

给水度测定仪设计*

赵延风 王正中 刘计良

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 针对目前原状土测定给水度方法存在较大误差,设计了一种原状土给水度测定仪,并提出新的测试思路及其计算方法。首先设计了给水度测定仪的结构及其操作过程,然后在分析土体入渗过程和释水过程的基础上,根据给水度定义,对给水度的计算公式进行推导,得到了用介质和渗透液的物理性质指标表述的给水度计算公式。分析结果及实例计算表明,原状土给水度测定仪测定过程简单,渗流过程与实际流态相近,公式计算结果准确。

关键词: 地下水资源 给水度 原状土 测定仪

中图分类号: S152.7; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)09-0069-05

Design of Determinator for Specific Yield

Zhao Yanfeng Wang Zhengzhong Liu Jiliang

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

Because the current methods for determining specific yield of undisturbed soil are not precise, aimed at designing a new determinator and proposing a new test idea and its calculation method, the research was conducted. First, the structure of a new determinator and its operational process for specific yield were proposed. Second, based on the analysis of infiltration and water release process of soil and the definition of specific yield, the formula presented by physical property parameters of medium and penetration liquid was obtained for computation of specific yield. The analysis results and examples indicated that the determination process of the determinator designed is simple. The seepage process was approximately the same as the practical flow pattern, and the formula has high accuracy.

Key words Groundwater resources, Specific yield, Undisturbed soil, Determinator

引言

在地下水资源评价、动态预报中经常遇到计算水量的问题,对于某一区域地下水资源量的计算必然涉及到给水度值的选取,给水度值选取直接关系到水量计算的准确程度。早在20世纪80~90年代,土壤水专家对土壤给水度就已做过深入研究,取得了重要成果^[1~4];之后,很多学者也做了大量的研究工作^[5~11],归纳起来,给水度确定的方法主要有抽水试验配线法、漏斗疏干法、地下水动态资料推求给水度和原状土取样释水试验测定等方法,这些方法在具体操作时存在较大的误差,造成较大误差的

影响因素分别是:①抽水试验配线法由于泰斯公式假定条件较多,实际条件很难达到理想化的要求,因此误差较大。②漏斗疏干法的抽出水量有部分水量来自漏斗区以外。③地下水动态资料推求借助潜水蒸发经验公式,由于观测的潜水蒸发资料与自然条件的蒸发状况并不相同而造成较大误差。④原状土取样释水试验测定,由于注水后的土样和真实地层水流运动状态不完全相同(土样未经过渗流过程),排出的水量不易准确测到,再者取土环刀体积相对较小,造成较大误差。

针对原状土取样释水试验测定方法,提出一种新的测试思路,在对原状土取样释水试验测定法的

收稿日期:2010-10-13 修回日期:2011-01-25

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2002AA62Z3191)和陕西省农业科技创新项目(2011NXC01-20)

作者简介:赵延风,副研究员,主要从事地下水开发利用及工程水力学研究,E-mail: zhyf2009@yahoo.cn

基础上,研制一种给水度测定仪,对仪器构造以及测试方法进行更新。常规的测试方法是给原状土体注水饱和,然后排水,用排出的重力水体积与土体体积的比值计算给水度。本文是在注水饱和后模拟实际地层水流运动,然后排水,不需要记录排水量,只测定释水后土体的一些物理性质指标进行计算,实现对原状土给水度进行精确测试。

1 给水度测定仪结构

给水度测定仪主要部件由带手把的土样筒、与土样筒直径相同的顶筒和底桶、锁扣、橡胶密封圈、自动供水桶组成,装置示意图如图1所示。土样筒尺寸为:10 cm(直径)×25.465 cm(深度),其容积为2 000 cm³(或 $\phi 10$ cm×19.099 cm,其容积为1 500 cm³)。土样筒和顶筒、底桶对接,分别用锁扣连接,环内衬橡胶密封圈止水。供水桶尺寸为:5 cm(直径)×60 cm(深度),标尺“0”点距桶顶5 cm。由土样筒和供水桶直径可知,当供水桶标尺水位下降1 cm时,供水桶补给到土样筒的水量平铺到土样筒截面上的水深为0.25 cm。底桶深5 cm,顶筒深8 cm。供水连接管12为内径5 mm软管,排水管4、进水口11、供水口13、加水口17、通气孔20均为内径5 mm的圆管。

