

# 天津地区微水试验求取含水层渗透系数的应用

肖传宁,刘承磊,李连营,孙怀军

(天津市勘察设计院集团有限公司,天津 300000)

**摘要:**为解决抽水试验求取含水层渗透系数周期长、操作复杂的问题,以天津某场地潜水含水层和承压含水层的微水试验为例,采用 Hvorslev 模型、Cooper 模型和 Bouwer&Rice 模型计算含水层渗透系数,并与抽水试验结果对比,Bouwer&Rice 模型分析潜水含水层微水试验数据求得的渗透系数与抽水试验结果相比误差小,结果准确;Hvorslev 模型分析承压含水层微水试验数据求得的渗透系数与抽水试验结果的相对误差远小于 Cooper 模型,Hvorslev 模型计算结果更为准确。研究表明:相较于抽水试验,微水试验周期短、操作简便,是一种经济、快速确定含水层渗透系数的现场试验方法。

**关键词:**天津;微水试验;含水层;渗透系数

**中图分类号:** P641

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2021)03—0252—05

## Application of Slug Test for Hydraulic Conductivity of Aquifer in Tianjin

XIAO Chuanning, LIU Chenglei, LI Lianying, SUN Huaijun

(Tianjin Survey Design Institute Group Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of long period and complicated operation in obtaining the hydraulic conductivity of aquifer in the pumping test, the slug test of unconfined and confined aquifer in Tianjin was taken as an example. The Hvorslev model, Cooper model and Bouwer&Rice model were used to calculate hydraulic conductivity of aquifer, and the results were compared with the pumping test. The hydraulic conductivity of unconfined aquifer obtained by Bouwer&Rice model of slug test data has smaller relative errors and accurate results; the relative error of Hvorslev model for hydraulic conductivity of confined aquifer is much smaller than the Cooper model, the results of Hvorslev model are more accurate. Compared with the pumping test, the slug test has a short period and simple operation, it is an economical and rapid field test method for hydraulic conductivity of aquifer.

**Keywords:** Tianjin; slug test; aquifer; hydraulic conductivity

含水层的渗透系数是反映岩土体渗透性的重要参数,也是水文地质及工程地质勘察工作中的关键参数<sup>[1-2]</sup>。目前,国内测定含水层渗透系数的主要手段为抽水试验,但其存在需要大量的人力物力,耗费较长时间等缺点<sup>[3]</sup>。同时,对于渗透性较弱、储水性较差的含水层,做抽水试验非常困难<sup>[4]</sup>。微水试验是利用某种方式使井(孔)中水位在一瞬时发生微小变化,并通过观测井(孔)中水位随时间的变化过程确定含水层水文地质参数的现场试验方法<sup>[5]</sup>。与抽水试验相比,该方法具有操作简便、试验周期短及对含水层扰动较低等优点<sup>[6-7]</sup>。国外对

微水试验的研究开展得较早,研究成果较多,在理论和求解方法方面已较为成熟,常用的有 Hvorslev 模型、Bouwer&Rice 模型和 Cooper 模型等,国内的研究主要在国外已有的研究基础上进行且在工程实践中应用较少<sup>[8-9]</sup>。林广宇等<sup>[10]</sup>通过对比微水试验、抽水试验及室内土工试验的结果,研究了微水试验求取含水层渗透系数的可靠性,本文是在其基础上的进一步应用。

本文以天津市某场地潜水含水层和微承压含水层的微水试验资料为基础,利用 Aquifer Test 中 Slug Test 模块求解,并与抽水试验计算结果对比,分析了

微水试验技术在天津地区测定水文地质参数的精度及适用性,为该技术的实践及推广提供一定的参考依据。Aquifer Test 软件具有简便、友好、直观的使用界面,并具有优良的可视化效果,其中的 Slug test 模块是分析处理微水试验数据的常用工具<sup>[11]</sup>。

