

ICS

备案号:

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL×××—××××

水利水电工程注水试验规程

(送审稿)

Code of water injection test for

water resources and hydropower engineering

(仅供审查, 请勿引用)

××××—××—××发布

××××—××—××实

中华人民共和国水利部 发布

前 言

为了规范水利水电工程地质勘察中的注水试验工作,根据水利部水利水电规划设计管理局发文(水总局科[2005]1号),由水利水电规划设计总院编制《水利水电工程注水试验规程》(SL—),根据文件要求和《水利技术标准编写规定》(SL1-2002),编制本标准。

本标准共6章14节41条和2个附录,主要技术内容有:

- 制定本标准的目的及其适用范围;
- 试坑单环注水试验适用条件、试验设备、现场试验和资料整理规定;
- 试坑双环注水试验适用条件、试验设备、现场试验和资料整理规定;
- 钻孔常水头注水试验适用条件、试验设备、现场试验和资料整理规定;
- 钻孔降水头注水试验适用条件、试验设备、现场试验和资料整理规定;
- 注水试验的记录格式和形状系数取值;
- 标准的用语说明。

本标准批准部门: 中华人民共和国水利部

本标准主持机构: 水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位: 水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位: 水利部水利水电规划设计总院

本标准参编单位: 中水东北勘测设计研究有限责任公司

中水北方勘测设计研究有限责任公司

本标准出版、发行单位:

本标准主要起草人: 鞠占斌 申林 高义军 刘金韬 李占军 任向宇 严福章 陈中和

本标准审查会议技术负责人:

本标准体例格式审查人:

目 次

1 总则	3
2 术语、符号	4
2.1 术语	4
2.2 符号	4
3 试坑单环注水试验	5
3.1 适用条件及试验设备	5
3.2 现场试验	5
3.3 试验资料整理	5
4 试坑双环注水试验	7
4.1 适用条件及试验设备	7
4.2 现场试验	7
4.3 试验资料整理	8
5 钻孔常水头注水试验	10
5.1 适用条件及试验设备	10
5.2 现场试验	10
5.3 试验资料整理	11
6 钻孔降水头注水试验	12
6.1 适用条件及试验设备	12
6.2 现场试验	12
6.3 试验资料整理	12
附录 A 注水试验记录格式	14
附录 B 钻孔注水试验的形状系数 A 取值规定	23
标准用词说明	24

1 总则

1.0.1 为规范水利水电工程地质勘察中的注水试验工作，制定本规程。

1.0.2 本标准适用于水利水电工程地质勘察中的注水试验工作。

1.0.3 本规程主要有以下引用标准：

《水利水电工程地质勘察规范》（GB50287）

《中小型水利水电工程地质勘察规范》（SL55）

《堤防工程地质勘察规程》（SL188）

《水利水电工程钻探规程》（SL291）

1.0.4 水利水电工程地质勘察注水试验工作，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语、符号

2.1 术语

2.1.1 试坑注水试验 water injection test in pit

保持固定水头高度向试坑注水，量测渗入土层的水量，以确定土层渗透系数的一种原位试验方法，可分为单环注水试验和双环注水试验。

2.1.2 钻孔注水试验 water injection test in borehole

通过钻孔向试段注水，以确定岩土层的渗透系数的原位试验方法。可分为钻孔常水头注水试验和钻孔降水头注水试验。

2.1.3 形状系数 shape factor

反映钻孔注水试验试段边界条件的参数。

2.2 符号

k —渗透系数 (cm/s);

Q —注入流量 (L/min);

F —注水铁环面积 (cm²);

H —试验水头 (cm);

H_a —试验土层的毛细上升高度 (换算成水柱压力, cm);

z —从试坑底算起的渗入深度 (cm);

A —形状系数 (cm);

t_1 、 t_2 —注水试验的某一时刻的持续试验时间 (min);

H_1 、 H_2 —在时间 t_1 、 t_2 时对应的试验水头 (cm);

r —套管内半径 (cm);

l —钻孔注水试验试段长度 (cm);

T_0 —特征时间 (min);

H_t —降水头注水试验对应 t 时的试验水头值 (cm);