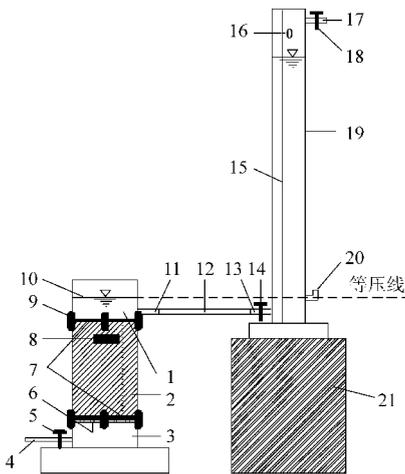


图1 给水度测定仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of determinator for specific yield

1. 顶筒 2. 土样筒 3. 底桶 4. 排水管 5. 排水阀 6. 透水隔板 7. 橡胶密封圈 8. 土样筒手把 9. 锁扣 10. 等压水位标记 11. 进水口 12. 供水连接管 13. 供水口 14. 供水阀 15. 水位标尺 16. 标尺“0”刻度 17. 加水口 18. 加水阀 19. 自动供水桶 20. 通气孔 21. 供水桶底座

2 测试步骤

2.1 取原状土

测定给水度的区域取原状土土样时,在现场直

接用带把土样筒($\phi 10$ cm×25.465 cm)分层取样,或者在现场取20 cm×20 cm×30 cm土样,用塑料纸包裹(防止土体内水分蒸发),带回实验室再用土样筒装样。装完土后将土样筒两头多余部分用削土刀削掉、削平,用塑料纸包裹待用。

2.2 土样筒安装

将土样筒安装到底桶上,根据需要依次可对接2个或3个土样筒,再将顶筒连上,土样筒两端均放置滤纸,防止土样粘连或在顶筒加水时冲散土样。

2.3 供水桶加水

将供水桶倒置并倾斜,使通气孔20位于倾斜方向的上面,关闭供水阀14,用胶管直接把水源龙头与加水口17相连,打开加水阀18以及水源龙头即可加水。加水时供水桶19内的空气从通气孔20排出,加水到桶内空间几乎被水充满时,关掉水源龙头及加水阀18,将供水桶放正,去掉加水胶管。通过微调加水阀18调整水位到0刻度,微调加水阀时,供水桶内0刻度以上多余的水量将从通气孔20排出。

2.4 供水

先用烧杯给顶筒内注水,再打开供水阀给顶筒内供水,让土样渗吸饱和并发生渗流现象,待稳定入渗2 h后关闭供水阀。

2.5 释水及称湿土质量

在供水口处将供水连接管卸掉,使顶筒内的水从供水连接管排出。底桶排水阀一直处于打开状态,用量筒观测底桶排水量的变化,隔一定时间间隔记录一次水量,如果水量不再增加,说明重力水已释放完毕。也可根据文献[4]结论,黄土在释水8.5 h后,即可认为重力水已释放完毕,此时即为释水过程的结束时刻,取下土样筒称其湿土质量。

2.6 干燥土样

将土样筒土样放入干燥箱,在105~110℃温度条件下干燥后称量。

2.7 计算给水度

根据排水末时刻的湿土质量以及最终的干土质量可以计算出土样的湿密度及土样干密度,在实验室测出土粒的相对密度,水密度由实测得到或者近似取为1 g/cm³,然后根据提供的计算公式直接计算土壤给水度。

3 测定仪工作过程分析

3.1 入渗过程分析

按照图1装置,用烧杯给顶筒注水至等压水位标记位置,打开供水阀,供水桶内的水将自动补给顶筒。当顶筒的水量进入到土样筒,在土体内毛管力

和顶筒水压力共同作用下开始入渗。首先在毛管力作用下出现向下运动的湿润峰,随着入渗时间的推移,土样筒内的土样从上至下逐渐渗吸饱和,当湿润峰到达土样筒底部的透水隔板,且土体内的水分达到毛管持水量时毛管力作用停止,此时仅在水压力作用下发生渗透。当土样筒有水渗出、底桶有水层出现,且供水桶在2个相邻时段内标尺上水位下降值相等时,说明土样已达到渗吸饱和状态并发生稳定渗流,该过程模拟了在定水头作用下土体非饱和入渗的全过程。达到稳定渗流后让其继续渗流2h,再次模拟饱和土体在定水头作用下的稳定渗流过程。

