4 Comparison of the ground settlements between models with inclined and flat roofs

结点号	沉降量/mm		斜顶/平顶/%	结点号	沉降量/mm		斜顶/平顶/%
	斜顶	平顶			斜顶	平顶	
23 878	0.941 21	1.169 4	80.49	28 214	1.200 50	1.639 30	73.23
23 879	0.906 03	1.137 2	79.67	28 215	1.196 10	1.642 70	72.81
25 135	1.010 90	1.233 9	81.93	28 833	1.227 00	1.768 00	69.40
25 136	0.995 69	1.221 5	81.51	28 834	1.223 40	1.761 40	69.46
26 208	1.361 20	1.800 3	75.61	28 908	1.258 80	1.806 00	69.70
26 209	1.356 00	1.793 2	75.62	28 909	1.256 20	1.801 50	69.73
26 283	1.357 00	1.764 8	76.89	29 720	0.791 68	1.035 10	76.48
26 284	1.353 30	1.760 0	76.89	29 726	0.748 10	0.961 94	77.77
27 095	1.042 20	1.414 5	73.68	30 839	0.877 81	1.208 50	72.64
27 101	1.042 70	1.421 0	73.38	30 840	0.824 34	1.117 70	73.75

注:表中沉降量以向下为正。

表 5 两种模型柱间顶板中部各点沉降对比表

Table 5 Comparison of the roof settlements in the middle of pillars between the models with inclined and flat roofs

5-1 柱子~5-2 柱子之间				5-2 柱子~5-3 柱子之间			
结点号	沉降量/mm			结点号	沉降量/mm		
	斜顶	平顶	斜顶/平顶/%		斜顶	平顶	斜顶/平顶/%
18 634	1.642 8	1.976 8	83.10	20 914	1.614 5	1.914 4	84.33
18 635	1.637 8	1.970 0	83.14	20 915	1.610 5	1.907 1	84.45
18 674	1.620 4	1.938 2	83.60	20 954	1.661 9	1.992 1	83.42
18 675	1.616 6	1.933 1	83.63	20 955	1.658 9	1.986 4	83.51

注:表中沉降量以向下为正。

表 6 两模型东墙中间高度各结点侧向位移对比表

Table 6 Comparison of lateral displacements at the middle height of the east wall between the two models

单元号	侧向位移/mm		单元号	侧向位移/mm	
	斜顶	平顶		斜顶	平顶
33 759	0.03	0.04	35 307	0.11	0.27
34 485	0.00	0.17	35 323	0.09	0.27
34 501	0.04	0.22	35 339	0.08	0.28
34 517	0.04	0.23	36 065	0.00	0.28
34 533	0.00	0.24	36 081	0.03	0.28
34 549	0.05	0.24	36 097	0.03	0.26
35 275	0.10	0.25	36 113	0.00	0.22
35 291	0.11	0.26	36 129	0.00	0.15

注：表中侧向位移均以向洞内方向的位移为正。

表 7 两模型后端墙中间高度结点的侧向位移对比表

Table 7 Comparison of lateral displacements at the middle height of the rear end wall between the two models

结点号	侧向位移/mm		结点号	侧向位移/mm	
	斜顶	平顶		斜顶	平顶
36 855	0	0.192 054	37 645	0	0.272 409
36 871	0	0.235 935	37 661	0	0.256 595
36 887	0	0.259 785	37 677	0	0.221 156
36 903	0	0.271 87	37 693	0	0.146 924
36 919	0	0.276 492	37 709	0	0.037 969

注：表中侧向位移均以向洞内方向的位移为正。

(1) 两模型柱间顶板中部应力对比分析

考虑到各柱之间顶板中部是较易产生威胁洞室稳定的拉应力重点部位之一，在这些部位附近取上下两层相邻单元进行对比分析。这里所谓下层单元，是指以临空面为下边界的单元，而上层单元则位于下层单元上方且相邻的单元。表 8, 9 分别对这

些部位的 σ_x , σ_y 和 σ_z 进行了对比分析。结果表明，除两模型的单元 24 653 和 27 283 的 σ_z 计算结果出现了微小的正负号不同(但量值很小)外，其余单元应力的拉、压情况都相同。但所述的 4 个单元的 σ_x , σ_y 都为拉应力，且斜顶模型拉应力仅为平顶模型拉应力的 16.67%~83.87%。这意味着前者比

表 8 两模型柱间顶板中部下层单元的应力对比

Table 8 Comparison of the stresses in the lower - layer zones in the middle of pillars between the two models

单元号	位置	斜顶应力值/MPa			平顶应力值/MPa			斜顶/平顶/%		
		σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
24 653	中部	0.1390	0.089	0.009	0.181	0.162	-0.007	76.80	54.94	-
27 278	中部	0.069 9	0.046	-0.001	0.177	0.158	-0.006	39.49	29.11	16.67

表 9 两模型柱间顶板中部上层单元的应力对比

Table 9 Comparison of the stresses in the upper layer zones in middle of pillars between the two models

