

# 层状岩体地下洞室变形影响因素分析

张占荣

(中国科学院武汉岩土力学研究所,湖北武汉 430071)

**【摘要】** 目前水电站建设多采用地下厂房,地下洞室围岩的变形特性是设计和施工关注的关键词之一。采用有限元程序,结合正交试验设计方法,考虑多因素共同变化的影响,研究了各因素对地下洞室变形特性的影响显著程度,对各因素对洞室特征部位变形影响的显著性分别进行了排序。分析结果表明:拱顶位移受岩层厚度和洞室埋深的影响程度最大,左边墙中点位移受洞室埋深和洞室高度的影响最大,右边墙中点位移主要受洞室埋深的影响最大;洞室最大位移多发生在左边墙中点附近,受岩层厚度、洞室埋深、洞室高度的影响都非常显著。绘出了各因素对洞室特征部位位移的影响趋势。

**【关键词】** 地下洞室;层状岩体;变形特性;正交试验;影响因素

**【中图分类号】** TU 457

**【文献标识码】** A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2009.05.007

## Study on Factors Influencing the Displacement Characteristic of Underground House in Stratified Rock

Zhang Zhanrong

(Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, Hubei, China)

**【Abstract】** Underground houses are mostly used in the construction of hydropower station, and the deformation characteristic of the surrounding rock is a key problem in the design and construction process. By using the FEM soft and the orthogonal experiment, the influence of multi-factor changing was taken into account, to study the influencing degree of the deformation characteristic of the surrounding rock by each factor, and the order of the influencing degree was listed. From the results we can see, the biggest influencing factor of vault displacement were the thickness of the rock stratum and the depth of the underground house, and the centre of the left side wall were the height and the depth of the underground house, the center of the right side wall was the depth of the underground house. The position of the biggest deformation was mostly near the centre of the left side wall. The biggest influencing factors of biggest displacement were the thickness of the rock stratum, the depth and the height of the underground house. At last, the influencing trend curves of the factor for the displacement of specific position were drawn.

**【Key words】** underground house; stratified rock; displacement characteristic; orthogonal experiment; influencing factor

### 0 引言

在高山峡谷地区建混凝土高坝时,与坝后式厂房相比,地下厂房在施工导流、泄洪消能、泄洪雨雾影响、碾压混凝土快速筑坝、缩短建设周期、节省工程投资等方面均有不可比拟的优点<sup>[1]</sup>,随着我国西部高山峡谷地区水利水电事业的发展 and 地下厂房施工设计水平的提高等,地下厂房在水电站建设中占到了绝对的优势。

地下厂房洞室的变形受到多因素的共同影

响,既有围岩力学性质、岩层间距、岩层倾向、节理切向刚度等内因,也有洞室形状、分步开挖步骤、支护形式、支护时机等外因<sup>[2-5]</sup>。各因素对地下洞室变形稳定的影响程度决定洞室的稳定程度,对影响洞室变形的因素进行分析,对于采取合理的施工、支护方式以及保证地下洞室的稳定性具有重要的指导意义。目前已有许多专家对地下洞室变形的影响因素进行了研究,但多采用单因素的分析方法,该方法忽略了各因素间的相互作用,与

**基金项目:** 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90715042); 国家高技术研究发展计划(863 计划)专项课题(2007AA11Z121)。

**作者简介:** 张占荣, 1982 年生,男,汉族,河北隆尧人,博士研究生,主要从事岩土力学数值分析方面的研究。E-mail: jlwdd@126.com

实际工程情况不太符合。本文采用有限元程序,结合正交设计试验方法,考虑多因素共同变化的影响,得出了各因素对地下洞室变形特性的影响大小和显著程度。

## 1 正交试验与计算模型

### 1.1 正交试验概述

正交设计是利用规格化的正交表来设计多因素、多水平试验方案的科学试验方法,它具有均匀分散性和整齐可比性两个特点<sup>[6]</sup>。

在考虑一个因素或两个因素对结果的显著性分析时,可以选用一元或二元方差分析,但是对于地下洞室开挖变形研究中所需要考虑的因素大于两个,需要考虑多个因素对计算结果是否有显著影响,这里可以采用正交试验的方法进行分析。该试验的原理就是利用数理统计学与正交性原理,从大量的试验点中选取合适且有代表性的点,应用“正交表”合理安排试验的一种科学试验方法。其构造原则是“均衡分散法”和“整齐可比性”,特点是安排的试验次数最少、且能反映客观事物变化的规律。

