

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.05.003

文章编号:1672-3767(2020)05-0021-09

引用格式:李健,于开宁,梁钊,等.基于宁波大榭岛熔结凝灰岩地区的压水试验改进[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(5):21-29.

LI Jian, YU Kaining, LIANG Zhao, et al. Improved water pressure test and its application in Daxie island (Ningbo) tuffs area [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(5): 21-29.

基于宁波大榭岛熔结凝灰岩地区的压水试验改进

李 健^{1,2}, 于开宁¹, 梁 钊¹, 沈 振³, 王晓明¹

(1. 河北地质大学 河北省高校生态环境地质应用技术研发中心, 河北 石家庄 050031;

2. 青岛海洋地质工程勘察院, 山东 青岛 266071; 3. 北京矿物局综合地质工程公司, 北京 102300)

摘 要:压水试验是测试深部岩体渗透性的重要方法之一。通过改进压水试验,如安装推拉阀门精简设备,在试段内安装探头直接测取试段压力,在压水泵和压力计之间安装水阀将压水试验转为脉冲试验等,在宁波大榭岛致密凝灰岩地区进行试验,对比分析了改进前后的测试效果。结果表明,理论计算的试段压力与实际存在一定差异,使用探头获取的试段压力排除了管损压力、孔内水位变化等因素的干扰,使得渗透系数的计算更准确;在低渗透性试段内,脉冲试验能测得小于 1.0×10^{-5} m/d 的渗透系数,更加精确。这些改进提高了压水试验的效率和精度,并拓展了试验设备的应用范围,对于岩体渗透性评价具有一定参考价值。

关键词:宁波大榭岛;钻孔压水试验;试段压力;渗透系数;脉冲试验;致密熔结凝灰岩

中图分类号:TU45

文献标志码:A

Improved water pressure test and its application in Daxie island (Ningbo) tuffs area

LI Jian^{1,2}, YU Kaining¹, LIANG Zhao¹, SHEN Zhen³, WANG Xiaoming¹

(1. Hebei Center for Ecological and Environmental Geology Research, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;

2. Qingdao Geo-Marine Engineering Survey Institute, Qingdao, Shandong 266071, China;

3. Beijing Mining Bureau Comprehensive Geo-engineering Co, Beijing 102300, China)

Abstract: The water pressure test is one of the important ways to test the permeability of deep-buried rock mass. In this paper, the water pressure test method was improved by installing the push-pull valve to simplify the equipment, installing the probe in the test section to directly measure the pressure, and installing a water valve between the pressure water pump and the pressure gauge to convert the water pressure test into a pulse test. The improved method was then applied to the measurement of the permeability in a tuffs area of Daxie island (Ningbo). The test results before and after the improvement of the method were analyzed and compared. The results show that the test section pressure obtained from theoretical calculation is different from the actual pressure. The test section pressure obtained by the probe excludes the interference of the tube damage pressure loss and the water level change in the hole so that the calculation of the permeability coefficient is more accurate. In the test section with a lower permeability coefficient, the pulse test can measure the permeability coefficient less than 1.0×10^{-5} m/d, which is more ac-

收稿日期:2019-01-23

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41902298)

作者简介:李 健(1990—),男,新疆昌吉人,工程师,硕士,主要从事地质工程研究.E-mail:3069694@qq.com

于开宁(1965—),男,山东乳山人,教授,博士,主要从事水文地质、环境地质等方面研究,本文通信作者。

E-mail:1211931193@qq.com

curate. By increasing the efficiency and precision of the water pressure test and expanding the application range of the test equipment, the above improvement has certain reference value for the evaluation of rock mass permeability.

Key words: Daxie island (Ningbo); water pressure test in borehole; testing pressure; permeability coefficient; pulse test; dense tuffs

压水试验是测试深部岩体渗透性的重要方法之一,由于能灵活调节试段位置和试段长度且试验数据易获得等特点,被广泛应用于地下能源储备库、矿业开采、地质调查等工程^[1-6]。对地下工程而言,岩体的渗透系数不仅是预测施工期涌水量的重要参数,而且由于岩体的渗透性主要受结构面的发育规模、裂隙的连通情况等因素影响,岩体的渗透系数也与岩石质量指标(rock quality designation, RQD)、围岩等级关系密切。准确测得岩体的渗透系数是地下工程能否顺利实施的关键因素之一,众多学者就压水试验方法及试验成果进行了大量研究,梁德贤等^[7]利用压水试验成果,从紊流非达西流角度出发,提出了高水压条件下岩体渗透系数的计算公式。宋矿银^[8]结合烟台 LPG 水封洞库项目研发了一套自动化程度高、易于操作的压水试验设备,并认为在单孔内采用双封塞密封试段更科学合理,测得的岩体渗透系数也更准确。范波等^[9]介绍了单孔压水试验、三段式压水试验和多孔交叉压水试验的相关理论,分析了各自的特点和不足:单孔压水试验要求精度高,需要一种高精度高自动化的设备用以提高试验精度和效率。然而上述学者在各种工程中用到的压水试验,都是按照传统规范方法进行,这些试验方法未考虑在试段内直接测取试段压力,且在低渗透性试段内测试精度有限。在前人研究基础上,结合现场测试经验,对单孔压水试验进行改进,包括试验设备和成果分析方法。使用改进后的试验方法在宁波大榭岛熔结凝灰岩地区进行应用,以检验改进效果。

