

文章编号:1673-5005(2007)01-0100-04

地下储油岩库围岩力学参数的正交设计

李云鹏¹, 郭书太², 王芝银¹, 陈山岭²

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 065000)

摘要:在相同岩性的现场库区内,岩体的物理力学参数随取样位置(深度)的变化具有不同的变化水平,即使在稳定岩层区不同深度岩性参数也有一定的差异。为了在储油岩库设计方案的数值模拟试验中充分体现这些实际特点,根据大量的岩石室内试验结果,采用正交设计试验方法,以岩石的弹性模量、泊松比、抗拉强度、粘聚力和内摩擦角共5个参数作为主要影响因素,选取储油洞库围岩塑性区面积(包括拉破坏区面积)和洞周最大位移值作为试验指标进行了正交试验,通过对正交试验结果进行直观分析,研究了地下储油岩库围岩力学参数的确定方法,给出了参数的最优组合,为解决同类问题建立了计算方法和分析思路。

关键词: 地下储油岩库; 力学参数; 正交设计

中图分类号: TU 45 **文献标识码:** A

Orthogonal design of mechanical parameters of surrounding rock for underground petroleum storage caverns

LI Yun-peng¹, GUO Shu-tai², WANG Zhi-yin¹, CHEN Shan-ling²

(1. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, Hebei Province, China)

Abstract: The physical and mechanical parameters of rock have the different levels which vary with sampling position (depth) in the surrounding rock with same properties, even in the stable layer of rock. In order to consider these actual characteristics in the simulating experiment of designing the petroleum storage caverns, the orthogonal experiment design method was used. The elastic modulus, the Poisson's ratio, the tensile strength, the cohesion and the friction angle of rock were taken as the orthogonal experiment factors, and the total area of plastic zones including the extension zones and the maximum value of displacement component were taken as evaluation indexes of experiment. The method of determining the mechanical parameters of surrounding rock for the petroleum storage caverns was studied by the direct-viewing analysis of the experiment results, and the optimal assembled parameters were given. The calculating method and analyzing process were established for solution of analogous problems.

Key words: underground petroleum storage cavern; mechanical parameters; orthogonal design

对于地下储油岩库的建造及施工方案的设计研究,一个重要手段是采用计算机仿真分析方法。仿真效果的有效性很大程度上取决于围岩力学参数的可靠性。工程实践表明,岩体力学参数的确定主要有两种途径,一是由实验室获得,二是通过现场试验或测量某种信息,并通过有关分析获得相应的力学参数。对于室内实验结果,由于取心具有很大程度

的局部性和随机性,以及现场与实验室环境和应力状态的差异,致使室内实验结果很难真实地反映工程实际地层变形与强度特性。因此,如何利用大量的室内实验结果,对分析系统输入合理有效的参数,并获得较合理和较接近实际的分析结果,这是一个值得关注的问题。关于计算分析参数的确定已有多种确定方法,如利用测量信息或现场试验曲线反演

收稿日期:2006-04-06

基金项目:国家自然科学基金项目(50374049)

作者简介:李云鹏(1956-),男(汉族),陕西武功人,教授,从事固体力学及其应用方面的教学与科研工作。

分析法^[1-5]、模糊数学确定法^[6]等。笔者根据某大型地下储油岩库库区地层的大量室内岩石力学试验结果,利用正交设计试验方法,对库区岩性参数进行优化组合试验研究,为地下储库设计的模拟分析研究确定较切合实际的岩性力学参数。

1 岩石力学室内试验

该工程库区主要岩性为中生界早白垩世天桥单元的中粗粒碱长花岗岩,库区洞群所处区域主要以硬质岩为主。通过现场选定3个典型位置进行钻孔取样分析,并结合工程地质考查资料进行分析,结果表明,本场地地层可划分为覆盖层、全风化层、强风化层、中风化层、微风化层和未风化层等。而且,对