### 1.2 计算模型与影响参数选取

本文参考龙滩水电站的地下洞室规模、层状岩体厚度、岩体及节理的力学参数<sup>①</sup>,建立了分析模型,计算模型分析图见图1,有限元网格划分见图2。在分析中略去了地形地貌、洞室间相互作用的影响,以一个独立的大型地下洞室分步开挖来研究层状岩体中地下洞室围岩的变形特征和影响因素。洞室宽度取28m,为了尽可能地减小边界效应的影响,模型高度和宽度均取为400m,洞室所处的围岩为层状岩体,岩体采用莫尔-库仑弹塑性本构关系,岩体层面采用节理单元。模型的左右边界视为方向约束,底部边界视为固定约束。计算参数见表1。

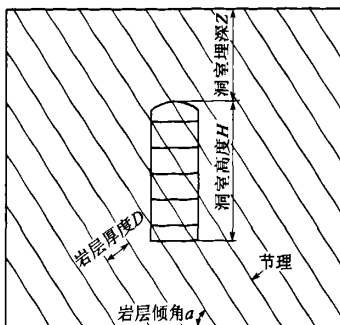


图1 试验计算模型示意图

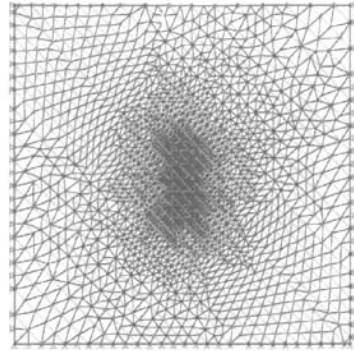


图2 有限元计算模型

正交试验设计的关键是试验指标、因素及因素水平的选取和试验计算方案的确定。在地下洞室变形机理影响因素敏感性分析的正交试验设计中,关键部位的位移数值和洞室的最大位移数值,是表征洞室变形特性的最直观的指标。本次研究选取拱顶和左、右边墙中点,及最大位移部位为关键部位,分别用A、B、C、M表示。

表1 材料计算参数表

岩体	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比	粘聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	抗拉强度 $\sigma_t/\text{MPa}$
	15	0.27	1.5	47	0.5
节理	法向刚度 $K_n/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	切向刚度 $K_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	粘聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	抗拉强度 $\sigma_t/\text{MPa}$
	16	0.4~4.0	0.2	26.6	0.1

以影响地下洞室变形特性的因素为基础,选用进行正交试验设计的影响因素主要是岩层厚度 $D$ 、岩层倾角 $\alpha$ 、洞室埋深 $Z$ 、洞室高度 $H$ 、节理面切向刚度 $K_s$ 。每种因素分为5水平,取值范围根据有关工程实例确定,见表1。

表2 参数的取值范围和水平

水平	$D/\text{m}$	$\alpha/(\text{°})$	$Z/\text{m}$	$H/\text{m}$	$K_s/(\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$
1	2	35	200	50.4	0.4
2	4	45	250	58.8	0.8
3	6	55	300	67.2	1.0
4	8	65	350	75.6	2.0
5	10	75	150	84.0	4.0

根据的影响因素,不考虑因素间的相互作用,可选用正交表 $L_{25}(5^6)$ ,试验次数为25次,是全面试验次数的0.8%。将各因素排在正交表前5列,剩余一个空白列为误差列,用符号“-”表示。设置误差

①中南勘察设计院.龙滩水电站地下厂房洞室群及输水系统工程地质报告[R].1994.

