

钻孔压水试验在宁夏地区新近系泥岩中的应用

袁飞

宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司

摘要:分析新近系泥岩的工程特点,按照现行规范在实践中存在的问题,结合工程运行情况提出了压水试验在该类地层中应用的注意要点及透水率计算过程中压力和进水量的选择。

关键词:压水试验;高压压水试验;透水率;自由膨胀率;管路损失

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.17.025

一、前言

新近系泥岩在宁夏地区分布范围高达60%~70%,宁夏地区在新近系地层上修建的蓄水工程约占80%~90%。压水试验是测定岩体透水率的主要方法之一。规范对大坝的防渗要求越来越严格,例如:《碾压式土石坝设计规范》SL274-2020灌浆帷幕的设计标准中1级、2级坝及高坝,岩基透水率为3~5Lu,2级中坝、低坝和3级以下中坝,基岩透水率不大于5~10Lu;《混凝土重力坝设计规范》SL319-2018灌浆帷幕的设计标准中坝高在100m以下,岩基透水率为1~3Lu,坝高在50~100m之间,岩基透水率为3~5Lu,坝高在50m以下,岩基透水率不大于5Lu。因此对岩体压水试验的精度要求越来越高。由于泥岩工程地质的特殊性,经过多年的工作经验,总结出了适用于新近系泥岩的压水试验的经验,该经验适用于钻孔常规压水试验,对于钻孔高压压水试验应按照高压压水试验的要求进行。

二、新近系泥岩工程地质特性

泥岩天然密度平均值 $2.0\sim 2.15\text{g}/\text{cm}^3$,干密度平均值 $1.79\sim 1.87\text{g}/\text{cm}^3$ 。泥岩主要由黏土矿物伊利石、高岭石、蒙脱石组成,含少量石膏,局部石膏成层分布,厚度较大。亲水性强,遇水易软化,失水易崩解,平均崩解时间26~27h。天然状态下单轴抗压强度为 $0.36\sim 0.6\text{MPa}$,饱和后为 $0.16\sim 0.21\text{MPa}$,属于极软岩。自由膨胀率45~60%,多具有弱膨胀性潜势。

泥岩风化主要受气候干湿交替影响,南方气候变化不大,强~弱风化层厚度 $0.3\sim 0.8\text{m}$,西北地区气候变化较大,强~弱风化层厚度 $1.0\sim 2.0\text{m}$,含水较低时呈现出块状,含水较高时易软化。地形变化不大时泥岩中裂隙宽度 $0.025\sim 0.2\text{mm}$,隐微裂隙发育,边坡处受卸荷影响,裂隙宽度较大。宽裂隙时透水率较大均需要挖除或灌浆处理,裂隙宽度较小时透水率多 $0.1\sim 20\text{Lu}$ 。根据工程等别的不同,按照规范中相应的灌浆帷幕的设计标准,处理的深度不同,因此压水试验数据的准确性直接影响着蓄水建筑物的安全与工程投资的大小。

三、压水试验设备

(一)止水栓塞

①栓塞可选用橡胶塞,风化层及胶结较差的段落宜选用液压和气压共用栓塞。但液压和气压栓塞进水孔不

宜太小,不应小于钻杆内径。进水孔太小时,水流速度太大,接头处流速损失太大,直接影响试验结果的真实性和准确性。

②栓塞长度应不小于8倍钻孔孔径。风化层或弱胶结层不宜封水时,栓塞宜与钻孔直径一致或略小。

③新近系泥岩中进行压水试验时建议采用单栓塞分段进行,自上而下分段成孔,成孔后立即进行试验,不可放置时间过长。放置时间过长导致孔壁及裂隙内泥岩软化膨胀,造成栓塞止水困难,且裂隙宽度减小,进水量减小,数据准确性较差。

(二)供水设备

①水泵额定工作压力宜大于试验最大压力的1.5倍,流量应大于 $100\text{L}/\text{min}$ 。水泵应选用双缸或三缸泵,也可采用多台水泵并联供水。进水管路宜设置稳压罐,保障出水压力稳定,流量均匀,工作安全可靠。