3孔岩心观察及试验分析发现,即使在相同岩层和风化程度相同的条件下,库区内岩体的物理力学参数随取样位置(深度)的变化具有不同的变化水平;在完整性好、岩石质量指标高的稳定岩层区不同深度处的岩性参数也有不同程度的差异。所以,为了详细了解不同岩层、不同深度岩性状态,实验时完全根据 GB/T 50266-99 标准选取加工试样。根据实际情况,由于覆盖层及全风化和强风化层岩心较难获取,故岩石性能参数实验主要在中风化、微风化层及未风化层层位进行,且由于未风化层厚度较大,将其分为3个层位段进行实验研究,每孔共计40组120块岩样,试样及其破坏形态如图1所示。

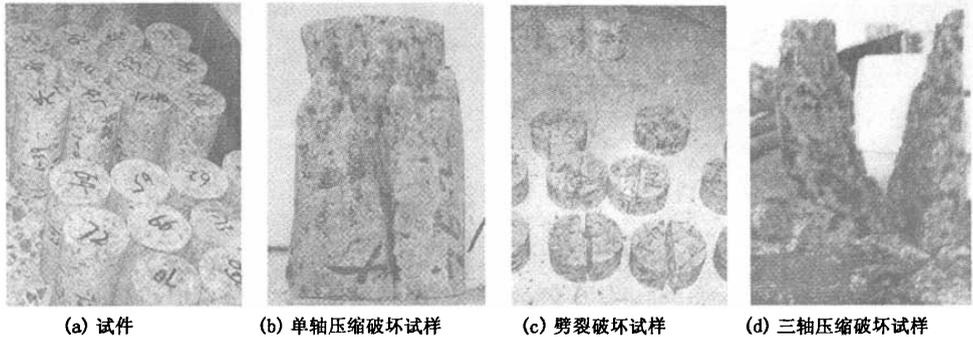


图1 试样与试件破坏形态

根据逐孔分层分组进行单轴压缩、劈裂和三轴等一系列岩石室内试验,并经相关数据整理将所获得各层岩石力学试验参数列于表1中。由试验结果可见,在未风化层内不同深度处岩石的力学参数有不同程度的变化。表1中,深度为79~134m的岩石基本为中粗粒正长花岗岩,岩石质量指标RQD值

在75%以上,岩石单轴抗压强度为80.557~106.442 MPa,岩石自然风干重度为25.57~25.67 kN/m³,其他参数(如C、 φ 值等)均有一定的变化范围。在进行地下储库设计研究时这些参数取值的合理性成为影响模拟结果及设计的重要因素。

表1 岩石物理力学参数试验结果

岩层	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	粘聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	抗拉强度 R_t/MPa	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	层深 s/m
覆盖层	10.2×10^{-3}	0.286	0	36.87	0	19.5	10.17
全风化层	1.7943	0.235	0.605	45.50	0.256	22.15	16.73
中风化	43.271	0.228	3.189	55.66	3.826	25.60	27.80~56.80
微风化	49.081	0.188	5.373	50.15	4.042	25.60	70.45~77.01
未风化(1)	47.978	0.205	7.067	38.51	2.451	25.67	115.73~134.67
未风化(2)	48.488	0.182	6.114	50.62	4.362	25.67	99.79~101.80
未风化(3)	47.314	0.187	5.509	52.60	3.913	25.57	79.22~83.60

2 岩石力学参数的正交试验

根据正交设计的组合原理^[7-8],按照一定的规律构造试验方案,进行结果分析试验来确定计算参数。对于储油岩库的稳定性设计仅从数值模拟研究的角

度来看,影响其结果的主要因素应取决于岩体的岩性力学参数,而且这些因素对整体的影响效应是综合性的,通过正交试验可以分析多因素及其交互作用对试验结果的影响,并按其各自的重要程度最终确定对试验结果的最优组合条件。

2.1 主要影响因素及水平的确定

选取岩石物理力学参数中对围岩稳定性影响较敏感的参数,包括岩石的弹性模量 E 、泊松比 μ 、抗拉强度 R_t 、抗剪强度指标中的粘聚力 C 和内摩擦角 φ 共 5 个参数作为主要影响因素,对于未风化层,按表 1 每因素取三个变化水平,其余岩层每因素按一个水平考虑,不参与正交试验的方案设计。于是,库区岩石力学参数的正交试验因素水平表及所考虑的因素见表 2。