单元号	位置	斜顶应力值/MPa			平顶应力值/MPa			斜顶/平顶/%		
		σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_x	σ_y	σ_z
24 653	中部	0.130	0.080	0.002	0.155	0.141	0.005	83.87	56.74	40.00
27 278	中部	0.058	0.031	-0.005	0.151	0.135	0.005	38.41	22.96	-

表 10 5-2 柱上方顶板及邻近部位拉应力单元个数分析
Table 10 The tensile zones above No.5.2 pillar and in its vicinity

模型名称	拉应力 σ_x			拉应力 σ_y		
	拉应力单元个数	占单元总数比例/%	最大拉应力值/MPa(单元号)	拉应力单元个数	占单元总数比例/%	最大拉应力值/MPa(单元号)
斜顶	116	70.7	0.146(25647)	52	31.7	0.0078 (27430)
平顶	143	87.2	0.170(26305)	113	68.9	0.127 (27430)

后者更利于洞室的稳定。虽然如此,但表 8, 9 的数据仍预示洞室顶板存在着被拉裂,继而发展为平板式塌方的危险,应当注意保护。

(2) 柱顶上方两模型应力分析结果对比

考虑到龙游石窟 14[#] 洞因历史上发生破坏而出现顶板全无但部分岩柱尚存的现象,所以,作者对柱顶单元应力状态特别关注。本文为节约篇幅,仅在 5-2 柱子上方顶板及其邻近部位分别选了 164 个单元,分上下两层,进行斜顶模型与平顶模型应力分析结果的对比分析。由于岩体抗拉强度远低于抗压强度,所以,以拉应力问题作为分析的重点。据统计,在其他条件相同时,斜顶模型的 σ_x 拉应力单元个数比平顶模型少 27 个(约为总数的 16.5%),见表 10。至于其中的 σ_x 最大拉应力值,斜顶模型为 0.146 MPa,而平顶模型却比它高 0.024 MPa,即为 0.170 MPa。另外,平顶模型 σ_x 拉应力值大于同一单元的斜顶模型的 σ_x 拉应力的单元个数达到 114 个,而相反的情况仅有 2 个单元;另外,表 10 也给出了有关 σ_y 拉应力的情况:平顶模型 σ_y 拉应力值大于同一单元斜顶模型 σ_y 拉应力值的单元数达 52 个,却无相反的情况。总之,上述分析显示,斜顶“设计”的应力条件与平顶“设计”相比有所改善。换言之,前者更有利于石窟的稳定。

5 结 论

龙游石窟作为我国古代文化的组成部分,向人们展示了古人的聪明才智。其斜顶“设计”是古人在满足某种建造目的的前提下巧妙运用地下结构的特点和地质条件的产物。

现场工程地质研究和三维数值分析表明,由于斜顶“设计”能改善洞室围岩的应力条件,以及减小顶板下沉量和边墙的侧向外鼓变形,所以较好地解决了浅埋问题。另外,本文的某些研究成果还表明,龙游石窟存在着多种变形破坏方式和危险。因此,应当特别重视它的保护问题。

参考文献(References):

- [1] 千古之谜 龙游石窟 探索·发现[DK]. 北京: 中国科学文化音像出版社, 2001.(Longyou Grottoes, a riddle forever, Discovery[DK]. Chinese Science and Culture Acoustic and Video Press, 2001.(in Chinese))
- [2] 杨志法, 王思敬, 许 兵等. 龙游石窟工程地质条件分析及保护对策初步研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(3): 292 - 295.(Yang Zhifa, Wang Sijing, Xu Bing, et al. Analysis of the engineering geological conditions of Longyou stone caverns and primary study on the protection strategies[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(3): 292 - 295.(in Chinese))
- [3] 孙 钧, 凌建明, 贾 岗等. 从工程科学角度看浙西大地的龙游石窟[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 131 - 133.(Sun Jun, Ling Jianming, Jia Gang, et al. Examining the Longyou Grottoes in the western land of Zhejiang province from the view point of engineering science[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 131 - 133.(in Chinese))
- [4] 孙 钧. 从工程科学角度看龙游石窟[J]. 岩石力学与工程动态, 2001, (53): 3 - 7.(Sun Jun. Examining the Longyou Grottoes in the western land of Zhejiang Province from the view point of engineering science[J]. Rock Mechanics and Engineering Trends, 2001, (53): 3 - 7.(in Chinese))
- [5] Sun Jun, Lin Jiangming, Jia Gang, et al. China's Longyou grottoes, Zhejiang Province[J]. News Journal, International Society for Rock Mechanics, 2001, 6(3): 44 - 46.
- [6] 地质矿产部. 地质专报(一) —— 区域地质第 11 号(浙江省区域地质志)[M]. 北京: 地质出版社, 1989.(Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province, Regional Geology Records of Zhejiang Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.(in Chinese))
- [7] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.(Gu DeZhen. Basement of Rock Engineering Geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1979.(in Chinese))
- [8] 王思敬, 杨志法, 刘竹华. 地下工程岩体稳定分析[M]. 北京: 科学出版社, 1984.(Wang Sijing, Yang Zhifa, Liu Zhuhua. The Stability Analysis of Rock Mass in Underground Engineering[M]. Beijing: Science Press, 1984.(in Chinese))

