

利用吕荣试验资料计算水文地质参数的新法压水试验方法

张祯武¹, 陈官权², 徐光祥³

(1. 贵州省水利电力学校, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州省水利水电基本建设工程处, 贵州 贵阳 550025;

3. 国家电力总公司贵阳勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 压水试验历时短、试段短, 是一种特殊的地下水流类型。过去由于理论研究不够, 不能用其资料正确求参。本文通过建立非稳定流压水试验数据模型, 利用吕荣法压水试验资料进行求参计算, 取得了满意效果。

关键词: 非稳定流; 压水试验; 定压力; 数学模型; 求参

中图分类号: P641.73

文献标识码: A

Abstract: Water pressure test is a special type of groundwater flow with the features of short duration and test segment. Owing to the lack of theoretical research the parameters can not be gained from data correctly. Through the mathematical model of nonstationary flow for water pressure test the parameters are calculated by the data from Lugeon's packer permeability test, which gets the satisfied results.

Key words: nonstationary flow; water pressure test; steady pressure; mathematical model; calculation of parameter

1 引言

在水利水电工程中, 渗流场及附加渗流场(指由工程引起的岩体水动力调整环境)对工程岩体及构筑物的影响都是活跃和敏感的^[1], 可导致水库渗漏及岩体的渗透、渗压损伤或破坏, 造成工程的减效或破坏, 引起巨大的经济损失。

反映渗流场特性的参数是渗透系数 K , 压力传导系数 a 及单位释(储)水系数 S 等。这些参数在水资源评价中一般采用抽水试验方法求取。但在水利水电工程中, 利用工程钻孔抽水试验是不适当和昂贵的, 工程岩体多为非均质岩体, 抽水试验资料不能反映岩体渗透特性空间分布的不均匀性, 无法指导工程处理。另一方面, 抽水试验不能在包气带和超深孔进行。因此, 压水试验仍是一种不能取代的手段。但目前的压水试验方法仅能确定岩体的相对透水性, 而回避了求取水文地质参数^[1]。

国内外不少学者为了通过已有的压水试验方法计算岩体的渗透系数, 曾作过不少工作。但以往的研究多以稳定井流理论为基础^[2], 而压水试验历时短, 是非稳定井流, 因而计算出的渗透系数误差常达数倍之多。另一方面, 地下水稳定流理论不能评价及预测岩体渗透强度和渗透、渗压损伤或渗透、渗压稳定性的时空变化^[3]。

作者研究了各种可能地质条件与压水试验条件

下的新法压水试验理论与求参方法。考虑到目前生产单位执行的吕荣法压水试验是调整压力, 使之稳定在预定值后, 每隔 1~2min 观测 1 次流量值, 当 5 次流量观测值的相对差不大于 10%, 或绝对差小于 1L/min 时, 则认为达到稳定要求^[2]。因此, 吕荣法压水试验水流本质上是不稳定的, 可以用非稳定流压水试验的理论与方法进行求参计算。为使新法压水试验不与现行压水试验规范冲突, 这里首先介绍利用吕荣法压水试验资料进行新法压水试验求参计算的理论与方法。

2 新法压水试验与吕荣压水试验的区别

2.1 新法压水试验的定义

所谓新法压水试验, 实际上包括短时(5~10min 左右)压水试验及瞬时(1~3min)压水试验。均是非稳定流压水试验, 若未特别指出, 一般均指前一种压水试验。

定义 1: 在以点 (x_0, y_0, z_0) 为中心处, 有一长度为 L 的压水试段, 以定压力(或定流量)注水, 同时在观测孔或试段中观测流量(或压力)随

收稿日期: 2001-11-12; 修订日期: 2003-01-04

基金项目: 贵州省自然科学基金项目(953002)。

作者简介: 张祯武(1951-), 男(汉族), 贵州瓮安人, 高级讲师。

时间变化的规律，并用这些规律计算水文地质参数，叫新法压水试验。

定义 2：在以点（ x_0, y_0, z_0 ）为中心处，有一长度为 L 的压水试段，压水时段很短，可视为瞬时，压入水量总体积为 V （）。在观测孔或试段中观测压力随时间变化的规律至压力基本恢复初始值，并用此规律求取水文地质参数，称瞬时新法压水试验。

2.2 新法压水试验与原压水试验方法的区别

由上述定义可知，新法压水试验与原压水试验方法相比，在理论上以非稳定流理论取代了稳定流理论；压水试验操作时，增加观测中的时间变量；不但更接近试验条件，且观测中不受流量相对差小于 10 % 等约束，并可以计算出渗透系数、压力传导系数等水文地质参数。以目前国内外应用较多的吕荣压水试验为例，与新法压水试验的区别列于表 1。