## 1 工程概况及试验方案

### 1.1 工程概况

试验场地位于天津市河东区某地块内,拟建商务办公楼2座、商业楼5座及地下车库。地下车库整体4层,埋深约21.0 m。场地内为施工临建用地、堆土场、钢筋加工区及施工临时道路等;场地西侧为项目二期工程、南侧为三期A地块工程、东侧为六纬路、北侧为八经路,其中二期工程为超高层公寓楼即将竣工,三期A地块正在进行西半部分主体施工,六纬路、八经路均为现状道路,交通繁忙。工程概况如图1所示。

### 1.2 水文地质条件

根据工程勘察结果,场地埋深28.00 m 深度范

围内的地层主要为人工堆积层及第四纪陆相、海相、沼泽相沉积层。按地层岩性及成因可自上而下划分为6个土层,进一步划分为10个亚层,根据岩性分布、室内渗透试验结果综合分析可分为潜水含水层、相对隔水层及承压含水层。场地地层分布特征如表1所示。

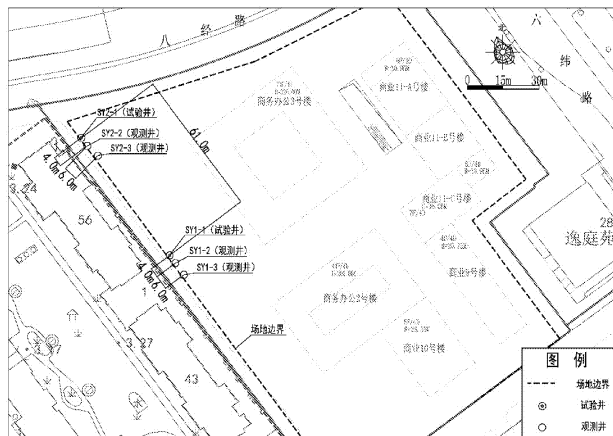


图1 工程概况及井位布置图

表1 场地地层分布情况

地层性质	成因年代	地层岩性	地层编号	厚度/m	标高/m
包气带及 潜水含水层	人工填土层(Qml)	杂填土	① <sub>1</sub>	3.00	3.50 ~ -0.50
		素填土	① <sub>2</sub>	1.00	0.50 ~ -0.50
相对隔水层	新近冲积层(Q <sub>4</sub> <sup>3N</sup> al)	黏土	③ <sub>1</sub>	2.10	-0.50 ~ -2.60
		粉土	③ <sub>2</sub>	2.80	-2.60 ~ -5.40
		粉质黏土	③ <sub>4</sub>	2.70	-5.40 ~ -8.10
		粉质黏土	⑥	6.40	-8.10 ~ -14.50
承压含水层	全新统中组海相沉积层(Q <sub>4</sub> <sup>2</sup> m)	粉质黏土	⑦	1.60	-14.50 ~ -16.10
相对隔水层	全新统下组沼泽相沉积层(Q <sub>4</sub> <sup>1</sup> h)	粉质黏土	⑧ <sub>1</sub>	3.10	-16.10 ~ -19.20
		粉土	⑧ <sub>2</sub>	3.30	-19.20 ~ -22.50
承压含水层	全新统下组陆相冲积层(Q <sub>4</sub> <sup>1</sup> al)	粉质黏土	⑨	2.00	-22.50 ~ -24.50
相对隔水层	上更新统第五组陆相冲积层(Q <sub>3</sub> <sup>c</sup> al)	粉质黏土			

场地潜水天然动态类型属渗入-蒸发径流型,主要接受大气降水入渗和地表水体渗漏补给,排泄方式主要为蒸发、地下水侧向径流和垂向越流。地下水总体流向为自北西南东,水位变幅0.5 m ~ 1.0 m。承压水天然动态类型属渗入-径流型,以越流补给、地下水侧向径流和“天窗”渗漏补给为主,排泄方式主要为侧向径流和越流。

