

砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究

王文焰^① 张建丰 汪志荣 高岩

(西安理工大学水资源研究所)

提 要 根据土壤水的能量原理,对砂层在黄土中的阻水作用进行了室内一维土柱的入渗试验研究及教学模拟,结果表明:在黄土中设置砂层,不仅具有良好的阻水性,使下渗水流在一定限度内滞留于砂层以上的土体内,增加了上层土壤的持水能力;而且还具有减渗性,使下渗水量及入渗峰面的湿润速度明显减小,并且还可将下渗的非线性过程转化为线性过程,从而使整个入渗过程进入一个具有较小入渗率的稳渗阶段。该研究结果对在黄土地区采用设置砂层的方法,作为水利、建筑工程以及西北农村窑洞民居防渗、减渗的一项工程技术措施,提供了理论依据。

关键词 能量原理 入渗 阻水性 减渗性

Experiment and Study on Water-Tightness and Infiltration Reduction of Sand Layer in Loess Soils

Wang Wenyan Zhang Jianfeng Wang Zhirong Gao Yan

(Institute of Water Resources, Xian University of Technology)

Abstract Based on the energy theory of soil water, this paper deals with the effect of watertightness of sand layer in loess soils through the lab experiments on water infiltration into soil column as well as mathematical simulation. The results showed that sand layer set up in the loess soils is characterised not only by better water-tightness, which can make infiltration flow stay over sand layer in soil body to a certain limit extent so as to improve water retaining capacity in upper soil layer, but also by infiltration flow as well as the wetting velocity and also convert the non-linear process of infiltration into the linear process, thus resulting in the whole infiltration process to enter the stable infiltration stage with a smaller infiltration rate. Accordingly the results of this project have provided the theoretical base for the adoption of setting up sand layer in the loess soil in Northwest China as an important technical engineering practice for the infiltration prevention and reduction to water conservancy work and architectural engineering as well as cave-dwellings of the local inhabitants.

Key words Energy theory Infiltration Water-tightness Infiltration reduction

根据土壤水能量原理,水在一层状结构的土体内入渗时,无论夹层土壤的质地较表层土壤粗或细,土体内的夹层均会对下渗水流起到阻水的作用^[1~3]。虽然对于层状土壤水分运动

收稿日期:1993-06-04

① 王文焰,教授,博士生导师,西安市金花南路 西安理工大学 748 信箱,710048

规律的研究,国内外学者已做了不少工作^[4~7],但对砂层在黄土中的阻水性尚未见到系统研究的报告和论述。作者采用甘肃西峰黄土,通过在室内一维土柱入渗试验,对砂层的阻水性及减渗性进行研究,并对其进行了数学模拟。试验研究结果表明:砂层在黄土中不仅具有良好的阻水性,增加了上层土壤的持水能力,而且具有减渗性,它可以将入渗的非线性过程转化为线性过程,对减小黄土的入渗水量,降低入渗峰面的湿润速度有明显效果。因此本文在黄土地区采用设置砂层的方法,作为水利、建筑工程以及窑洞民居的一项防渗、减渗的重要工程技术措施,提供了理论依据。

1 试验材料

试验在室内采用扰动的甘肃西峰黄土(其颗粒组成 $<0.01\text{mm}$ 占24.1%, $<0.005\text{mm}$ 占14.7%)及三种不同粒径砂料进行,砂料的中值粒径分别为0.054、0.26及0.6cm。

试验土筒直径为11.8cm、高80cm。西峰黄土经处理过筛(2mm)按一定容重分层称重装入有机玻璃土筒。为便于对比不同粒级的砂层对入渗水流的阻水作用,各试验方案的砂层埋深均为35cm,厚度为10cm。

为研究砂层在黄土中的阻水性,试验将一定量的水注入土筒内,并加盖防止蒸发;待其土面的水全部渗入土内,采用 γ 透射法测量土柱的水分剖面,以了解砂层的阻水作用^[8]。

在砂层的减渗性研究中,试验采用积水入渗,积水深4cm,供水系统采用改进后的马氏瓶,同时用 γ 法测量不同时刻土壤水分剖面,并观测入渗峰位置,西峰黄土容重为 $1.35 \times 10^{-2}\text{N/cm}^3$,细、中、粗三种砂层容重均为 $1.65 \times 10^{-2}\text{N/cm}^3$ 。同时与容重为 1.45×10^{-2} 、 $1.55 \times 10^{-2}\text{N/cm}^3$ 的西峰黄土进行了对比试验。