3.2 释水过程分析

关闭供水阀,排出顶筒内的水量。土样筒内的重力水开始释水,在重力水开始释水时,土体内的孔隙完全被水充满,即处于饱和状态,此时土壤含水量已超过土体内毛管悬着水的最大含水量(田间持水量),超过部分即为重力水。当土体含水量达到田间持水量以后,多余的水分不再被毛管力保持而受重力支配自由排出,但由于介质阻力等的作用使重力水不能瞬时释放,随着释水时间的延长,重力水逐渐脱离土体排出,最终达到重力水完全释放。在自然界,黄土含水层在释水过程中存在迟后排水就是这个原因,在释水过程的初期,单位时间内的释水量较大,在释水过程的中后期,单位时间内释水量越来越少。从以上分析还可以看出,给水度实际上是单位土体最大饱和含水量与重力水自由释放后土体持水量之差。

4 给水度计算公式

给水度是表示单位面积含水层中潜水位下降一个单位厚度时,由于含水层的疏干而释放出来的水量,是单位饱和土体在重力作用下自由释放出的水量。根据给水度的定义:给水度是单位体积饱和土体,在重力作用下能自由排出的水的体积与该土体体积之比,为一无量纲值,即

$$\mu = \frac{V_w}{V} \quad (1)$$

式中 μ ——给水度

V_w ——重力作用下自由释放的水体积, cm^3

V ——饱和土体的体积, cm^3

由文献[12]可知,在假设土体孔隙完全被水充满的条件下,含水土体的给水度与持水度之和等于土壤的孔隙率,即

$$n = \mu + \eta \quad (2)$$

式中 η ——土体持水度 n ——土体孔隙率

在式(2)两边同乘以水的密度 ρ_w 并移项

$$\mu\rho_w = n\rho_w - \eta\rho_w \quad (3)$$

由持水度的定义^[13]可知,饱和土体在重力作用下,土体内未能排出的水体积 V_h 与土体体积 V 的比值

$$\eta = \frac{V_h}{V} \quad (4)$$

在式(4)两边同乘以水的密度

$$\eta\rho_w = \frac{V_h\rho_w}{V} = \frac{m_h}{V} = \frac{m - m_s}{V} = \rho - \rho_d \quad (5)$$

即 $\eta\rho_w = \rho - \rho_d$ (6)

式中 m_h ——土体内重力水释放后剩余在土体内的水分质量, g

m ——单位体积内重力水释放后土体质量, g

m_s ——土体干燥后的质量, g

ρ ——土体湿密度, g/cm^3

ρ_d ——土体干密度, g/cm^3

而孔隙率可表示为^[13]

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{G_s\rho_w} \quad (7)$$

式中, G_s 为土粒的相对密度,无量纲,通常用比重瓶法测定;砂砾的相对密度为 2.65,黏粒的相对密度为 2.67 ~ 2.74 之间,黏粒土的平均相对密度为 2.70。

将式(6)、(7)代入式(3)得

$$\mu\rho_w = \left(1 - \frac{\rho_d}{G_s\rho_w}\right)\rho_w - (\rho - \rho_d) \quad (8)$$

对式(8)整理后,即得到给水度的直接计算式

$$\mu\rho_w = \rho_w + \rho_d - \frac{\rho_d}{G_s} - \rho \quad (9)$$

然而,理论给水度一般在实际工程应用中很难得到,都是用过程给水度^[4]近似代替理论给水度的办法,因此式(9)可变为

$$\mu_i\rho_w = \rho_w + \rho_d - \frac{\rho_d}{G_s} - \rho_i \quad (10)$$

式中 μ_i ——过程给水度,即在释水某一时段后的给水度

ρ_i ——重力水释水某一段时段后土体的湿密度, g/cm^3

5 应用举例

某井所在区域为潜水黄土含水层区域,地势平坦,地下水埋深 2 m,抽水井深 43 m,出水量为 $50 \text{ m}^3/\text{s}$,降深 9.5 m,影响半径为 92 m,水的密度取 $\rho_w = 1 \text{ g}/\text{cm}^3$,试求该区域埋深 2.5 m 范围附近潜水黄土含水层的给水度。

