

ICS 27.140

P 59

备案号: J492—2006

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

DL/T 5331 — 2005

**水电水利工程钻孔
压水试验规程**

**Code of water pressure test in borehole for
hydropower and water resources engineering**

2005-11-28 发布

2006-06-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	2
3 术语和符号	3
3.1 术语	3
3.2 符号	4
4 基本规定	5
4.1 试验方法和试段长度	5
4.2 压力阶段和压力值	5
4.3 试验钻孔	7
4.4 试验用水和试验人员	7
5 试验设备	8
5.1 止水栓塞	8
5.2 供水设备	8
5.3 量测设备	8
6 现场试验	10
6.1 一般规定	10
6.2 试验准备	10
6.3 洗孔	10
6.4 试段隔离	10
6.5 水位观测	11
6.6 试验性压水	11
6.7 压力和流量观测	11
7 试验资料整理	13

DL / T 5331 — 2005

附录 A (资料性附录)	钻孔高压压水试验	16
附录 B (规范性附录)	管路压力损失测定	21
附录 C (资料性附录)	混凝土塞位灌制法	23
附录 D (规范性附录)	用压水试验成果计算岩体 渗透系数	24
附录 E (资料性附录)	钻孔压水试验记录格式	25
条文说明		29

前 言

本标准是根据国家发展和改革委员会《关于印发 2005 年行业标准项目计划的通知》（发改办工业〔2005〕739 号文）的安排，结合多年来水电水利工程实践中积累的压水试验经验和技術成果，在《水利水电工程钻孔压水试验规程》（SL 25—1992）的基础上制定的。

钻孔压水试验的主要任务是测定岩体的透水性，为评价岩体的渗透特性和防渗设计提供基本资料。

本标准与 SL 25—1992 比较有以下一些变化：

- 规定了钻孔压水试验的目的、适用范围；
- 规定了钻孔压水试验方法和试段长度、压力值和压力阶段、试验设备和现场试验操作程序；
- 规定了钻孔压水试验资料整理方法；
- 增加了规范性引用文件；
- 增加了术语和符号；
- 在“基本规定”中，增加了“试验用水和试验人员”内容；
- 在“止水栓塞”中，将栓塞长度“不小于 7 倍钻孔孔径”修改为“不小于 8 倍钻孔孔径”；
- 在“量测设备”中，增加了“压力传感器”内容；
- 在“现场试验”中，增加了“试验准备”和“试验性压水”内容；
- 增加了“钻孔高压压水试验”要求。

本标准的附录 A、附录 C、附录 E 为资料性附录，附录 B、附录 D 为规范性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

DL / T 5331 — 2005

本标准由电力行业水电规划设计标准化技术委员会归口并负责解释。

本标准起草单位：中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、浙江华东建设工程有限公司。

本标准主要起草人：周光辉、张明林、陆飞、刘世明、李孙权。

1 范 围

本标准规定了水电水利工程地质勘察中的钻孔压水试验的工作内容、试验方法和技术要求。

本标准适用于水电水利工程地质勘察中的常规钻孔压水试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准。然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

DL/T 5013 水电水利工程钻探规程

3 术语和符号

3.1 术 语

3.1.1

钻孔压水试验 **water pressure test in borehole**

用栓塞将钻孔隔离出一定长度的孔段，并向该孔段压水，根据一定时间内压入水量和施加压力大小的关系来确定岩体透水性的一种原位渗透试验。

3.1.2

试段长度 **length of test section**

压水试验时水可以进入岩体的孔段长度。单栓塞隔离时为栓塞底部至孔底的长度，双栓塞隔离时为两栓塞之间的长度。

3.1.3

试验压力 **testing pressure**

作用在试段内的实际平均压力。

3.1.4

管路压力损失 **pressure loss of tube**

水流经工作管路因流体摩阻而损失的压力值。

3.1.5

栓塞 **packer**

将钻孔隔离出单独封闭孔段的试验设备。

3.1.6

透水率 **absorption rate**

表达试段岩体透水性的指标。透水率的计量单位为吕荣，符号为 Lu。

3.2 符 号

- l ——试段长度, m;
 P ——试验压力, MPa;
 P_p ——压力表指示压力, MPa;
 P_s ——管路压力损失, MPa;
 P_z ——压力表中心至压力计算零线的水柱压力, MPa;
 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;
 q ——透水率, Lu;
 Q ——压入流量, L/min;
 k ——岩体渗透系数, m/d;
 H ——试验水头, m;
 r_0 ——钻孔半径, m;
 λ ——摩阻系数, MPa/m。

4 基 本 规 定

4.1 试验方法和试段长度

4.1.1 钻孔压水试验一般随钻孔的加深自上而下地用单栓塞分段隔离进行。对于岩体完整、孔壁稳定的孔段，可在连续钻进一定深度（不宜超过 40m）后，用双栓塞分段进行压水试验。

4.1.2 试段长度宜为 5m。

含断层破碎带、裂隙密集带、溶蚀带等强透水带的孔段，应根据具体情况确定试段长度。同一试段不应跨越透水性相差悬殊的两种岩层。

相邻试段应互相衔接，可少量重叠，但不应漏段。

4.1.3 单栓塞试验时，残留岩芯可计入试段长度之内，但其长度不宜超过 0.2m。

4.2 压力阶段和压力值

4.2.1 压水试验宜按三级压力五个阶段进行，即按 $P_1—P_2—P_3—P_4 (=P_2)—P_5 (=P_1)$ 进行，其中 $P_1 < P_2 < P_3$ 。 P_1 、 P_2 、 P_3 三级压力宜分别为 0.3MPa、0.6MPa 和 1.0MPa。当试验压力超过 1.0MPa 时，参见附录 A 进行。

4.2.2 当试段位于基岩面以下较浅或岩体软弱时，应适当降低压水试验压力。

4.2.3 逐级升压至最大压力值后，若该试段的透水率小于 1Lu，可不再进行降压阶段的压水试验。

4.2.4 试验压力的确定方法如下：

1 当用安设在与试段连通的测压管上的压力表测压时，试验压力按式（4.2.4-1）计算：

$$P = P_p + P_z \quad (4.2.4-1)$$

式中:

P ——试验压力, MPa;

P_p ——压力表指示压力, MPa;

P_z ——压力表中心至压力计算零线的水柱压力, MPa。

2 当用安设在进水管上的压力表测压时, 试验压力按式(4.2.4-2)计算:

$$P = P_p + P_z - P_s \quad (4.2.4-2)$$

式中:

P_s ——管路压力损失, MPa;

其余符号与式(4.2.4-1)相同。

4.2.5 压力计算零线的确定方法如下:

1 当地下水位在试段以下时, 压力计算零线为通过试段中点的水平线。

2 当地下水位在试段以内时, 压力计算零线为通过地下水位以上试段中点的水平线。

3 当地下水位在试段以上时, 压力计算零线为地下水位线。

4.2.6 管路压力损失的确定方法如下:

1 当工作管内径不一致时, 管路压力损失应根据实测资料确定。实测方法见附录 B。

2 当工作管内径一致且内壁光滑度变化不大时, 管路压力损失可用式(4.2.6)计算:

$$P_s = \lambda \frac{l_p}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.2.6)$$

式中:

λ ——摩阻系数, $\lambda=2 \times 10^{-4} \text{MPa/m} \sim 4 \times 10^{-4} \text{MPa/m}$;