表 2 计算参数的正交试验因素水平表

水平	因素(岩层参数)				
	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	内粘聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	抗拉强度 R_t/MPa
1	47.978	0.205	7.067	38.51	2.451
2	48.488	0.182	6.114	50.62	4.362
3	47.314	0.187	5.509	52.60	3.913
因素序号	1	2	3	4	5

2.2 正交试验方案的确定

正交试验方案可通过选取适当的正交设计表来构造。正交设计表选取的一般原则是,正交表中的水平数应与每个因素水平数相等,正交表中的因素数应大于或等于实际因素数。所以,在符合原则的前提下,应尽可能选用试验次数较小的正交表,以减少计算分析工作量。于是,对表 2 所示 3 水平 5 因素正交试验,可选择直接由正交表 $L_{18}(3^7)$ 选取前 5 列来构造围岩计算力学参数的试验方案,此时,试验次数应为 18 次,试验方案见表 3。

表 3 确定力学参数的试验方案及试验指标结果

方案	因素序号					试验指标	
	1	2	3	4	5	S_p/m^2	U_m/cm
1	1	1	1	1	1	11.71	0.4133
2	1	2	2	2	2	11.93	0.4108
3	1	3	3	3	3	11.93	0.4112
4	2	1	1	2	2	11.71	0.4098
5	2	2	2	3	3	11.93	0.4074
6	2	3	3	1	1	11.93	0.4077
7	3	1	2	1	3	11.71	0.4180
8	3	2	3	2	1	11.93	0.4153
9	3	3	1	3	2	11.71	0.4160
10	1	1	3	3	2	11.93	0.4132
11	1	2	1	1	3	11.71	0.4108
12	1	3	2	2	1	11.93	0.4114
13	2	1	2	3	1	11.71	0.4098
14	2	2	3	1	2	11.93	0.4071
15	2	3	1	2	3	11.71	0.4079
16	3	1	3	2	3	11.93	0.4180
17	3	2	1	3	1	11.71	0.4155
18	3	3	2	1	2	11.93	0.4161

2.3 试验指标的选取

根据地下储油岩库的特点,围岩所处的力学状态及开挖位移的发展和变化量是影响稳定性与安全性的主要因素。因此,在正交设计试验时选取储油洞库围岩破坏区面积(包括塑性区和拉破坏区面积)和最大位移值作为试验指标。试验指标可写为

$$S_p = \sum_{i=1}^m s_{pi}, \quad (1)$$

$$U_m = \max(u_1, u_2, \dots, u_n).$$

式中, S_p 为当前数值模拟试验中围岩破坏区总面积; s_{pi} 为第 i 个处于破坏状态的单元面积; m 为破坏单元的总数; U_m 为当前试验中位移分量的最大值; n 为位移分量的总数。

由式(1)可知,数值模拟试验指标值越大,地下储油洞库围岩当前的状态越危险,而以该状态进行设计所获得的储油岩洞安全系数则越大。

2.4 试验结果分析

由正交试验数值计算参数确定的方案见表 3。利用作者开发的有限元程序进行数值模拟试验。其中每次数值试验的具体过程与一般数值模拟过程相同。每一分析方案所采用的岩性力学参数由表 3 中所列的因素水平集与在表 2 中对应的因素水平值进行组合确定。如表 3 中的方案 4,其对应的因素水平集为 {2,1,1,2,2}。由此可见,对方案 4 所选的参数组合是:

$$E = 48.488 \text{ GPa}; \mu = 0.205; C = 7.067 \text{ MPa};$$

$$\varphi = 50.62^\circ; R_t = 4.362 \text{ MPa}.$$

在数值分析过程中,考虑了可能的施工工程因素和自然条件的变化,并持续模拟储油岩洞库的施工全过程。

根据上述设计方案,经 18 次正交设计模拟试验,将试验指标值列于表 3 的最后 2 列中。根据正交试验结果可进行直观分析,以确定围岩计算参数的最佳组合。步骤如下:

(1) 计算各因素不同水平的试验指标和(即水平平均和) B_i^j 、指标均值(即水平均值) k_i^j 及各因素的水平平均值的极差 R^j , 表达式为

$$\begin{cases} B_i^j = \sum_{k=1}^n \delta_{A_j(k)} S U_k, & k_i^j = B_i^j/l, \\ R^j = \max k_i^j - \min k_i^j. \end{cases} \quad (2)$$