### 1.3 微水试验情况

本次在场地内布设6口试验井(SY1-1、SY1-2、SY1-3、SY2-1、SY2-2、SY2-3),其中,SY1-1、SY1-2、SY1-3为潜水含水层完整井,SY2-1、

SY2-2、SY2-3为承压含水层完整井。针对场地潜水含水层及承压含水层的微水试验分别在SY1-1、SY2-1中进行1次,水位测量采用Micro Diver自动水位记录仪监测。同时,为分析微水试验的精度,在潜水含水层及承压含水层分别进行了1次带2个观测井的抽水试验,试验井SY1-2、SY1-3为潜水水位观测井,SY2-2、SY2-3为承压水水位观测井。抽水试验在完成微水试验且在水位完全恢复后进行。井位布置情况如图1所示,井身结构参数见表2。

表 2 井身结构参数表

井类型	井号	孔径/mm	井径/mm	井深/m	实管埋深/m	滤管埋深/m	沉淀管埋深/m
潜水试验井	SY1-1	650	330	18.5	0.0~2.0	2.0~18.0	18.0~18.5
潜水观测井	SY1-2	650	330	18.5	0.0~2.0	2.0~18.0	18.0~18.5
潜水观测井	SY1-3	650	330	18.5	0.0~2.0	2.0~18.0	18.0~18.5
承压水试验井	SY2-1	650	330	26.5	0.0~22.5	22.5~26.0	26.0~26.5
承压水观测井	SY2-2	650	330	26.5	0.0~22.5	22.5~26.0	26.0~26.5
承压水观测井	SY2-3	650	330	26.5	0.0~22.5	22.5~26.0	26.0~26.5

## 2 微水试验基本原理

目前国内外提出的微水试验求解模型多达 50 种,这些模型中 Hvorslev 模型、Cooper 模型及 Bouwer&Rice 模型较为常用。

### 2.1 Hvorslev 模型

Hvorslev<sup>[12]</sup> 在 20 世纪 50 年代发展建立的 Hvorslev 模型是一种适用于承压含水层完整井的求解模型,其忽略了含水层的弹性释水过程。

Hvorslev 模型的表达方式如下,一般采用直线图解法求解:

$$\ln\left[\frac{H(t)}{H_0}\right] = -\frac{2KMT}{r_c^2 \ln(R/r_w)} \quad (1)$$

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R/r_w)}{2MT_0} \quad (2)$$

式中: $H_0$  为初始水头变化; $H(t)$  为随时间的水头变化; $t$  为时间; $R$  为微水试验影响半径; $r_w$  为井管半径; $r_c$  为钻孔套管半径; $K$  为含水层渗透系数; $M$  为承压含水层厚度; $T_0$  为基本时间间隔,即变化的水位降深与初始水位降深之比为 0.37 时所对应的时间。

### 2.2 Cooper 模型

20 世纪 60 年代,Cooper 等<sup>[13]</sup> 建立了一种适用于承压含水层完整井的 Cooper 模型求解方法,考虑了含水层的弹性释水效应。

Cooper 等给出了如下形式的解析解,利用标准曲线配线法求参数:

$$H = H_0 F(\alpha, \beta) = H_0 \frac{8\alpha}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{t \exp(-\beta u^2/\alpha)}{u f(u, \alpha)} du \quad (3)$$

$$f(u, \alpha) = [u J_0(u) - 2\alpha J_1(u)]^2 + [u Y_0(u) - 2\alpha Y_1(u)]^2 \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{r_w^2 S}{r_c^2} \quad \beta = \frac{KMt}{r_c^2} \quad (5)$$

式中: $\alpha$  为无量纲释水系数; $\beta$  为无量纲惯性参数; $J_0(u)$  为第一类零阶 Bessel 函数; $J_1(u)$  为第一类一阶 Bessel 函数; $Y_0(u)$  为第二类零阶 Bessel 函数; $Y_1(u)$  为第二类一阶 Bessel 函数。

