

水力阶撑试验在水电工程的应用研究

Application of hydraulic jacking test to hydropower engineering

毛吉震, 陈群策, 张彦山
(中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085)

摘要: 主要通过实例介绍水力阶撑试验的原理、方法过程及在工程设计中的应用。并将多点测试结果进行了对比和综合分析, 选取了地下建筑的最佳位置。

关键词: 水力阶撑; 阶撑压力; 地应力; 气垫调压

中图分类号: TV 223.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0477-05

作者简介: 毛吉震(1952-), 男, 河南夏邑人, 华中理工大学毕业, 高级工程师, 主要从事水压致裂法地应力测量及研究。

MAO Ji-zhen, CHEN Qun-ce, ZHANG Yan-shan

(Institute of Crustal Dynamics, SSB, Beijing 100085, China)

Abstract: The principle and test procedure of hydraulic jacking test as well as its practical application were illustrated through test example. Based on the comprehensive analysis of the test results at several test sites, the most favorable site for hydropower construction was chosen and confirmed.

Key words: hydraulic jacking; jacking pressure; geostress; air cushion regulating pressure

0 前言*

在水电工程勘测、设计中, 关键的问题是要尽可能详尽地了解工程区域的岩体状况及岩体在设计水头压力作用下的物理力学行为, 并进行科学的分析。虽然地下设施的选址一般都选在地质构造稳定、远离复杂的断裂带、岩石相对完整的区域。但对一些高水头电站的坝址、高压叉管、调压井、气垫调压室、输水隧道及地下厂房周边的围岩来说, 在建成蓄水后, 由于承受高水头压力的作用, 岩石微孔隙及裂隙将承受一定的张应力, 进而促使岩石矿物结晶间的胶结物及裂隙间的充填物发生微观断裂, 随着时间的延长和水头压力的提高, 一旦超过岩石的承载能力, 将会导致严重的灾害发生, 如 1976 年美国 Teton 坝在蓄水后的突发事故。若地下水压增高, 同样可促使岩石孔隙及裂隙间的压力增高, 将导致裂隙进一步扩展、相互沟通, 从而引起涌水、漏水、山体滑坡以及地下建筑物变形等灾害发生。若能准确地测定出工区围岩裂隙的最大承载能力, 将具有重要的意义。为此, 中国地震局地壳应力研究所近年来, 在工程实践中利用水力阶撑试验法, 对多个水电工程区域的裂隙岩体进行了原地模拟工程设计中水头压力载荷能力的现场测试, 为设计部门提供了可靠的第一手实测资料。

早在 1987 年, T. W. Doe 和 G. E. Korbin^[1] 就对水力阶撑试验进行了定义, 并较详细地论述了该方法用于地应力测量的试验步骤和工作原理。后来, J. Rutqvist^[2,3] 又利用试验对裂隙介质的水力力学性质, 如岩

石裂隙的法向水力刚度进行了较为深入的分析。在国内, 陈群策、李方全(1996)^[4] 利用该方法在老挝的一个抽水蓄能电站成功地进行了垂向主应力大小的实地测定, 消除了山体边坡对垂向应力计算误差的影响。但利用该方法对裂隙岩体进行载荷能力的原地测试尚未见有报道。

1 基本理论

水力阶撑试验的理论基础是裂隙岩体的渗流理论。孔隙介质的渗流行为遵循达西定律, 即裂隙岩体的渗流速度与渗流坡降成正比。该定律在岩土力学中一直得到广泛的应用, 并沿用求解裂隙岩体中渗流问题。直到上世纪 60 年代中期, 人们开始认识到裂隙岩体不能简单看作孔隙介质, 而应视为裂隙块体或离散体介质。实际上, 由于岩体中存在着各种各样的裂隙结构面及断层等, 其渗透性主要取决于这些裂隙面的透水性。基于这样的思路, 众多学者为了研究裂隙岩体的渗透特性, 做了大量的室内试验, 得出结论: 大多数岩石工程渗流问题符合立方定律, 该定律具体表述为

$$q = \frac{gb^3}{12v}I, \quad (1)$$

式中 q 为渗透流量, g 为重力加速度, b 为裂缝宽度, I 为液体压力, v 为液体的运动粘滞系数。此外, 人们从试验中还得到下面的经验公式:

$$k_r = \frac{1}{4} \left(\frac{5}{4r+1} - 1 \right), \quad (2)$$

式中 k_r 为裂隙渗透系数, r 为裂隙接触面积与总面积之比。另有试验表明^[5], 在裂隙面法线方向试件承受单轴压力为 0.6 MPa 时, $r < 0.1\%$; 当压力增至 1.3 MPa 时, r 约为 1%; 压力增至 20 MPa 时, r 为 10%~20%。该试验结果表明了裂隙面上有效应力与裂隙宽度的关系, 与公式(1) 对应, 就是压力 I 和裂隙宽度 b 的关系。由试验证明, 当含有裂隙的岩体承受液体压力时, 起初, 渗透流量与压力呈线性变化, 随着压力的不断升高, 裂面上的有效应力将随之降低, 在压力接近或等于裂面有效应力时, 渗透流量与压力将出现拐点, 不再是简单的线性关系, 一旦压力超过裂面有效应力后, 将促使裂隙宽度增加, 导致渗透流量增大, 压力与流量再度呈现近线性关系。总体来看, 在向裂隙岩体进行加压注水试验时, 渗透流量与压力的变化过程是一个水力耦合过程, 该过程可表示为: $\Delta p \rightarrow \Delta \sigma \rightarrow \Delta u \rightarrow \Delta q$, 其中 p 、 σ 、 u 、 q 分别表示流体压力、裂隙面上的法向有效应力、裂隙面法向位移和流量。下面从水力阶撑试验的水力耦合机制入手, 论述其工作原理及试验过程。

2 试验方法和分析

水力阶撑试验(Hydraulic Jacking Test), 顾名思义, 就是多级阶式稳定压力的注水试验。它与常规压水和高压压水既有相同之处, 又有根本的区别。常规压水是在不破坏岩体介质的前提下, 测试岩体在不同压力下的渗透特性, 高压压水是根据具体要求测试不同压力阶段岩体的渗透特性, 而水力阶撑试验是用测定岩体裂面法线方向的正应力来确定裂隙岩体载荷能力的试验。

试验设备和方法与水压致裂法地应力测量基本相同(见图 1), 主要分为井下和地面两部分。井下主要是两只止水封隔器和两路供压管线, 地面主要是压力供源及记录仪表、数据采集、分析处理系统。该测试系统可在造孔结束后, 根据测试要求灵活地选择测试深度进行测试。

具体试验过程以及数据处理方法如下:

(1) 选择试验段

根据试验目的和要求可选择一条或一组裂隙作为试验段, 为了取得较为准确的测量数据, 应在一个测点根据裂隙的走向、倾角和深度多选测试段, 以便分析对照。并将止水封隔器放置在所选裂隙的上下两端。