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, $g=9.8\text{m/s}^2$ 。

4.3 试 验 钻 孔

4.3.1 压水试验钻孔的孔径宜为 59mm~150mm。

4.3.2 压水试验钻孔宜采用金刚石钻进或硬质合金钻进, 并按 DL/T 5013 标准执行, 严禁使用泥浆等护壁材料钻进。在碳酸盐岩类地层钻进时, 应选用合适的冲洗液。

试验钻孔的套管脚止水必须可靠。

4.3.3 在同一地点(指 10m 以内)布置两个及以上钻孔时, 应先钻进拟进行压水试验的钻孔。

4.4 试验用水和试验人员

4.4.1 试验用水宜采用清水, 当水源的泥沙含量较多时, 应采取沉淀措施。

4.4.2 钻孔压水试验人员应熟练掌握试验方法和操作程序。

5 试 验 设 备

5.1 止 水 栓 塞

5.1.1 止水栓塞应符合下列要求：

- 1 止水可靠，操作方便。
- 2 栓塞长度不小于 8 倍钻孔孔径。

5.1.2 根据具体条件可选择不同类型的栓塞。气压式、水压式栓塞止水的可靠性较好，宜优先选用。

5.2 供 水 设 备

5.2.1 试验用的水泵应符合下列要求：

- 1 在 1MPa 压力下，额定流量大于 100L/min。
- 2 压力稳定，出水均匀，工作可靠。

5.2.2 吸水笼头上应设置 1~2 层孔径小于 2mm 的过滤网。吸水笼头至水池底部的距离不小于 0.3m。

5.2.3 供水调节阀门应灵活可靠，不漏水，且不宜与钻进共用。

5.3 量 测 设 备

5.3.1 量测压力用的压力传感器和压力表应符合下列要求：

- 1 压力传感器的压力范围应大于试验压力。
- 2 压力表应反应灵敏，卸压后指针回零。压力表的工作压力应保持在极限压力值的 1/3~3/4 范围内。

5.3.2 流量计应能在 1.5MPa 压力下正常工作，量测范围应与供水设备的排水量相匹配，并能测定正向和反向流量。

5.3.3 水位计应灵敏可靠，不受孔壁附着水或孔内滴水的影响。水位计的导线应经常检测。

5.3.4 宜采用能自动测量压力和流量的记录仪进行压水试验。

5.3.5 试验用的仪表应专门保管，不得与钻进共用，并定期进行校正。

6 现场试验

6.1 一般规定

- 6.1.1 现场钻孔压水试验应根据钻孔任务书要求进行。
- 6.1.2 试验工作包括试验准备、洗孔、下置栓塞隔离试段、水位观测、试验性压水、压力和流量观测等步骤。

6.2 试验准备

- 6.2.1 在试验开始前，应按钻孔任务书要求选择供水设备、止水栓塞及量测设备。
- 6.2.2 试验前应对各种试验设备、仪表的工作状态进行检查，发现问题立即处理。
- 6.2.3 按试验现场条件，合理布置并安装试验设备、试验用仪表及工作管路。试验工作管不得有破裂、弯曲、堵塞等现象。接头处应可靠密封，不得有渗漏。

6.3 洗孔

- 6.3.1 洗孔采用压水法洗孔。洗孔钻具应下到孔底，流量应达到水泵的最大排水量。
- 6.3.2 洗孔至孔口回水清洁时即可结束。
当孔口无回水时，洗孔时间不得少于 15min。

6.4 试段隔离

- 6.4.1 栓塞定位要准确，并宜安设在岩石较完整的部位。
- 6.4.2 采用气压式或水压式栓塞时，充气（水）压力应大于最大试验压力（ P_3 ）0.2MPa~0.3MPa，在试验过程中充气（水）压力

应保持不变。

6.5 水位观测

6.5.1 试验前应先观测孔内水位，试段隔离后，再观测工作管内水位。

6.5.2 水位观测每隔 5min 进行一次。当水位下降速度连续两次均小于 5cm/min 时，观测工作即可结束，用最后的观测结果确定压力计算零线。

6.5.3 水位观测过程中如发现承压水时，观测时间应延长至水位稳定。当承压水位高于孔口时，应进行承压水头观测和涌水量观测。

6.6 试验性压水

6.6.1 试验性压水压力应采用设计的最大压力值，延续时间宜为 15min。

6.6.2 在试验性压水过程中，应观测孔内水位变化情况，检查栓塞止水是否可靠、管路是否畅通、仪表工作及机械运行是否正常等。

6.6.3 当栓塞隔离无效时，应采取移动栓塞、起塞检查、更换栓塞或灌制混凝土塞位等措施加以处理。移动栓塞时只能向上移，其范围不应超过上一次试验的塞位。灌制方法参见附录 C。

6.6.4 试验性压水成功后，方可进行该试段正式压水试验。

6.7 压力和流量观测

6.7.1 打开排气阀，向试段送水，应充分排气，排气阀连续出水后，将其关闭。

6.7.2 调整调节阀，使试验压力达到预定值并保持稳定后，方可进行流量观测。

6.7.3 流量观测工作应每隔 1min 或 2min 进行一次。当流量无持

续增大趋势，且五次流量读数中最大与最小值之差小于最终值的10%，或最大与最小值之差小于1L/min时，本阶段试验即可结束，取最终值作为计算值。

6.7.4 将试验压力调整到新的预定值，重复上述试验过程，直到完成该试段的试验。

6.7.5 在降压阶段，如出现水由岩体向孔内回流的现象，应记录回流情况，待回流停止，流量达到6.7.3规定的要求后方可结束本阶段试验。

6.7.6 在试验过程中，应对受影响的井、洞、孔、泉等进行水位或流量观测。

6.7.7 在压水试验结束前，应检查原始记录，发现问题及时纠正。

7 试验资料整理

7.0.1 试验资料整理包括校核原始记录, 绘制 $P-Q$ 曲线, 确定 $P-Q$ 曲线类型和计算试段透水率等内容。

7.0.2 绘制 $P-Q$ 曲线时, 应采用统一比例尺, 即 P 轴坐标 1mm 代表 0.01MPa, Q 轴坐标 1mm 代表 1L/min。

曲线图上各点应标明序号, 并依次用直线相连, 升压阶段用实线, 降压阶段用虚线。

7.0.3 $P-Q$ 曲线分为五种类型, 即: A 型 (层流型)、B 型 (紊流型)、C 型 (扩张型)、D 型 (冲蚀型) 和 E 型 (充填型)。

根据升压阶段 $P-Q$ 曲线的形状以及降压阶段 $P-Q$ 曲线与升压阶段 $P-Q$ 曲线之间的关系, 确定试段的 $P-Q$ 曲线类型。

$P-Q$ 曲线的类型及曲线特点见表 7.0.3。

7.0.4 试段透水率采用最大压力阶段 (第三阶段) 的压力值 (P_3) 和流量值 (Q_3) 按式 (7.0.4) 计算:

$$q = \frac{Q_3}{lP_3} \quad (7.0.4)$$

式中:

q ——试段的透水率, Lu;

l ——试段长度, m;