1 单孔内岩体渗透系数取值

测定岩体渗透系数的试验方法可分为两大类:一是稳态法;二是非稳态法^[10]。压水试验属于稳态法,即在稳定的试段压力下读取稳定的压入流量。单孔压水试验中,一般采用 3 个压力点 5 个压力阶段进行施压,即 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1$,国内规范推荐 $P_1 = 0.3 \text{ MPa}$ 、 $P_2 = 0.6 \text{ MPa}$ 、 $P_3 = 1.0 \text{ MPa}$;欧洲规范中 $P_1 = 1/4 P_{\max}$ 、 $P_2 = 1/2 P_{\max}$ 、 $P_3 = P_{\max}$ 。其中: $P_{\max} = 0.0125 \times Z (P_{\max}$ 为试段最大压力,MPa; Z 为试段顶部至孔口之间的高差,m)。记录各压力点的流量,绘制对应的压力-流量曲线。一般取最大压力下的压力和流量计算该试段的渗透系数,国内规范^[11]中计算渗透系数的公式为:

$$K = \frac{Q}{2\pi HL} \ln \frac{L}{r_0} \quad (1)$$

其中: K 为岩体渗透系数,m/d; Q 为压入流量, m^3/d ,试验中为了方便记录采用 L/min ; H 为试验水头,m,是试段压力 P 转化的水柱高度; L 为试段长度,m; r_0 为钻孔半径,m。

在岩体较完整、渗透系数较小的试段进行压水试验时,常会遇到在较大压力下压入流量接近 0 的情况。由式(1)可知受流量计最小精确读数的影响,使用压水试验方法测试岩体渗透系数时会存在下限:如当流量计的最小分度值为 $0.1 \text{ L}/\text{min}$,即测不到小于 $0.1 \text{ L}/\text{min}$ 的流量值,将 $Q = 0.1 \text{ L}/\text{min}$ 代入式(1)计算出的渗透系数为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{d}$,则在该试验条件下压水试验无法测得小于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{d}$ 的渗透系数。与压水试验相比,脉冲试验更适于测试渗透性低的岩体^[12]。脉冲试验(pressure pulse test)又称压力消散试验,属于非稳态法,其原理是对试段施加标准压力后密封试段,观测并记录压力(试验水头)随时间衰减曲线,通过解偏微分方程,确定岩石的渗透系数。利用脉冲试验测试岩体渗透性在国内外均有广泛的研究和应用:Selvadurai 等^[13]研究了脉冲试验测试岩体渗透性时气体掺入对衰减率的影响;陈群策等^[12]在甘肃某花岗闪长岩地区同时进行压水试验和脉冲试验,认为脉冲试验更适用于测试渗透性较低的岩体。

脉冲试验可用图解法求解渗透系数 K (图 1)。图解法的具体做法是:把试验所得 H/H_0 随时间衰减的实测点(其中 H 为记录的某一时刻水头衰减的残余值, H_0 为脉冲试验开始时的水头)以同一比例画在透明的单对数坐标纸上,水平移动试验曲线,比较其与标准曲线的接近程度,固定试验曲线与标准曲线最接近位置,定出 $\beta = 1$ 直线(即 $Tt\pi/V_w C_w \rho_w g = 1$)与试验曲线图 t 轴相交的坐标值 t_m ,则可求出岩层的导水系数^[14]。

岩层导水系数:

$$T = \frac{V_w C_w \rho_w g}{\pi t_m}, \quad (2)$$

其中: C_w 为水的压缩系数, m^2/N ; ρ_w 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; V_w 为水的体积, m^3 。

进而得到试段渗透系数:

$$K = \frac{T}{L}。 \quad (3)$$

其中 L 为试段长度, m 。

对试段进行密封、加压是脉冲试验和压水试验都需要的试验条件,使用安装在进水管上的压力计即可观测压力消散,因此,只需稍加改进,压水试验设备就可用于脉冲试验。

2 压水试验的改进

本次改进基于一套国内较先进的压水试验设备,该设备采用双水压封塞密封试段,通过调节水泵转速控制试段压力,使用安装在进水管上的高精度电子流量计、电子压力计来读取流量和压力数据,为确保管路系统的密封性,使用特制的合金钻杆作为进水管。设备硬件方面的改进主要有以下三点:①使用推拉阀门连接钻杆和上封塞;②在试段内安装水压探头;③在进水系统管路上安装两个阀门。改进后的设备及试验步骤如图 2。

