

引黄工程地下泵站岩体变形参数的测定

章光 王水林 朱爱民

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

摘要 应用钻孔千斤顶法对万家寨引黄工程总干一、二级地下泵站的不同岩层的弹性模量进行了现场测试, 测试数据经过数理统计方法进行处理, 并给出了不同岩层平行于层面与垂直于层面的岩体弹性模量数的建议值。

关键词 钻孔弹模计, 现场测试

分类号 TU 454

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2000)04-0539-04

1 前言

引黄入晋工程位于山西省西北部的偏关县万家寨乡, 由万家寨水库引水, 总干西起兴建中的该水库, 东至偏关县下土寨, 总干线有 20 座建筑物。一、二级地下泵站各装机 10 台。一级泵站地区分布为寒武纪张夏组至奥陶系亮甲山组约 15 个岩组, 岩性为灰岩、鲕状灰岩、泥灰岩、白云岩、白云质灰岩和页岩, 按岩层厚度划分为厚层、中厚层及薄层。泵站区岩层产状平缓, 走向北东, 倾向北西, 倾角 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。地层中有二组构造裂隙, 一组为 $NW 280^{\circ} \sim 290^{\circ}$, 另一组为 $NE 5^{\circ} \sim 10^{\circ}$; 倾角均大于 75° ; 而且该区厚层、中厚层与薄层岩组相间排列。二级泵站位于申同咀近东西向山梁以下 130~160m 深处, 山梁两侧为深切冲沟, 泵站地区基岩地层与一级泵站相同, 岩层平缓, 走向 $N 60^{\circ} \sim 70^{\circ} E$, 倾向北西, 倾角 $2^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。

由于衬砌设计方面的要求, 需要了解地下泵站围岩的岩体弹性模量。国内测定岩体弹性模量的传统方法是平板法。该法不仅试验周期长, 费用高, 而且仅能测定洞周或地表附近岩体弹模。当待测岩体不出露时, 则需开挖试验洞使其出露, 又进一步增加了工作的难度和经费。对于万家寨引黄工程总干一、二级地下泵站而言, 岩层分布复杂且某些待测岩层远离主干洞洞壁, 采用平板法困难很大。受业主委托, 中国科学院武汉岩土力学研究所采用钻孔千斤顶法成功地测定了各岩层的弹性模量。本文对此次试验作一总结和介绍, 以期推广这一先进方法在国

内岩土工程界的应用。

2 测试原理及设备

本次岩体弹模测试采用钻孔千斤顶法, 所用设备为由中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 BJ 系列钻孔弹模计。

钻孔千斤顶法是一种先进的测量岩体弹性模量的方法, 其原理是利用钻孔将千斤顶安置于岩体深部任意待测部位, 通过千斤顶对孔壁施加压力并记录相应的钻孔径向变形, 最后根据压力与变形的关系求出岩体弹性模量值。

国外广泛采用的测试设备是由国际岩石力学学会推荐的古德曼千斤顶(Goodman Jack)。但古德曼千斤顶由于存在承压块纵向弯曲及承压块与孔壁曲率匹配不良等问题, 其弹模测试值严重偏低, 需要修正。针对古德曼千斤顶的缺陷, 中国科学院武汉岩土力学研究所发展了 BJ 系列钻孔弹模计。BJ 系列钻孔弹模计有如下特点^[1]:

(1) BJ 系列弹模计有 $\phi 6$ mm (与古德曼千斤顶相同)、 $\phi 10$ mm 和 $\phi 30$ mm 三种不同外径, 可满足不同钻孔直径的需要, 也便于综合利用应力解除孔、声波测试孔进行试验, 节约钻孔费用。后两种尺寸由于增大了外径, 也即增大了试验影响区的范围, 更能代表岩体的变形特性。图 1 为 BJ-110 的构造图。