列的目的是为了利用正交设计原理来研究各个参数对特征部位位移影响程度<sup>[6]</sup>。

2 结果与讨论

2.1 正交试验结果

对特征部位在各种试验条件下的位移值进行计算,计算结果见表3。

表3 正交试验结果

试验编号	因素及水平						评价指标/mm			
	D	a	Z	H	K <sub>s</sub>	—	A	B	C	M
1	1	1	1	1	1	1	36	57	51	62.5
2	1	2	2	2	2	2	44	84	68	93.5
3	1	3	3	3	3	3	60.5	127	93.5	127.91
4	1	4	4	4	4	4	63	133	126	156.2
5	1	5	5	5	5	5	63	154	154	164.54
6	2	1	2	3	4	5	36	70	56	72.91
7	2	2	3	4	5	1	84	133	112	165.03
8	2	3	4	5	1	2	82.5	158	135	171.71
9	2	4	5	1	2	3	55	121	99	122.82
10	2	5	1	2	3	4	10	40	40	43.16
11	3	1	3	5	2	4	55	110	93.5	120
12	3	2	4	1	3	5	42	70	63	78.1
13	3	3	5	2	4	1	78	137	117	146.2
14	3	4	1	3	5	2	15	47.5	50	49.7
15	3	5	2	4	1	3	21	70	70	74
16	4	1	4	2	5	3	36	80	80	89.8
17	4	2	5	3	1	4	42	126	102	132.9
18	4	3	1	4	2	5	12.5	50	45	53.6
19	4	4	2	5	3	1	31.5	99	85.5	98.9
20	4	5	3	1	4	2	21	60	60	62.8
21	5	1	5	4	3	2	54	126	108	139.6
22	5	2	1	5	4	3	12	54	54	60.8
23	5	3	2	1	5	4	16	40	38	45.7
24	5	4	3	2	1	5	44	88	84	90.2
25	5	5	4	3	2	1	45	105	105	108.8
1	1	1	1	1	1	1	36	57	51	62.5

2.2 单因素影响程度分析

将各个因素相同水平的试验结果求平均值,极差是在各水平的平均值中由最大值减去最小值得。极差越大说明此因素的不同水平产生差异就越大,对地下洞室变形特性的影响程度越敏感。对表3中的试验结果进行极差分析,见表4。

表4 各因素极差分析

因素	拱顶位移					
	D	a	Z	H	K <sub>s</sub>	—
K <sub>1j</sub>	266.5	217	85.5	170	274.5	225.5
K <sub>2j</sub>	267.5	224	148.5	212	216.5	211.5
K <sub>3j</sub>	211	249.5	264.5	198.5	184.5	198
K <sub>4j</sub>	143	208.5	268.5	234.5	186	210
K <sub>5j</sub>	171	160	292	244	197.5	214
极差R	24.9	17.9	41.3	14.8	18	5.5
敏感性	Z>D>K <sub>s</sub> >a>H					

续表

因素	左边墙位移					
	D	a	Z	H	K <sub>s</sub>	—
K <sub>1j</sub>	555	443	248.5	348	531	499
K <sub>2j</sub>	522	467	363	429	475.5	470
K <sub>3j</sub>	434.5	512	518	475.5	452	462
K <sub>4j</sub>	415	488.5	546	512	449	454
K <sub>5j</sub>	413	429	664	575	432	454.5
极差R	28.4	16.6	83.1	45.4	19.8	9
敏感性	Z>H>D>K <sub>s</sub> >a					

因素	右边墙位移					
	D	a	Z	H	K <sub>s</sub>	—
K <sub>1j</sub>	492.5	388.5	240	311	470.5	442
K <sub>2j</sub>	442	399	317.5	389	421	410.5
K <sub>3j</sub>	393.5	428.5	443	406.5	396.5	390
K <sub>4j</sub>	372.5	444.5	509	461	399.5	413
K <sub>5j</sub>	389	429	580	522	402	434
极差R	24	11.2	68	42.2	14.8	10.4
敏感性	Z>H>D>K <sub>s</sub> >a					