首先取回原状土,在距抽水井 10、20、30、40 m 处距离地面 2.5 m 处的疏干漏斗区取疏干原状土样,每个取样点通过人工开挖各取 2 个土样,其大小约为 20 cm × 20 cm × 30 cm,并进行编号 A 和 B,用塑料纸密封装箱带回实验室,装箱时箱体与土样接触的六面都要用柔软物镶实,以免土样在箱内晃动。

将取回的土样分为两组测定计算,A 组直接测定土样的物理性质指标计算给水度,计算结果列于表 1 中左半部分。B 组用给水度测定仪测定计算给

水度,将土样取出放到实验台上,用削土刀削平土样顶面,将土样筒垂直压入土内,一边压入土样筒一边用削土刀削掉土样筒外周边的多余土体,直到土样筒全部贯入土体,并顶部有约 3 ~ 5 mm 左右的土样伸出,然后用削土刀将土样筒底部和顶部削平,整个过程必须认真、细心完成,确保土样无断裂、扰动发生;再给土样筒上下面都放上滤纸,与底桶和顶筒连接,按照图 1 装置供水开始实验,达到稳定渗流 2 h 后释水,释水 8.5 h 后^[4],测得土样的物理性质指标列于表 1 中的右半部分。

表 1 实验室实测土样参数

Tab. 1 Parameters of soil samples tested in the laboratory

土样编号	样点距井距离 L/m	疏干漏斗区土体湿密度 $\rho_t/g \cdot cm^{-3}$	土体干密度 $\rho_d/g \cdot cm^{-3}$	土粒的相对密度 G_s	过程给水度 μ_t	土样编号	样点距井距离 L/m	注水-释水后土体湿密度 $\rho_t/g \cdot cm^{-3}$	土体干密度 $\rho_d/g \cdot cm^{-3}$	土粒的相对密度 G_s	过程给水度 μ_t
A_1	10	1.930	1.510	2.700	0.021	B_1	10	1.932	1.511	2.703	0.020
A_2	20	1.933	1.513	2.702	0.020	B_2	20	1.935	1.515	2.701	0.019
A_3	30	1.928	1.509	2.698	0.022	B_3	30	1.929	1.510	2.700	0.022
A_4	40	1.935	1.517	2.707	0.022	B_4	40	1.937	1.516	2.705	0.019

以编号 B_1 土样为例计算给水度。根据题意可知 $\rho_t = 1.932 g/cm^3$, $\rho_d = 1.511 g/cm^3$, $G_s = 2.703$, 水密度取为 $\rho_w = 1 g/cm^3$, 根据式(10)求得过程给水度 $\mu_t = 0.020$ 。

同样可求出其他土样的给水度,将 A、B 两组的计算结果同列于表 1 中。取 4 个土样的平均值作为该区域 2.5 m 深度范围附近的给水度,A 组土样给水度平均值为 0.021,B 组土样给水度平均值为 0.020,结果非常接近,但有差异。分析两组存在差异的原因主要是:在抽水 3 d 后取样,A 组是疏干漏斗区直接取样测定土壤的物理性质指标,完全是在地下水位下降、土体内重力水疏干后的取样测定;而 B 组则是疏干漏斗区取样再次注水-释水,释水 8.5 h 后测定土体的物理性质指标,与 A 组相比多了一次人为干扰(注水-释水)的过程,再者 B 组土样释水时间较短也是引起 B 组土样释水后湿密度普遍大于 A 组土样的原因,土体湿密度偏大给水度就偏小,这也符合给水度测定的一般规律。其实 A 组和 B 组的两种测试方法都是本文提出的,A 组是直

接测定计算,B 组则是用测定仪模拟水流入渗后测试计算的。

6 结束语

在分析目前原状土给水度测定方法的基础上,设计了给水度测定仪的结构及给水度测定的操作步骤;在分析土体入渗过程及释水过程的基础上,根据给水度的定义,从理论上推导出给水度的直接计算公式。该方法关注的是排水过程的结束并不关注排水量的多少,给水度测定仪及其计算方法的应用,为给水度的计算增添了一种新的途径,该方法从理论分析到计算公式的建立没有复杂的推导过程,其优点是:原状土给水度测定仪结构简单,容易制作,操作方便;测定给水度时,一般不需要关注注水饱和的过程以及释水量的多少,直接把释水后的土样及时送往实验室测定土体的湿密度、干密度及土粒相对密度即可;该仪器测定给水度模拟了实际地层回灌水流的渗透状态,包括在定水头作用下非饱和土体入渗和饱和土体渗流两种情况,与实际情况接近。