新法压水试验与吕荣压水试验的区别 表 1

方法	理论基础	试验及观测方法	历时	主要成果	成果解释及应用
吕荣压水试验	地下水稳定流理论	三压力五压力阶段循环试验。固定压力，观测流量值，当相对差小于 10 % 或绝对差小于 1L/min 时，以终值作该压力阶段计算流量值	50min 以上	1. 吕荣值 Lu ； 2. 计算渗透系数（误差达 2 ~ 6 倍）； 3. 绘制 $P - Q$ 曲线	了解裂隙岩体的相对渗透性，定性评价裂隙在高水头作用下的变化情况，参考确定防渗帷幕下限。 渗透系数计算误差太大
新法压水试验	地下水非稳定流理论	固定流量，观测压力随时间变化的规律	10min 左右	1. 吕荣值 Lu ； 2. 正确计算渗透系数、压力传导系数、单位释（储）水系数、有效裂隙率及真水力传导系数等参数； 3. 绘制 P （压力）- K （或 n ）曲线	计算岩体渗流场中流量、水力、水压力传导强度及范围。定量评价裂隙岩体及其透水性随水压力的变化规律，评价与预测裂隙岩体渗透、渗压损伤及渗透、渗压稳定性
		固定压力，观测流量随时间变化的规律			
		冲量压水，观测压力随时间的变化规律	很短		

从表 1 中可看出新法压水试验同样可获得原吕荣法的成果，对吕荣法既有继承性，又有根本性的改革，在理论、方法及成果应用方面均有很大进步。

3 定压力新法压水试验数学模型

3.1 试段位于承压含水层

虽然试段正好位于两隔水层之间（图 1a），成为承压完整注水井的概率很小。但是，若岩体的铅直透水率远小于水平透水率，当忽略铅直渗透系数分量时，则可将其中的压水试段视为承压完整注水井（图 1b）。这种情况有一定机率。

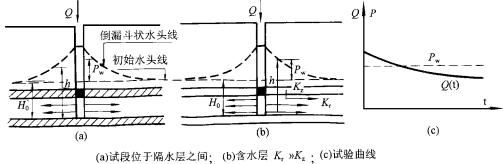


图 1 定压力承压二维流新法压水试验示意

如果试验压力 P 保持不变，则此非稳定流压水试验定解问题的提法如下：

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \right) & r < r < \\ P(r, 0) = 0 & r < r < \\ P(\quad, t) = 0 & t > 0 \\ P(r, t) = P & t > 0 \quad (P \text{ 为常数}) \end{cases} \quad (1)$$

此问题的解可写成^[4]

$$Q = 2 \quad KLPG(\quad) \quad (2)$$

其中， $G(\quad) = \frac{4}{0} \exp(-x^2)$
 $\left\{ \frac{-}{2} + \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{y_0(\quad)}{J_0(\quad)} \right] \right\} d\quad$ 为无越流定压力井流的流量函数： $= at/r^2$ ； r 为钻孔半径； $J_0(\quad)$ ， $y_0(\quad)$ 分别为零阶第一类与零阶第二类贝塞尔函数。 $a = K/S$ ，其中 S 为单位贮水系数； K 为渗透系数； t 为新法压水试验作用时间； L 为试段长度。

3.2 均质各向同性裂隙岩体中定压力三维流新法压水试验数学模型

定压力压水试验中，试段中的压力一般等于或大于 0.3MPa，当试段长度小于承压含水层厚度时，应将试段看作承压不完整注水井。但是，应用不完整井流数学模型需要的信息多^[4]，且在整个含

(透) 水层厚度上将岩体作均质化处理困难。而将试段视为点源 (图 2a) 则较易处理。

假定: (1) 承压含水岩体均质各向同性, 无界; (2) 试段较短, 可视为注水点源, 且别无源汇; (3) 在 $t = 0$ 时刻, 以定压力进行压水试验, 试验引起的地下水流满足达西定律。