H_0 —降水头注水试验的初始水头值 (cm);

m —传导比;

k_h —试验土层的水平渗透系数 (cm/s);

k_v —试验土层的垂直渗透系数 (cm/s)。

3 试坑单环注水试验

3.1 适用条件及试验设备

3.1.1 试坑单环注水试验适用于地下水位以上的砂土、砂卵砾石等无粘性土层。

3.1.2 单环注水试验设备及用途见表 3.1.2。

表 3.1.2 单环注水试验设备一览表	
名称	规格
铁环	高 20cm, 直径 25~50cm
水箱	容积 1m ³
量桶	断面上下均一, 面积不大于 5000cm ² 且有刻度清晰的水尺或玻璃管
计时钟表	秒表
供水管路及阀门	

3.2 现场试验

3.2.1 试坑开挖应符合下列要求:

- 1、在选定的试验位置, 挖一个圆形或方形试坑至预定深度;
- 2、在试坑底部一侧再挖一个深 15~20cm 注水试坑, 坑底应修平, 并确保试验土层的结构不被扰动。

3.2.2 铁环安装应符合下列要求:

- 1、在注水试坑内放入铁环, 使其与试坑紧密接触, 外部用粘土填实, 确保四周不漏水;
- 2、在环底铺 2~3cm 厚的粒径 5~10mm 的细砾作为缓冲层。

3.2.3 向铁环内注水, 使环内水头高度保持在 10cm, 记录观测时间和注入水量。在试验过程中, 试验水头波动幅度不应大于 0.5cm。

3.2.4 流量观测应符合下列规定:

- 1、流量观测精度应达到 0.1L。
- 2、开始 5 次观测时间间隔为 5min, 以后每隔 20min 观测一次并至少观测两次;
- 3、当连续两次观测的流量之差不大于 10%时, 试验即可结束, 取最后一次注入流量作为计算值。

3.3 试验资料整理

3.3.1 注入流量与时间 (Q~t) 关系曲线 (见图 3.3.1) 应在现场绘制。

3.3.2 试验土层的渗透系数按公式 (3.3.2) 计算:

$$k = \frac{17.67Q}{F} \quad (3.3.2)$$

式中 k ——试验土层的渗透系数 (cm/s);

Q ——注入流量 (L/min);

F ——铁环的面积 (cm²)。

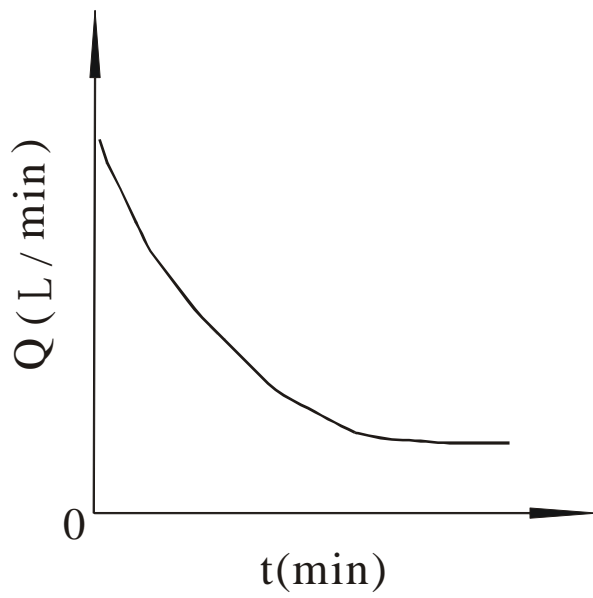


图 3.3.1 $Q-t$ 曲线图

4 试坑双环注水试验

4.1 适用条件及试验设备

4.1.1 试坑双环注水试验适用于地下水位以上的粘性土层。

4.1.2 双环注水试验设备及用途见表 4.1.2。

表 4.1.2 双环注水试验设备一览表

名称	规格
铁环	高 20cm，直径分别为 25cm 和 50cm
水箱	容积 1m ³
流量瓶	容积 5L
瓶架	
玻璃管	直径 1~2cm
记时钟表	秒表

4.2 现场试验

4.2.1 试坑开挖应符合下列要求：

- 1、在选定的试验位置，挖一个圆形或方形试坑至预定深度；
- 2、试坑底部一侧再挖一个深 15~20cm 注水试坑，坑底应修平，并确保试验土层的结构不被扰动。

4.2.2 铁环安装应符合下列要求：

- 1、在注水试坑内放入铁环，将直径分别为 25cm 和 50cm 的两个铁环按同心圆状压入坑底，深约 5 ~ 8 cm，并确保试验土层的结构不被扰动；
- 2、在内环及内、外环之间环底铺上厚 2 ~ 3 cm 的粒径为 5 ~ 10mm 的细砾作为缓冲层。