参 考 文 献

- 张蔚榛,张瑜芳. 土壤释水性和给水度数值模拟的初步研究[J]. 水文地质工程地质, 1983(5): 18 ~ 28.
- 雷志栋,谢森传,杨诗秀,等. 土壤给水度的初步研究[J]. 水利学报, 1984,15(5): 10 ~ 17.
Lei Zhidong, Xie Senchuan, Yang Shixiu, et al. The preliminary investigation of the specific yield[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984,15(5):10 ~ 17. (in Chinese)
- 张蔚榛,蔡美娟. 均质壤土给水度的室内试验和数值模拟[J]. 武汉水利电力学院学报, 1988(2): 1 ~ 11.

- Zhang Weizhen, Cai Meijuan. Numerical simulation and laboratory test for special yield of homogeneous soil [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1988(2): 1~11. (in Chinese)
- 4 李佩成. 黄土含水层给水度合理取值的研究[J]. 水利学报, 1999, 30(11): 38~41.
Li Peicheng. Study on rational determination of specific yield in aquifer of loess area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(11): 38~41. (in Chinese)
- 5 张家发. 地下水位匀速下降条件下层状非均质多孔介质给水度的初步研究[J]. 水利学报, 1988, 19(8): 9~17.
Zhang Jiafa. On the variation of specific yield in response to uniform fall of water table in stratified porous media [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 19(8): 9~17. (in Chinese)
- 6 张家发. 给水度概念和广义给水度变化规律的初步分析[J]. 长江科学院院报, 1991, 8(1): 63~69.
Zhang Jiafa. Specific yield concepts and laws on the generalized specific yield variation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1991, 8(1): 63~69. (in Chinese)
- 7 刘廷玺, 朱仲元, 王亚娟, 等. 给水度的变化机理及其试验分析[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 17~21.
Liu Tingxi, Zhu Zhongyuan, Wang Yajuan, et al. Variations mechanism and experimental analysis of specific yield [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2002, 23(2): 17~21. (in Chinese)
- 8 朱仲元, 贾德彬, 高瑞忠, 等. 推求潜水变幅带给水度 μ 的非稳定流公式法[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 26~29.
Zhu Zhongyuan, Jia Debin, Gao Ruizhong, et al. The unsteady flow formula method to calculate storage coefficient μ [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2002, 23(2): 26~29. (in Chinese)
- 9 高瑞忠, 朝伦巴根, 朱仲元, 等. 确定潜水含水层系统参数的 Boulton - RAGA 方法[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 23~26.
Gao Ruizhong, Chaolunbagen, Zhu Zhongyuan, et al. Boulton - RAGA method for identifying unconfined aquifer parameters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(6): 23~26. (in Chinese)
- 10 常安定, 李佩成. 用割离井公式反求水文地质参数的直线图解法[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 135~138.
Chang Anding, Li Peicheng. The flow jacob linear graphic method of converse calculating the hydrogeology parameters with the isolated-well formulas [J]. Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2006, 34(4): 135~138. (in Chinese)
- 11 王旭升. 可变给水度的潜水面运动方程[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 335~339.
Wang Xusheng. Equations of phreatic surface movement with variable specific yield [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 335~339. (in Chinese)
- 12 霍崇仁, 王禹良. 水文地质学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- 13 冯国栋. 土力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.

(上接第 68 页)

- 17 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 18 唐学林, 余欣, 任松长, 等. 固-液两相流体动力学及其在水力机械中的应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- 19 SL/T67. 1~67. 3—1994 微灌灌水器[S]. 1994.
- 20 ISO/TC 23/SC 18/WG5 N4: Clogging test methods for emitters[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2003.
- 21 Potter M C, Wiggert D C. Mechanics of fluids [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- 22 陈雪, 吴普特, 范兴科, 等. 灌水器迷宫流道结构参数数值模拟与抗堵塞分析[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(2): 35~38.
Chen Xue, Wu Pute, Fan Xingke, et al. Numerical simulation of structural parameters using CFD and anti-clogging design analysis on drip emitter [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(2): 35~38. (in Chinese)