(2) 座封

座封的方法是通过地面高压泵向两个封隔器加压

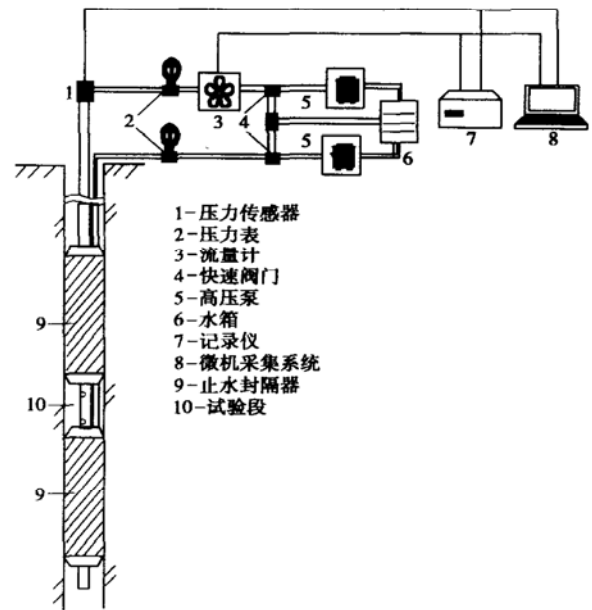


图1 水力阶撑试验测试系统

Fig. 1 System of hydraulic jacking test

使其膨胀。目的是使所选试段能与钻孔其它部位隔离, 形成一独立的试验空间。

(3) 试验

测试过程中首先用高压泵向试验段注水, 一旦试验段内的空隙被液体充填, 并且排入的流量大于岩体裂隙渗透流量后, 试验段内的压力将开始上升, 一般起始压力为 1 MPa, 待压力和流量数值曲线稳定(大约 2~5min)后, 再通过调节流量使压力升高一个台阶(为准确测定岩体裂隙的阶撑压力, 压力阶差常选为 0.5 MPa), 其后以此类推直至裂隙充分被张开, 试验即可结束。测试过程中的压力、流量信号通过传感器分别送至 X-T 记录仪进行现场显示记录和计算机进行数据采集、分析处理。压力与流量曲线如图 2 所示, 该曲线为一水力阶撑试验的实测全程记录。

(4) 水力学机制简述

起初由于向裂隙岩体试段内注水, 流量较大, 随着试段及裂隙空间被水充满后, 流量由大变小压力由零逐渐增大, 为使压力保持某一稳定数值, 可通过控制流量来达到压力和流量的稳定值。开始时, 流量与压力的变化呈近似线性关系, 从物理意义上讲, 此时的裂缝系统是不变形的, 裂缝宽度基本上不发生变化, 渗流主要受控于水压力并遵循达西定律。此时的渗流规律基本属于层流状态。随着压力不断升高, 裂隙面将由闭合状态逐渐转变为张开状态, 流量也将明显增大或突然增大, 流体状态由层流转为紊流, 而上述的曲线将由线性变为非线性。此时裂隙面法线方向的有效应力与施加的液体压力平衡, 这一流量突变点所对应的压力, 就是裂隙被张开的临界压力点。在水力阶撑试验中被

称为阶撑压力。随着压力的再度升高,裂隙将产生较大的破裂与扩展,此时,压力与流量又由非线性再次变为近似线性关系(见图3)。

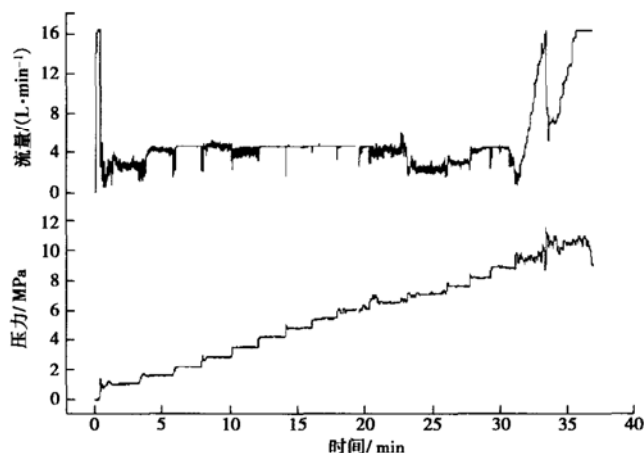


图2 阶撑试验的压力、流量记录曲线

Fig. 2 Record of pressure and flow rate of hydraulic jacking test

图3是试验中压力与流量的特征曲线,相当于常压水试验中的 $P-Q$ 曲线。图3(a)为敞开裂隙的特征曲线(初始增压时就有一定流量,当压力升高超过临界点时,流量明显增大);图3(b)为闭合裂隙的特征曲线(初始增压时流量为零,当压力升高超过临界点时,流量突然增大)。由图发现裂隙从自然状态到产生新的破裂均经过近线性—非线性—近线性三个阶段。