### 2.3 Bouwer&Rice 模型

Bouwer&Rice 模型是由 Bouwer 等<sup>[14]</sup> 建立发展的,其适用于潜水含水层,忽略含水层弹性释水效应。

H. Bouwer 等给出了如下形式的解析解,一般采用直线图解法求解:

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R/r_e)}{2L} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{h_0}{h_t}\right) \quad (6)$$

式中: $r_e$  为滤管半径; $L$  为含水层中滤管的长度。

对于完整井,Bouwer 和 Rice 给出了影响半径  $R$  的计算方式如下:

$$\ln \frac{R}{r_e} = \left[ \frac{1.1}{\ln(b/r_e)} + \frac{C}{L/r_e} \right]^{-1} \quad (7)$$

式中: $b$  为滤管底部至含水层顶部的长度; $h$  为静止状态下潜水含水层厚度; $L$  为含水层中滤管的长度; $A$ 、 $B$ 、 $C$  均为  $L/r_e$  的函数。

## 3 微水试验数据分析

### 3.1 微水试验计算结果

对潜水含水层试验井 SY1-1、承压含水层试验井 SY2-1 各进行 1 次降水水位微水试验,分别记录每次提水后水位随时间的恢复数据,利用上述数据分别采用适当的模型方法求解含水层渗透系数。

潜水含水层试验井 SY1-1 的静止水位为 0.87 m,初始时刻最大水位降深约为 0.30 m,试验周期约为 75 min,其水位降深变化曲线如图 2 所示。

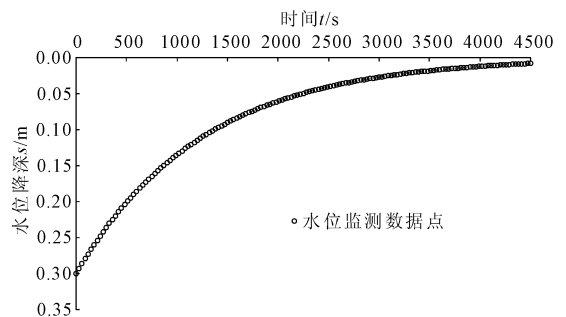


图 2 潜水含水层微水试验水位降深随时间变化过程

潜水含水层采用 Bouwer&Rice 模型求解,利用 Aquifer Test 中 Slug Test 模块的配线过程如图 3 所示,求得场地潜水含水层渗透系数为 0.209 m/d。

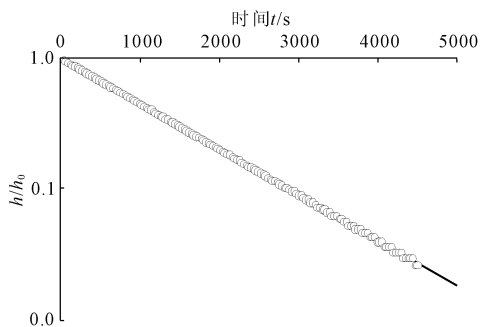


图 3 潜水含水层微水试验 Bouwer&Rice 模型  $h/h_0 - t$  曲线

承压含水层试验井 SY2 - 1 的静止水位为 -2.37 m,初始时刻的最大水位降深约为 0.64 m,试验周期为 10 min,水位降深变化曲线如图 4 所示。

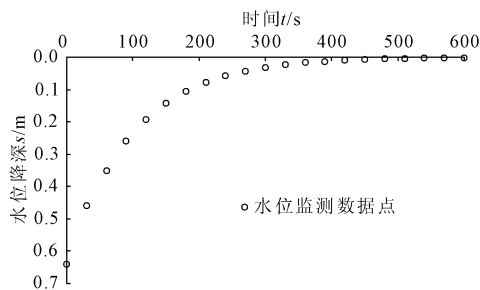


图 4 承压含水层微水试验水位降深随时间变化过程

承压含水层采用 Hvorslev 模型和 Cooper 模型求解,同样利用 Aquifer Test 中 Slug Test 模块的配线过程如图 5、图 6 所示,求得场地承压含水层渗透系数分别为 3.350 m/d、5.030 m/d。