4.2.3 安装瓶架，将流量瓶装满清水，用带两个孔的胶塞塞住，孔中分别插入长短不等的两根玻璃管（管端切成斜口）作为出水管和进气管，安装如图 4.2.3 所示。

4.2.4 试验过程中，应用两个流量瓶同时向内环和内、外环之间注水，水深均为 10cm。流量瓶通气的玻璃管口距坑底应为 10cm，以保持试验水头不变。

4.2.5 流量观测应符合下列规定：

- 1、注入水量由瓶上刻度读出；
- 2、开始 5 次观测时间间隔为 5min，以后每隔 30min 测记一次并至少观测两次；
- 3、当连续两次观测的注入流量之差不大于 10% 时，试验即可结束，取最后一次注入流

量作为计算值。

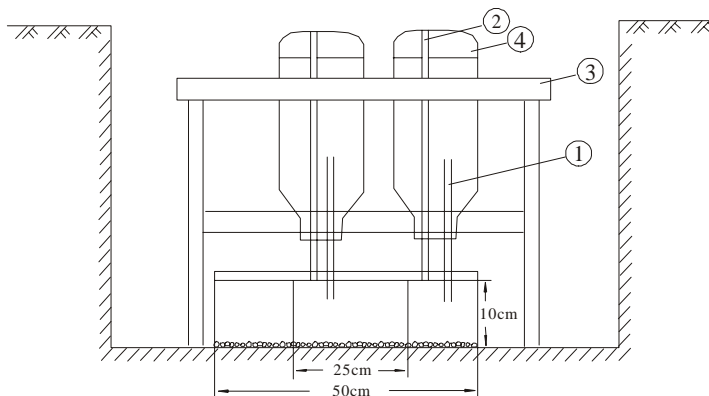


图 4.2.3 双环注水法安装示意图

① 出水管 ② 进气管 ③ 瓶架 ④ 流量瓶

4.2.5 注水试验的渗入深度可采用下列方法确定：

1 试验前在距试坑 3~5m 处打一个比坑底深 3~4m 的钻孔，并每隔 20cm 取样测定其含水量。试验结束后，立即排出环内积水，在试坑中心打一个同样深度的钻孔，每隔 20cm 取样测定其含水量，与试验前资料对比，以确定注水试验的渗入深度。

2 以试坑内环直径为一边向下开挖，通过对土层进行观测来确定注水试验的渗入深度。

4.3 试验资料整理

4.3.1 内环注入流量与时间 ($Q \sim t$) 关系曲线 (见图 3.3.1) 应在现场绘制。

4.3.2 试验土层的渗透系数按公式 (4.3.2) 计算：

$$k = \frac{17.676Qz}{F(H + z + 0.5H_a)} \quad (4.3.2)$$

式中 k ——试验土层的渗透系数 (cm/s)；

Q ——内环的注入流量 (L/min)；

F ——内环的底面积 (cm²)；

H ——试验水头 (cm)；

z ——从试坑底算起的渗入深度 (cm)；

H_a ——试验土层的毛细上升高度 (cm) (不同土层毛细上升高度的取值可通过试验确定或参见表 4.3.2)。

表 4.3.2 不同土层的毛细上升高度

土层名称	毛细上升高度（cm）	土层名称	毛细上升高度（cm）
粘土	200	粉质粘土	160
粉土	120	粉砂	60

5 钻孔常水头注水试验

5.1 适用条件及试验设备

5.1.1 钻孔常水头注水试验适用于渗透性比较大的壤土、粉土、砂土和砂卵砾石层，或不能进行压水试验的风化、破碎岩体，断层破碎带和其他透水性强的岩体等。

5.1.2 钻孔常水头试验设备见表 5.1.2)