(2) 将古德曼千斤顶的 12 个扁圆形活塞改为 5 个圆形活塞, 它们全部位于承压块区段内, 从而显著降低了纵向弯曲的影响。

1999年8月3日收到初稿, 1999年11月4日收到修改稿。

作者章光简介: 男, 42岁, 1994年于中国科学院武汉岩土力学研究所获博士学位, 现任研究员, 主要从事岩体特性及其测试方法的研究。

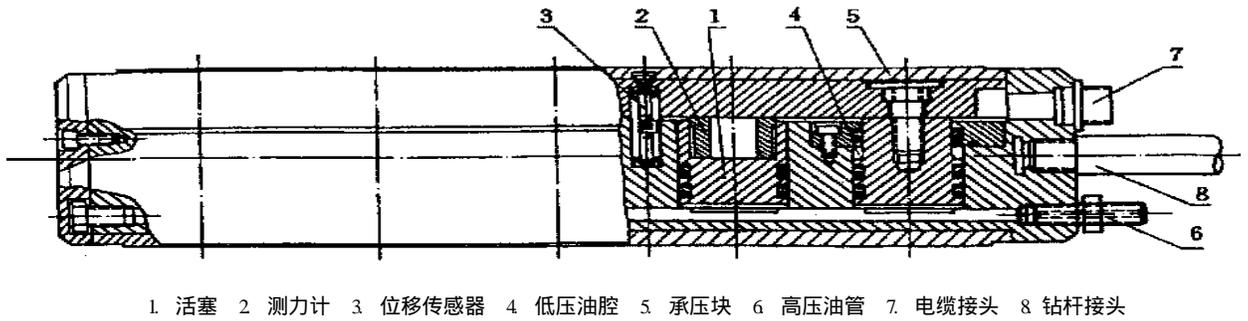


图 1 BJ-110 钻孔弹模计构造图
Fig 1 Structure of borehole jack

(3) 两个位移传感器安装在承压块中部, 接近于最大位移部位, 即使承压块有纵向弯曲也对测试结果影响甚微。

(4) 承压块改为可装卸式, 因而承压块的曲率半径、接触角大小和材料弹模可根据具体情况选择, 使其尽可能与钻孔匹配。同时承压块的接触角 2β 由 90° 改为 30° 和 45° 两种, 增大了接触压力且压力分布更加均匀。

(5) 在活塞上增加两个荷重传感器, 可直接测量承压块对孔壁的压力, 消除了压力换算及管路损失对测量结果的影响, 并有利于自动记录及数据处理。

经过多次现场试验的检验^[2~4], 表明该系列钻孔弹模计性能稳定, 测试结果可靠。

3 测点布置、测试结果及处理

3.1 测点布置

依照有关要求, 在一级泵站处于张夏组五段岩层 ($2Z^5$) 的 W_1 孔和处于张夏六段岩层 ($2Z^6$) 的 S_2 孔, 二组泵站分别位于寒武系凤山组岩层 ($3f^1, 3f^2, 3f^3$) 的 S_4 孔, W_7 孔与 W_7 孔进行岩体弹模测试。

各岩层中的测点布置参照现场钻孔取芯结果确定如下:

- (1) $2Z^5$ 岩层平行层面与垂直层面各 5 个点。
- (2) $2Z^6$ 岩层平行层面与垂直层面各 5 个点。
- (3) $3f^1$ 岩层平行层面与垂直层面各 6 个点。
- (4) $3f^2$ 岩层平行层面与垂直层面各 4 个点。
- (5) $3f^3$ 岩层平行层面与垂直层面各 5 个点。

这里平行层面和垂直层面分别指钻孔弹模计对孔壁的加力方向平行和垂直于岩层的层面。

3.2 加压方式

本次试验按《水利水电工程岩石试验规程》^[5], 加压方式采用逐级一次循环法, 典型的“压力-变形”实测曲线如图 2 所示。实测曲线中最后一级循环的

加载段将被用来计算岩体的弹性模量。

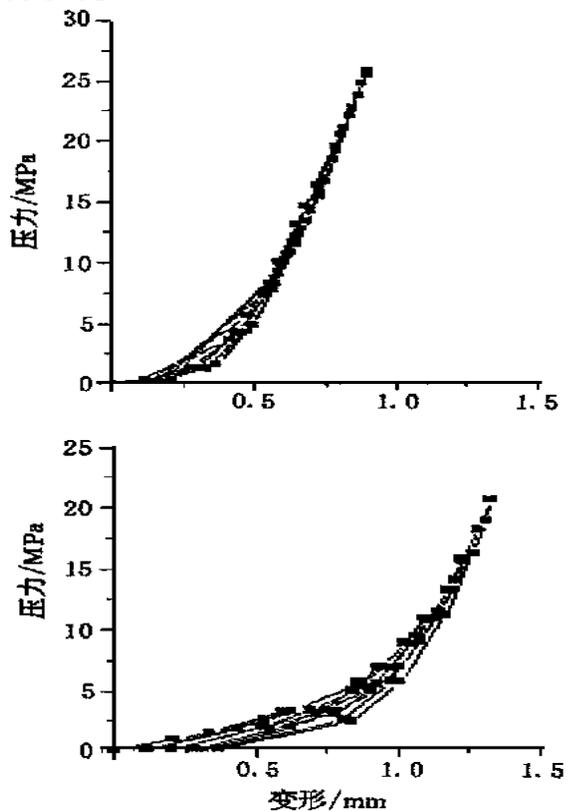


图 2 实测压力-变形曲线

Fig 2 Measured curves of pressure versus deformation

3.3 变形参数计算及结果

从图 2 可以看出, 当压力较低时, 实测曲线存在着程度不同的弯曲; 而当压力较高时, 实测曲线的线性较好。造成这一现象的原因有二: 一是岩体中张裂隙的压密, 二是钻孔弹模计承压板与孔壁之间间隙的压密。显然低压段的曲线不反映岩体的真实变形性质。通过对所得到的 50 个实测曲线图进行分析, 发现当压力大于 10MPa 时, 压密过程已完成, 此后的实测曲线均表现出良好的线性, 故选用压力大于 10MPa 的实测曲线段作为计算岩体弹性模量的依据。

