

中华人民共和国水利行业标准

水 利 水 电 工 程
钻孔压水试验规程

SL31-2003

条文说明

× × × × 北京

目 次

- 1 总则
- 3 基本规定
 - 3.1 试验方法和试段长度
 - 3.2 压力阶段与压力值
 - 3.3 试验钻孔
 - 3.4 试验用水与试验人员
- 4 试验设备
 - 4.1 止水栓塞
 - 4.2 供水设备
 - 4.3 量测设备
- 5 现场试验
 - 5.1 试验程序
 - 5.2 洗孔
 - 5.3 试段隔离
 - 5.4 水位观测
 - 5.5 压力和流量观测
- 6 试验资料整理

1 总 则

1.0.1 在岩体上或岩体内修建水工建筑物时,必须研究建筑物区及其影响范围内岩体的透水性。测定岩体渗透性的方法有压水试验、注水试验、抽水试验等,其中压水试验是最常用的在钻孔内进行的岩体原位渗透试验。具体做法是在钻进过程中或钻孔结束后,用栓塞将某一长度的孔段与其余孔段隔离开,用不同的压力向试段内送水,测定其相应的流量值,并据此计算岩体的透水率。

压水试验成果主要用于评价岩体的渗透特性(透水率大小及其在不同压力下的变化趋势),并作为渗控设计的基本依据。当条件简单时,也可用于渗漏计算。

1.0.2 本标准采用吕荣试验作为常规性的压水试验方法。

吕荣试验是世界各国普遍采用的常规性压水试验方法,采用这种试验方法,有利于国际间的技术合作与交流。

吕荣试验方法从提出至今,经历了一个漫长的发展过程,在一些具体做法上与原始的吕荣试验已有很大的不同。另一方面,目前国际上尚没有统一的压水试验方法,各国的规定之间,也存在一定的差别。因此,在遵循吕荣试验原则的前提下,允许对某些具体做法作出选择或修改。

针对工程的不同目的和需要,出现了许多专门性压水试验方

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、高压压水试验等，这些试验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标准的规定进行。

3 基本规定

3.1 试验方法与试段长度

3.1.1 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，其主要优点是：

- 1 试验工作和钻探工作可以部分或全部分离，因而可提高工效；
- 2 可以根据孔内实际情况合理地确定栓塞置放位置和试段长度，试验成果与地质条件之间的相关性较好。

3.1.2 本标准规定试段长度宜为 5m。

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 3~6m 之间，多数为 5m，与我国规定基本上一致。在实际操作时，由于诸多因素的影响，试段长度通常不是整数。

对于地质构造条件特殊(如断层、裂隙密集带、岩溶洞穴等)的孔段，应根据具体情况确定试段的位置和长度，同时还应考虑

下一试段栓塞止水的可靠性。

3.2 压力阶段与压力值

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

1 多阶段试验的目的

多个阶段试验的目的，是了解试段岩体流量随压力的变化关系。大量试验资料表明，压水试验时的压力——流量关系并非都是线性的。非线性的压力——流量关系出现的原因有两类：

1) 流态 当水在岩体裂隙中的渗流速度超过某一值时，即出现非线性流，或统称紊流。一个试段的岩体中含有多条开度各不相同的裂隙，非线性流实际上是这些裂隙不同流态的综合反映。

2) 裂隙状态 在试验压力作用下，作为渗流通道的裂隙状态会产生改变，包括裂隙开度增大(扩张)、水力劈裂、裂隙中的充填物移动、冲蚀、堵塞，等等。

多阶段循环试验，就是通过测定试段的压力—流量的关系，分析其产生变化的原因，测定岩体的透水性，判断岩体在灌浆期间及运行期间在水（浆）压力可能出现的状态改变。

多阶段试验还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

《英国场地勘察标准》(BS5930：1981)采用三级压力五个阶段，即 $P_1-P_2-P_3-P_4(=P_2)-P_5(=P_1)$ ， $P_1 < P_2 < P_3$ 。

美国垦务局《原位测定岩体渗透性的压水试验建议方法》(RTH381-80) 采用五级压力八个阶段，即 $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5-P_6(=P_1)-P_7(P_3)-P_8(P_5)$ ， $P_1 < P_2 < P_3 < P_4 < P_5$ 。其目的是通过试验较准确地求得 $P-Q$ 曲线的非线性度 $m(\lg P - \lg Q)$ 图上的斜率)。