表 5.1.2 钻孔注水试验设备一览表

设备类型	名称
供水设备	水箱、水泵
量测设备	水表、量筒、瞬时流量计、秒表、米尺等
止水设备	栓塞，套管塞（粘土与套管结合）
水位计	电测水位计

5.2 现场试验

5.2.1 用钻机造孔，至预定深度下套管，严禁使用泥浆钻进。孔底沉淀物厚度不得大于 10cm，同时要防止试验土层被扰动。

5.2.2 在进行注水试验前，应进行地下水位观测，作为压力计算零线的依据。

水位观测间隔为 5min，当连续两次观测数据变幅小于 5cm/min 时，即可结束水位观测。

5.2.3 钻至预定深度后，可采用栓塞或套管塞进行试段隔离，并应保证止水可靠。

对孔底进水的试段，用套管塞进行隔离；对孔壁和孔底同时进水的试段，除采用栓塞隔离试段外，还要根据试验土层种类和孔壁稳定性，决定是否下入护壁花管。

对孔壁和孔底进水的试段，同一试段不宜跨越透水性相差悬殊的两种土层。对于均一土层，试段长度不宜大于 5m。

5.2.4 试段隔离后，用带流量计的注水管或量筒向套管内注入清水，套管中水位高出地下水位一定高度（或至孔口）并保持固定不变，观测注入流量。

5.2.5 流量观测应符合下列规定：

- 1、开始 5 次流量观测间隔为 5min，以后每隔 20min 观测一次并至少观测两次。
- 2、当连续两次观测流量之差不大于 10% 时，即可结束试验，取最后一次注入流量作为计算值。
- 3、当试段漏水量大于供水能力时，应记录最大供水量。

5.3 试验资料整理

5.3.1 注入流量与时间（ $Q \sim t$ ）关系曲线（见图 3.3.1）的绘制应在现场进行。

5.3.2 当试验土层位于地下水位以下时，采用公式（5.3.2）计算试验土层的渗透系数：

$$k = \frac{17.67Q}{AH} \quad (5.3.2)$$

式中 k ——试验土层的渗透系数(cm/s)；

Q ——注入流量(L/min)；

H ——试验水头(cm)；

A ——形状系数 (cm)，按附录 B 选用。

5.3.3 当试验土层位于地下水位以上时，可采用公式（5.3.3）计算试验土层的渗透系数：

$$k = \frac{7.2Q}{H^2} \lg \frac{2H}{r} \quad (5.3.3)$$

式中 r ——钻孔半径，(cm)；

其余符号同前。

6 钻孔降水头注水试验

6.1 适用条件及试验设备

6.1.1 钻孔降水头注水试验适用于地下水位以下渗透系数比较小的粘性土层或岩层。

6.1.2 试验设备与钻孔常水头方法相同（见表 5.1.2）。

6.2 现场试验

6.2.1 钻孔降水头注水试验对造孔、地下水位观测和试段隔离的要求，参见 5.2.1~5.2.3 条的规定。

6.2.2 试段隔离后，向套管内注入清水，应使管中水位高出地下水位一定高度（初始水头值）或至套管顶部后，停止供水，开始记录管内水位高度随时间的变化。

6.2.3 管内水位下降速度观测应符合下列规定：

1、量测管中水位下降速度，开始间隔为 5min 观测 5 次，然后间隔为 10min 观测 3 次，最后根据水头下降速度，一般可按 30min 间隔进行。

2、应在现场，采用半对数坐标纸绘制水头下降比与时间（ $\ln H_t/H_0 \sim t$ ）的关系曲线（见图 6.2.3）。当水头比与时间关系呈直线时说明试验正确。

3、当试验水头下降到初始试验水头的 0.3 倍或连续观测点达到 10 个以上时，即可结束试验。

6.3 资料整理

6.3.1 根据注水试验的边界条件和套管中水位下降速度与延续时间的关系，采用公式（6.3.1）计算试验土层的渗透系数：

$$k = \frac{\pi r^2}{A} \frac{\ln \frac{H_1}{H_2}}{t_2 - t_1} \quad (6.3.1)$$

式中 H_1 ——在时间 t_1 时的试验水头(cm)；

H_2 ——在时间 t_2 时的试验水头(cm)；

r ——套管内径 (cm)

A ——形状系数 (cm)。

6.3.2 也可根据 $\ln H_t/H_0 \sim t$ 关系曲线求得的注水试验特征时间 T_0 ，采用公式（6.3.2）计算试验土层的渗透系数：

$$k = \frac{\pi r^2}{AT_0} \quad (6.3.2)$$

式中 T_0 —注水试验的特征时间 (min), 可在 $\ln H_t/H_0-t$ 曲线 (见图 6.2.3) 确定,

取 $H_t/H_0=0.37$ 或 $\ln H_0/H_t=1$ 时对应的时间作为 T_0 值。

H_t —注水时间为 t 时的水头值(cm)