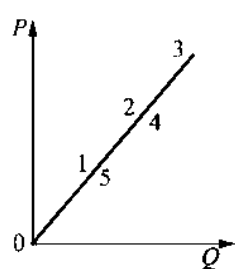
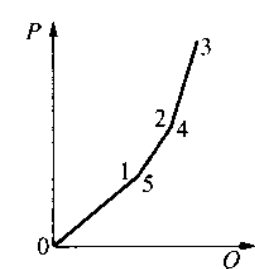
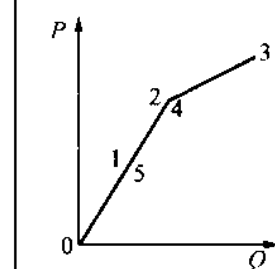
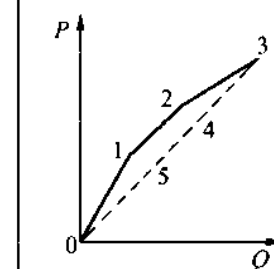
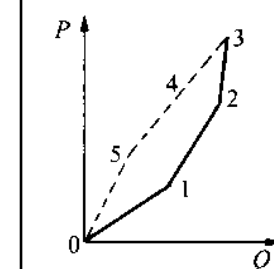
Q_3 ——第三阶段的压入流量, L/min;

P_3 ——第三阶段的试验压力, MPa。

试段透水率取两位有效数字。透水率小于 0.10Lu 时记为零。

7.0.5 每个试段的试验成果, 应采用试段透水率和 $P-Q$ 曲线的类型符号 (加括号) 表示, 如 0.23 (A)、12 (B)、8.5 (D) 等。

表 7.0.3 $P-Q$ 曲线类型及曲线特点表

类型名称	A (层流) 型	B (紊流) 型	C (扩张) 型	D (冲蚀) 型	E (填充) 型
$P-Q$ 曲线					
曲线特点	升压曲线为通过原点的直线, 降压曲线与升压曲线基本重合	升压曲线凸向 Q 轴, 降压曲线与升压曲线基本重合	升压曲线凸向 P 轴, 降压曲线与升压曲线基本重合	升压曲线凸向 P 轴, 降压曲线与升压曲线不重合, 呈顺时针环状	升压曲线凸向 Q 轴, 降压曲线与升压曲线不重合, 呈逆时针环状

7.0.6 当需要根据压水试验成果计算岩体渗透系数时，可按附录 D 的式 (D.1) 进行。

7.0.7 钻孔压水试验记录格式，参见附录 E。

附 录 A
(资料性附录)
钻孔高压压水试验

A.1 目的及适用范围

A.1.1 为了测定岩体在高水头下的渗透特性、渗透稳定性及其结构面张开压力，应进行钻孔高压压水试验。

A.1.2 钻孔高压压水试验适用于高坝、高水头电站、抽水蓄能电站以及其他各种高水头建筑物的工程地质勘察。

A.2 基 本 规 定

A.2.1 试验孔布置

钻孔高压压水试验孔可单孔布置。对于高压输水隧道，试验孔宜与观测孔（洞）成组布置，间距与相互平行的输水隧道间距相近。

A.2.2 试验方法、试段长度及试验类型

A.2.2.1 高压压水试验可用双栓塞分段进行，也可用单栓塞自上而下地分段进行。

A.2.2.2 试段长度宜为 5m，可根据岩体的完整程度适当地加长或缩短。

A.2.2.3 试验分两种，一种为确定岩体结构面张开压力的，另一种为测定岩体渗透特性和渗透稳定性的。

A.2.3 加压方式、压力值及压力稳定时间

A.2.3.1 高压压水试验压力选择应先确定最高压力，最高压力不宜小于建筑物工作水头的 1.2 倍。

A.2.3.2 高压压水试验压力可分为 5~10 级（按最大试验压力等

分)。

根据试验目的不同分循环和非循环加压。对确定结构面张开压力的可进行非循环试验,压力可分 10 级施加;对确定岩体渗透稳定性和临界压力的(临界压力的确定见 A5.5),可进行多循环试验,一般为四循环,第一循环加压段和第四循环卸压段,压力可分 10 级,第二、三、四循环的加压可分 5 级,按最大试验压力值等分,第一、二、三循环的卸压可分 1~5 级。

A.2.3.3 当试验压力骤降即发生扩容现象时,可不再加压。

A.2.3.4 试验压力的确定方法与常规压水试验相同。

A.2.3.5 压力的稳定时间因试验目的不同而异。确定结构面张开压力的,每级压力维持时间为 5min;确定岩体渗透稳定性的,压力稳定时间宜在 120min 以上,不应小于 30min。

A.2.4 试验钻孔

试验钻孔要求同常规压水试验,但其孔径应满足试验进水量和栓塞止水的要求。

A.3 试 验 设 备

A.3.1 止水栓塞

根据具体条件可选择止水可靠性较好的水压式、油压式等类型的栓塞。栓塞长度宜不小于 8 倍钻孔孔径,且需根据具体试验压力和止水方式验算确定。

A.3.2 供水设备

A.3.2.1 试验用的水泵应符合下列要求:

1 水泵最大排水量应满足最高试验压力和最长试段条件下的渗水量要求。

2 水泵额定压力应大于试验最高压力及最大排水量下的管路压力损失之和。

3 压力稳定,出水均匀,工作可靠。

A.3.2.2 若单台水泵不能满足试验供水要求时,可用多台水泵并

联供水。

A.3.2.3 需建造容积足够的蓄水池，供连续循环试验用水。

A.3.3 量测设备

A.3.3.1 压力量测设备应满足 5.3.1 的要求。

A.3.3.2 流量计应能在 1.5 倍最大试验压力下正常工作，量测范围应与供水设备的排水量相匹配，并能测定正向和反向流量。应采用两只不同量程的流量传感器。

A.3.3.3 水位计应满足 5.3.1 的要求。

A.3.4 栓塞、试验管路及接头均采用耐压材料，并应连接密封可靠。

A.4 现场试验

A.4.1 一般规定

高压压水试验基本操作程序同常规压水试验。

A.4.2 洗孔

高压压水试验洗孔要求同常规压水试验。

A.4.3 试段隔离

A.4.3.1 下塞前应对试验管路进行检查，不得有损伤和堵塞等现象。

A.4.3.2 采用油压式或水压式栓塞时，充油（水）压力应大于相应试验压力 0.5MPa，每级压力下充油（水）压力应保持不变。

A.4.3.3 栓塞定位要准确，并应安设在岩体较完整的部位。

A.4.3.4 当栓塞隔离无效时，应采取移动栓塞、起塞检查、更换栓塞等措施加以处理。栓塞只能上移，其范围不应超过上一次试验的塞位。

A.4.4 水位、压力和流量观测

A.4.4.1 高压压水试验水位、压力观测要求同常规压水试验。

A.4.4.2 高压压水试验流量观测：对于只需测定结构面张开压力的，每隔 1min 观测一次，确定渗透稳定性的每隔 5min 观测一次。

A.4.4.3 在试验过程中，应对所设的观测孔（洞）及可能受影响的井、洞、孔、泉等进行水位或流量观测。

A.4.4.4 当观测孔（洞）出现浑水时，应对出水携带的颗粒进行化学成分分析。

A.4.4.5 压水试验结束前，应认真检查原始记录，发现问题应及时纠正。

A.5 试 验 资 料 整 理

A.5.1 试验资料除按常规的压水试验方法和内容整理外，尚需按 A.5.2~A.5.10 的要求整理。

A.5.2 试验资料整理包括校核原始记录，绘制 $P-Q$ 曲线和稳压阶段透水率—时间曲线。

A.5.3 设有观测孔（洞）时，应绘制试验压力 P 与观测孔（洞）出水量 Q 关系曲线。

A.5.4 $P-Q$ 曲线分类

根据形状，可将 $P-Q$ 曲线分成两类：第一类的有一急变段，渗水量 Q 先随压力 P 增大而增大，但当 P 值接近某一值时， Q 值急增，该压力为临界压力；第二类为缓变型的，渗水量 Q 随压力 P 增大而逐渐增大。