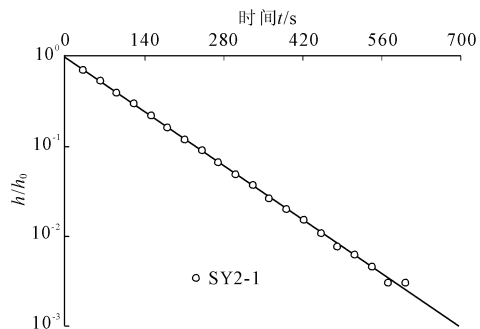


图 5 承压含水层微水试验 Hvorslev 模型  $h/h_0 - t$  曲线

### 3.2 数据分析

为对比微水试验结果的准确性,在不同含水层同一井中各进行 1 次带 2 个观测井的定流量抽水试验,并引用“相对偏差”的概念量化两种方法计算结果的差异,相对偏差为两种计算结果差与和之比的

绝对值。潜水含水层抽水试验稳定抽水量约为 25.34 m<sup>3</sup>/d,抽水井 SY1 - 1 最大水位降深为 5.73 m,观测井 SY1 - 2、SY1 - 3 最大水位降深分别为 2.63 m、1.53 m,抽水时长约为 46 h。承压含水层抽水试验稳定抽水量约为 87.41 m<sup>3</sup>/d,抽水井 SY2 - 1 最大水位降深为 6.06 m,观测井 SY2 - 2、SY2 - 3 最大水位降深分别为 3.01 m、1.91 m,抽水时长约为 45 h。潜水含水层及承压含水层均采用 Dupuit 稳定流公式计算渗透系数,结果如表 3 所示。

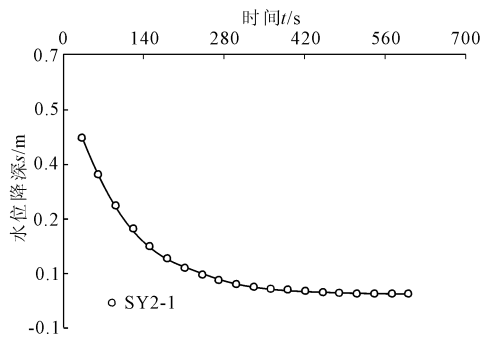


图 6 承压含水层微水试验 Cooper 模型  $s - t$  曲线

表 3 抽水试验、微水试验渗透系数统计结果

含水层类型	渗透系数/(m · d <sup>-1</sup> )		相对误差/%
	抽水试验	微水试验	
潜水含水层	0.223	0.209 (Bouwer&Rice 模型)	3.24
承压含水层	3.507	3.350 (Hvorslev 模型)	2.29
		5.030 (Cooper 模型)	17.84

由表 3 可以看出,潜水含水层微水试验 Bouwer&Rice 模型计算结果较抽水试验偏小,相对误差为 3.24%。承压含水层微水试验 Hvorslev 模型计算结果较抽水试验偏小,相对误差为 2.29%,Cooper 模型计算结果较抽水试验偏大,相对误差为 17.84%。

潜水含水层微水试验的试验井 SY1 - 1 中最大水位变化为 0.30 m,承压含水层微水试验的试验井 SY2 - 1 中最大水位变化为 0.64 m,水位变化远小于抽水试验的试验井水位变化值 5.73 m、6.06 m。潜水含水层、承压含水层微水试验的试验周期分别为 75 min、10 min,相较于抽水试验周期 46 h、45 h 较小。同时,潜水含水层、承压含水层微水试验均未对周边观测井中的水位产生影响。