H_0 —注水试验的初始水头值 (cm)

其它符号同 6.3.1。

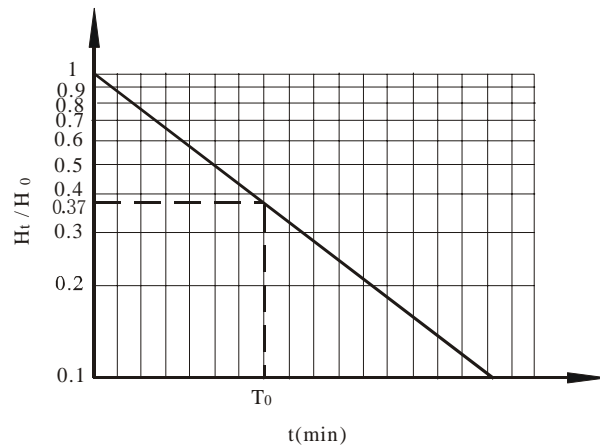


图 6.2.3 H_t/H_0-t 曲线图

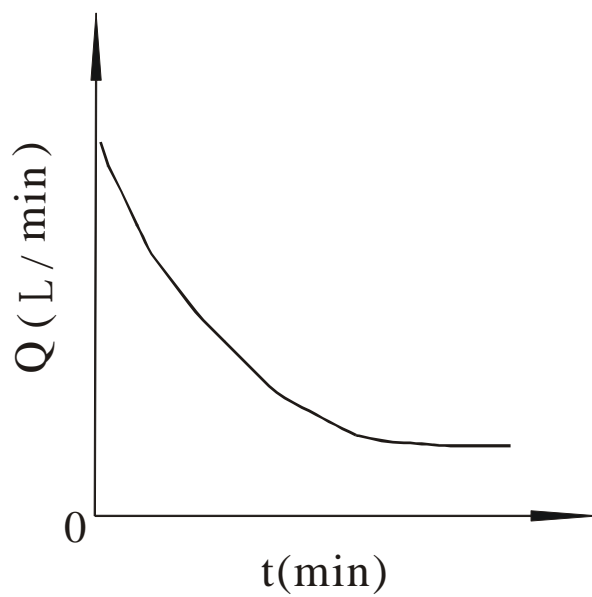
附录 A 注水试验记录格式

A. 0. 1 试坑单环注水试验记录格式见表 A. 0. 1-1，资料整理记录格式见表 A. 0. 1-2。

A. 0. 2 试坑双环注水试验记录格式见表 A. 0. 2-1，资料整理记录格式见表 A. 0. 2-2。

A. 0. 3 钻孔常水头注水试验记录格式见表 A. 0. 3-1，资料整理记录格式见表 A. 0. 3-2。

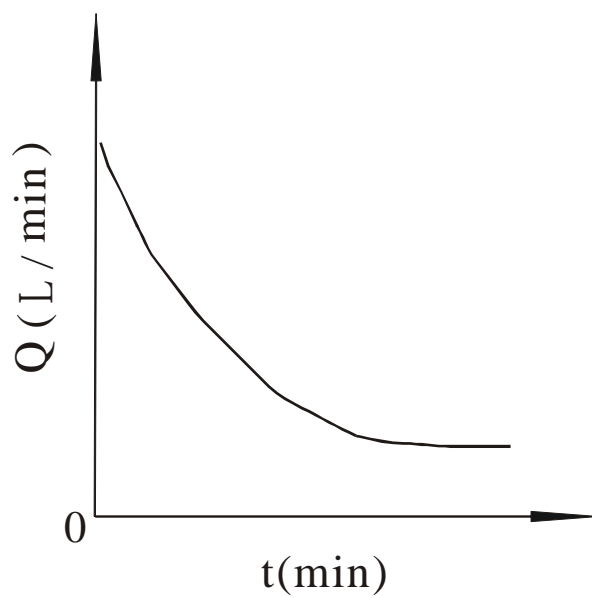
A. 0. 4 钻孔降水头注水试验记录格式见表 A. 0. 4-1，资料整理记录格式见表 A. 0. 4-2。