②压水试验进水管道应直接利用钻杆,钻杆经过多年使用内壁光滑,管路较长时,钻杆宜采用 50mm ,管路较短时易适当减小。过压力表和水表的连接管道内径不宜太小,管道内壁摩擦系数不宜太大。

四、数据采集及分析

(一)压力表的安装方式

应采用进水管上安设压力表的方式(如图4.1)。不建议采用回水管上安设压力表的方式,回水管安装压力表的方式多采用橡胶管从试验段上部接到地表,管路长且橡胶管内部摩擦系数较大。管路损失与流速的平方成正比,流速较大管路较长时管路损失急剧加大,最终达到一个定值,因而无法准确确定管路损失,试验结果误差较大。

(二)管路损失的确定

有条件时建议根据《水利水电工程钻孔压水试验规程》SL31-2003附录A的要求测定。当管道内部光滑、摩擦系数较小时可参照以下公式(式4.1)进行估算,但管道内径较小,内部粗糙、摩擦系数较大时不可采用该公式计算。

$$p_s = \lambda \frac{L_p}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{式4.1})$$

λ —摩擦系数,MPa/m; L_p —工作管长度, m; d —工作管内径, m; v —管内流速, m/s; g —重力加速度, $9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。

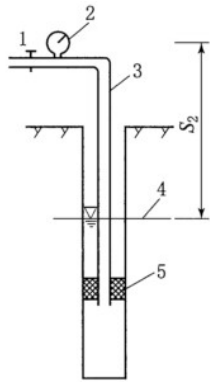
(三)压力阶段与压力值的选择

①压力阶段宜选用5级压力, $P_1-P_2-P_3-P_2-P_1$,对于高坝宜选用多级压力循环试验,可以更详细了解不同压力和流量下的渗流状态和裂隙状态。当存在水力劈裂情况时一般仅进行升压阶段试验。

②对于上部泥岩的最大试验压力值 (P_3) 应根据泥岩的胶结情况、上部盖重、工程运行后的静水压力、地下水的水柱压力等因素综合考虑, 建议不宜过大, 避免发生抬动 (试验段上部盖重较小时, 应进行抬动监测), 使得数据失真, 也不能小于工程运行后的最大静水压力值, 避免工程运行后在静水压力作用下产生水力劈裂。对于下部弱风化及微风化泥岩的最大试验压力 (P_3) 应适当降低, 高压压水试验按照相关规程规范执行。试验压力应按照下式计算 (式4.2)

$$P = P_p + P_z - P_s \quad (\text{式4.2})$$

P_p —孔口部位压力表、压力传感器显示压力, MPa;
 P_z —地面安装压力表、压力传感器安设水平面至压力计算零线的水柱压力 (压力计算零线的确定按照相关规范规程执行), MPa; P_s —管路压力损失, MPa。



1—进水阀门; 2—压力表;
 3—进水管; 4—地下水位;
 5—橡胶塞

图 4.1 进水管安装压力表

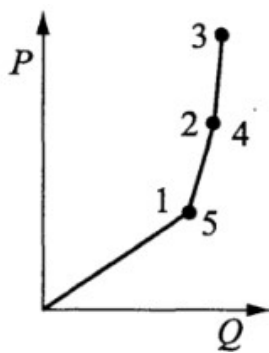


图 4.2 B (紊流) 型

(四) 计算压力的选择

透水率的选择按照下式计算 (式4.3), 针对裂隙宽度、胶结程度的不同, 选择合适压力下的流量值, 选取原则如下:

(1) 胶结较差和风化层泥岩中透水率计算的压力选取

对于上部胶结较差和风化层泥岩中的裂隙宽度较大且工程运行后在静水压力下存在水力劈裂的可能, 工程

实践发现该层P-Q曲线多为C (扩张) 型、D (冲蚀) 型和A (层流) 型, 建议Q采用最大压力 P_3 下的流量进行透水率的计算, 对工程偏于安全, 较为符合工程运行状况。