利用“压力-变形”曲线计算岩体弹性模量的计算

公式由文[1]详细给出, 这里不再赘述。

各岩层测点处实测弹性模量列于表 1~ 5。

表 1 $2Z^5$ 岩层弹性模量

Table 1 Elastic moduli of rock stratum $2Z^5$

测点位置/m	弹性模量/GPa	
	平行层面	垂直层面
9.30	21.01	13.94
8.60	12.70	11.86
8.00	12.77	11.86
7.15	20.97	12.75
6.35	15.93	15.39

表 2 $2Z^6$ 岩层弹性模量

Table 2 Elastic moduli of rock stratum $2Z^6$

测点位置/m	弹性模量/GPa	
	平行层面	垂直层面
12.40	11.19	10.89
11.40	7.92	7.51
10.45	18.94	16.18
9.45	12.45	9.14
8.80	13.57	12.29

表 3 $3f^1$ 岩层弹性模量

Table 3 Elastic moduli of rock stratum $3f^1$

测点位置/m	弹性模量/GPa	
	平行层面	垂直层面
9.20	23.80	10.60
8.50	11.19	10.96
6.50	15.84	14.84
5.80	17.53	11.15
4.80	9.86	5.84
3.70	11.60	7.79

表 4 $3f^2$ 岩层弹性模量

Table 4 Elastic moduli of rock stratum $3f^2$

测点位置/m	弹性模量/GPa	
	平行层面	垂直层面
3.80	16.66	10.07
3.30	13.17	11.14
2.80	13.65	12.91
2.00	17.21	16.55

表 5 $3f^3$ 岩层弹性模量

Table 5 Elastic moduli of rock stratum $3f^3$

测点位置/m	弹性模量/GPa	
	平行层面	垂直层面
13.55	23.87	23.55
12.75	17.67	12.98
11.95	15.37	11.48
11.15	15.19	12.95
10.35	13.10	12.88

由于岩体介质非均质性, 即使同一区段的岩体, 其弹性模量测值也表现出一定的离散性, 所以对测得的数值宜采用数理统计^[6]的方法进行处理。本文认为在每一个岩层段, 平行于层面与垂直于层面的测值均服从正态分布规律, 按置信度 90% 分析各岩层段, 得到总干一、二级泵站岩体弹性模量的建议值, 列于表 6。弹性模量建议值的置信区间公式为

$$E = \bar{x} \pm \frac{s}{\sqrt{n-1}} t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1) \quad (1)$$

式中: \bar{x} 为样本均值, n 为样本个数, s 表示样本方差, $1-\alpha$ 为置信度, 查 t 分布可得 $t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-1)$ 。

表 6 各岩层弹性模量建议值

Table 6 Suggested elastic moduli for the rock strata

岩层	弹性模量/GPa	
	平行层面	垂直层面
$2Z^5$	16.68 ± 2.84	13.12 ± 1.07
$2Z^6$	12.80 ± 2.76	11.20 ± 2.27
$3f^1$	14.97 ± 3.15	10.20 ± 1.87
$3f^2$	15.17 ± 1.68	12.87 ± 2.33
$3f^3$	17.04 ± 2.84	14.77 ± 3.39

4 结束语

对测试结果进行分析, 可以得出如下结论:

(1) 就各岩层而言, 岩体弹性模量测值比较离散, 且沿深度变化也无明显规律性。譬如 $2Z^5$ 岩层的弹性模量, 平行层面最大为 21.01 GPa, 最小为 12.70 GPa; 垂直岩层最大为 15.39 GPa, 最小为 11.86 GPa。表明岩层的均匀性较差。应用数理统计方法, 给出了各岩层变形参数的建议值(列于表 6), 供有关方面参考。

(2) 就整体而言, 各岩层的弹性模量也存在着程度不同的差异。一级泵站中, $2Z^5$ 岩层的平行层面和垂直层面的弹性模量分别比 $2Z^6$ 岩层相应的弹性模量高 30.31% 和 17.14%, 稳定性计算时, 建议将两岩层区分开来; 而二级泵站中 $3f^3$ 岩层与 $3f^2$ 岩层相比, 分别只高 12.33% 和 14.76%, 为计算简便, 此两岩层可视为同一岩层, 但它们应与 $3f^1$ 岩层区分开来。