2 砂层的阻水性

2.1 砂层阻水作用

在一定量的水注入土筒后,当下渗水流到达砂层上界面后,界面处含水量随着时间的延长出现突变。此后土壤水分进行再分布,界面以上将最终出现稳定的水分剖面。图1为细砂阻水层在注入不同水量的稳定土壤水分剖面变化图。

由图可见,砂层的存在增加了上层土体的持水能力,在下渗水流没有达到最大持水能力以前。砂层起到了阻止水流继续向下层渗流的作用。

2.2 砂层阻水能力

根据土壤水的能量概念,砂层的阻水能力以及上层土体的持水能力直接与双层结构的土、砂质地、容重与厚度有关。试验成果表明,在砂层埋深35cm及厚度10cm的相同条件下,细、中、粗砂层的阻水作用很接近,表1的资料为三种不同粒径的砂层,在注水1500mL后的

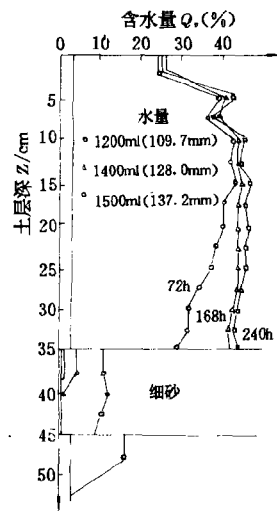


图1 细砂阻水层情况下的土壤水分剖面图

阻水能力的对比情况。

表1 不同粒径砂层的阻水能力对比

砂类	细砂	中砂	粗砂
上层土壤持水量/mL	1446.05	1479.21	1466.42
砂层持水量/mL	101.75	37.41	12.45
下层土壤持水量/mL	50.99		21.43
砂层上界面土壤含水量/(%)	42.24	41.77	41.31
上层土壤持水量占总水量的百分数/(%)	96.40	98.61	97.76
水分剖面测量误差/(%)	6.60	1.10	0.02

试验对比结果表明,砂层以上土体的持水能力有随干容重增加而减小的趋势(表2)。

表2 不同土壤容重的持水能力的对比

干容重 / $10^{-2} \text{ N} \cdot \text{cm}^{-3}$	加水量 /mL	上层土持水量 /mL	占加水量的百分数 /(%)	测量精度 /(%)
1.35	1500	1446.05	96.40	+6.6
1.45	1500	1355.92	90.39	-4.9
1.45	1600	1356.26	84.77	-5.6
1.55	1500	1298.37	86.56	-4.9
1.55	1600	1308.74	81.80	-5.8

3 砂层的减渗性

在黄土中设置砂层,它的作用不仅表现在增加了砂层以上的土体的持水能力,同时也反映在减小入渗量和降低下渗峰面的湿润速度上。

当入渗峰面未到达砂层之前,入渗水量的变化符合一般均质土的非线性变化过程(图2),经回归拟合表示式:

$$F = 41.626 T^{0.558} \quad (1)$$

式中 F 为累积入渗水量,mm; T 为入渗时间,h。相关系数 $r = 0.998$ 。

当入渗峰面到达砂层后,入渗水量开始减小,反映在累积入渗水量随时间变化曲线上出现明显转折,并转为线性变化(图2)。根据对中砂层埋深为25cm的试验表明,入渗时间最长达56.8h,试验点仍保持线性关系。由此可见,入渗峰到达砂层之后,入渗率不再随时间变化而开始进入稳渗阶段。

将不同砂层埋深情况下的累积入渗量出现转折时间 t_1 (即标志入渗开始进入稳渗阶段的时间),及其稳定入渗率 f , 的试验结果示于表3,可以看出:

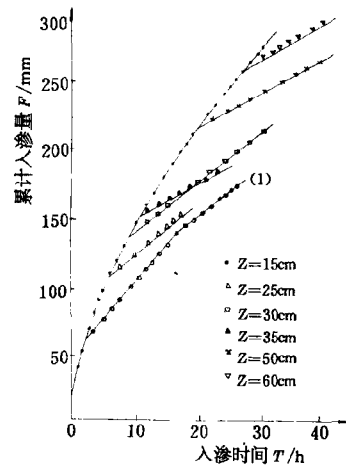


图2 细砂阻水层在不同埋深情况下累积入渗水量的时间变化关系

表 3 各试验方案 t_1 及 f_r 值

砂层埋深 Z/cm		15	25	30	35	50	60
细砂层 $d_{50}=0.054$	t_1/h	2.0	5.3	9.0	10.0	19.3	26.3
	$f_r/mm \cdot h^{-1}$	5.464	4.252	3.857	3.136	2.700	2.308
中砂层 $d_{50}=0.26$	t_1/h	2.0	5.5				
	$f_r/mm \cdot h^{-1}$	3.890	2.880				
粗砂层 $d_{50}=0.60$	t_1/h	2.2	5.2		10.3		
	$f_r/mm \cdot h^{-1}$	3.525	2.700		1.975		

注:1) 砂层厚度均为 10cm。 2) 砂层平均粒径 d_{50} 单位为 cm。

1) 时间 t_1 仅与砂层埋深 Z 有关,而与砂层的粒径关系不大。 t_1 随砂层埋深 Z 的增加而增大,二者关系经回归分析可用下式表示:

$$t_1 = 0.00946Z^{1.982} \quad (2)$$

式中 Z 为砂层埋深,cm; $r=0.993$ 。

2) 将式(1)对时间 T 求导,即可得出表示均质情况下入渗率 f 随时间的关系式

$$f = \frac{dF}{dT} = 23.227 T^{-0.442} \quad (3)$$

并以此式关系求出各试验方案开始进入稳渗阶段 t_1 时刻的瞬时入渗率 f (表 4),由表 3、4 可见,在砂层粒径一定情况下,进入稳渗阶段后的稳渗率 f_r 随砂层的埋深增加而减小,其减小程度,如以各稳渗率 f_r 与开始进入稳渗阶段 t_1 时刻的瞬时入渗率 f 的比值表示,则可以看出,对于细砂层其减低的变化范围在 0.32~0.43。而当砂层埋深相同时,其入渗率减小程度有随砂层粒径的增大而增加的趋势,反映在 f_r/f 比值上,由细砂变为粗砂其值可由 0.38 左右减至 0.23 左右。

表 4 各试验方案 t_1 和 η 值

砂层埋深 Z/cm		15	25	30	35	50	60	
	t_1/h	2.0	5.3	9.0	10.0	19.3	26.3	平均值
	$f/mm \cdot h^{-1}$	17.098	11.114	8.795	8.395	6.277	5.475	
细砂	f_r/f	0.320	0.383	0.439	0.374	0.430	0.422	0.386
	η	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
中砂	f_r/f	0.228	0.259					0.244
	η	0.71	0.68					0.695
粗砂	f_r/f	0.206	0.243		0.235			0.228
	η	0.64	0.64		0.63			0.637

3) 以细砂层的稳渗率 f_{r_0} 为依据,并将其它不同粒径砂层的稳渗率 f_r 进行对比,且将二者比值定义为 η ,即

$$\eta = f_r/f_{r_0} \quad (4)$$

则由表4可见,同一粒径砂层之 η 值较稳定,且有随砂层粒径变粗而减小的趋势。

如以平均粒径 d_{50} 表示不同砂层的粒径组成情况,且对表4各试验进行多元回归,即可得到下渗水流进入稳渗后的稳渗率 f_s 及砂层埋深 Z 的关系式:

$$f_s = \eta \cdot (11.613 - 2.296 \ln Z) \quad (5)$$

式中 $\eta = 0.561 d_{50}^{-0.193} \quad (6)$

4) 显然进入稳渗阶段后(即 $T > t_1$)的累积入渗水量 F 应等于 t_1 时刻前的非线性入渗过程的累积入渗水量 F_0 和 $(T-t_1)$ 时段内的稳渗过程累积入渗量 F_s 之和,即:

$$F = F_0 + F_s \quad (7)$$

式中 F_0 与 F_s 经变换分别为:

$$F_0 = 3.09 Z^{1.106} \quad (8)$$

$$F_s = \eta(11.613 - 2.296 \ln Z)(T - 0.00946 Z^{1.982}) \quad (9)$$

当在黄土中设置两个砂层时,入渗水流在经过两个砂层界面时,均会起到减渗作用,图2所示折线(1),即为在土面以下15cm及35cm处分别设置5cm和10cm厚的两个细砂层累积入渗水量的过程线,由图可见,下渗水流在到达第二砂层界面时,累积入渗量过程线再一次发生转折,使稳定率又一次减小。