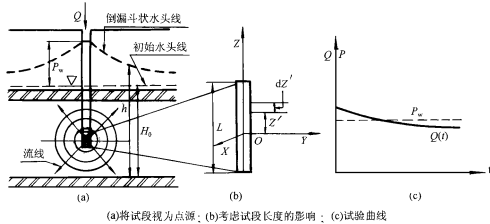


图 2 定压力承压三维流非稳定流压水试验示意

上述条件可归纳为如下定解问题

$$\frac{\partial P}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{S} (x, y, z, t), \quad \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} < \infty, t > 0 \quad (3)$$

$$P(x, y, z, 0) = 0, \quad \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} < \infty \quad (4)$$

$$P(R, t) = P, \quad t > 0 \quad (P \text{ 为常数}) \quad (5)$$

将式 (3) ~ 式 (5) 两边除以 Q , 并令 $N = P/Q$ 。利用富氏变换求解并注意初始条件 (4), 当观测点在试段壁 (R 处) 时, 再由边界条件 (5), 得到

$$N = \frac{1}{SL(4a)^{3/2}} \int_0^t \frac{1}{(t-\tau)^{3/2}} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4a(t-\tau)} \right] d\tau \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} = a_{xx} \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + a_{yy} \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} + a_{zz} \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} + \frac{Q}{S} (x, y, z, t), & R < \infty, t > 0 \\ P(R, 0) = 0, R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} < \infty, & P(R, t) = P, t > 0 \end{cases}$$

令 $N = P/Q$, $Y = y \sqrt{a_{xx}/a_{yy}}$, $Z = z \sqrt{a_{xx}/a_{zz}}$, $X = x$, 得到

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} = a_{xx} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{S} (x, y, z, t), & R < \infty, t > 0 \\ N(R, 0) = 0, R < \infty, & N(R, t) = P/Q, t > 0 \end{cases}$$

定解问题 与定解问题 (3) ~ (5) 在形式上相同, 具有相同形式的解。由于这种情况需要观测孔, 观测点不在试段中, 所以有

$$N = \frac{1}{4LK_{xx}R} \operatorname{erfc} \left(\frac{R}{\sqrt{4a_{xx}a_{yy}a_{zz}t}} \right) \quad (9)$$

其中:

$$R = \frac{\sqrt{a_{yy}a_{zz}x^2 + a_{xx}a_{zz}y^2 + a_{xx}a_{yy}z^2}}{\sqrt{4a_{xx}a_{yy}a_{zz}t}}$$

$$N = \frac{P}{Q} = \frac{1}{4KL R} \operatorname{erfc} \left(\frac{R}{\sqrt{4at}} \right) = R / \sqrt{4at} \quad (7)$$

当考虑试段长度的影响时, 由于微分方程 (3) 是线性的, 可以把试段作用看作是无数长度为 dz 点源 (图 2b) 作用的叠加。根据式 (6), 有

$$dN = \frac{dz}{SL(4a)^{3/2}} \int_0^t \frac{1}{(t-\tau)^{3/2}} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2 + (z-z')^2}{4a(t-\tau)} \right] d\tau$$

$$N = \frac{1}{SL(4a)^{3/2}} \int_0^t \exp \left[-\frac{r^2}{4a(t-\tau)} \right] \int_{-L/2}^{L/2} \frac{dz' d\tau}{(t-\tau)^{3/2}} \cdot \exp \left[-\frac{(z-z')^2}{4a(t-\tau)} \right]$$

最后得到

$$N = \frac{1}{4KL} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{u} e^{-\frac{r^2}{4a(t-u)}} \operatorname{erfc} \left(\frac{u}{L} \right) du \quad (8)$$

式中, $u = (L/2) / \sqrt{4at}$; Q 为压水试验的流量; r 为试段中心到观测点的半径; r 为试验钻孔半径; t 为压水试验作用时间; $a = K/S$ 为压力传导系数, 其中: S 为单位贮水系数, K 为渗透系数; L 为试段长度; u 为积分变量, $\operatorname{erfc}(\cdot)$, $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为补余误差函数与误差函数。

3.3 均质各向异性裂隙岩体中定压力三维流新法压水试验数学模型

设各向异性裂隙岩体中压水试验满足如下定解条件

$$R = \sqrt{a_{yy}a_{zz}x^2 + a_{xx}a_{zz}y^2 + a_{xx}a_{yy}z^2}$$

上式为将试段视为点源时的数学表达, 若考虑试段长度的影响, 有

$$N = \frac{1}{4LK_{xx}} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{u} e^{-\frac{r^2}{4a(t-u)}} \operatorname{erfc} \left(\frac{u}{L} \right) du \quad (10)$$

其中:

$$u = \frac{a_{yy}a_{zz}x^2 + a_{xx}a_{zz}y^2 + a_{xx}a_{yy}z^2}{4a_{xx}a_{yy}a_{zz}t}$$

$$= \frac{L/2}{\sqrt{4 a_{xx} a_{yy} a_{zz} t}}$$

式中: $N = P/Q$; P 为观测点固定的水压力; K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 分别为 x , y , z 主方向的渗透系数张量; $a_{xx} = K_{xx}/S$; $a_{yy} = K_{yy}/S$; $a_{zz} = K_{zz}/S$; 其余符号同前。