因素	最大位移					
	D	a	Z	H	K <sub>s</sub>	—
K <sub>1j</sub>	604.65	484.8	269.8	371.9	581.4	531.3
K <sub>2j</sub>	575.63	530.3	385	462.9	517.3	498.7
K <sub>3j</sub>	468	545.1	565.9	492.2	475.3	487.7
K <sub>4j</sub>	438	517.8	604.6	588.4	498	498.9
K <sub>5j</sub>	445.1	453.3	706.1	616	459.4	514.8
极差R	33.3	18.4	87.3	48.8	24.4	8.7
敏感性	Z>H>D>K <sub>s</sub> >a					

由极差分析可知,在试验的规定范围内,各影响因素对拱顶位移的影响显著性排序依次为Z>D>K<sub>s</sub>>a>H,各影响因素对地下洞室左、右边墙中点以及最大位移部位位移值的影响显著性排序相同,都为Z>H>D>K<sub>s</sub>>a。各个因素对评价指标影响的极差均大于误差的极差。

2.3 方差分析及显著性检验

为了研究各因素对地下洞室变形特性影响的显著与否,本文还对地下洞室变形特性的正交表进行了方差分析,分析结果见表5。由于各个因素对评价指标影响的偏差平方和均大于空列的偏差平方和,所以误差的偏差平方和是空列的偏差平方和,误差的自由度为4,也就是空列的自由度。F<sub>j</sub>值是因素的水平改变引起的平均偏差平方和与误差偏差平方和的比值,显著性是用不同信度的F值来比较因素改动对试验结果的影响。F<sub>a</sub>(n1, n2)为一定信度下的F值,其中:n1为因素的自由度,n2为误差的自由度,a为信度。当F<sub>j</sub>>F<sub>0.01</sub>(n1, n2)时,称因素j对试验结果有非常显著的影响;当F<sub>0.05</sub>(n1, n2)<F<sub>j</sub><F<sub>0.01</sub>(n1, n2)时,就称因素j对试验结果有

显著影响;当  $F_{0.1}(n1, n2) < F_j < F_{0.05}(n1, n2)$  时, 就称因素  $j$  对试验结果有一定的影响;当  $F_j < F_{0.1}(n1, n2)$  时, 就称因素  $j$  对试验结果无影响。查  $F$  值表可知:  $F_{0.1}(4, 4) = 4.11$ ,  $F_{0.05}(4, 4) = 6.39$ ,  $F_{0.01}(4, 4) = 15.98$ 。

表 5 各因素试验结果的方差分析

拱顶位移				左边墙中点位移			
方差来源	$S_j$	F 值	显著性	方差来源	$S_j$	F 值	显著性
D	2498	32.34	非常	D	3488	12.65	显著
a	858	11.11	显著	a	900	3.26	无
Z	6476	83.83	非常	Z	21241	77.00	非常
H	695	9.00	显著	H	5872	21.29	非常
K	1113	14.42	显著	K	1187	4.31	一般
误差	77			误差	275		

右边墙中点位移				最大位移			
方差来源	$S_j$	F 值	显著性	方差来源	$S_j$	F 值	显著性
D	1927	5.68	一般	D	4871	21.06	非常
a	432	1.28	无	a	1097	4.75	一般
Z	15386	45.33	非常	Z	24757	107.05	非常
H	5017	14.78	显著	H	7782	33.65	非常
K	765	2.25	无	K	1799	7.78	显著
误差	339			误差	231		