1、绘制 $Q \sim t$ 关系曲线

2、计算试验土层的渗透系数

$$k = \frac{17.67Q}{F}$$

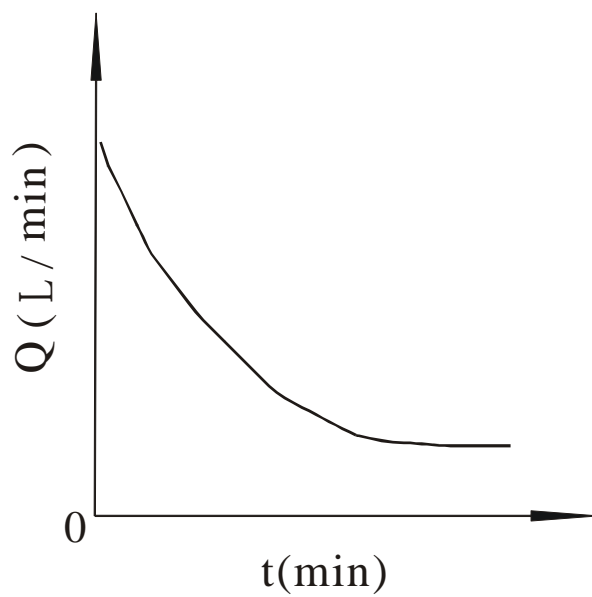
3、试验土层的基本情况描述和需要说明的问题

1、绘制 $Q \sim t$ 关系曲线

2、计算试验土层的渗透系数

$$k = \frac{17.67 Q z}{F(H + z + 0.5 H_a)}$$

3、试验土层的基本情况描述和需要说明的问题

1、绘制 $Q \sim t$ 关系曲线

2、计算试验土层的渗透系数

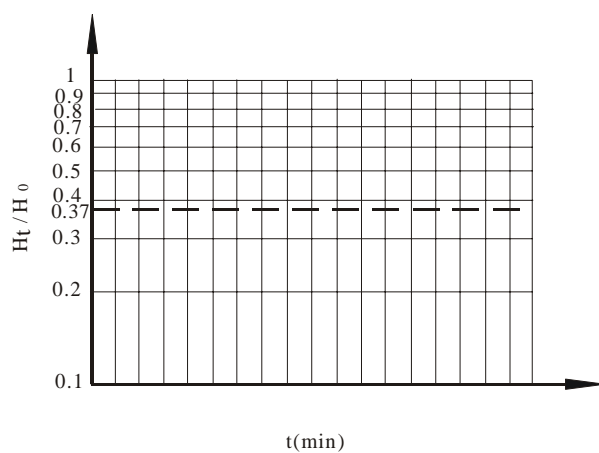
$$1) \quad k = \frac{17.67Q}{AH}$$

$$2) \quad k = \frac{7.2Q}{H^2} \lg \frac{2H}{r}$$

3、试验土层的基本情况描述和需要说明的问题

表 A.0.4-2

钻孔降水头注水试验资料整理记录

1、绘制 $\ln H_t/H_0 \sim t$ 关系曲线

2、计算试验土层的渗透系数

$$1) \quad k = \frac{\pi r^2}{A} \frac{\ln \frac{H_1}{H_2}}{t_2 - t_1}$$

$$2) \quad k = \frac{\pi r^2}{AT_0}$$

3、试验土层的基本情况描述和需要说明的问题

附录 B 钻孔注水试验的形状系数 A 取值规定

B.0.1 钻孔注水试验形状系数 A 取值见表 B.0.1-1

表 B.0.1-1 钻孔注水试验的形状系数值

试验条件	简图	形状系数 A	备注
试段位于地下水位以下，钻孔套管下至孔底，孔底进水。		$5.5r$	
试段位于地下水位以下，钻孔套管下至孔底，孔底进水，试验土层顶板为不透水层。		$4r$	
试段位于地下水位以下，孔内不下套管或部分下套管，试验段裸露或下花管，孔壁和孔底进水。		$\frac{2\pi l}{\ln \frac{ml}{r}}$	$\frac{l}{r} > 8$ $m = \sqrt{k_h / k_v}$ 式中 k_h 、 k_v 分别为试验土层的水平、垂直渗透系数，无资料时，m 值可根据土层情况估计。
试段位于地下水位以下，孔内不下套管或部分下套管，试验段裸露或下花管，孔壁和孔底进水，试验土层顶部为不透水。		$\frac{2\pi l}{\ln \frac{2ml}{r}}$	$\frac{l}{r} > 8$ $m = \sqrt{k_h / k_v}$ 式中 k_h 、 k_v 分别为试验土层的水平、垂直渗透系数，无资料时，m 值可根据土层情况估计。