式中, $l = n/S$; $i = 1, S$ (水平数); $j = 1, r$ (实际因素数); $A_j(k)$ 为第 j 个因素中第 k 试验号所对应的水平号; $S U_k$ 为第 k 试验号所对应的试验指标值; $\delta_{A_j(k)}$ 为 Kronecker 符号。

(2) 因素重要性顺序评定。依照各因素指标均值的极差大小排出重要性顺序,极差越大,该因素越重要。

(3) 最优因素(参数)组合方案选择。根据试验

指标的要求(该指标高者为优),从每个因素的 k_i^j 中找出最高点的水平。将各因素的最优水平组合起来,即为该库区岩层因素水平组合方案。

直观分析过程及其结果列于表4和表5中。

表4 试验指标 U_m 的计算参数正交设计方案直观分析

因素号	k_i^j			R^j	重要性排序	最佳水平	最佳参数值
1	0.4118	0.4083	0.4165	0.0082	1	3	47.31
2	0.4137	0.4111	0.4117	0.0025	2	1	0.205
3	0.4122	0.4122	0.4121	0.0002	4	1	7.067
4	0.4126	0.4122	0.4122	0.0004	3	1	38.51
5	0.4122	0.4122	0.4122	0.0001	5	3	3.913

表5 试验指标 S_p 的计算参数正交设计方案直观分析

因素号	k_i^j			R^j	重要性排序	最佳水平	最佳参数值
1	11.82	11.82	11.86	0.0367	3	3	47.31
2	11.78	11.86	11.86	0.0733	2	2,3	0.182
3	11.71	11.86	11.93	0.2200	1	3	5.509
4	11.86	11.86	11.82	0.0367	3	1	38.51
5	11.82	11.82	11.86	0.0367	3	3	3.913

由表4和表5中两种不同试验指标的直观分析结果可见,围岩力学参数 E, φ 及 R_t 的最佳取值在两种试验指标下是相同的,而 μ, C 是不同的。由于 μ 是影响变形的重要指标, C 是影响塑性破坏区的主要指标,所以,泊松比 μ 的最佳水平值应在表4中取值,而粘聚力 C 的最佳水平值应在表5中选取。由此可见,该地区储油岩库区未风化层的岩石力学参数的最佳选择方案应为: $E = 47.314 \text{ GPa}, \mu = 0.205, C = 5.509 \text{ MPa}, \varphi = 38.51^\circ, R_t = 3.913 \text{ MPa}$ 。

3 结束语

根据大量的室内试验资料,用正交设计试验方法考虑了各因素相互影响及其对洞室稳定性影响的综合效应,研究了在进行工程模拟仿真时如何应用实验结果确定岩层最佳力学参数组合方案的分析过程和方法。对岩石力学参数中室内实验数据具有离散性的情况,利用正交试验设计确定岩石力学参数是一种较有效且实用性较强的方法。

参考文献:

[1] 王芝银,杨志法,王思敬. 岩石力学位移反演分析回顾及进展[J]. 力学进展,1998,28(4):488-498.
WANG Zhi-yin, YANG Zhi-fa, WANG Si-jing. Review

on inverse analysis of displacements in rock mechanics [J]. Advances in Mechanics, 1998,28(4):488-498.
[2] 王芝银,李云鹏. 地下工程位移反分析方法及程序[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1993.
[3] 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,2002:199-200.
[4] 孙钧,蒋树屏,袁勇,等. 岩石力学反演问题的随机理论与方法[M]. 汕头:汕头大学出版社,1996.
[5] 李云鹏,王芝银,丁秀丽. 流变荷载试验曲线的模型识别及其应用[J]. 石油大学学报:自然科学版,2005,29(2):73-77.
LI Yun-peng, WANG Zhi-yin, DING Xiu-li. Model identification for rheological load test curve and its application [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2005,29(2):73-77.
[6] LI Yun-peng. Fuzzy determination of calculating parameters of rock masses [C]//Proceedings of the International Symposium on Application of Computer Methods in Rock Mechanics. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1993:1329-1335.
[7] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996:148-167.
[8] 庄楚强,吴亚森. 应用数理统计基础[M]. 2版. 广州:华南理工大学出版社,2003.

(编辑 沈玉英)