日本建设省《吕荣试验技术准则》(1984)采用五级压力九个阶段，即 $P_1-P_2-P_3-P_4-P_5-P_6(=P_4)-P_7(=P_3)-P_8(=P_2)-P_9(=P_1)$ ， $P_1 < P_2 < P_3 < P_4 < P_5$ 。其目的是较准确地确定试段岩体的临界压力(即 $P-Q$ 曲线上，流量开始显著超比例增大时的压力)。

综合考虑各种因素，作为常规压水试验，可以采用三级压力五个阶段的试验方法。

3 试段压力

试段压力确定实质上是最大试段压力确定。最大试段压力确定之后，其余两级压力可按等分原则确定。

多数国家采用最大试段压力为 1MPa。由于吕荣值的定义压力是 1MPa，故一般说来，最大试段压力应达到该值。此外，能了解到此范围内的压力—流量变化关系，一般也可以满足要求。

3.2.2 当试段位置埋深较浅(小于 15m)时，采用最大试段压力为 1MPa 进行试验，可能会导致岩体抬动，故宜适当降低试段压力。

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：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，情况各不相同。因此，难以规定具体的不引起岩

体抬动变形的最大试段压力值。各工程在工作开始时，可对浅部试段进行少量试验，以确定适宜的试段压力。

3.2.4 本条规定了不同情况下压力计算零线的确定原则。这些原则对竖直钻孔和倾斜钻孔都是适用的。

3.2.5 本条规定了管路压力损失的确定方法。

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，因此目前所有的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(例如大于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公式计算和实际测定两种。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，当采用钻杆作工作管进行压水试验时，应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。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，因此实测工作只能由各单位自行进行，而不能采用全国统一的图表。

表 3.2.6 管路压力损失实测表

流量 (L/min)	每米钻杆 压力损失	每付接头 压力损失	管长(m)的压力损失			
			25	50	75	100
25	0.010	0.090	0.61	1.31	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

流量 (L/min)	每米钻杆 压力损失	每付接头 压力损失	管长(m)的压力损失			
			25	50	75	100
100	0.212	1.177	10.01	21.19	32.38	43.56

注：1. 设每根钻杆长 5m；2. 压力损失单位为 10^{-2} MPa。

表 3.2.6 引自东北勘测设计研究院实测的管路压力损失资料(钻杆外径 50mm，内径 38mm；接头外径 50mm，内径 22mm)。从该表可以看出，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。

3.3 试验钻孔

3.3.1 我国水利水电工程地质钻探的常用孔径为 59~91mm，少数可达 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，其渗流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。

3.3.2 为了减少岩粉堵塞裂隙，压水试验钻孔最好采用金刚石或合金钻进。采用泥浆等护壁材料钻进使孔壁上形成一层泥膜，并堵塞裂隙，因此压水试验钻孔不应使用泥浆、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。当水中钙镁离子浓度超过 6×10^{-4} 时，离子型乳化液将变成钙镁盐，导致乳化液严重破乳。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必须进行止水。

3.3.3 为了防止由于钻孔相距过近，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，布置两个以上钻孔时，应先完成拟进行压水试验的钻孔。

4 试验设备

4.1 止水栓塞

4.1.1 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，规程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。

4.1.2 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、水压式和气压式四种类型。双管循环式栓塞的优点是不存在管路压力损失，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。因此

本标准建议优先选用气压式或水压式栓塞。

4.2 供水设备

4.2.1 对供水设备的基本要求是压力稳定、出水均匀，在 1MPa 压力下流量能保持 100L/min。应当指出，上述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，当坝址的岩体透水性普遍较大时，应选用供水能力更大的水泵。如能满足试验压力的要求，宜选用电动离心泵。当采用往复式水泵时，应在出水口处安设容积不小于 5L 的稳压空气室，以提高出水口压力的稳定性。

4.2.2 为了保持试验用水清洁，吸水龙头外应包设过滤网，并与水池底部保持不小于 0.3m 的距离。

供水调节阀门应灵活可靠，使压力能迅速调整至预定值。

4.3 量测设备

4.3.1 压力表目前仍是主要的测压工具。为了保证量测精度，压力表的量测范围应控制在极限压力值的 $1/3$ 至 $3/4$ 之间。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表。