(2) 下部微风化及以下泥岩中透水率计算的压力选取

对于下部微风化及裂隙宽度0.025~0.2mm, 隐微裂隙发育的岩体, 各透水率计算的压力段及进水量选取按照以下条件进行。

①小压力 ($P_1=0.1\text{MPa}$ 、 $P_2=0.2\text{MPa}$ 、 $P_3=0.3\text{MPa}$ 以下简称小压力) 下的压力及进水量的选取

根据表4.1统计和图4.3可知, 小压力时的P-Q曲线中: 86%呈近似A (层流) 型, 12.5%呈近似B (紊流) 型。P-Q曲线多呈顺时针环状, B (紊流) 型中 P_3 压力下的透水率降低幅度较小, 因此可以采用 $P_3=0.3\text{MPa}$ 下的进水量进行透水率的计算。

②大压力 ($P_1=0.2\text{MPa}$ 、 $P_2=0.4\text{MPa}$ 、 $P_3=0.6\text{MPa}$ 以下简称大压力) 下的压力及进水量的选取

大压力时的P-Q曲线中: 46.7%呈近似B (紊流) 型, 26.7%呈近似A (层流) 型, 10.0%呈E (充填) 型。P-Q曲线多呈顺时针环状。在 P_3 压力下的进水量和透水率急剧下降 (如图4.3大压力P-Q曲线), 有时呈现负增长。根据小压力和大压力的压水试验P-Q曲线可以看出在压力0.3~0.4MPa开始凸向Q轴。

P-Q曲线呈现近似B (紊流) 型和E (充填) 型的占比为56.7%。其主要原因是水流在流动时流速水头的损失与流速的平方成正比, 由于泥岩中的亲水性矿物含量较高, 裂隙宽度太小, 水流在裂隙中流动时随着压力的增加, 流速增大, 裂隙内水流的水头损失急剧增大, 最终形成一定值 (定值的大小与裂隙宽度正相关), 因此P-Q曲线多为近似B (紊流) 型和E (充填) 型, 随着压力P的增大Q的增加量较小。一般中小型碾压土石坝的坝基宽度多为200~300m, 工程运行后上游地表水向下游经过长距离的渗流过程中, 裂隙中的水压力已趋于定值且不会太大, 因此建议采用试验压力 P_1 (注: P_1 不大于0.3MPa) 下的流量进行透水率的计算, P_1 下的透水率能够真实的反应岩体的透水情况, 对于工程也是偏于安全。

P-Q曲线呈现近似A (层流) 型的占比为26.7%, P-Q曲线多呈顺时针环状。 P_1 和 P_3 压力下的透水率相差不大。但大多数在降压阶段压力为 P_1 时的进水量稍大于升压时压力为 P_1 时的进水量。在水库长时间运行情况下, 裂隙存在冲蚀的情况, 因此建议采用降压阶段压力为 P_1 时的进水量进行透水率的计算较为符合工程运行后的真实情况。

$$q = \frac{Q}{lP} \quad (\text{式4.3})$$

q—试段的透水率吕荣值, Lu; l—试段长度, Lu;
 Q—某级压力下稳定阶段的流量, L/min; P—某级压力下稳定阶段的试段压力, MPa。

表 4.1 宁夏各地区工程钻孔压水试验曲线类型统计表
(试验压力 $P_1=0.1\text{MPa}$, $P_2=0.2\text{MPa}$, $P_3=0.3\text{MPa}$)

工程名称	工程所在地	统计试验次数	压水试验曲线类型段次及所占百分数				
			A (层流) 型	B (紊流) 型	C (扩张) 型	D (冲蚀) 型	E (充填) 型
赵家沟蓄水池	吴忠市	25	22 (88%)	3 (12%)	/	/	/
巴庄子蓄水池	红寺堡	55	44 (80%)	9 (16.4%)	/	1 (1.8%)	1 (1.8%)
石山子水库	盐池县	37	32 (86.5%)	5 (13.5%)	/	/	/
何家沟水库	固原市	19	19 (100%)	/	/	/	/
合计		136	117 (86%)	17 (12.5%)	/	1 (0.7%)	1 (0.7%)

表 4.2 宁夏各地区工程钻孔压水试验曲线类型统计表
(试验压力 $P_1=0.2\text{MPa}$, $P_2=0.4\text{MPa}$, $P_3=0.6\text{MPa}$)