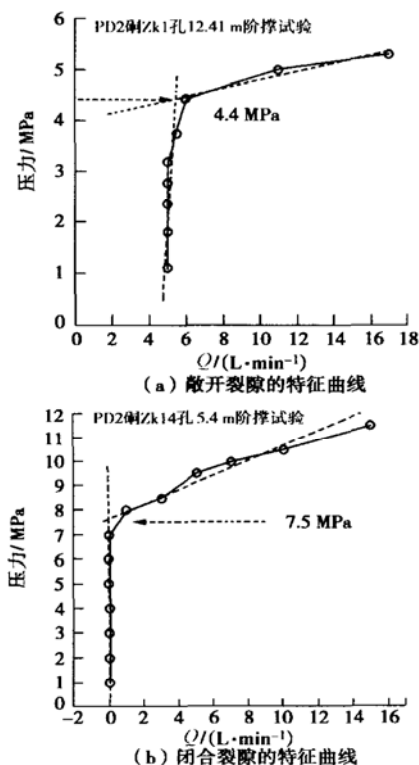


图3 水力阶撑试验典型的特征曲线

Fig. 3 Record of pressure vs flow rate of hydraulic jacking test

(5) 数据的判读

在图3中两个近线性阶段的线段上各划一条直线,将其交叉点(如箭头所指)对应的压力值,即上述裂隙张开的临界压力点,称为阶撑压力(P_j),也就是裂隙岩体的承载能力。

为了比较准确地确定阶撑压力值,在临近非线性区时,压力台阶可以取为0.25 MPa或更小,因为压力台阶越小,越有利于提高试验的精度。另外,还可在裂隙充分张开后关闭高压水泵,并利用压力记录曲线,按照水压致裂应力测量求取关闭压力的方法^[6],分析裂隙面法线方向的有效应力,以便相互验证对比。这样所测定的数据就更加精确可信。

3 测试实例

下面用实例说明阶撑试验在水电工程中的应用。

我国西南地区拟建一座气垫式调压电站,所谓气垫式调压,即在岩体内开挖一个密闭的空间形成腔体,利用腔体内的高压气体作为“气垫”来调节水位高度,以稳定地控制发电量。这种调压方式目前只有挪威及个别国家采用,我国还属首例。

为建成后能安全稳定运行,首先要选择岩体完整、密闭性能较好的区域作为地下厂房或调压室的最佳位置。在实际中岩体内总不可避免地存有一定的节理裂隙,这些软弱结构面在高水头压力的作用下能否张裂,主要取决于裂隙岩体的承载能力。为给气垫调压室设计提供重要的资料依据,并能充分论证该设计方案的可行性,我们在工区开展了原地应力测量,并利用水力阶撑试验对裂隙岩体的承载能力进行了原位测定。

该电站水头落差约为400 m,由于水头落差较大,对气垫调压室、地下厂房及高压叉管等处岩体裂隙的承载能力就提出了要求,即承载能力必须大于4.0 MPa才能满足设计需要。

用上述水力阶撑试验法在工区的一个平洞内进行了五个测点14个钻孔21个试段进行了测定,其结果见表1。

下面对各测点的测试概况进行简述:

(1) 测点1

本组测点位于PD2#洞口0+353 m处,在该测点垂直孔(Zk01)和下斜孔(Zk03)中,分别进行了1段节理裂隙的阶撑测试。为了准确地了解裂隙岩体的载荷能力,试段的长度限定为0.85 m。由于本测点两个钻孔的缓倾角裂隙比较发育,并两孔涌水量较大,表明岩体中裂隙的串通性较强。阶撑压力分别为4.4 MPa和3.3 MPa。根据阶撑压力数值分析,该测点裂隙岩体承载水头压力的能力较差。