A.5.5 根据最大曲率或近似双直线法确定临界压力。

每级压力维持 5min 的高压压水试验，临界压力即为结构面张开压力。

对多循环高压压水试验，分别确定各循环的临界压力，根据各循环的临界压力随循环数的变化，确定稳定临界压力。

A.5.6 对第二类的 $P-Q$ 曲线，压力和渗水量之间的关系可用指数函数或其他更合适的如双曲函数拟合，拟合函数参数可用最小二乘法计算确定。

A.5.7 设有观测孔（洞）的，根据其出水量与压力关系，判断是否存在临界压力。根据临界压力和渗径计算临界水力坡降。

A.5.8 计算试验段与建筑物工作水头相对应的透水率。

A.5.9 高压压水试验试段透水率一般采用最大压力阶段的压力值和流量值计算。分析透水率随压力变化关系时，需计算每个压力段的透水率。

A.5.10 当需要根据压水试验成果计算岩体渗透系数时，可按照附录 D 的式 (D.1) 进行。

附 录 B

(规范性附录)

管路压力损失测定

B.1 当使用钻杆作为单管柱栓塞的工作管,且钻杆内径与接头内径不一致时,应实测管路压力损失,编制出每米钻杆、每副接头在不同流量下的压力损失图表。

B.2 测定压力损失所用的钻杆和接头应与实际使用的规格一致。

B.3 测试管路总长度不应小于 40m,管路末端连接胶管,抬高 2m 左右放入量测水箱中。

B.4 测试管路两端安装压力表,末端安装流量计,用仪器测量两端压力表的高差。

B.5 将不同流量的水输入管路,管路两端的压力差即为该流量下的管路总压力损失。

B.6 实测流量范围 10L/min~100L/min,测点不少于 15 个,分布要均匀,同时用流量计和水箱测定流量。实测工作应进行两次,取其平均值。

B.7 测试管路为两套。测定第一套管路后,配第二套管路,第二套管路管径和钻杆总长度应与第一套相同,但接头数相差 3 副以上。

B.8 在同一坐标上绘制出两套管路的压力损失与流量关系曲线,从图上量取各流量值相应的压力损失差 ΔP_s (见图 B.1)。

B.9 各种流量下每副接头的压力损失用式(B.1)计算:

$$P_{sj} = \frac{\Delta P_s}{n} \quad (\text{B.1})$$

式中:

P_{sj} ——某流量下每副接头的压力损失, MPa;

ΔP_s ——该流量下两套管路的压力损失之差, MPa;

n ——两套管路接头数之差。

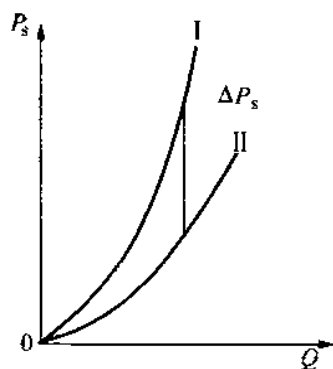


图 B.1 压力损失与流量关系曲线

B.10 从各种流量下的管路总压力损失中减去接头的压力损失, 计算出各种流量下每米钻杆的压力损失值。

B.11 编制出便于使用的各种流量下每米钻杆及每副接头的压力损失图表。

附录 C

(资料性附录)

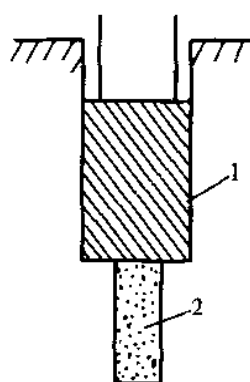
混凝土塞位灌制法

C.1 当栓塞止水困难,采取其他措施均无效果时,或当表部风化岩带较厚,又需要进行压水试验时,可采用灌制混凝土塞位法,即使孔壁形成一段与岩石结合良好的完整混凝土孔段,以保证止水的可靠性。

C.2 灌制混凝土塞位时,应将已钻开待试的孔段用中砂填实,将待试孔段以上部分的孔径扩大 20mm。

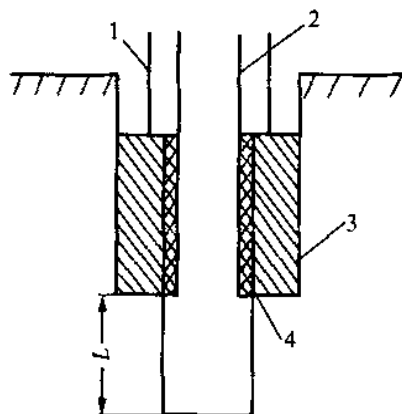
C.3 用导浆管向已扩孔的底部注入早强浓水泥浆或水泥砂浆,水泥浆的高度应大于 2m。岩石软弱、孔壁不规则时,宜即时将护壁套管插至已扩孔的孔底。

C.4 待凝足够时间后,钻开混凝土,清除试段内的填砂,将栓塞塞在套管内或已被水泥浆固结的孔段上进行压水试验,见图 C.1 和图 C.2。



1—混凝土; 2—充填砂

图 C.1 混凝土塞位示意图



1—套管; 2—工作管;

3—混凝土塞位; 4—栓塞

图 C.2 混凝土塞位灌制法
试段长度示意图

附录 D

(规范性附录)

用压水试验成果计算岩体渗透系数

D.1 当试段位于地下水位以下, 透水性较小 ($q < 10\text{Lu}$)、 $P-Q$ 曲线为 A (层流) 型时, 可按式 (D.1) 计算岩体渗透系数:

$$k = \frac{Q}{2\pi Hl} \ln \frac{l}{r_0} \quad (\text{D.1})$$

式中:

k ——岩体渗透系数, m/d ;

Q ——压入流量, m^3/d ;

H ——试验水头, m ;

l ——试段长度, m ;

r_0 ——钻孔半径, m 。

D.2 当试段位于地下水位以下, 透水性较小 ($q < 10\text{Lu}$), $P-Q$ 曲线为 B (紊流) 型时, 可用第一阶段试验压力 P_1 (换算成水头值, 以米计) 和压入流量 Q_1 代入式 (D.1) 近似地计算渗透系数。

D.3 当透水性较大时, 宜采用其他水文地质试验方法测定岩体渗透系数。

附 录 E
(资料性附录)
钻孔压水试验记录格式

钻孔压水试验记录封面式样参见图 E.1。

_____工程_____阶段	
钻孔压水试验记录	
钻孔编号	_____
钻孔位置	_____
坐 标	$\frac{X}{Y}$
孔口高程	_____
技术负责	_____
施工机组	_____
××勘测设计研究院	
年 月 日	

图 E.1 钻孔压水试验记录封面式样

钻孔压水试验试段记录表参见表 E.1。

表 E.1 钻孔压水试验试段记录表

试段编号: 自 m至 m 试段长度: m 水柱压力: m

[illegible]