由表 5 可知:岩层厚度  $D$  和洞室埋深  $Z$  对拱顶位移有非常显著的影响,岩层倾角  $a$ 、洞室高度  $H$  和节理法向刚度  $K$ , 对拱顶位移有显著的影响;洞室埋深  $Z$  和洞室高度  $H$  对左边墙中点位移有非常显著的影响,岩层厚度  $D$  对左边墙中点位移有显著的影响,节理法向刚度  $K$ , 对左边墙中点位移有一定的影响,岩层倾角  $a$  对左边墙中点位移无影响;洞室埋深  $Z$  对右边墙中点位移有非常显著的影响,洞室高度  $H$  对右边墙中点位移有显著的影响,岩层厚度  $D$  对右边墙中点位移有一定的影响,岩层倾角  $a$ 、节理法向刚度  $K$ , 对右边墙中点位移无影响;岩层厚度  $D$ 、洞室埋深  $Z$  和洞室高度  $H$  对洞室最大位移有非常显著的影响,节理法向刚度  $K$ , 对洞室最大位移有显著的影响,岩层倾角  $a$  对右边墙中点位移有一定的影响。这与通过极差分析得到的各因素对洞室变形特性的影响显著性排序是相一致的。计算模型中层状岩体均为左倾,可能是造成左右边墙影响因素有差异的主要原因。

#### 2.4 各因素显著性检验

针对本次的正交试验,以各因素水平为横坐标,各水平条件下特征部位位移平均值为纵坐标,得到岩层厚度  $D$ 、岩层倾角  $a$ 、洞室埋深  $Z$ 、洞室高度  $H$  以及节理面切向刚度  $K$ , 对特征部位平均位移值大

小影响的趋势图(见图 3)。

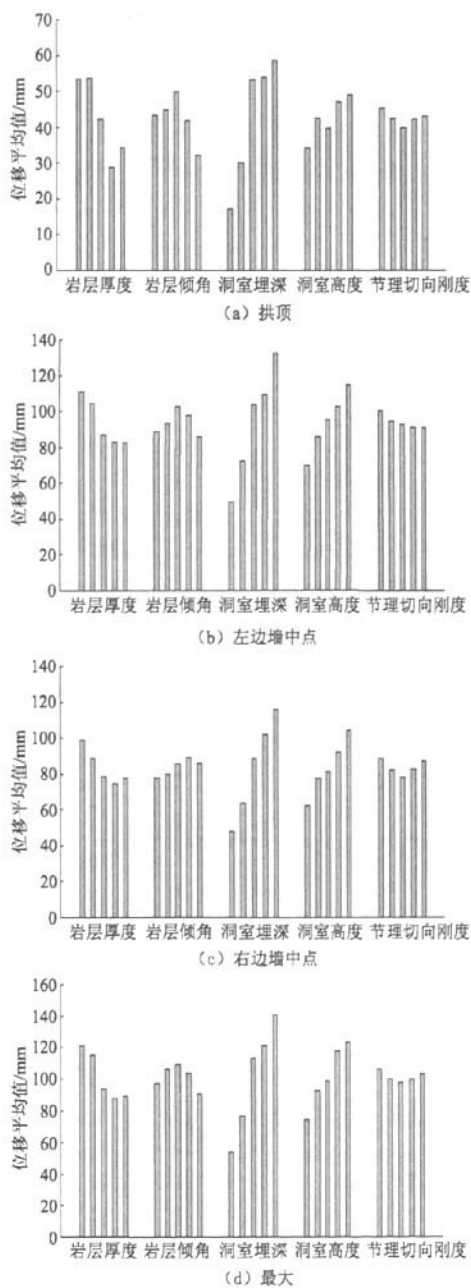


图 3 因素趋势分析图

由图 3 可以看出,拱顶的位移值随着岩层厚度  $D$  与洞室埋深  $Z$  的变化显著,岩层厚度变薄或洞室埋深增加都会导致拱顶位移值的增大;洞室左、右边墙中点的位移值都随着洞室埋深  $Z$  与洞室高度  $H$  的变化显著,洞室埋深增加或者洞室高度的加大都会导致拱顶位移值的增大;洞室最大位移值都随着岩层厚度  $D$ 、洞室埋深  $Z$  与洞室高度  $H$  的变化显