(2) 测点2

表 1 各测点水力阶撑试验结果

Table 1 Hydraulic jacking test results at different test sites

测点	测点位置	钻孔名称	试段深度 /m	阶撑压力 值/MPa	测点最小主 应力值/MPa	备注
1	0+ 353	ZK01(垂直孔)	11.99~ 12.84	4.4	5.71	全孔裂隙较发育, 互通性强
		ZK03(下斜孔)	18.60~ 19.45	3.3	5.71	全孔裂隙较发育, 互通性强
		ZK04(垂直孔)	14.0~ 15.0		5.64	测段漏水严重无压力显示
2	0+ 523		6.20~ 7.20	2.7	5.64	属敞开裂隙
		ZK05(水平孔)	23.10~ 24.10	2.4	5.64	属敞开裂隙
		ZK06(下斜孔)	9.30~ 10.30		5.64	测段漏水严重无压力显示
3	0+ 675	ZK07(垂直 1 孔)	5.60~ 6.40	5.0	8.44	试段内含约 $\angle 45^\circ$ 闭合裂隙 1 条
			24.00~ 24.8	2.8	8.44	试段内含约 $\angle 45^\circ$ 敞开裂隙 1 条
		ZK08(水平 4 孔)	20.70~ 21.50	6.5	8.44	试段内含约 $\angle 35^\circ$ 缓裂 1 条
		ZK09(水平 3 孔)	10.40~ 11.20	10.5	8.44	试段内含约 $\angle 35^\circ$ 闭合缓裂 1 条
4	0+ 680	ZK10(水平 1 孔)	9.62~ 10.42	1.5	1.88	试段内含约 $\angle 45^\circ$ 中裂 2 条
			15.94~ 16.74	2.5	7.88	试段内含中陡裂隙 1 条
		ZK11(水平 2 孔)	20.68~ 21.48	15.0	7.88	闭合隐含裂隙
			22.00~ 22.80	7.6	7.88	含 $\angle 70^\circ$ 陡裂 1 条
		ZK12(垂直 2 孔)	21.00~ 21.80	3.5	7.88	含 $\angle 65^\circ$ 陡裂 1 条
		ZK13(垂直孔)	10.58~ 11.38	8.0	10.1	裂面平直敞开无充填
5	0+ 729		24.00~ 24.80	10.0	10.1	裂面平直、闭合无充填
		ZK14(水平孔)	5.00~ 5.80	7.5	7.88	含 4 条 $\angle 43^\circ$ 闭合裂隙, 间距 1~ 5 cm
			24.00~ 24.80	5.0	10.1	含缓倾闭合裂隙一条
		ZK15(下斜孔)	9.20~ 10.00	9.0	10.1	4 条 $\angle 15^\circ \sim 20^\circ$ 缓裂, 闭合无充填
			14.50~ 15.30	5.0	10.1	一条 $\angle 75^\circ$ 闭合陡裂

本组测点位于 PD2[#] 洞口 0+ 523 m 处, 在 3 个钻孔中共选择了 4 个试验段。试段长度均为 1 m, 试段内均含一条或一组节理裂隙。在试验中发现, 垂直和下斜孔的测段漏水严重, 压力上不去; 水平孔 2 个测段的阶撑压力分别是 2.7 MPa 和 2.4 MPa, 由测值表明裂隙连通性较强, 承载水头压力的能力很弱。

(3) 测点 3

本测点位于 PD2[#] 洞 0+ 675 m 处。在垂直孔 (ZK07) 和洞壁上不同方向的两个水平孔 (ZK08 和 ZK09) 内共进行了四段测试, 阶撑压力分别是 5.0, 2.8, 6.5, 10.5 MPa。其中 3 段阶撑压力数值比前两个测点高, 但其中 1 段较低仅为 2.8 MPa, 不能满足高水头压力的要求。

(4) 测点 4

本测点位于 PD2[#] 洞 0+ 680 m 处, 测孔为洞壁上相互垂直的两个水平孔 (ZK10 和 ZK11) 和一个垂直孔 (ZK12)。在该测点的三个测孔中, 共进行了五个试段的测试, 阶撑压力分别为 1.5, 2.5, 15.0, 7.6, 3.5 MPa。其中 3 段阶撑压力较低, 最低的仅为 1.5 MPa, 该测点的岩石条件仍不具备建造气垫调压室。

(5) 测点 5

测点位于 PD2[#] 平洞内 0+ 729 m, 在 3 个钻孔 (Zk13 Zk14 Zk15) 内共选择了 6 个试验段。试段长度

均为 0.80 m, 并含一条或一组裂隙。6 个试段的测试结果分别是 8.0, 10.0, 7.5, 5.0, 9.0, 5.0 MPa。由阶撑压力结果可见, 数值均在 5.0~ 10.0 MPa 范围。总体看该测点裂隙岩体对高水头压力的抵御能力较强, 可以满足 400 m 高水头压力以及建造气垫调压室的基本条件。

根据以上 5 个测点所获得的阶撑压力数值分析, 随着平洞深度的增加, 岩石完整度逐渐转好, 阶撑压力数值逐渐增大, 测点 1~ 4 的阶撑压力值相对较低, 均不能满足 400 m 水头压力的载荷, 而测点 5 的阶撑压力值最小为 5 MPa, 最大为 10.0 MPa, 均大于 400 m 水头的载荷压力。