试验日期 年 月 日 钻孔地质负责人: _____ 记录者: _____

钻孔压水试验计算图表式样参见图 E.2。

_____号钻孔第_____段

试段安装记录表

栓塞类型		
工作管	内径 mm	
	根数	
	总长 m	
	压力表高出地面 m	
试段	孔径 mm	
	孔深 m	
	试段长度 m	
	残留岩芯 m	
止水效果		

水位观测记录表

时间		地面至水位 m	水位差 cm
时	分		

计 算

曲线类型	
选用压力 P MPa	
压入流量 Q L/min	
试段长度 m	
计算公式	$q = \frac{Q}{Pl}$
吕荣值 Lu	

渗透系数
 $k =$

计算者: _____
 校核者: _____

图 E.2 钻孔压水试验计算图表式样

水电水利工程钻孔压水 试 验 规 程

条 文 说 明

目 录

1 范围	31
4 基本规定	32
4.1 试验方法和试段长度	32
4.2 压力阶段和压力值	33
4.3 试验钻孔	35
4.4 试验用水和试验人员	36
5 试验设备	37
5.1 止水栓塞	37
5.2 供水设备	38
5.3 量测设备	38
6 现场试验	40
6.1 一般规定	40
6.2 试验准备	40
6.3 洗孔	40
6.4 试段隔离	40
6.5 水位观测	41
6.6 试验性压水	41
6.7 压力和流量观测	42
7 试验资料整理	44

1 范 围

本标准规定了水电水利工程地质勘察中钻孔压水试验的工作内容、试验方法和技术要求，其目的是测定岩体的透水性，并作为防渗设计的基本依据。

本标准的适用范围是水电水利工程地质勘察工作中的常规钻孔压水试验。针对工程的不同目的和需要进行的其他专门性压水试验方法，如测定某一组裂隙渗透性的压水试验、交叉孔压水试验、多栓塞压水试验等，不在本标准规定之内。帷幕灌浆施工中的压水试验工作应按照相应规范的规定进行。

近年来在高坝、高水头电站以及抽水蓄能电站的工程地质勘察中，为了测定岩体在高水头下的渗透特性，一些勘测设计单位进行了高压压水试验尝试，并取得了一定的经验。由于高压压水试验尚处于经验积累阶段，在试验设备的选用、最高压力的选定以及试验成果的分析等方面有待进一步探索，本标准编制时将其作为资料性附录供参考。

4 基 本 规 定

4.1 试验方法和试段长度

4.1.1 常用的压水试验方法是用单栓塞隔离试段，随着钻孔的加深自上而下分段进行。本标准推荐此方法作为基本的压水试验方法，同时还规定，可以使用双栓塞进行压水试验。

当采用双栓塞进行压水试验时，为了确保双栓塞压水试验的资料质量，在本标准中规定了采用双栓塞试验方法的一些条件，如岩体完整、孔壁稳定的孔段，连续钻进深度不宜超过 40m 等，其目的是为了尽量减少岩粉堵塞裂隙的影响，并尽可能发挥绳索取芯技术的优点。

在采用双栓塞进行压水试验时，下栓塞的止水可靠性不易检查，因而为了确保压水试验成果的准确性，下栓塞的长度要适当加长，同时可采用传感器进行检查。

4.1.2 试验段是编制渗透剖面图的基本单位。目前的压水试验，求得的透水率是试段的平均值，如试段过长，势必影响成果的精度；如试段过短，又会增加压水试验的次数和费用。国外有关规程中规定的试段长度在 3m~6m，多数为 5m，与我国规定基本一致。在实际操作中，由于诸多因素的影响，试段长度通常不是整数，因此，本标准对试段长度作了一般性规定。

对于地质条件特殊（如断层破碎带、裂隙密集带、溶蚀带等）的孔段，应根据具体情况确定试段的位置和长度，以求得上述孔段的真实透水性，同时还应考虑下一试段栓塞止水的可靠性。

4.1.3 本条对有残留岩芯情况的试段长度作了具体说明，同时对残留岩芯的长度作了不宜大于 0.2m 的规定。因为在钻孔压水试验实际操作过程中，若残留岩芯过多，不易清洗残留岩芯段的岩粉，

造成该裂隙堵塞；或因加压后由于残留岩芯段软弱致使栓塞下移而影响试验成果。

4.2 压力阶段和压力值

4.2.1 本条规定压水试验宜按三级压力五个阶段进行。三级压力值宜分别为 0.3MPa、0.6MPa 和 1.0MPa。

1 多阶段试验目的

法国工程师吕荣当时提出的钻孔压水试验方法是采用 1MPa 的压力进行一个阶段的试验。通过实践证明，采用一阶段的试验成果有一定的局限性。只做一阶段试验，特别是只做压力高达 1MPa 的一阶段试验，难以判别岩体是否已经产生了抬动变形或充填物冲蚀等现象，所得的成果是不够全面的。只有采用多级压力循环试验，将不同压力下的流量变化情况以及最大压力前、后同一压力下的流量变化情况进行对比分析，才能了解渗流状态和裂隙状态的具体情况，从而便于合理地确定岩体真实的渗透性。多阶段试验提供了资料相互校核的机会，提高了资料的可靠性。

2 压力阶段数

目前各国的压水试验多采用多级压力循环试验的方法，但压力阶段不尽相同。多数国家采用三级压力五个阶段，即逐渐升压至最大压力，然后按原压力逐级下降。综合考虑各种因素，作为常规压水试验，本标准采用三级压力五个阶段。

3 试验压力

鉴于吕荣值的定义压力为 1MPa，故试验的最大压力一般应达到该值，用法定计量单位表示则为 1MPa。最大试验压力确定之后，其余两级压力可按等分原则确定，当最大试验压力 P_3 为 1MPa 时， P_1 、 P_2 分别为 0.3MPa、0.6MPa。

当工程需要采用大于 1MPa 的压力进行压水试验时，参见附录 A 高压压水试验进行。

4.2.2 当试段位置埋深较浅（一般小于 30m）或岩体软弱时，采

用最大试验压力为 1MPa 进行试验，可能会导致岩体抬动变形而使试验成果失真。因此多数国家都对岩面以下一定深度内的试段所采用的最大试验压力加以限制。最常用的压力随深度的增量为每米增加 0.023MPa。

但实际上，压水试验时岩体是否会产生抬动变形，取决于很多因素，例如：岩体完整性、裂隙中渗透压力的大小和分布情况、上覆岩体自重、上覆岩体的结构力等。鉴于上述情况，很难精确地规定具体的不引起岩体抬动变形的最大压力试验值。在实际试验时，建议采取以下措施：

1 在每个工程开始工作时，可对浅部试段进行少量试验，以确定不引起岩体变形抬动的最大试验压力。

2 当岩体强度较低或裂隙比较发育时，建议采取下列数值确定最大试验压力：

当试段深度（基岩面以下）小于 15m 时， $P_3=0.3\text{MPa}$ ；

当试段深度（基岩面以下）为 15m~30m 时， $P_3=0.6\text{MPa}$ ；

当试段深度（基岩面以下）大于 30m 时， $P_3=1.0\text{MPa}$ 。

4.2.3 当试段的透水率小于 1Lu 时， $P-Q$ 曲线通常为直线。因此，本条规定当试段的透水率小于 1Lu 时可不再进行降压阶段的试验。

4.2.5 本条规定不同情况下确定压力计算零线的原则方法。这些确定原则，对竖直钻孔和倾斜钻孔都是适用的。

4.2.6 初期的吕荣试验是不考虑管路压力损失的。后来认识到这样做过于粗糙，因此目前所有国外规程都规定必须计入管路压力损失。特别是我国目前使用的钻杆内径与接头内径不一致，管路压力损失问题更为突出。实测资料表明，当流量较大（大于 50L/min）时，管路压力损失急剧增大，不计管路压力损失将导致成果产生较大误差。此外，不计压力损失还会改变 $P-Q$ 曲线的形状，使出现 B（紊流）型曲线的比例增大。