统计试验次数	压水试验曲线类型段次及所占百分数				
	A (层流) 型	B (紊流) 型	C (扩张) 型	D (冲蚀) 型	E (充填) 型
30	8 (26.7%)	14 (46.7%)	4 (13.3%)	1 (3.3%)	3 (10.0%)

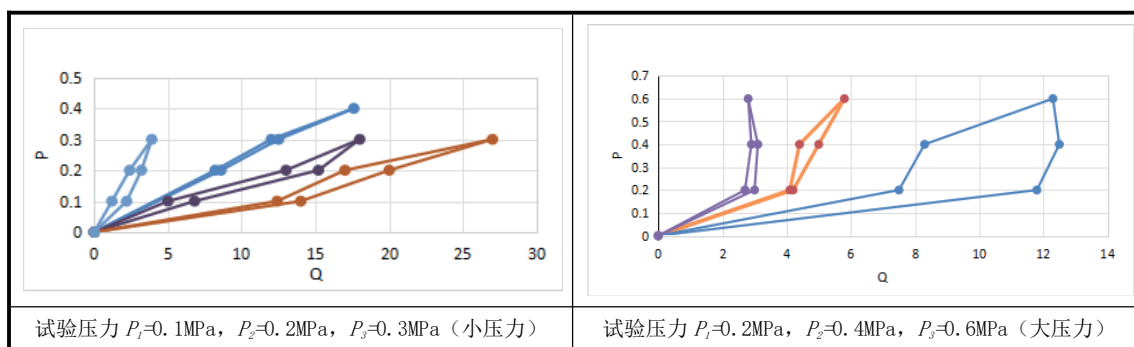


图 4.3 钻孔压水试验典型 P-Q 曲线

五、结语

(1) 在新近系泥岩中进行压水试验时可选用橡胶塞, 风化层及胶结较差的段落宜选用液压和气压共用栓塞。但液压和气压栓塞进水孔不宜太小。应采用单栓塞自上而下分段进行, 成孔后立即进行试验, 不可放置时间过长。

(2) 管道应选择内部光滑、管径较大、摩阻系数较小的管道, 在有条件的情况下建议实测管路损失或可参照式 4.1 进行估算。但管道内径较小, 内部粗糙、摩阻系数较大时不可使用, 不可采用式 4.1 进行管路损失的估算。

(3) 对于上部胶结较差和风化层泥岩中的裂隙宽度较大且工程运行后在静水压力下存在水力劈裂的可能, 建议 Q 采用最大压力 P_3 下的流量进行透水率的计算。

(4) 对于下部微风化及裂隙宽度较小的岩体。当工程运行时的水头较低时建议采用小压力进行压水试验, P-Q 曲线多呈近似 A (层流) 型, 可以采用 $P_3=0.3\text{MPa}$ 下的进水量进行透水率的计算。当工程运行时的水头较高时, 当采用大压力进行压水试验时, P-Q 曲线呈现

近似 B (紊流) 型和 E (充填) 型, 建议采用试验压力 P_1 (注: P_1 不大于 0.3MPa) 下的流量进行透水率的计算。P-Q 曲线呈现近似 A (层流) 型时, 建议采用降压阶段压力为 P_1 时的进水量进行透水率的计算。

(5) 高压压水试验应按照相关规范规程的要求进行。其他参数的选择参考《水利水电工程钻孔压水试验规程》SL31 的要求进行。

(6) 新近系泥岩成岩作用弱, 属于极软岩, 俗称“软岩硬土”, 岩体透水率的选择应从土和岩的角度综合考虑。

参考文献

[1] 彭佩. 基于压水试验的岸坡岩体渗透性分区初探 [J]. 山西水利, 2023, (10): 27-31.
 [2] 王光明. 绳索取芯钻孔不起大钻压水试验技术 [J]. 云南水力发电, 2023, 39 (12): 310-314.
 [3] 刘明明, 李博勇, 熊泽斌, 等. 基于钻孔压水试验的渗透系数取值方法研究 [J]. 中国农村水利水电, 2021, (05): 183-187.