## 4 结论及建议

(1) 相较于抽水试验,微水试验周期短、操作简便,是一种较为经济、快速确定含水层渗透系数的现

场试验方法。

(2) 利用 Bouwer&Rice 模型分析潜水含水层微水试验数据求得的渗透系数与抽水试验计算结果相比误差小,结果准确。

(3) 利用 Hvorslev 模型分析承压含水层微水试验数据求得的渗透系数与抽水试验计算结果的相对误差远小于 Cooper 模型, Hvorslev 模型计算结果更为准确。

(4) Bouwer&Rice 模型、Hvorslev 模型的计算结果均较抽水试验偏小, Cooper 模型较抽水试验偏大, 与林广宇等的研究结论基本一致。

由于周期有限,本次研究工作未进行不同降深、不同流量的重复微水试验,如有条件建议在同一试验井内针对不同降深和流量进行多次微水试验,对比不同激发强度对试验结果的影响,以便于为后期工程的实践应用提供依据。

#### 参考文献:

[1] 薛禹群,吴吉春. 地下水动力学[M]. 3 版. 北京:地质出版社,2010:15-17.

[2] 耿培刚,李志明,郭 嫄. 徐州地区含砂姜黏土层渗透特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(5):82-86.

[3] 肖先焯,张 强,蔡国军,等. 承压井抽水动态实验仪与地下水动力学实验教学[J]. 实验技术与管理,2020,37(12):112-117.

[4] 信亚雯,周志芳,马 筠,等. 基于现场双管试验确定弱透水层水力参数的方法[J]. 实验技术与管理,2019,40(4):1535-1542.

[5] 陈则连,原国红,赵丙君. 微水试验技术的应用研究[J]. 工程勘察,2009,37(7):31-34.

[6] 万伟锋,李清波,蔡金龙,等. 多孔均质含水层中激发强度对微水试验结果的影响[J]. 水文地质工程地质,2018,45(6):1-6.

[7] 李清波,万伟锋,蔡金龙,等. 基于物理模型试验的微水试验可靠性研究[J]. 人民黄河,2020,42(2):99-103.

[8] 吕连勋,王军辉,王 峰. 微水试验技术在临河沉积区渗透特性研究中的应用[J]. 工程勘察,2017,45(8):27-32.

[9] 万伟峰,李清波,曾 峰,等. 微水试验研究进展[J]. 人民黄河,2018,40(8):99-104.

[10] 林广宇,符亚兵,焦志亮,等. 微水试验方法在天津地区求取渗透系数应用对比分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(4):242-246.

[11] 梁世川. 基于 Aquifer Test 的含水层水文地质参数计算——以塔城市供水改扩建工程为例[J]. 地下水,2019,41(3):80-81.

[12] Hvorslev M J. Time lag and soil permeability in ground water observations, waterways[J]. Exper. Sta. Corps of Engrs, Bull., 1951,36(118):1-50.

[13] Cooper H H, Bredehoeft J D, Papadopulos I S. Response of a finite - diameter well to an instantaneous charge of water[J]. Water Resources Research, 1967,3(1):263-269.

[14] Bouwer H, Rice R C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells [J]. Water Resources Research, 1976,12(3):423-428.

(上接第 251 页)

[13] Hou S Z, Wang P, Guo Y, et al. Factors driving riverbed scouring and sedimentation in the Bayangaole to Toudaoguai reaches of the Upper Yellow River [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016,26(9):1305-1320.

[14] 侯素珍,王 平,刘晓燕,等. 孔兑洪水泥沙调控关键技术研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2017:103-110.

[15] 吴保生. 冲积河流平滩流量的滞后响应模型[J]. 水利学报,2008,39(6):680-687.

[16] Wu B S, Xia J Q, Fu X D, et al. Effect of altered flow regime on bankfull area of the Lower Yellow River, China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008,33(10):1585-1601.

[17] 李凌云,吴保生,侯素珍. 滞后响应模型在黄河内蒙古河段的应用[J]. 水力发电学报,2011,30(1):70-77.

[18] 郭 彦,林秀芝,侯素珍,等. 基于 EMD 和 BP 算法的降水数据插补[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2):16-21.