

# 微水试验方法在天津地区求取渗透系数应用对比分析

林广宇, 符亚兵, 焦志亮, 梁玉凯

(天津市勘察院, 天津 300191)

**摘要:**为解决天津地区微水试验求参方法应用过程中计算参数可靠性分析问题,通过开展现场微水试验-抽水试验,以及参考室内土工试验结果,对其进行分析,研究表明:微水试验方法采用 Hvorslev 模型、Bouwer&Rice 模型计算渗透系数,对天津地区含水层特性及现有成井工艺适用性相对较好,具有推广应用的可行性;采用 Bouwer&Rice 模型计算的渗透系数略低于抽水试验裘布依公式计算结果,采用 Hvorslev 模型计算的渗透系数略高于抽水试验裘布依公式计算结果,但抽水试验与微水试验两种方法获得的渗透系数相对偏差小于 10%,可见天津地区微水试验在一定条件下可替代抽水试验快速求取渗透系数,具有一定可靠性。

**关键词:**天津地区;微水试验;渗透系数;土工试验

**中图分类号:** P641

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672—1144(2020)04—0242—05

## Comparative Study on the Application of Slug Test Method for Permeability in Tianjin

LIN Guangyu, FU Yabing, JIAO Zhiliang, LIANG Yukai

(Tianjin Institute of Geotechnical Investigation Survey, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of reliability analysis of parameters calculation in the application of slug test in Tianjin, a comparative study of field test between pumping test and slug test was carried out by indoor geotechnical test. The results show that: in Tianjin area the slug test which adopt Hvorslev model and Bouwer&Rice model to calculate the hydraulic conductivity can adapt the characteristics of aquifer and the applicability of existing well completion technology, therefore it is a method with great feasibility and can be very popular in application; the calculated value of hydraulic conductivity of pumping test is generally higher than that of Bouwer&Rice model and lower than that of Hvorslev model, and the relative deviation between the calculated value of hydraulic conductivity from pumping test and slug test is relatively small, which is generally lower than 10%. It can therefore conclude that the slug test in Tianjin area can replace the pumping test to get the hydraulic conductivity quickly under certain conditions.

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

在水文地质调查工作中常采用抽水试验方法求取含水层渗透系数,但对于某些工程或项目,存在试验周期、试验期间电力供应、出于环境安全考虑不宜大量抽汲地下水等限制,微水试验便是这一情景下解决求取渗透系数问题的一种替代方法。微水试验是一种快速求取含水层渗透系数的现场原位试验方法。该试验方法的基本原理是采用瞬时向试验井

内注入或抽取一定水量方式,使井中水位瞬时上升或下降一定高度,通过观测水位随时间变化关系,从而计算渗透系数等水文地质参数<sup>[1-2]</sup>。微水试验方法具有便于野外实施、工作周期短、受场地条件限制小等优势,但目前在天津地区应用较少<sup>[3]</sup>。

Hvorslev 等学者于 20 世纪 50 年代首先应用此类试验方法,并在后续研究中对计算模型进行了完

善和修正<sup>[4]</sup>。截止目前,各国学者已经陆续提出了 50 余种非稳定流微水试验的数学求解模型,包含了承压水、非承压水、完整井、非完整井等多种条件下的渗透系数计算<sup>[5]</sup>。其中,常用的微水试验计算模型主要有 Hvorslev 模型、Bouwer&Rice 模型、Cooper 模型<sup>[6]</sup>。