著,岩层厚度变薄、洞室埋深增加或者洞室高度的加大都会导致拱顶位移值的增大。这与极差分析和方差分析的结果是一致的。

### 3 结论

1)本文以正交试验法对地下洞室变形的影响因素进行了敏感性分析,分析所涉及的5个因素分别是:岩层厚度 $D$ 、岩层倾角 $\alpha$ 、洞室埋深 $Z$ 、洞室高度 $H$ 、节理面切向刚度 $K_s$ 。试验指标有4个:拱顶和左、右边墙中点,及最大位移部位位移值。

2)各因素对拱顶位移影响显著性排序为 $Z > D > K_s > \alpha > H$ ,各因素对左、右边墙中点以及最大位移部位位移影响显著性排序都为 $Z > H > D > K_s > \alpha$ 。

3)分析了各因素对特征部位位移的影响显著程度,其中,岩层厚度 $D$ 和洞室埋深 $Z$ 对拱顶位移影响非常显著,洞室埋深 $Z$ 和洞室高度 $H$ 对左边墙中点位移影响非常显著,洞室埋深 $Z$ 对右边墙中点位移影响非常显著,岩层厚度 $D$ 、洞室埋深 $Z$ 和洞室高度 $H$ 对洞室最大位移的影响都非常显著。计算模型中层状岩体均为左倾,可能是左、右边墙影响因素有差异的主要原因。

4)分析了各因素对试验指标的影响趋势,总的

来说,特征部位位移值,随着岩层厚度 $D$ 的增加而减小,随洞室埋深 $Z$ 、洞室高度 $H$ 的增加而增加,随着岩层倾角 $\alpha$ 的增加有先增加后减小的趋势,随着节理切向刚度的增加有先减小后增加的趋势。

### 参考文献

- [1] 郭子嵩. 地下厂房在峡谷高坝水电站枢纽布置中的优势[J]. 水力发电, 2000(9): 38-42.
- [2] 王启耀, 杨林德, 赵法锁. 陡倾角层状岩体中地下洞室围岩的变形[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(5): 69-73.
- [3] 张练, 丁秀丽, 付敬. 清江水布垭枢纽地下洞室施工开挖数值分析[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(3): 42-46.
- [4] 丁秀丽, 盛谦, 邬爱清. 水布垭枢纽地下厂房施工开挖与加固的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(S): 2162-2167.
- [5] 张占荣, 盛谦, 冷先伦, 等. 岩滩水电站地下厂房洞室群围岩稳定性分析[J]. 金属矿山, 2008(6): 20-22; 30.
- [6] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学技术出版社, 2001.

(上接第245页)

坏——“压酥”现象。

4)由数值计算和实验可以看出,在交叉部的拱顶和拱腰(特别是在拱腰的锐角侧)出现较大应力与较大位移。因此,在施工中应当重点监测。

### 参考文献

- [1] 陈国庆, 冯夏庭, 周辉等. 锦屏二级水电站引水隧洞长期稳定性数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 417-422.
- [2] 朱昌星, 阮怀宁, 朱珍德, 等. 锦屏深埋长大引水隧洞围岩蠕变特性仿真分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 06(02): 0921-0925.
- [3] 吴世勇, 任旭华, 陈祥荣等. 锦屏二级电站引水隧洞围岩稳定分析及支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3777-3782.
- [4] 徐日庆, 龚晓南, 王明洋, 等. 粘弹性体本构模型的识别与变形预报[J]. 水利学报, 1998(4): 75-80.
- [5] 李志业, 曾艳华, 等. 地下结构设计原理与方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.
- [6] 沈泰. 地质力学模型试验技术的进展[J]. 长江科学院院报, 2001, 18(5): 32-36.
- [7] 左保成, 陈从新, 刘才华. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1805-1808.

收稿日期: 2009-07-30