确定管路压力损失的方法有实际测定和公式计算两种。对内

径不一致的管路，用公式计算与实际测定结果差异较大。因此，当采用钻杆作为工作管进行压水试验时，应在地面测定每米钻杆和每副接头在不同流量下的压力损失，并编制出图表供现场试验时使用。东北勘测设计研究院对管路压力损失进行了实测，其实测成果见表 1，各单位在进行压水试验时可参考使用。

表 1 管路压力损失实测表 $\times 10^{-2} \text{MPa}$

流量 L/min	每米钻杆 压力损失	每副接头 压力损失	不同管长的压力损失			
			25m	50m	75m	100m
25	0.010	0.090	0.61	1.13	2.01	2.71
50	0.085	0.211	2.97	6.15	9.33	12.51
75	0.140	0.591	5.86	12.32	18.77	25.23
100	0.212	1.177	10.01	21.19	32.38	43.56
注：每根钻杆长度为 5m，钻杆外径 50mm，内径 38mm；接头外径 50mm，内径 22mm。						

从表 1 中可以看出，管路压力损失随流量的增大而急剧增大，且压力损失主要产生在接头部位。由于我国目前使用的钻杆和接头在规格和内表面粗糙度等方面不尽相同，因此实测工作最好由各单位按照实测方法自行进行。

4.3 试 验 钻 孔

4.3.1 我国水电水利工程钻探的常用孔径为 59mm~150mm。试验钻孔的孔径对压水试验成果有影响，但一般说来这种影响很微小，可以忽略不计。孔径特大或特小的钻孔，其渗透的边界条件差异较大，因此，在将这类钻孔的压水试验成果与常规直径钻孔的压水试验成果作对比之前，应进行专门的试验论证。

4.3.2 为了减少岩粉堵塞，压水试验钻孔最好采用金刚石钻进或硬质合金钻进。采用泥浆护壁材料钻进会使孔壁上形成一层泥膜，并堵塞裂隙，因此压水试验钻孔严禁使用泥浆、植物胶等护壁材料钻进。

在金刚石钻进时，通常使用乳化冲洗液。乳化液由水、油和表面活性剂组成。乳化液中的油珠重新凝结并离析出来的现象称为破乳。乳化液破乳后，将产生大量油泥、泡沫和胶状物，会严重堵塞裂隙，妨碍水流通过。此外，石灰岩、白云岩及其他含二价金属元素的岩石对活性剂有强烈吸附作用，也将使乳化液严重破乳，故在碳酸盐岩类岩石中钻进压水试验钻孔时，应选用合适的冲洗液。

为了使钻进时冲洗液能在孔口返出，减少岩粉堵塞裂隙的机会，同时当栓塞止水无效时，水能返出孔口，易于发现，规程要求试验钻孔的套管脚止水必须可靠。

4.3.3 为了防止由于钻孔相距过近，在压水试验时产生水流串通而影响试验成果的真实性，故本条规定，如在 10m 范围内布置两个及以上钻孔时，应先完成拟进行压水试验的钻孔。

4.4 试验用水和试验人员

4.4.1 试验用水应采用清水，当水源的泥沙含量较多时，会影响压水试验成果，因此应采取沉淀措施。当水源中含有漂浮物或油料等杂物时，也会影响压水试验的操作可行性及其成果的准确性，因而也应采取相应措施。

4.4.2 钻孔压水试验人员是确保压水试验成功和成果准确的关键。本条要求经过各种形式的技术培训，使钻孔压水试验人员能熟练掌握压水试验方法和操作程序。

5 试 验 设 备

5.1 止 水 栓 塞

5.1.1 关于止水栓塞长度问题，东北勘测设计研究院曾进行电拟试验，以比较不同栓塞长度的绕渗量大小（假设地层的渗透性为均质）。试验结果表明，当栓塞长度达到 7.5 倍钻孔孔径时，绕渗量增加速度减缓。伯利斯（J.C.Bliss）和拉许顿（K.R.Rushton）用数学模型研究栓塞长度的影响，得出类似的结论。因此，本标准中规定止水栓塞长度不小于试验钻孔孔径的 8 倍。此外，从保持栓塞附近岩体的渗流稳定性角度出发，也要求栓塞有一定的长度。

5.1.2 止水栓塞是压水试验的关键设备。目前国内使用的止水栓塞有双管循环式、单管顶压式、水压式和气压式等类型。双管循环式栓塞的优点是不必考虑管路压力损失，缺点是需要下两套管子，对小口径金刚石钻孔不适用，且操作费时，钻孔较深时尤其如此，这种栓塞目前已很少采用。单管顶压式栓塞的优点是操作简单，缺点是栓塞长度较短，当孔壁岩石较破碎时止水效果较差。水压式和气压式栓塞的共同特点是胶囊易与孔壁紧贴，即使在孔壁不太平直的情况下，也能实现面接触，且栓塞较长，止水可靠性好，对不同孔径、孔深的钻孔均能适应，操作比较方便。水压式栓塞的缺点是试验结束后胶囊内的水不易排放干净。气压式栓塞的缺点是在钻场上需要有一套高压充气装置。从止水可靠性的角度出发，本标准建议宜优先选用气压式或水压式栓塞。如试验压力较大，还可采用油压式栓塞。常用的止水栓塞见表 2。

表 2 常用止水栓塞

序号	止水栓塞类别	适 用 条 件
1	XSQ75 绳索取芯气压封隔器	孔深 300m 内绳索取芯钻进不提钻压水试验
2	XS75 型水压封隔器	孔深 300m 内自上而下逐段压水试验
3	S75 气压式绳索压水试验封隔器	孔深 300m 内自上而下逐段压水试验
4	ZYF-1 型水压单双封隔器	适用孔径 59mm~150mm
5	油压封隔器	适用于高压压水试验

5.2 供 水 设 备

5.2.1 对供水设备的基本要求是压力稳定，出水均匀，在 1MPa 压力下额定流量能大于 100L/min。应当指出，额定流量为 100L/min 的供水泵的供水能力只能使岩体透水率小于 20Lu 的试段达到预定的最大试验压力 1MPa。因此，当坝址的岩体透水率普遍较大时，应选用供水能力更大的水泵。当采用往复式水泵时，宜采用三缸往复式水泵，因其出水流量稳定性好；当采用其他出水流量不够稳定的水泵时，在水泵出水口附近可增设一个容积不小于 5L 的空气室。

5.2.2 为了保持试验用水清洁，吸水笼头上应包设过滤网，并与水池底部保持一定的距离（不小于 0.3m）。

5.2.3 供水调节阀门应灵活可靠，使压力能迅速调整至预定值。

5.3 量 测 设 备

5.3.1 压力表目前仍是主要的测压工具。压力表的工作压力应保持在有效范围内（即极限压力值的 1/3~3/4）。鉴于吕荣试验所用的压力值变化幅度较大，为满足上述要求，试验期间应更换压力量测设备。