国内自 20 世纪 80 年代以来陆续开展相关研究,对试验方法、试验原理、生产实践经验进行介绍,如国立中央大学(台湾)陈家洵<sup>[7]</sup>利用双封塞系统(Double Packers)开展了多深度试验在地下水污染原位治理中的应用研究。长春地质学院的宿青山等<sup>[8]</sup>较早开展了瞬时抽(注)水试验的计算方法和应用研究,但并未形成完善的操作程序和标准。近年来,国内对非稳定流微水试验的研究和应用显著增多。铁道第三勘察设计院于 2009 年研究开发了“地层渗透系数快速测定系统”,该系统可以完成现场数据采集、筛选、处理自动计算的全部工作<sup>[9]</sup>。河海大学和成都勘测设计研究院联合开发了“岩土体渗透性参数快速测试系统”<sup>[10]</sup>。中国地质大学于 2011 年在安徽某试验区进行了抽水试验和微水试验在求取参数上差别的研究<sup>[11]</sup>。河海大学季纯波等<sup>[12]</sup>通过注水高度对潜水含水层厚度的影响关系的推导,并结合室内变水头渗透试验和抽水试验结果,验证了应用此模型计算得出渗透系数的准确性。上述研究成果多针对细砂等粗颗粒含水介质进行,而天津地区由于其第四系滨海沉积环境特点,沉积物颗粒较细、渗透性相对较低,含水层主要由粉土、粉砂组成,适用性不确定,不同方法之间的对比研究和相关应用较少。

因此,本次研究针对上述试验方法,结合工程实践案例采用抽水试验和微水试验两种方法分别计算渗透系数,并利用统计学手段分析抽水试验、微水试验以及室内渗透试验成果数据,比较几种方法求取参数上的异同,分析推广应用的可能性、是否存在可指导生产实践的特定规律,揭示可能存在的问题。

## 1 研究区概况

本次研究结合天津地区的 10 个工程项目,以工程建设经常涉及、含水介质相似、径流条件相近的第 I、第 II 承压含水组的粉土、粉砂含水介质为试验研究目标层位。天津地区该主要含水层自上而下按照时代成因及地层编号依次为:全新统下组陆相冲积层(Q<sub>4</sub><sup>1</sup>al)粉土、粉砂(地层编号③<sub>2</sub>);上更新统第五组陆相冲积层(Q<sub>3</sub><sup>6</sup>al)粉土、粉砂(地层编号⑨<sub>2</sub>);上更新统四组海相滨海-潮汐带相沉积层(Q<sub>3</sub><sup>d</sup>mc)粉

土、粉砂(地层编号⑩<sub>2</sub>);上更新统第三组陆相冲积层(Q<sub>3</sub><sup>6</sup>al)粉土(地层编号⑪<sub>2</sub>)、粉砂(地层编号⑫<sub>4</sub>)。埋深一般介于 20 m ~ 50 m,各含水层之间由黏土、粉质黏土等构成相对隔水层,天然状态下,垂直方向上的水力联系较弱,各承压含水层的压力水头随季节变幅不明显。

## 2 试验原理及方法

### 2.1 试验原理与方法初步比选

通过对几种可替代抽水试验求取水文地质参数的试验方法进行比选分析,稳定流注水试验(常水头)结果通常显著偏小,试验水头不易实施控制、试验周期较长;而非稳定流试验具有周期较短、较易于实施的特点,但《水文地质手册》等工具书中传统的降水头试验计算公式对井结构缺乏必要的修正,因此,本次研究针对工程实践中易于实施、工作周期短、计算较为便捷的微水试验方法开展,使用 Cooper、Hvorslev、Bouwer&Rice 等考虑井结构影响因素的成熟计算模型,探讨其求取水文地质参数可靠性,如表 1 所示。

表 1 试验基本原理及方法比选

试验方法	类型	适用条件	工作周期	井结构	计算方法优劣
钻孔常水头注水试验	稳定流	适用于渗透性比较大的壤土、粉土、砂土和砂砾石层。	周期长	非完整井	仅采用形状系数 A 修正水流边界条件的影响,此外需获得含水层水平、垂向渗透系数,未对井结构导致的偏差进行修正。
钻孔降水头注水试验	非稳定流	适用于地下水位以下粉土、黏性土层或渗透系数较小的岩层。	周期短	非完整井、完整井	Cooper、Hvorslev 等计算模型对井结构参数导致的偏差有修正。
微水试验(本次研究)	非稳定流	适用于阻尼衰减(低渗透性)和欠阻尼衰减(高渗透性)含水层。	周期短	非完整井、完整井	Cooper、Hvorslev 等计算模型对井结构参数导致的偏差有修正。