3.4 试段在包气带

定压力压水试验时,无论在饱水带还是包气带,并不是一开始就能达到设定压力,而是经过一定时间的调整后压力才趋于稳定的,只不过在包气带调整的时间长一些。为了便于数学描述,我们规定以压力开始稳定瞬时为压水试验时间零点。这样,包气带与饱水带均可用相同的数学模型描述。

3.5 应用条件

压水试验历时短、试段短、影响范围小,因而无论对均质、非均质裂隙岩体,式(2)~式(10)均适用。事实上,对非均质渗流场的处理,总是把介质特性变化不大的单元视为均质介质^[5]。

虽然(7)、(9)两式是把试段视为巨厚承压含水层中的注水点源推导出来的,应用时应满足含(透)水层厚度较大这一条件,但经沿试段积分得到考虑试段长度影响的(8)、(10)两式后,其应用范围扩展很大,只要压水试验中能升压,基本可应用。求参时,除时间与流量观测值外,仅需钻孔半径、试段长度及试验压力等数据,应用条件十分宽松。这意味着,利用具有时间流量观测值的吕荣法压水试验资料,也能求参。

4 求参计算方法

由于定压力新法压水试验的3个数学模型较难人工求解,反求含水层参数困难,因此宜用计算机进行求参计算。

4.1 程序设计

新法压水试验采用功能强大、界面好、人机对

话方便的 VB6.0 语言开发求参计算程序。

4.2 计算实例

索风营水电站是贵州省西电东送的重点工程,地勘工作量大、工期紧,无条件在完成规范要求的吕荣法压水试验后,再进行新法压水试验。因此,在该电站采用吕荣压水试验资料,对重点勘探孔进行了600多次段新法压水试验求参计算,表2是其中 ZK130-3 孔段按吕荣法、新法压水试验求得的参数对比。

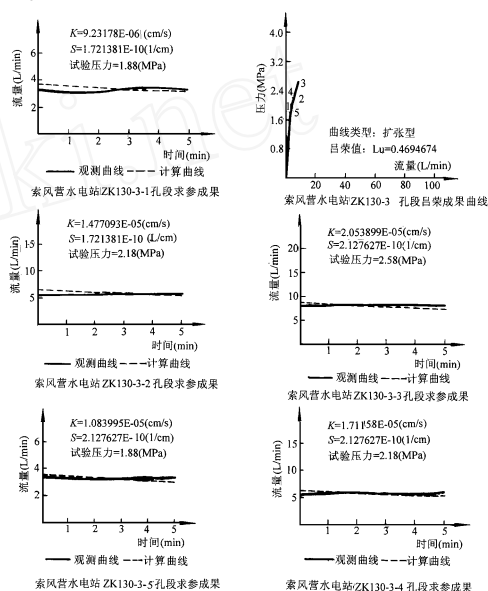


图3 索风营水电站 ZK130-3 试段求参拟合曲线

4.3 计算准确度评价

在表2中可看出,利用吕荣法和新法压水试验求出的渗透系数总的趋势是一致的,都随压力改变有所改变。但是,按吕荣法求出的参数没有体现该试段 P-Q 曲线所表达的扩张型(见图3中的吕荣曲线)曲线的内涵,而新法压水试验求出的渗透系数却与 P-Q 曲线表达的意义一致,正确地表达了该试段岩体裂隙在高压下扩张而产生的参数变化。另一方面,按过去的方法求得的渗透系数比按新法压水

索风营水电站 ZK130-3 试段新法压水试验与吕荣压水试验参数对比

表2

压力阶段序号	1	2	3	4	5
试验压力 (MPa)	1.88	2.18	2.58	2.18	1.88
对应流量 (L/min)	3.3	5.8	8.2	5.7	3.3
吕荣法					
K (cm/s)	2.98×10^{-5}	4.52×10^{-5}	5.40×10^{-5}	4.44×10^{-5}	2.98×10^{-5}
新法压水试验					
K (cm/s)	9.24×10^{-6}	1.48×10^{-5}	2.05×10^{-5}	1.71×10^{-5}	1.08×10^{-5}
S (1/m)	1.72×10^{-10}	1.72×10^{-10}	2.13×10^{-10}	2.13×10^{-10}	2.13×10^{-10}
a (cm ² /s)	53630.07	85808.56	96534.71	80445.47	50948.53

(下转第44页)