(3) 各岩层的弹性模量均表现出较明显的各向异性特征, 平行层面弹模均比垂直层面弹模大。前者与后者之比, $2Z^5$ 岩层为 1.27, $2Z^6$ 岩层为 1.14, $3f^1$ 岩层为 1.47, $3f^2$ 岩层为 1.18, $3f^3$ 岩层为 1.15, 显然 $3f^1$ 岩层和 $2Z^5$ 岩层不应作为各向同性介质考虑, 其他三种岩层由设计人员和计算人员酌定。

3.4 变形参数建议值

致谢 本次试验得到了水利部天津勘测设计研究院勘察院的大力配合, 武汉岩土力学研究所刘继光高级实验师参加了现场试验, 闵弘工程师完成了数据整理和计算, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 李光煜, 周百海 测顶测体变形物性的BJ-110 钻孔弹模计[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(4): 12~ 23
- 2 李光煜, 刘继光, 金英吉 平壤柳京饭店基岩变形特性现场测定[J]. 岩土力学, 1991, 12(2): 15~ 24
- 3 李光煜, 刘继光, 谢元静 钻孔弹模计检测断层固结灌浆效果[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 15(3): 289~ 293
- 4 Zhang Guang Application of BJ-110 borehole jack to elastic modulus measuring in a nuclear island ground base[A]. In: Zhu Keshan ed Proceedings of International Symposium on Rock Mechanics and Environmental Geotechnology [C]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997, 197~ 202
- 5 中华人民共和国行业标准 水利水电工程岩石试验规程(征求意见稿)[S]. 1998
- 6 董德元, 扬节, 苏敏文等编著 试验研究的物理统计方法[M]. 北京: 中国计量出版社, 1987(第一版), 116~ 128

MEASUREMENT OF ROCK MASS DEFORMATION PARAMETES FOR YELLOW RIVER DIVERSION PROJECT

Zhang Guang, Wang Shuilin, Zhu Amin

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

Abstract By means of borehole jack method, the in-situ measurement of elastic modulus is carried out for different rock formation of GMPS 1, 2 of Yellow River Diversion Project in Wanjiazhai. Due to the scatter of the moduli, the data are interpreted through applied statistics. The elastic moduli parallel and perpendicular to rock stratum are suggested.

Key words borehole jack, in-situ measurement

**国家自然科学基金岩土力学及相关学科类
1999 年资助项目题录(续 1)**

1 自由申请项目题录

所属学部	项 目 名 称	负责人	专业职务	单 位	起止年月	资助金额/万元
地球	环勃海地区区域承载力与可持续发展研究	毛汉英	研究员	中科院地理所	2000 01-2002 12	16 00
地球	非均质性对土壤水力性质影响的形态学研究	徐绍辉	副研究员	中科院南京土壤所	2000 01-2002 12	16 00
地球	地理信息系统支持下的暴雨滑坡灾害动态风险评估	周成虎	研究员	中科院地理所	2000 01-2002 12	14 00
地球	建筑物形变与结构应变三维数字摄影测量与数学模型研究	赵西安	副教授	西安建筑科技大学	2000 01-2002 12	12 00
地球	有机柱撑粘土的表面酸性、结构特征及层间柱环境研究	何宏平	副教授	中科院广州地化所	2000 01-2002 12	18 00
地球	白云鄂博地区基性岩浆作用与活动大陆边缘动力学研究	郝梓国	研究员	地矿部矿床地质所	2000 01-2002 12	18 00
地球	大别山古生代岩浆岩与基—酸性岩石间的研究动力学联系	马昌前	教授	中国地质大学(武汉)	2000 01-2002 12	17 00
地球	新疆西天山西段低温榴辉岩相平衡岩石学研究及地质意义	张立飞	副教授	北京大学	2000 01-2002 12	20 00
地球	煤储层渗透性与现代构造应力场之耦合特征及作用机理	秦 勇	教授	中国矿业大学	2000 01-2002 12	18 00
地球	远城盐湖湖泊沉积作用与黄土的关系	王 强	研究员	地矿部天津地矿所	2000 01-2002 12	18 00
地球	阿尔金高压变质岩带的岩石学特征及其大地构造意义	车自成	教授	西北大学	2000 01-2002 12	20 00
地球	江南造山带中段糜棱岩的流变学和年代学研究	孙 岩	教授	南京大学	2000 01-2002 12	17 00
地球	西天山高压变质岩的流体特性研究	高 俊	研究员	地矿部地质所	2000 01-2002 12	18 00

(待续)