本次对照试验组中,试验井均采用完整井结构。抽水试验采用可调式变频潜水泵,以便准确控制恒定流量抽水,单井抽水,设置 2 口观测井,进行稳定流三次降深抽水试验,采用自动水位记录仪,记录时间间隔为 1 min,渗透系数取三次降深试验数据计算的平均值。

微水试验利用上述建立的 3 口试验井,每井各进行 1 次试验,采用注水方式瞬时改变水位,根据井径计算水位瞬时抬升约 1.0 m 所需的水量,于 3 s ~ 5 s 内注入,形成瞬时水位抬升,采用自动水位记录

仪,记录时间间隔为 1 s。对于每组试验数据,分别采用 Hvorslev 模型、Bouwer&Rice 模型、Cooper 模型计算渗透系数。

## 2.2 微水试验计算方法

### 2.2.1 Cooper 模型

Cooper 等<sup>[13]</sup>在假设含水层均质、各向同性、侧向无限延伸的前提下,得出承压完整井的渗透系数等水文地质参数的计算公式:

$$H = H_0 F(\alpha, \beta) \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{r_s^2 S}{r_c^2} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{kbt}{r_c^2} \quad (3)$$

$$F(\alpha, \beta) = \frac{8\alpha}{\pi^2} \int_0^1 \frac{\exp(-\beta u^2)}{u f(u, \alpha)} du \quad (4)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (5)$$

$$f(u, \alpha) = [UJ_0 u - 2\alpha J_1 u]^2 + [uy_0 u - Z\alpha y_1 u]^2 \quad (6)$$

式中: $H_0$ 为试验初始时刻水位与静止水位之差的绝对值,m; $H$ 为水位变化值,m; $r_s$ 为过滤管半径,m; $r_c$ 为井管半径,m; $b$ 为含水层的厚度,m; $t$ 为时间,注水或取水瞬时为起始时间,d; $S$ 为含水层释水系数,无量纲; $K$ 为含水层渗透系数,m/d; $T$ 为含水层导水系数,m<sup>2</sup>/d。

实际工作中测得不同时刻的水位,计算得出与初始静止水位之差  $H_t$ ,初始时刻水位差记为  $H_0$ ,在半对数坐标系中绘制  $H_t/H_0 - \lg t$  关系曲线,记录相称点所对应时刻  $t$ ,可计算得出相关水文地质参数:

$$T = \frac{r_c^2}{t} \quad (7)$$

$$k = \frac{T}{b} \quad (8)$$

$$S = \frac{r_c^2}{r_s^2} \alpha \quad (9)$$

### 2.2.2 Hvorslev 模型

Hvorslev 等<sup>[14]</sup>按照试验井过滤管和含水层的位置关系分别给出以下计算模型,用以计算承压完整井和承压非完整井条件下的渗透系数。

(1) 试验井过滤段紧邻隔水层:

$$K_r = \frac{r_c^2}{2LT_L} \ln \left( \frac{L}{r_{we}} + \sqrt{1 + \left( \frac{L}{r_{we}} \right)^2} \right) \quad (10)$$

(2) 试验井过滤段位于含水层中部:

$$K_r = \frac{r_c^2}{2LT_L} \ln \left( \frac{L}{2r_{we}} + \sqrt{1 + \left( \frac{L}{2r_{we}} \right)^2} \right) \quad (11)$$

(3) 试验井为完整井:

$$K_r = \frac{r_c^2 \ln \left( \frac{R}{r_{we}} \right)}{2LT_L} \quad (12)$$

式中: $K_r$ 为渗透系数,m/d; $r_{we}$ 为试验井过滤段的有效半径,m; $r_c$ 为试验井管半径,m; $L$ 为自然条件下含水层中过滤管的长度,m; $T_L$ 为基本时间间隔(即  $h_t/h_0 = 0.37$  时对应的时刻),d; $R$ 为影响范围,近似等于 200 倍的过滤段有效半径,m。