当用压力传感器测定试验压力时，其压力范围应大于最大试

验压力。

5.3.2 目前我国在压水试验时所用的流量计实际上是表示累计水量的水表，这种水表只有和测時計联合使用，才能算出流量值。少部分单位采用电磁式流量计，效果较好。值得说明的是用普通水表做压水试验，在试验压力较大时存在安全隐患。因此本标准规定流量计应在 1.5MPa 压力下能正常工作。在压水试验降压阶段，有时会出现回流，为了记录回流情况和消除回流的影响，要求流量计能测定正、反向流量。

5.3.3 我国的地下水位量测设备，大多是在导线的一端接测头，另一端接万能表。导线无专用线架，也不显示深度，要靠人工丈量；测头规格不一，绝缘不好，往往反应不灵，或出现误读。针对这些情况，本条提出了一些要求。

5.3.4 为有利于我国压水试验技术水平的提高，保证压水试验成果质量，本标准鼓励使用自动记录仪进行压水试验。常用的量测设备见表 3。

表 3 常用压水试验量测设备

序号	量测设备	技术参数或适用范围
1	SF-2 型水表读分器	流量测试范围 1L/min~120L/min，精度 3%，耐压 2MPa
2	CY-1 型水深测压仪	压力测量范围 0.0MPa~1.2MPa，精度 0.5%；水深测量范围 0m~100m，精度 0.5%
3	电阻式双线钻孔水位计	适用在深孔地下水位较深钻孔中压水试验时，可在钻杆中测量水柱高度
4	ZS-1000A 型钻孔水文地质综合测试仪	可在钻杆内测量地下水位和水柱高度。压力传感器量程 0.01MPa~6.00MPa，分辨率 1%；流量传感器量测范围 0.5L/min~500L/min，分辨率 1%；深度传感器 0m~999m

6 现场试验

6.1 一般规定

6.1.2 本条概述了压水试验现场工作的基本操作内容。当采用双栓塞进行压水试验时，某些步骤（洗孔、水位测量、仪表安装等）可以简化。

6.2 试验准备

6.2.1 为了使压水试验工作顺利进行，应按试验压力、钻孔结构、孔深、地层等情况合理选择供水设备（水泵、吸水笼头、供水调节阀等）、止水栓塞及量测设备。

6.2.2 本条强调了在压水试验前应对各种设备和仪表进行检查。

6.2.3 本条强调了应按现场条件合理安装试验设备及仪表等，在下塞前应检查工作管和防止接头处漏水，防止试验数据失真，以确保试验工作顺利进行。

6.3 洗孔

6.3.1 本标准规定洗孔采用压水洗孔法，取消了原标准规定的活塞抽吸洗孔法。活塞抽吸洗孔法在供水水井中被广泛采用，但是由于活塞抽吸洗孔吸力较大，可能影响孔壁稳定，实际试验工作中未被采用，故删去。

6.3.2 本条规定了洗孔结束标准。

6.4 试段隔离

6.4.1 要提高试段隔离工作的质量，一是要有性能良好的止水栓塞，二是要使栓塞位于岩石较完整处。下置栓塞时塞位确定要准

确，避免漏段。

6.4.2 为了保证气压式或水压式栓塞的隔离效果，充气（水）压力应大于该试段的最大试验压力，并在整个试验过程中保持不变。

水压栓塞在试验过程中，由于岩体变形，会造成充气（水）压力下降，如不及时对栓塞充水加压，有可能影响止水效果。

6.5 水 位 观 测

6.5.1 下塞前地下水位观测的主要目的，是确定水柱压力的起算点，即确定压力计算零线。

当地层为同一含水层时，在下塞前、后观测的地下水位是一样的。当存在多个含水层时，下塞前、后观测的地下水位可能不同。对压水试验来说，起作用的是试段的地下水位而不是整个孔的混合水位，所以要求栓塞隔离试段后在工作管内观测水位。通过下塞后观测地下水位，可以了解到岩体中含水层的分布和变化等水文地质特性，在某种意义上，甚至比一次压水试验更有价值。

6.5.2 本条规定了水位观测的结束标准。

6.5.3 本条规定了当发现承压水时的观测要求。同 6.5.1 一样，延长观测时间的目的是为了获得一个相对准确的地下水位来确定压力计算零线，而对承压水的观测宜视工程需要进行，如需进行承压水观测，则应执行相应的观测标准。

6.6 试 验 性 压 水

6.6.1 为了确保压水试验的成功，须进行试验性压水。本条规定了试验性压水的压力和持续时间。

6.6.3 当试段隔离无效时，应采取措施。本条列举了几种处理措施，可根据具体情况选用。灌制混凝土塞位前，先要扩大孔径，灌制后又要有有一定的待凝时间，比较费时费工，故只有在栓塞止水困难，其他措施均无效时，才采用这种方法。

6.6.4 试验性压水成功后方能进行正式压水试验。在实际生产过

程中当出现不能起压的情况时(即采用最大水泵排量进行送水时,压力也不能抬高的情况),压水试验就无法进行,此时可采用最大排量送水 10min,并记录其注入量。

6.7 压力和流量观测

6.7.1 本条强调在向试段充水之前,应开启排气阀,使管路充分排气,然后再开始试验,否则将对试验成果有较大影响。

6.7.2 压力、流量观测工作有两种方式:一种是调节压力使之稳定不变,观测流量随时间变化情况;另一种是调节流量使之稳定不变,观测压力随时间变化情况。本标准推荐的是前一种。

6.7.3 本条规定了流量观测的间隔时间、次数和结束标准。

1 观测间隔

为了了解试验时流量的变化情况,原则上希望每分钟观测一次,对于直读式流量计来说,这样做并无困难。但目前我国大多数试验采用水表测流量,每分钟观测一次过于紧张,故本标准规定每隔 1min 或 2min 观测一次,视工地的具体情况而定。

2 观测结束标准和取值

理论上,流量在向稳定值趋近的进程中,其变化值是随时间递减的。为了使试验成果更可靠,要求在某一时段内流量的变化值不大于某一标准,这样试验虽未达到真正稳定,但至少已进入缓变段,因而可以把试验误差控制在一定范围之内。

参考国外有关资料,本标准规定五次流量读数的相对差不大于 10%,或绝对差不大于 1L/min,该阶段试验即可结束。绝对差的标准主要是根据流量计实际可能达到的精度确定的。

取最后一次读数作为计算值,比取该时段内的平均值更合理些,也较方便。

3 流量增大问题

理论上,当压力保持不变时,不应出现流量随时间增大的现象。因此,当出现这种情况时,应进行检查。如果不是设备、仪

表发生故障，则应延长试验时间，直至流量不再增大，且达到上述标准方可结束。

6.7.4 当某一阶段观测工作结束后，将试验压力调整到新的预定值重新进行试验。

6.7.5 在压水试验过程中，当试验压力由高压压力转换到较低压力时，有时会出现水从岩体流入钻孔的现象，这种现象称为回流。

产生回流现象的原因，是由于在试验压力下降的瞬间，钻孔附近岩体内的水压力暂时高于试验压力，因而使水自岩体反流。这个过程一般持续数分钟至十余分钟。随着岩体内水压力逐渐下降，回流量渐降至零。当岩体内水压力继续调整至低于试验压力，水重新流向岩体，并随着压力调整结束而趋于稳定。