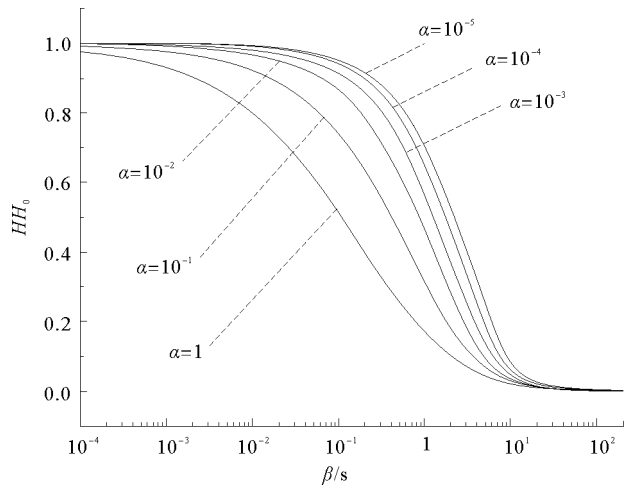


图 1 脉冲试验标准曲线

Fig. 1 Standard curve of pulse test

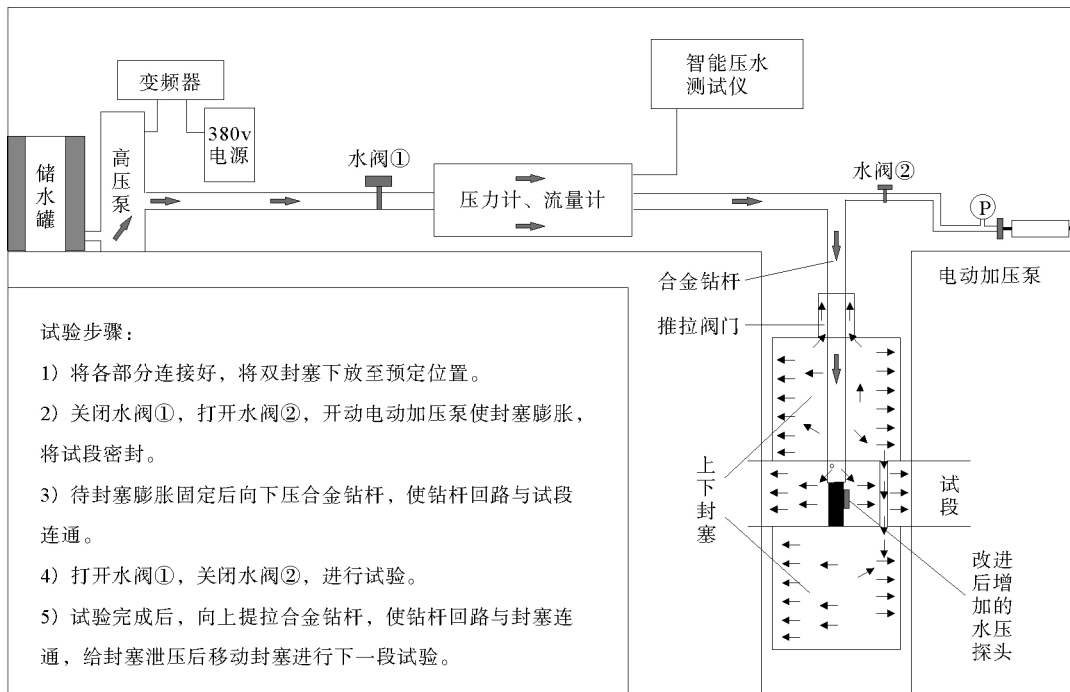


图 2 改进后的试验设备及试验步骤

Fig. 2 Improved test equipment and test steps

试验数据分析方面的改进主要针对试段压力计算。现场试验时当采用安设在与试段连通的测压管上的压力计时,试段压力按式(4)计算:

$$P = P_p + P_z, \tag{4}$$

其中: P 为试段压力, MPa; P_p 为压力计指示压力, MPa; P_z 为压力计中心至压力计算零线的水柱压力, MPa (图 3)。

当采用安设在进水管的压力计测压时, 试段压力按式(5)计算:

$$P = P_p + P_z - P_s. \tag{5}$$

其中 P_s 为管路压力损失, MPa。其余符号同式(4)。

式(5)中当压力计安装在进水管上时, 压力计和试段之间管路中的水是流动的, 这就会造成一部分水压被管路对水流的阻力所损耗。而式(4)中压力计是安装在与试段连通的测压管上, 由于测压管内的水是不流动的, 此时测压管中的水只起到传递水压的作用。假设在图 3 中, 将测压管上的压力计安装在与钻孔水位齐平的位置, 此时 $P_z = 0$, 试段压力 P 等于测压管压力计指示压力 P_p , 由于钻孔内的水位是静止的, 测压管中的水不流动, 在测压管任意位置处管内外的压力差始终为压力计指示压力 P_p (即 $P_p = P$)。由此可以推断压水试验中用来计算渗透系数 K 的试验水头 H 实质上是试段位置加压后的水头与该处初始水头的差值。结合式(4)~(5)可以推导出某一深度地面压力计指示压力 P_p 、试段压力 P 与管损压力 P_s 的关系公式如下:

$$P = P_1 - P_2, \tag{6}$$

$$P_s = P_p + P_z - P. \tag{7}$$

其中: P_1 为试验时试段内水压, MPa; P_2 为试验前试段内水压, MPa。其余符号同上。

使用改进后的设备进行试验具有以下几方面优势:

1) 提高试验效率

推拉阀门的加入省去了封塞加压管。推拉阀门是一种能够切换水流回路的装置, 在向孔内下放封塞时推拉阀门处于拉出状态, 此时钻杆与封塞连通, 通过钻杆可以给封塞加压; 当封塞膨胀固定在孔壁上后, 下压钻杆, 钻杆与试段连通, 即可进行试验。改进后的设备结构简单紧凑, 方便运输安装, 在深孔中连续进行试验时效率提升尤为明显。

2) 提高试验精度

由于试验现场条件复杂, 在试验过程中会有很多干扰因素, 例如岩石吸水和管路压力损耗会使试段压力小于预期值, 具体有多少压力传递至试段无法准确计算。针对这一问题, 在试段内安装了高精度的水压探头(最大量程 3.5 MPa, 精度约 ± 1.8 KPa) 用来直接记录试验前和试验时试段内的水压。试验时准确记录各试段各压力段的开始、结束时间, 按式(6)计算该试段压力 P 。

3) 扩展设备应用范围

与压水试验相比, 脉冲试验更适于测试低渗透性低的岩体。压水试验过程中遇到压入流量特别小(小于 0.01 L/min) 时可进行脉冲试验。压水试验适用于渗透系数较大的岩体(大于 10^{-5} m/d), 脉冲试验适用于渗透系数较低的岩体, 弥补了压水试验的短板, 在现场试验中推荐先使用压水试验方法进行试压, 当压入流量较小时转而进行脉冲试验。

3 在宁波大榭岛熔结凝灰岩地区的应用

试验所在地区基岩主体由上侏罗统高坞组 (J_3g) 及西山头组 (J_3x) 上段组成, 岩性为流纹质晶屑玻屑

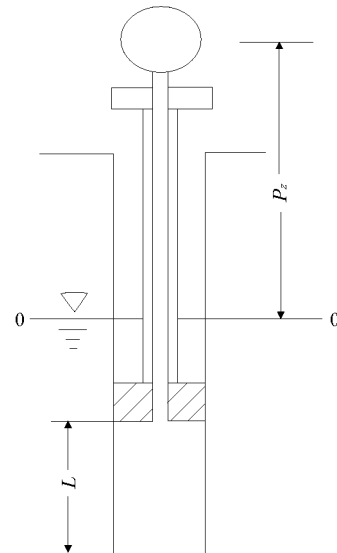


图 3 压力计中心至压力计算零线的水柱压力 P_z

Fig. 3 Water-column pressure (P_z) from the center of pressure gauge to the zero line

熔结凝灰岩、英安质含角砾晶屑玻屑熔结凝灰岩、凝灰质砂岩等。覆盖层主要为第四系坡积、冲积及滨海沉积。场地地下水补给来源主要为大气降水,地表无水系。采用单孔分段式压水试验,试段长度 10 m。试段压力分级分阶段施加,结合国内外规范对试验压力的要求,各试段的加压顺序及转为脉冲试验的条件按表 1 执行,取各试段最大压力下的压力和流量计算该试段的渗透系数。

表 1 试验压力随深度变化及脉冲试验条件

Tab. 1 Variation of test pressure with depth and conditions of the pulse test

封塞位置/m	各级压力/MPa								在此压力下压入流量接近 0 时转为脉冲试验/MPa	
20(*)	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1				0.2	
30	0.1	0.2	0.3	0.5	0.3	0.2	0.1		0.2	
40	0.1	0.3	0.4	0.6	0.4	0.3	0.1		0.3	
50	0.1	0.3	0.5	0.8	0.5	0.3	0.1		0.3	
60	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1	0.3
70	0.1	0.3	0.6	0.8	1.0	0.8	0.6	0.3	0.1	0.3
80	0.2	0.5	0.7	1.0	1.2	1.0	0.7	0.5	0.2	0.5
90	0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.1	0.8	0.5	0.2	0.5
≥100	0.2	0.5	0.9	1.2	1.5	1.2	0.9	0.5	0.2	0.5