### 2.2.3 Bouwer&Rice 模型

Bouwer 等<sup>[15]</sup>提出了适用于含水层过阻尼情况下的半解析、针对无压完整井和无压非完整井的计算模型。Bouwer 经过后续研究发现,除过滤管顶部距离含水层边界很近的情况外,之前提出的模型亦可用于计算承压含水层渗透系数。

$$K = \frac{1}{t} \frac{r_c^2 (\ln R - \ln r_{we})}{2L} \ln \frac{h_0}{h_t} \quad (13)$$

其中影响半径  $R$  计算公式如下:

(1) 非完整井的影响半径为:

$$\ln \frac{R}{r_{we}} = \left[ \frac{1.1}{\ln \frac{b}{r_{we}}} + \frac{A + B \ln(h-b)r_{we}}{\frac{L}{r_{we}}} \right]^{-1} \quad (14)$$

(2) 完整井的影响半径为:

$$\ln \frac{R}{r_{we}} = \left[ \frac{1.1}{\ln \frac{b}{r_{we}}} + \frac{C}{\frac{L}{r_{we}}} \right]^{-1} \quad (15)$$

式中: $H$ 为天然状态下含水层的厚度,m; $b$ 为过滤管底部至含水层顶部距离,m; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 均为  $L/r_{we}$  的函数,无量纲。

## 3 试验结果分析

### 3.1 计算结果初步分析

经过对各种试验计算方法结果初步统计分析(见图 1),采用 Cooper 模型的渗透系数计算值虽然总体高低值趋势与其他方法一致,但偏离普遍较大,可见其对天津地区承压含水层的特点及现有成井工艺适应性较差,且计算过程中需人为调整适配曲线,对计算结果有一定影响。因此,本文后续关于微水试验的讨论主要针对 Hvorslev 模型、Bouwer&Rice 模型两种计算方法进行,二者计算值较为接近,分析过程中取二者平均值作为微水试验方法求解渗透系数的代表值。

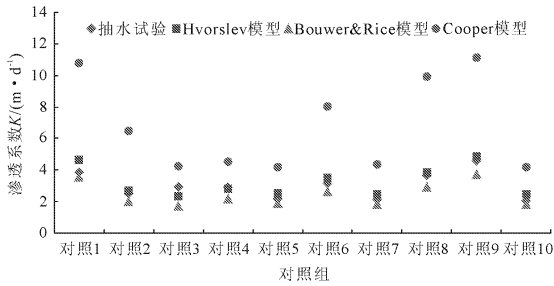


图 1 各种试验计算方法获得的渗透系数

### 3.2 抽水试验 - 微水试验渗透系数对比分析

为考察微水试验、抽水试验两种方法求取渗透系数的差异性,采用“相对偏差”这一指标量化评价两种方法获得结果之间的差异,相对偏差即为二者之差比上二者之和的绝对值,计算统计结果如表 2、图 2 所示。

表 2 渗透系数计算值对比结果

对照组	渗透系数 $K/(m \cdot d^{-1})$		相对偏差 /%
	抽水试验	微水试验	
对照组 1	3.82	4.12	3.78
对照组 2	2.54	2.38	3.25
对照组 3	2.91	2.05	17.34
对照组 4	2.90	2.50	7.41
对照组 5	2.20	2.23	0.68
对照组 6	3.15	3.08	1.12
对照组 7	2.10	2.16	1.41
对照组 8	3.69	3.37	4.53
对照组 9	4.60	4.32	3.14
对照组 10	2.07	2.17	2.36