另外, 在 5 个水力阶撑试验测点, 还同时进行了水压致裂法地应力测量, 从获得的最小主应力值来看, 随着平洞深度的增加, 数值也逐渐增大。

将 5 个测点的水力阶撑试验与应力测量结果进行对比分析, 再结合工程地质条件总体考虑, 最后确定测点 5 为气垫调压室的佳位置。

4 结 语

近年来经过国内外多项工程实践的应用证实, 水力阶撑试验是提供围岩尤其是裂隙岩体载荷能力的有效方法, 所测结果可信度较高, 技术上已趋成熟。在工

程实践中,由于该方法能给工程设计、灾害预测提供可靠的依据,因而人们对围岩载荷能力的测试越来越受到重视。

除上述应用外,还可根据围岩的载荷能力设定工程的灌浆压力、地下厂房和深埋输水管道衬砌方案的选定、以及山体滑坡、矿山涌水的预测等。

在地应力测量方面,利用该方法对水平或近水平裂隙进行测定,可以较准确地求取垂向主应力大小,特别是对地形较为复杂的区域,可以消除由山体边坡对垂向应力计算误差的影响。利用该方法还可在单孔中进行三维地应力测量,法国学者柯尼特(Cornet)早已进行了大量的研究,最近我国也已有该方面的报道。

参考文献:

[1] Doe T W, Korbin G E. A comparison of hydraulic fracturing and

hydraulic jacking stress measurements[A] . Proc 28th US symposium on Rock Mechanics[C] . Tucson, 1987. 283- 290.

[2] Rutqvist J. Determination of hydraulic normal stiffness of fractures in hard rock from well testing[J] . Int J Rock mech Min Sci & Geomech Abstr, 1995, 32(5) : 513- 523.

[3] Rutqvist J. Theoretical and field studies of coupled hydro-mechanical behaviour of fractured rocks field experiment and modeling [J] . Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1992, 29(4) : 411- 419.

[4] 陈群策, 李方全. 水力阶撑法用于原地应力测量的工作原理及其工程实践[J] . 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3) : 305- 310.

[5] 朱岳明. 裂隙岩体渗流研究评述[J] . 海河科技进展, 1991, 11(2) : 16- 25.

[6] 李方全. 水压致裂地应力测量及井温观测[A] . 三峡坝区水库诱发地震研究[M] . 北京: 地震出版社, 1993. 11- 49.

简讯

关于举办 2004 年全国“注册土木工程师(岩土)执业资格专业考试”考前培训班的通知

全国“注册土木工程师(岩土)执业资格专业考试”已进行了两年,我们已成功举办了4期考前培训班。为了帮助今年参加考试的专业技术人员系统复习、把握考试重点、吃透考点难点、掌握应试技巧,在总结前两年考试和辅导经验基础上,于2004年7月30日至8月8日在邯郸举办2004年全国“注册土木工程师(岩土)执业资格专业考试”考前培训班,现将有关事项通知如下:

1. 培训内容

按照2004年注册岩土工程师考试大纲要求讲授如下内容:岩土工程勘察;浅基础;深基础;地基处理;土工结构、边坡与支挡结构、基坑与地下工程;特殊条件下的岩土工程;地震工程;工程经济与管理。各章节都讲一定数量的例题和案例分析题。

2. 授课教师

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会常务副理事长、清华大学教授(博士生导师)李广信;河北建筑工程学院岩土工程研究所所长杜海金教授(国家注册

岩土工程师);河北建筑工程学院王小红教授;石家庄城乡建设学院扬宝春副教授(国家注册监理工程师、造价工程师)。

3. 培训时间和地点

时间:2004年7月30日报到,7月31日—8月8日授课。

地点:河北省邯郸市市中煤水文地质局教育培训中心(从邯郸火车站乘9路、24路、38路、40路公共汽车到客车大修厂站下车,水星宾馆五楼)。

4. 参加人员

今年已报名参加全国注册岩土工程师考试的人员。

5. 培训费用

培训费600元(包括培训、资料、光盘),食宿费60元/天人。

6. 联系方式

北京:010—62785593,联系人:王东华;邯郸:0310—7115060,联系人:赵河发。

(中国土木工程学会土力学及岩土工程分会 供稿)