标准用语说明

执行本标准时，标准用词应遵守下表规定。

标准用语说明

标准用语	在特殊情况下的等效表述	要求严格程度
应	有必要、要求、要、只有……才允许	要求
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推荐
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	允许
不必	不需要、不要求	

中华人民共和国水利行业标准

水利水电工程注水试验规程

SL

条文说明

目 次

1 总则.....	27
3 试坑单环注水试验.....	27
3.1 适用条件及试验设备.....	27
4 试坑双环注水试验.....	27
4.1 适用条件及试验设备.....	27
5 钻孔常水头注水试验.....	27
5.1 现场试验.....	27
5.2 试验资料整理.....	27
6 钻孔降水头注水试验	28
6.2 现场试验.....	28
6.3 试验资料整理.....	28

1 总则

1.0.1 注水试验是用人工抬高水头，向试坑或钻孔内注入清水，来测定岩土体渗透性的一种原位测试方法。它适用于不能进行抽水试验和压水试验，取原状样进行试验又比较困难的松散岩土体。

目前水利水电行业内没有注水试验的技术标准，各勘察单位在工程地质勘察过程中，需要做注水试验时，自行引用其它行业标准或自定标准。对不同的工程项目，由于使用的技术标准不统一，造成这一试验成果的可比性差，不利于行业内的技术交流。制定本规程的目的是完善水利水电工程地质勘察中的原位试验手段，规范水利水电工程注水试验方法、内容和资料分析及整理，使利用注水试验进行岩土体渗透性参数的试验方法和操作程序在行业内统一标准，有利于这一原位测试手段在行业内得到广泛应用。

1.0.2 本条规定规程适用于各类水利水电工程的地质勘察工作。

3 试坑单环注水试验

3.1 适用条件及试验设备

3.1.1 本条规定了单环注水试验适用于砂土和砂卵砾石等无粘性土，渗流为三维流，它测得的是土层的综合渗透系数。对毛细力作用较大的粘性土，使用单环注水试验，测得的渗透系数误差较大。

4 试坑双环注水试验

4.1 适用条件及试验设备

4.1.1 本条规定了试坑双环注水试验适用于毛细力作用较大的粘性土层，采用双环注水试验，在内、外环之间和内环同时注水，内、外环之间为三维流，内环近似平行流，求得的渗透系数基本上反映土层的垂直渗透性。

5 钻孔常水头注水试验

5.2 现场试验

5.2.1 对进行注水试验的钻孔，使用泥浆钻进，在孔壁形成泥皮影响土层的渗透性，所以进行注水试验的钻孔，不得使用泥浆钻进，应采用清水钻进。孔底沉淀物厚度超过允许值，影响试段长度，应进行清孔。

5.2.5 当试段漏水量大于供水能力时，无法测得试验水头和计算渗透系数。但是通过记录注入的最大流量，对了解岩土体的渗透性是有参考价值的。

5.3 试验资料整理

5.3.3 严格的讲，对于地下水位以上进行注水试验，由于受土层毛细力影响，渗流并不符合达西定律，如果按达西定律确定的公式进行计算，求得的渗透系数将存在一定的误差。因此，本规程推荐纳斯别尔格公式计算非饱和带土的渗透系数，它的适用条件是：

$$50 < H/r < 200$$

$$H \leq 1$$

式中 H ——试验水头 (cm)；

r ——钻孔半径 (cm)；

l ——试段长度 (cm)。

6 钻孔降水头注水试验

6.2 现场试验

6.2.4 为保证试验成果的准确性，要求试验必须达到一定的观测时间和取得足够的观测数据。对渗透性比较大的土层，可以用试验水头降低值控制；对渗透性较小的土层，为了减少试验时间，可以用观测次数控制。

6.3 试验资料整理

6.3.2 公式(6.3.2-2)是公式(6.3.2-1)在 $\ln(H_1/H_2)=\ln(H_0/H_t)=1$ 或者 $H_t / H_0 = 0.37$ 和 $T_0=t_2-t_1$ 时的特定条件下的简化形式。