- [9] 王思敬. 巧夺天工的龙游石窟[J]. 岩石力学与工程动态, 2001, (53): 8 - 9.(Wang Sijing. The wonderful artical excelling nature, Longyou Grottoes[J]. Rock Mechanics and Engineering Trends, 2001, (53): 8 - 9.(in Chinese))
- [10] Itasca Consulting group, Inc. Fast Lagrangian analysis of continua in 3 dimensions[R]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 1997.
- [11] 陈帅宇, 周维垣, 杨 强等. 三维快速拉格朗日法进行水布垭地下厂房的稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1 047 - 1 053.(Chen Shuaiyu, Zhou Weiyuan, Yang Qiang, et al. Analysis on stability of surrounding rocks of Shuibuya underground plant by three-dimensional fast Lagrange method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1 047 - 1 053.(in Chinese))

基于计算智能的岩土力学模型参数反演方法及其工程应用

李守巨

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

博士学位论文摘要: 最优估计的岩土力学模型参数是通过比较现场观测到的信息数据与理论模型得到的模型数据的差异而得到的。通过定义目标函数, 将参数识别反问题转化为优化问题处理。基于梯度搜索方法的参数反演方法缺陷在于无法保证搜索到全局最优解, 其主要原因在于观测误差和模型误差的存在。Tihonov(1963)证明, 如果正问题(Forward Problem)是线性的, 那么, 反问题的解存在唯一并且连续地依赖于观测数据(稳定)。关于地下水反问题和热传导反问题以及位移反分析的数值试验发现, 当正问题是线性时, 如果当不考虑观测数据的观测误差时, 反问题的解是唯一的, 也就是说, 目标函数是凸函数, 正如 Tihonov 所指出的那样; 但是, 当考虑到观测数据的观测误差时, 即使正问题是线性的, 反问题的目标函数是非凸的, 反问题解是不唯一的。观测误差越大, 目标函数的局部极小值数目越多。

遗传算法是一种基于达尔文“自然选择、适者生存”生物进化思想的全局搜索算法, 其致命的缺陷在于早熟(Premature)特性。通过将模拟退火算法嵌入到遗传算法中, 建立了一种新的锦标赛选择策略。该选择策略使得在种群进化初期, 各个个体被选择的概率基本相等, 保证了进化过程中种群的多样性, 有效解决遗传算法的早熟问题。而随着种群的进化, 模拟退火算法中的退火温度逐步降低, 使得适应度高(目标函数小)的个体被选择的概率增加, 加快了算法的收敛速度; 当接近种群进化结束时, 只有适应度高的个体被选中。根据自然界中不同类型蚂蚁的分工特性, 在蚁群算法中增加了“侦察”蚂蚁, 该侦察蚂蚁负责搜索信息素非常低的路径(反问题的解), 使得算法具有快速搜索到新的更优解的能力, 同时有效地避免蚁群算法的“趋同”特性。同时, 将遗传算法中的最优个体保留策略应用到蚁群算法, 增强了蚁群算法的全局收敛特性和解的精度。由于蚁群算法采用“地毯式”搜索, 收敛速度十分有限, 特别是对于需要多次求解正问题的岩土力学参数反演问题, 其计算速度尤其突出。通过对蚁群算法的改进, 将模拟退火算法与蚁群算法相结合, 建立了模拟退火-蚁群算法, 该混合优化方法能够充分利用蚁群算法的信息素蒸发和全局修正特性以及模拟退火算法的快速“邻域”搜索特性, 加快了蚁群算法的收敛速度和全局收敛特性。

结合丰满发电厂、白山发电厂和云峰发电厂的改进和扩建工程, 根据现场观测数据, 包括坝基扬压力、漏水量和坝体变形观测数据, 建立了基于计算智能的混凝土大坝和岩石基础弹性参数反演方法、稳态或非稳态地下水流动模型的渗透系数和储水系数以及地下水渗流污染源辨识方法、线性和非线性岩土材料导热参数识别方法。数值算例和工程实际应用结果表明, 所建立的基于计算智能的参数反演方法具有良好的鲁棒性和全局收敛特性。

关键词: 岩土工程; 参数反演; 计算智能; 遗传算法; 模拟退火算法; 人工神经网络; 蚁群算法

PARAMETER IDENTIFICATION PROCEDURES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING WITH COMPUTATIONAL INTELLIGENCES AND THEIR APPLICATIONS

LI Shou-ju

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industry Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

收稿日期: 2004 - 11 - 15

作者简介: 李守巨(1960 -), 男, 2004 年 11 月在大连理工大学获得岩土与环境力学博士学位, 导师为刘迎曦教授; 主要从事岩石力学及其反问题的研究工作。E-mail: lishouju@dlut.edu.cn.