注:(*)表示封塞在地面下 0~20 m 位置时都采用该行数据,即前 20 m 采用第一行,20~30 m 采用第二行,以此类推

由于设备改进后并不影响其原有功能,因此可以使用改进前和改进后的方法计算同一试段渗透系数。

3.1 传统试验方法

选取 V5 号孔内进行的 15 段压水数据进行分析计算,其中管路压力损失按式(8)计算:

$$P_s = \lambda \frac{L_p v^2}{d 2g} \quad (8)$$

其中: λ 为摩阻系数, $\lambda = 2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ MPa/m; L_p 为工作管长度,m; d 为工作管内径,m; v 为管内流速,m/s; g 为重力加速度,m/s²。

试验前后测量钻孔水位,记录稳定的压力流量值。根据试验管路条件,选取 $\lambda = 3 \times 10^{-4}$ MPa/m,运用式(1)、式(5)计算各试段渗透系数和压力,计算结果见表 2。

表 2 V5 号孔使用传统方法计算结果表

Tab. 2 Results obtained from traditional methods for hole V5

试段 编号	深度/ m	初始水位/ m	终止水位/ m	地面压力计 压力值 P_p /MPa	地面流量计流 量值 $Q/(L/min)$	管损压力/ MPa	试段压力/ MPa	渗透系数/ (m/d)
1	25~35	14.5	1.5	0.298	2.380	4.21×10^{-4}	0.443	6.60×10^{-3}
2	35~45	16.7	2.3	0.510	0.405	1.68×10^{-5}	0.677	7.34×10^{-4}
3	45~55	15.0	2.1	0.594	10.503	1.43×10^{-2}	0.730	1.77×10^{-2}
4	55~65	11.7	5.4	0.815	13.740	2.98×10^{-2}	0.902	1.87×10^{-2}
5	65~75	7.0	3.1	0.905	8.328	1.29×10^{-2}	0.962	1.06×10^{-2}
6	75~85	21.7	13.7	0.507	0.007	1.05×10^{-8}	0.724	1.19×10^{-5}
7	85~95	16.7	12.4	0.511	0.011	2.42×10^{-8}	0.678	1.99×10^{-5}
8	95~105	26.7	12.7	0.502	0.005	6.74×10^{-9}	0.769	7.98×10^{-6}
9	105~115	15.4	12.6	0.499	0.012	2.97×10^{-8}	0.653	2.25×10^{-5}
10	115~125	15.7	11.5	0.502	0.013	5.50×10^{-8}	0.659	2.42×10^{-5}
11	125~135	15.6	13.4	0.504	0.012	5.08×10^{-8}	0.660	2.23×10^{-5}
12	135~145	18.7	12.7	0.512	0.008	2.44×10^{-8}	0.699	1.40×10^{-5}
13	145~155	16.7	14.7	0.502	0.006	1.47×10^{-8}	0.669	1.10×10^{-5}
14	155~165	16.6	14.3	0.501	0.010	4.37×10^{-8}	0.667	1.84×10^{-5}
15	165~175	16.9	11.5	1.497	0.109	5.52×10^{-6}	1.666	8.03×10^{-5}

3.2 改进后的试验方法

严格按照要求进行试验,准确记录各试段各压力阶段的开始、结束时间,精确到秒。试验完成后数据分类汇总。各试段首先进行压水试验,在达到相应条件时额外进行脉冲试验。使用改进后的试验方法对 V5 号孔进行数据分析。

3.2.1 高精度压水试验

试段 1~5 及 15 压入流量较大,分别按式(1)和式(6)计算试段压力和试段渗透系数,计算结果见表 3。

表 3 V5 号孔使用改进方法计算结果表
Tab. 3 Results obtained from the improved method for hole V5

试段编号	试段位置/m	试验时试段内 压力 P_1 /MPa	试验前试段内 压力 P_2 /MPa	试段压力 P / MPa	流量 Q /(L/min)	渗透系数/ (m/d)
1	25~35	0.573	0.265	0.308	2.380	9.48×10^{-3}
2	35~45	0.879	0.333	0.546	0.405	9.10×10^{-4}
3	45~55	1.155	0.480	0.675	10.503	1.91×10^{-2}
4	55~65	1.350	0.580	0.770	13.740	2.19×10^{-2}
5	65~75	1.580	0.680	0.900	8.328	1.14×10^{-2}
15	165~175	3.221	1.660	1.561	0.109	8.57×10^{-5}

由表 3 中数据可知,改进后的试段压力计算无须考虑管损压力、水位变化、试段岩体吸水等因素,这些改进在排除干扰的同时也提高了试验精度。

3.2.2 脉冲试验

V5 号孔第 6~14 段在一定压力下压入流量接近 0 时,需额外进行脉冲试验,试段压力加至 1.5 MPa 后关闭水阀,按照表 4 的时间间隔记录压力(水头)衰减。