在压水试验过程中，当出现回流时，应尽量详细记录有关情况（包括回流时间、回流量等），以便积累资料。需要注意的是，不可把流量从负经零到正这个变化过程中的暂时停滞误认为是该试段流量为零。

6.7.6 为了解岩体裂隙连通情况和压水试验的影响范围，应在试验过程中，对受压水试验影响的井、洞、孔、泉等进行观测（包括出水位置、水位、流量等），必要时可配合使用示踪剂。

6.7.7 本条强调在试验结束前应对原始记录进行认真检查，发现问题及时解决，以确保试验成果准确可靠。

7 试验资料整理

7.0.1 本条规定了试验资料整理的主要内容和步骤。

7.0.2 本条规定了绘制 $P-Q$ 曲线的方法。

绘制 $P-Q$ 曲线是划分类别的基础。实践表明, 绘制 $P-Q$ 曲线可以直观地反映流量随压力的变化关系。

绘制 $P-Q$ 曲线应采用统一的比例尺。如果采用不同的比例尺, 例如在流量较小时用较大的比例尺, 就会出现一些人为造成的不规则曲线, 使判读和划分类别产生困难。

采用规程中规定的比例尺 (P 轴 $1\text{mm}=0.01\text{MPa}$, Q 轴 $1\text{mm}=1\text{L/min}$), 各点标明序号, 并分别用实线和虚线连接升压曲线和降压曲线。这样图幅紧凑, 图面清晰, 绘制和使用都比较方便。

7.0.3 本条说明划分 $P-Q$ 曲线类型的原则, 五种类型的曲线特点及其意义。

本标准采用豪斯比和库兹纳尔的分类法。划分 $P-Q$ 曲线类型的主要依据有两点, 一是升压阶段 $P-Q$ 曲线的形状, 二是降压阶段 $P-Q$ 曲线与升压阶段 $P-Q$ 曲线是否重合及其相对关系。根据上述原则, 将 $P-Q$ 曲线划分为五种类型。

对五种 $P-Q$ 曲线类型进一步说明如下:

1 A 型 (层流型)

1) 曲线特征: $P-Q$ 曲线中升压曲线为通过坐标原点的直线, 降压曲线与升压曲线重合。

2) 解释: 渗流状态为层流。在整个试验期间, 裂隙状态没有发生变化。

2 B 型 (紊流型)

1) 曲线特征: $P-Q$ 曲线中升压曲线为凸向 Q 轴的曲线,

降压曲线与升压曲线基本重合。

- 2) 解释：渗流状态为紊流（这里所谓的紊流，是所有非线性的压力—流量关系的统称）。在整个试验期间，裂隙状态没有发生变化。

3 C 型（扩张型）

- 1) 曲线特征： $P-Q$ 曲线中升压曲线大体上为凸向 P 轴的曲线，降压曲线与升压曲线基本重合。

C 型曲线最关键之处在于：在某一压力之后，流量显著增大，且第四点与第二点、第五点与第一点基本重合。至于第一、二两点之间，可以通过坐标原点的直线，也可以是凸向 Q 轴的曲线，表明在流量突增之前的渗流状态，但不作为曲线类型划分的依据。

- 2) 解释：在试验压力作用下裂隙状态产生变化（原有裂隙加宽，隐裂隙劈裂），岩体渗透性增大，但这种变化是暂时的、可逆的，随着试验压力下降，裂隙又恢复到原来的状态，呈现出一种弹性扩张性质。从整个 $P-Q$ 曲线的变化中，可以看出裂隙弹性扩张作用与试验压力之间的关系，以及这种作用对原来渗流状态的干扰。

4 D 型（冲蚀型）

- 1) 曲线特性： $P-Q$ 曲线中升压曲线大体上为凸向 P 轴的曲线，降压曲线与升压曲线不重合，位于升压曲线的右侧，整个 $P-Q$ 曲线呈顺时针环状。

D 型曲线最关键之处在于：在某一压力之后，流量显著增大，且 $Q_4 > Q_2$ ， $Q_5 > Q_1$ 。 $P-Q$ 曲线中的其他变化，对曲线类型划分来说不是本质的。

- 2) 解释：在试验压力作用下裂隙状态产生变化，岩体渗透性增大，这种变化是永久性的、不可逆的。流量显著增大且不能恢复原状，多半是由于隐裂隙劈裂且与原有的裂隙相通或裂隙中的充填物被冲蚀、移动造

成的。

冲蚀型 $P-Q$ 曲线中的升压曲线和降压曲线都会出现一些不同的变化。如升压曲线中的第一、二两点与原点之间可能为直线，也可能为凸向 Q 轴的曲线，分别说明在产生冲蚀作用之前流态为层流或紊流；降压曲线可能为凸向 P 轴的曲线（说明一部分为可恢复的弹性变形，一部分为不可恢复的冲蚀作用），也可能为直线或凸向 Q 轴的曲线（分别说明在冲蚀作用产生之后流态为层流或紊流）。总之，从整个 $P-Q$ 曲线的变化中，可以看出隐裂隙劈裂或充填物冲蚀作用与试验压力之间的关系，这种作用对原来渗流形态的干扰、冲蚀作用的程度以及冲蚀后对渗流形态的影响等。

5 E 型（充填型）

- 1) 曲线特性： $P-Q$ 曲线中，升压曲线为直线或凸向 Q 轴的曲线，降压曲线与升压曲线不重合，位于升压曲线的左侧，整个 $P-Q$ 曲线呈逆时针环状。

E 型曲线最关键之处在于： $Q_4 < Q_2$ ， $Q_5 < Q_1$ 。至于升压、降压曲线的形状对类型划分不起什么作用。

- 2) 解释：试验期间裂隙状态发生了变化，岩体渗透性减小，这种减小大多是由于裂隙被部分堵塞造成的。此外，如裂隙处于半封闭状态，当被水充满后，流量即逐渐减小，甚至趋近于零。其曲线特点是：升压曲线凸向 Q 轴，降压曲线凸向 P 轴。

把 E 型称为充填型，有两个含义，一是在试验过程中裂隙被移动的固体所充填；二是半封闭的裂隙被水所充填。

7.0.4 本条规定透水率的计算方法及其精度。

透水率取第三阶段压力和流量数据（ P_3 、 Q_3 ）进行计算，主要原因是该组数据最接近于吕荣值的定义压力。

透水率取两位有效数字，这与压水试验可能和需要达到的精度是一致的。透水率小于 0.10Lu 时记为零。

7.0.5 $P-Q$ 曲线类型是反映试段岩体渗透特性的重要资料，本条规定同时用透水率和 $P-Q$ 曲线来表示该试段的压水试验成果。

7.0.6 应当指出，各种教科书和手册中，计算渗透系数的公式很多，如裘布依公式、霍斯列夫（Horslev）公式、莫伊（Moye）公式、巴布什金公式等。这些公式都以渗流服从达西定律为基本前提，只是对边界条件的假设不同。因此，不同公式的计算结果，差别大致在 $\pm 20\%$ 之内。而当岩体渗透性较大时，用压水试验和抽水试验法求得的渗透系数相差可达数十倍至百余倍。因此，仅当透水率较小（如 $q < 10 \text{Lu}$ ），且 $P-Q$ 曲线为 A 型（层流型）时，才可以用附录 D 所列的公式计算渗透系数。当透水率较大时，用压水试验方法求得的渗透系数，其准确度较差。