为了保证根据 $\ln H_0/H_t \sim t$ 曲线求得的 T_0 的准确性，要求试验结束时间必须满足 6.2.4 条的规定。降水头注水试验的形状系数和常水头注水试验相同

对于在包气带内进行的钻孔降水头注水试验，与包气带的饱和度和孔隙度有关，目前水利水电工程勘察中缺少资料进行对比，可采用饱和带注水试验公式和中国有色金属工业协会颁布的行业标准《注水试验规程》YS5214—2000 及美国双栓塞注水试验推荐的公式计算渗透系数，为下次规程修订积累资料。

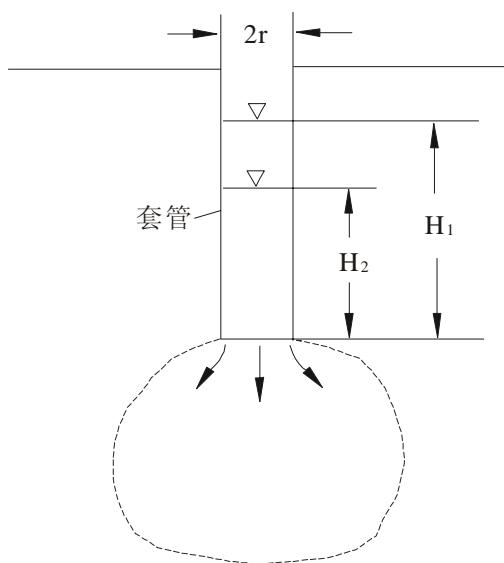


图 t.6.3.2-1 试验安装示意图

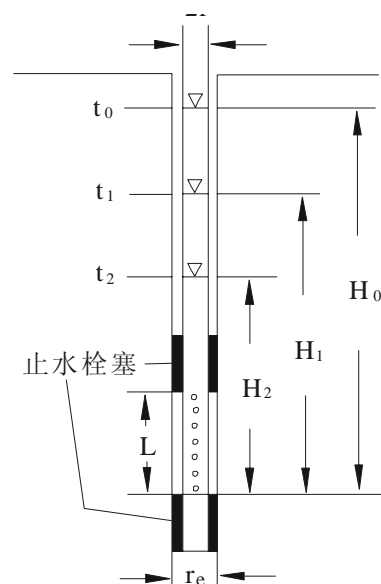


图 t.6.3.2-2 试验安装示意图

中国有色金属工业协会颁布的行业标准《注水试验规程》YS5214—2000 考虑了包气带的饱和度和孔隙度，试验安装如图 t.6.3.2-1 所示，采用公式（1）计算渗透系数：

$$k = \frac{r \ln \frac{H_1}{H_2}}{4t_2 \left[\frac{3(H_1 - H_2)}{4S_r \cdot n \cdot r} + 1 \right]^{\frac{1}{3}} - t_1} \quad (1)$$

式中 k ——试验土层的平均有效渗透系数（cm/min）；

r ——注水管内半径（cm）；

t ——观测时间（min）；

H_1 ——当 $t=t_1$ 时的管内水柱高度（从孔底算起）（cm）；

H_2 ——当 $t=t_2$ 时的管内水柱高度（从孔底算起）（cm）；

S_r ——试验土层的最终饱和度；

n ——试验土层的孔隙度；

美国《地下水手册》推荐采用双栓塞隔离试段，试验安装如图 t.6.3.2-2 所示，试段的渗透系数采用修正的 Jarvis 公式（2）计算渗透系数：

$$k = \frac{r_1^2}{2l\Delta t} \left[\frac{\operatorname{arsh} \frac{l}{r_e}}{2} \ln \left(\frac{2H_1 - l}{2H_2 - l} \right) - \ln \left(\frac{2H_1H_2 - lH_2}{2H_1H_2 - lH_1} \right) \right] \quad (2)$$

式中 k ——时段的平均渗透系数 (cm/min);

l ——试段的长度 (cm);

r_l ——工作管内半径 (cm);

r_e ——时段的有效半径 (cm);

Δt ——时间间隔 ($t_l - t_0, t_2 - t_l$) (min);

H ——试段底部到工作管中水面的水柱高度 (在测量时间 t_0 、 t_1 、 t_2 时分别为 H_0 、 H_1 、 H_2) (cm)。