将试验所得 H/H_0 随时间衰减的实测点,画在与脉冲试验标准曲线同比例的对数坐标纸上。水平移动实测曲线(图 4 点划线),在标准曲线上找到与实测曲线最相近的一条,固定实测曲线与该条标准曲线最接近的位置,此时标准曲线上 $\beta=1$ 的直线(图 4 虚线)在实测曲线上对应的时间值即为 t_m ,表 4 记录的 V5 号孔第 6 段脉冲试验实测曲线与标准曲线见图 4。

表 4 V5 号孔第 6 段脉冲试验记录表
Tab. 4 The sixth pulse test record table of V5 hole

试验时间/s	试验水头 H /m	H/H_0	试验时间/s	试验水头 H /m	H/H_0	试验时间/s	试验水头 H /m	H/H_0
0	150.24	1.000	390	86.83	0.578	1 320	46.39	0.309
15	150.53	1.002	420	84.91	0.565	1 440	44.13	0.294
30	145.52	0.969	480	80.10	0.533	1 560	42.34	0.282
45	141.91	0.945	540	75.90	0.505	1 680	40.78	0.271
60	139.20	0.927	600	72.04	0.480	1 800	39.36	0.262
90	131.76	0.877	660	68.36	0.455	1 920	38.05	0.253
120	124.47	0.828	720	65.04	0.433	2 040	36.55	0.243
150	117.33	0.781	780	62.33	0.415	2 160	35.32	0.235
180	113.20	0.753	840	59.86	0.398	2 280	34.31	0.228
210	108.40	0.722	900	57.65	0.384	2 400	33.36	0.222
240	104.25	0.694	960	55.57	0.370	2 700	31.35	0.209
270	100.11	0.666	1 020	53.59	0.357	3 000	29.87	0.199
300	96.75	0.644	1 080	51.79	0.345	3 300	29.54	0.197
330	93.12	0.620	1 140	50.23	0.334	3 600	28.13	0.187
360	90.56	0.603	1 200	48.80	0.325			

由图 4 可知,该试段 t_m 约 420 s。计算导水系数的其他参数中水的压缩系数 $C_w = 4.6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$, 水的密度 $\rho_w = 1\,000 \text{ kg}/\text{m}^3$, $g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$, 水的体积 $V_w = 0.071 \text{ m}^3$ (包含内径 19 mm 的加压管 76.7 m 和直径 95 mm 试段 10 m 中水的体积), 将以上参数代入式(2)、式(3)中计算该试段的导水率及渗透系数。用同样的方法计算 V5 号孔第 7~14 段脉冲试验数据, 计算结果见表 5。