当用压力传感器测定试验压力时，其量测范围应大于最大试验压力。

4.3.2 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

水表作压水试验，在试验压力较大时，存在安全隐患。因此，规程规定流量计应在 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。

4.3.3 为了提高我国压水试验工作技术水平，保证压水试验成果质量，规程规定宜使用自动记录仪进行压水试验。

4.3.4 地下水位量测设备，要求测头绝缘良好，能灵敏可靠地反映地下水位的位置，不受孔壁附着水或孔内水滴的影响。导线易变形伸长，故应经常检测。

5 现场试验

5.2 洗 孔

5.2.1 本标准规定采用压水洗孔法，取消了原规程规定的活塞抽吸洗孔法。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。

5.3 试段隔离

5.3.2 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，会造成充塞压力下降，如不及时对栓塞充水加压，有可能影响止水效果。

5.3.3 为了提高试段隔离的质量，除要求止水栓塞性能良好外，还应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。

5.3.4 当试段隔离无效时，应分析原因，及时采取措施，不允许轻易放弃该段的试验。规程中列举了几种处理措施，可根据具体情况选定。

5.4 水位观测

5.4.1 试验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。为了比较两者之间的异同，故规程要求在下塞前应首先观测一次孔内水位，下塞后再按规定进行工作管内的水位观测。

5.5 压力和流量观测

5.5.1 本条规定在向试段供水之前，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。

5.5.2 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，观测压力随时间的变化情况。本标准推荐的是前一种。

5.5.3 本条对流量观测的间隔时间、次数和结束标准作出规定，与原规程相同。

1 观测间隔

为了了解试验时流量的变化情况，我们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，故规程规定每隔 1 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过程中，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，规程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

当压力保持不变，流量随时间持续增大时，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，直至流量不再持续增大，且达到上述标准方可结束。

5.5.5 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段压力，因而使水自岩体流出。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，回流量渐减至零。当岩体内水压力继续调整至低于试验压力之后，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。尤其重要的是，切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。

5.5.6 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,对试验钻孔附近的露头、井、硐、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 试验资料整理

6.0.2 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, $P—Q$ 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。

6.0.3 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。

下面,对五种 $P—Q$ 曲线类型作进一步说明。

1 A(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基本重合。

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(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(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 4 点与第 2 点 , 第 5 点与第 1 点基本重合。

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 , 但这种变化是暂时性的、可逆的 , 随着试验压力下降 , 裂隙又恢复到原来状态 , 呈现出一种弹性扩张性质。

4 D(冲蚀)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，是在某一压力之后，流量显著增大，且 $Q_4 > Q_2$ ， $Q_5 > Q_{i0}$ 。

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，多半是由于岩石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。

5 E(充填)型

1) 曲线特征： $P—Q$ 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 型曲线的关键之点在于 $Q_4 < Q_2$ ， $Q_5 < Q_{i0}$ 。

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。

6.0.5 本条规定了试段透水率的计算方法及其精度

透水率取第三阶段压力，流量数据(P_3 、 Q_3)进行计算，与原规程相同，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。

6.0.6 $P—Q$ 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 $P—Q$ 曲线类型来表示该试段的压水试验成

果。

6.0.7 当 $P-Q$ 曲线为 C 型或 D 型时，表明在最大试验压力(P_3)范围内，流量出现显著增大，试段的裂隙状态产生变化(裂隙扩张、劈裂、充填物冲蚀等)。在一个工程或一个地段内，如果 $P-Q$ 曲线为 C 型或 D 型的试段比例较大，作为一种地质现象应当引起足够重视。此时应结合该工程或该地段的地质情况(地层岩性、地质构造、岩溶等)和钻孔岩心情况进行分析，找出流量显著增大的地质原因，并在工程地质报告中加以说明。必要时可在勘探阶段或灌浆试验中安排一定数量的专门性试验，确定岩体的临界压力。

6.0.8 在各种教科书和手册中，计算渗透系数的公式很多，如霍斯列夫(Horslev)公式、莫伊(Moye)公式、巴布什金(Бабушкин)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，用压水试验法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($q < 10 \text{ Lu}$)，且 $P-Q$ 曲线为 A(层流)型时，才可以用附录 D 所列的霍斯列夫公式计算渗透系数。