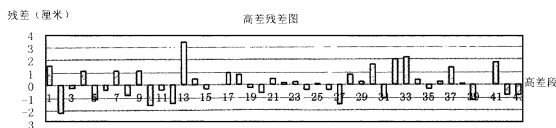


图3 加模型改正、以20号点和3段高差的平面拟合高差与水准高差之差

值能够明显地提高高程拟合的精度。

图3中标在1点上的表示1~2点的拟合高差与水准高差之差值,其它点上的各差值的含义以此类推。由图3可见2~3、32~33、33~34的差值超过2厘米,13~14的差值超过3厘米。因各GPS点的水准高程由这些高差推得,由图3的差值不难解释,图2中13点前的高程差明显偏小、33点后的高程差明显偏大,原因主要是这几段水准高差的差值较大。

图4和图5分别给出了加模型改正后,用1,22,44点平面拟合求得的GPS高程与高差与水准测量的高程与高差的差值。

尽管采用不同的拟合点计算,图2与图4的高程差值和图3与图5的高差差值有惊人的相似,只是数值上图4、图

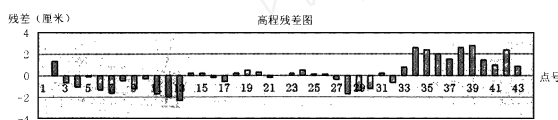


图4 加模型改正、以1、22、44点平面拟合高程与水准高程差值

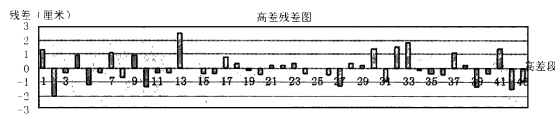


图5 加模型改正、以1、22、44点平面拟合高差与水准高差差值

5所示的结果要明显偏小。由于三个拟合点1、22、44的高程与其它GPS点由同一条水准路线推得,各点的高程并不是独立的,因此,其差值小只能表明该高程拟合方法的内符合精度高。事实上,采用这3点拟合本质上将2~3、13~14的高差误差平滑到1~22点之间,32~33、33~34的高差误差平滑在22~44点之间,如果从已知水准点独立引测高程作外符合比较,采用高差的拟合结果不一定差。由于从已知水准高程的GPS点引测的水准高程点并不是独立的,因此在拟合时不能用作高程观测值,只有高差和从已知水准点直接引测的高程才是独立观测值。

根据上述结果和分析,我们认为高差观测值能够有效地改善高程拟合的精度,并建议只有从已知水准点直接引测的高程和高差才能在高程拟合时作为观测值。

参考文献

- [1] 沈云中等. GPS铁路航测外控点的高程计算模型. 同济大学学报, 1996 (8).
- [2] 沈云中. 削弱不可建模系统差影响的高程异常拟合方法. 工程勘察, 1998 (2).

(上接第22页)

试验理论求出的在本例中大3倍左右。由于新法压水试验理论接近实际压水试验条件,求参中采用了观测值与计算值进行拟合以控制求参精度(图3),且利用了试验中的全部数据,因而正确性有保证。而传统计算方法只利用了观测数据中的最后一个流量值,用的是稳定流计算公式,压水试验时间很短,试验水流是非稳定流。因此,误差不可避免。同时,计算结果大3倍也意味着,按此标准进行防渗帷幕设计,可能造成防渗过当,产生较大浪费。

5 结论

新法压水试验是以地下水非稳定流理论为基础的压水试验方法,现行的吕荣法则以稳定流理论为理论基础的。虽然二者存在本质的区别,但吕荣法是把一定条件下的非稳定井流视为稳定井流的。因此,只要在压水试验中正确记录时间变量,就可

以使新法与吕荣法压水试验的现场试验工作整合,既取得吕荣法成果,又获得了宝贵的水文地质参数。

新法压水试验虽然理论复杂,人工整理资料困难,但通过编程,用计算机进行求参计算,则既回避了复杂的理论计算,又避免了人工计算的二次误差。通过对索风营水电站600余段次的新法压水试验计算成果分析,证明计算参数的准确度良好。

参考文献

- [1] 崔政权. 系统工程地质导论. 水利电力出版社, 1992.
- [2] 水利水电工程钻孔压水试验规程 (SL25-92).
- [3] 杨延毅, 周维垣. 裂隙岩体的渗流——损伤耦合分析模型及其工程应用. 水利学报, 1991, (5): 19~27.
- [4] 薛禹群, 朱学愚. 地下水动力学. 北京: 地质出版社, 1979.
- [5] 孙纳正. 地下水流的数学模型和数值方法. 北京: 地质出版社, 1981.