脉冲试验结果表明,在压入流量接近 0 的不同试段,渗透系数可能相差数 10 倍,脉冲试验结果在低渗透性的试段具有重要参考价值。

3.3 对比分析

将 V5 号孔 15 段改进前与改进后的试验数据进行对比,对比结果见表 6。

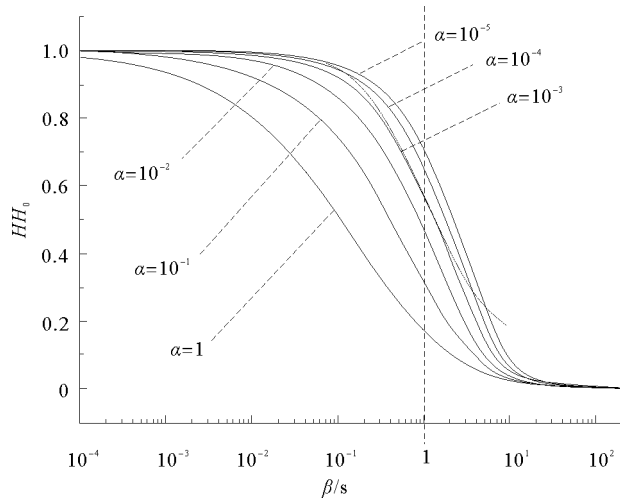


图 4 实测曲线与标准曲线

Fig. 4 Measured curve and standard curve

表 5 脉冲试验结果

Tab. 5 Results of pulse test

试段编号	试段位置/m	H_0/m	V_w/m^3	t_m/s	$T/(\text{m}^2/\text{s})$	$K/(\text{m}/\text{s})$	$K/(\text{m}/\text{d})$	$K/(\text{cm}/\text{s})$
6	75~85	150.2	0.071	420	2.43×10^{-10}	2.43×10^{-11}	2.10×10^{-6}	2.43×10^{-9}
7	85~95	150.1	0.095	620	2.21×10^{-10}	2.21×10^{-11}	1.91×10^{-6}	2.21×10^{-9}
8	95~105	151.1	0.098	1 000	1.41×10^{-10}	1.41×10^{-11}	1.22×10^{-6}	1.41×10^{-9}
9	105~115	150.4	0.101	840	1.73×10^{-10}	1.73×10^{-11}	1.49×10^{-6}	1.73×10^{-9}
10	115~125	149.7	0.104	560	2.66×10^{-10}	2.66×10^{-11}	2.30×10^{-6}	2.66×10^{-9}
11	125~135	152.5	0.107	500	3.07×10^{-10}	3.07×10^{-11}	2.65×10^{-6}	3.07×10^{-9}
12	135~145	153.4	0.110	1 200	1.31×10^{-10}	1.31×10^{-11}	1.13×10^{-6}	1.31×10^{-9}
13	145~155	150.3	0.112	1 500	1.08×10^{-10}	1.08×10^{-11}	9.30×10^{-7}	1.08×10^{-9}
14	155~165	152.3	0.115	1 000	1.65×10^{-10}	1.65×10^{-11}	1.43×10^{-6}	1.65×10^{-9}

注:岩土体渗透系数 K 最常用的单位是 cm/s 和 m/d ,根据式(2)、(3)量纲计算可知,经计算最初得到的渗透系数 K 单位为 m/s (过程单位),实际应用中应将该单位转换为常用的 cm/s (常用单位)和 m/d (常用单位)

由表 6 可知,在进行压水试验的试段(试段 1~5、15),使用改进前后的试段压力计算的渗透系数最大只相差 20%,精度提高程度不大;而在渗透性差(压入流量很小)需要额外进行脉冲试验的试段(试段 6~14),改进前受流量计最小分度值的影响,只能确定该段渗透系数小于 $10^{-5} \text{ m}/\text{d}$,改进后在这些试段额外进行脉冲试验,测得的渗透系数在某些试段远小于 $1.0 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{d}$,如试段 13 相差约 845 倍,大致相差了 3 个数量级。以上数据表明,传统压水试验方法在数据获取和计算方法上存在不足,改进后试验精度提高程度较大。

改进前后 V5 号孔各试段渗透系数对比见图 5。

表 6 改进前后试验成果对比
Tab. 6 Comparison of experimental results before and after improvement

试段编号	深度/m	改进前试段压力/MPa	改进后试段压力/MPa	压力差/MPa	改进前试段渗透系数/(m/d)	改进后试段渗透系数/(m/d)	渗透系数差值/(m/d)
1	25~35	0.443	0.308	0.135	6.60×10^{-3}	9.48×10^{-3}	2.88×10^{-3}
2	35~45	0.677	0.546	0.131	7.34×10^{-4}	9.10×10^{-4}	1.76×10^{-4}
3	45~55	0.730	0.675	0.055	1.77×10^{-2}	1.91×10^{-2}	1.43×10^{-3}
4	55~65	0.902	0.770	0.132	1.87×10^{-2}	2.19×10^{-2}	3.21×10^{-3}
5	65~75	0.962	0.900	0.062	1.06×10^{-2}	1.14×10^{-2}	7.33×10^{-4}
6	75~85	0.724	0.674	0.050	1.19×10^{-5}	2.73×10^{-6}	-9.13×10^{-6}
7	85~95	0.678	0.674	0.004	1.99×10^{-5}	1.91×10^{-6}	-1.80×10^{-5}
8	95~105	0.769	0.729	0.040	0.80×10^{-5}	1.22×10^{-6}	-6.76×10^{-6}
9	105~115	0.653	0.611	0.042	2.25×10^{-5}	1.49×10^{-6}	-2.11×10^{-5}
10	115~125	0.659	0.609	0.050	2.42×10^{-5}	2.30×10^{-6}	-2.19×10^{-5}
11	125~135	0.660	0.592	0.068	2.23×10^{-5}	2.65×10^{-6}	-1.97×10^{-5}
12	135~145	0.699	0.638	0.061	1.40×10^{-5}	1.13×10^{-6}	-1.29×10^{-5}
13	145~155	0.669	0.597	0.072	1.10×10^{-5}	9.30×10^{-7}	-1.01×10^{-5}
14	155~165	0.667	0.606	0.061	1.84×10^{-5}	1.43×10^{-6}	-1.70×10^{-5}
15	165~175	1.666	1.561	0.105	8.03×10^{-5}	8.57×10^{-5}	5.40×10^{-6}

对比分析结果表明:改进后使用压力探头直接测取传递到试段内的压力准确;当岩体的渗透系数小于 10^{-5} m/d 时,常规的压水试验方法不再适用,而应采用脉冲试验。脉冲试验不仅能得到更低更精确的试段渗透系数,而且容易由压水试验转换。脉冲试验的这些特点很好地补充了压水试验在测试低渗透性试段方面的不足。

4 结论

1) 由于施加在试段上的压力不能无限大,压水试验中流量计的最小精确读数决定了压水试验的测量下限,对于渗透性很差的试段无法准确测得其渗透系数。而改进后的试验方法允许对渗透性很差的试段额外进行脉冲试验,能够得到精确的渗透系数(小于 1.0×10^{-5} m/d),较好地解决了这个问题。