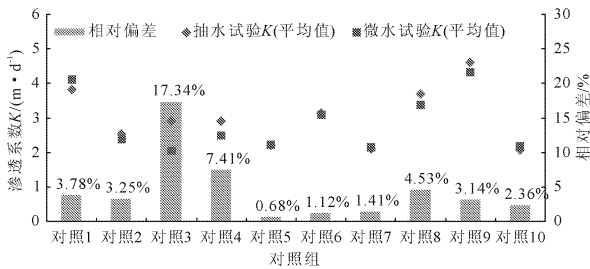


图 2 渗透系数计算值及相对偏差

微水试验、抽水试验的渗透系数计算值对照组 3 较为异常,相对偏差达到 17.34%,而其他对照组的相对偏差普遍介于 0.68% ~ 7.41% 之间,总体上差异小于 10%。

### 3.3 室内试验渗透系数对比分析

本次研究通过收集资料,获得了各对照组所在场地岩土工程勘察报告中相应含水介质的室内土工试验渗透系数成果,为便于分析比较,将室内土工试验获得的渗透系数单位统一换算至单位  $m/d$ 。室内

土工试验渗透系数统计结果如表 3 所示。

表 3 抽水试验、微水试验、土工试验渗透系数统计结果

对照组	渗透系数 $K/(m \cdot d^{-1})$		
	抽水试验	微水试验	土工试验
对照组 1	3.82	4.12	0.238
对照组 2	2.54	2.38	0.017
对照组 3	2.91	2.05	0.036
对照组 4	2.90	2.50	0.441
对照组 5	2.20	2.23	0.083
对照组 6	3.15	3.08	0.346
对照组 7	2.10	2.16	0.476
对照组 8	3.69	3.37	0.242
对照组 9	4.60	4.32	0.259
对照组 10	2.07	2.17	0.069

为初步分析数据统计特征,同时为后续充实研究提供统计分析的思路,本次研究以现有数据为基础,对所有抽水试验 - 室内土工试验对照组渗透系数倍数关系计算 95% 置信区间的下限为 3.17,上限为 67.37,考虑到对照组 2、对照组 3 数据明显异常,剔除异常数据样本后,计算 95% 置信区间下限为 8.10,上限为 23.33,如表 4 所示。

表 4 抽水试验 - 室内试验渗透系数倍数关系统计分析结果

原始数据			剔除异常数据		
样本数据	计算指标	计算结果	样本数据	计算指标	计算结果
16.05	样本数据个数	10.00	16.05	样本数据个数	8.00
146.99	样本均值	35.27	—	样本均值	15.71
80.00	样本标准差	44.87	—	样本标准差	9.11
6.58	抽样平均误差	14.19	6.58	抽样平均误差	3.22
26.47	置信水平	0.95	26.47	置信水平	0.95
9.11	自由度	9.00	9.11	自由度	7.00
4.41	$t$	2.26	4.41	$t$	2.36
15.25	误差范围	32.10	15.25	误差范围	7.61
17.75	置信下限	3.17	7.75	置信下限	8.10
30.06	置信上限	67.37	30.06	置信上限	23.33

对所有微水试验 - 室内土工试验对照组渗透系数倍数关系计算 95% 置信区间下限为 3.19,上限为 60.68,剔除异常数据样本后,计算 95% 置信区间下限为 7.60,上限为 23.73,如表 5 所示。

## 4 结论及建议

### 4.1 结论

通过本次研究工作,得出以下主要结论:

(1) 通过本次对比试验研究和验证,对微水试验获得的观测数据采用 Hvorslev 模型、Bouwer&Rice 模型计算渗透系数,对天津地区含水层特性及现有

成井工艺适用性较好,具有推广应用的可行性;而采用 Cooper 模型计算获得渗透系数明显高于抽水试验,这也与前人相关研究结论较为一致。

表 5 微水试验 - 室内试验渗透系数倍数关系统计分析结果

原始数据			剔除异常数据		
样本数据	计算指标	计算结果	样本数据	计算指标	计算结果
17.30	样本数据个数	10.00	17.30	样本数据个数	8.00
137.59	样本均值	31.93	—	样本均值	15.67
56.43	样本标准差	40.18	—	样本标准差	9.65
5.66	抽样平均误差	12.71	5.66	抽样平均误差	3.41
26.83	置信水平	0.95	26.83	置信水平	0.95
8.92	自由度	9.00	8.92	自由度	7.00
4.54	$t$	2.26	4.54	$t$	2.36
13.91	误差范围	28.74	13.91	误差范围	8.07
16.65	置信下限	3.19	16.65	置信下限	7.60
31.51	置信上限	60.68	31.51	置信上限	23.73

(2) 由于试验方法本身的影响范围较小,实际应用时需注意地层分布的均匀性和稳定性,在地层分布差异较大的场地应用时,应分别在具有代表性的区域布设试验点,以保证场地水文地质参数获得的科学性和合理性以及代表性。

(3) 采用 Hvorslev 模型和 Bouwer&Rice 模型计算得出的渗透系数与抽水试验方法计算得出的渗透系数较为接近,微水试验两种模型计算的平均值与抽水试验计算值的相对偏差介于 0.68% ~ 7.51% 之间,小于 10%。

(4) 通过现场试验与室内土工试验获得的渗透系数进行对比分析,抽水试验、微水试验的渗透系数计算值一般为室内土工试验结果的约 8 倍 ~ 24 倍,产生此种差异的原因从地层沉积特性、各种方法特点、实施过程等方面分析,主要由于:① 地层本身非均质性;② 现场取样、室内试验过程人为因素影响(包括取样位置、运输条件、放置时间、试样选取等);③ 室内试验和现场试验之间“尺度效应”的影响(主导作用),导致结果存在较为明显差异,但二者之间的倍数关系总体规律可作为生产实践参考。

## 4.2 建议

(1) 由于区域微水试验实践经验较少,单独使用一种方法可能导致求参偏离,实际应用中可选择 Hvorslev 模型和 Bouwer&Rice 模型计算渗透系数共同作为参考。

(2) 由于研究周期内承担的抽水试验工程有限,截至本次研究工作完成时只进行了 10 组对照试验,如有条件建议在更多工程中重复上述试验内容,以求所发现的规律更具有代表性和统计意义。

## 参考文献:

- [1] 沈珍瑶,谢彤芳. 确定含水层渗透系数的微水试验法[J]. 地下水,1994(1):4-5.
- [2] 黄勇,周志芳,王锦国. 低渗透性含水层水文地质参数确定方法及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2006,34(6):672-675.
- [3] 林广宇,符亚兵,焦志亮,等. 天津地区非稳定流试验求参对比研究[J]. 地下水,2019,41(5):77-79.
- [4] 张昌新. 基于 Hvorslev 模型的微水试验应用[J]. 铁道勘察,2016,42(2):16-20.
- [5] 陈则连. 水文地质试验技术应用研究[J]. 铁道勘察,2009,35(1):40-45.
- [6] 原国红,马琳. 水文地质参数自动监测处理系统的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(4):834-834.
- [7] 陈家洵. 地下水污染原位整治的瓶颈与对应[J]. 中工高雄会刊,2009,17(2):46-52.
- [8] 宿青山,王占兴. 用瞬时模拟抽水试验确定水文地质参数[J]. 长春地质学院学报,1983(4):61-71.
- [9] 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.
- [10] 徐海洋,周志芳. 岩土体渗透性参数现场快速测试系统应用[J]. 勘察科学技术,2011(5):26-29.
- [11] 鞠晓明,何江涛,王俊杰,等. 抽水试验与微水试验在确定水文地质参数中的对比分析[J]. 工程勘察,2011,39(1):51-56,63.
- [12] 季纯波,陈亮,赵小龙,等. 关于一种潜水井裸井 slug 数学模型的探讨及实证[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(2):67-70.
- [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] 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.
- [15] 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.