2) 改进后在不影响试验原有功能的前提下使试验数据更丰富准确,提高了试验效率,扩展了试验设备的功能性,并在实际应用中收到一定效果,对相关类型的试验具有参考价值。

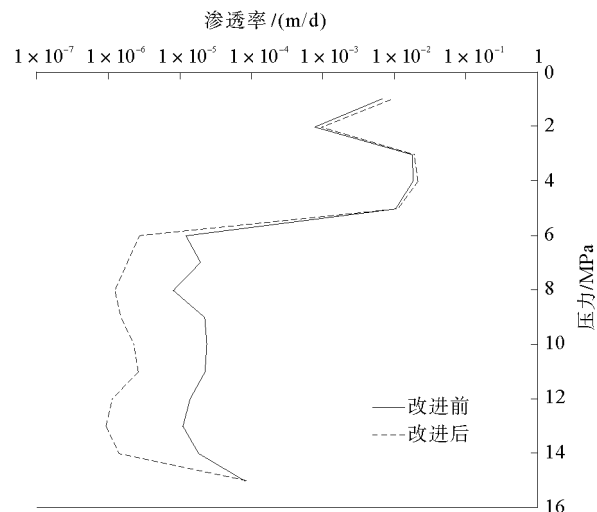


图 5 改进前后各试段渗透系数对比
Fig. 5 Comparison of the permeability coefficients before and after improvement

参考文献:

- [1]张必昌,胡成,陈刚,等.利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法[J].水文地质工程地质,2019,46(3):62-69.
ZHANG Bichang, HU Cheng, CHEN Gang, et al. Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 62-69.
- [2]黄震,姜振泉,孙晓倩,等.深部岩体在高压水头作用下的渗透性状况试验[J].采矿与安全工程学报,2015,32(4):651-657.
HUANG Zhen, JIANG Zhenquan, SUN Xiaoqian, et al. Experimental examination of permeability of deep rock mass under high water pressure[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(4): 651-657.
- [3]YIHDEGO Y. Hydraulic in situ testing for mining and engineering design: Packer test procedure, preparation, analysis and interpretation[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(1): 29-44.
- [4]BECKER K, FISHER A T. Borehole packer tests at multiple depths resolve distinct hydrologic intervals in 3.5-Ma upper oceanic crust on the eastern flank of Juan de Fuca Ridge[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113(B7): B07105.
- [5]ANDERSON R N, ZOBACK M D. Permeability, underpressures, and convection in the oceanic crust near the Costa Rica Rift, eastern Equatorial[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1982, 87(B4): 2860.
- [6]王琳琳,魏久传,尹会永,等.新安煤矿 16 煤导水裂隙带高度研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2014,33(1):40-45.
WANG Linlin, WEI Jiuchuan, YIN Huiyong, et al. The height of water flowing fractured zone of 16 coal seam in Xin'an coal mine[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 33(1): 40-45.
- [7]梁德贤,姜振泉,曹丁涛.高压压水试验渗透系数的求取[J].采矿与安全工程学报,2016,33(2):324-328.
LIANG Dexian, JIANG Zhenquan, CAO Dingtao. Calculation of hydraulic conductivity in high water-pressure test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, 33(2): 324-328.
- [8]宋矿银.地下水封洞库工程水文地质试验方法研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2014.
- [9]范波,罗平平.钻孔压水试验理论研究现状及展望[J].煤炭工程,2010,42(1):91-94.
FAN Bo, LUO Pingping. Present status and outlook of theoretical study on borehole water pressurized test[J]. Coal Engineering, 2010, 42(1): 91-94.
- [10]王伟,李小春,李强,等.小尺度原位瞬态压力脉冲渗透性测试系统及试验研究[J].岩土力学,2011,32(10):3185-3195.
WANG Wei, LI Xiaochun, LI Qiang, et al. Small size in-situ transient pulse permeability measurement system and its experimental research[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3185-3195.
- [11]中华人民共和国水利行业标准.SL31—2003,水利水电工程钻孔压水试验规程[S].
- [12]陈群策,祁英男,毛吉震,等.利用压力脉冲试验测定某地花岗岩体的渗透系数[J].岩土力学,2005,26(9):1469-1472.
CHEN Qunce, QI Yingnan, MAO Jizhen, et al. Permeability test of granite mass by using pressure pulse test method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1469-1472.
- [13]SELVADURAI A P S, ICHIKAWA Y. Some aspects of air-entrainment on decay rates in hydraulic pulse tests[J]. Engineering Geology, 2013, 165.
- [14]李方全.三峡坝区水库诱发地震研究:茅坪钻孔的现场测试与分析[M].北京:地震出版社,1993:50-61.

(责任编辑:高丽华)