此外,砂层埋设深度以及粒径组成情况对入渗峰面的湿润速度均有一定影响。图3为厚度5cm的细砂层在分别处于15、25及30cm不同位置时与均质土对比的入渗峰面深度 H 随时间的变化过程线。由图可见,当入渗峰面到达砂层上界面之后,由于砂层的阻水作用,增大了上层土体的持水能力,同时降低了入渗率,使通过砂层的下渗水量大为减少,因而表现在入渗峰面的湿润速度开始减低,湿润深度较均质土为浅,并有随时间的延续而与均质土的差距愈来愈大的发展趋势。同时,砂层埋深愈浅,其对入渗峰面的影响愈大。根据对细、中、粗砂三种不同粒径砂层的试验表明,随着砂层粒径由细变中,其对入渗峰面下移规律的影响作用在增大;但当砂层粒径由中变粗时,其影响作用基本稳定,各实测点基本落在同一曲线上。如当土体内设置两个砂层时,试验表明,其对入渗峰面下移规律的影响远大于一个砂层的情况。

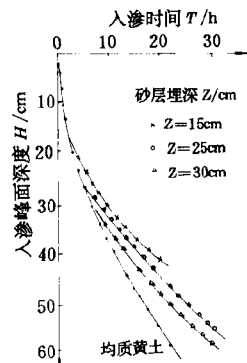


图3 细砂层在不同埋深情况下入渗峰面深度与时间的变化关系图

4 数值模拟

当前在非饱和土壤水分运动的定量研究中,愈来愈多地采用数学模拟方法,以上由试验所得砂层在黄土中的阻水及减渗特性,亦可由数值模拟方法得到同样结果。

本文所讨论的问题,实质是层状土壤中水分的入渗及再分布问题。因此在假定不考虑温度势的影响;各层土壤均质、各向同性;以及各层土壤水分运动参数的表达形式相同而有不

同系数值的情况下,可通过一维非饱和土壤水运动基本方程的定解进行数值模拟。

一维非饱和土壤水运动基本方程为

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial z} K(h) \quad (10)$$

式中 h 为吸力, cm; $C(h)$ 为土壤容水率, cm^{-1} ; $K(h)$ 为土壤导水率, cm/min 。

对式(10)在以下初始条件及边界条件下采用有限差分法进行数值求解。

$$h(z, 0) = h_0(z), t = 0$$

$$h(0, t) = h_a(z), z = 0$$

式中 h_a 为接近或饱和情况下土壤势值。

$$q(0, t) = 0 \quad \text{或} \quad K(h) \frac{\partial h}{\partial z} - K(h) = 0$$

$$h(L, t) = h_0(L), \quad z = L$$

各层水分运动参数为:

西峰黄土 ($\gamma_d = 1.35 \times 10^{-2} \text{N}/\text{cm}^3$):

$$K(h) = 1.861 \times 10^{-8} h^{-5.4341} \quad \text{cm}/\text{min}$$

$$C(h) = 0.12068 h^{-1.23367} \quad \text{cm}^{-1}$$

细砂 ($\gamma_d = 1.36 \times 10^{-2} \text{N}/\text{cm}^3$):

$$K(h) = 2.513 \times 10^{-7} h^{-3.8204} \quad \text{cm}/\text{min}$$

$$C(h) = 0.08104 h^{-1.46838} \quad \text{cm}^{-1}$$

在取时间步长 Δt 为 1min, 距离步长 Δz 为 1cm 时, 由数值模拟计算结果所得之不同时间 T 的土壤水分剖面及累积入渗水量 F 随时间 T 的变化过程, 与试验点吻合甚好(见图 4)。

5 结 语

根据土壤水的能量原理, 在黄土中设置砂层, 不仅具有良好的阻水性, 使土体的持水能力增加, 而且还具有减渗性, 使入渗率及入渗峰面湿润速度明显减小。从而使整个入渗过程进入稳渗阶段。这为采用此方法做为减渗、防渗的工程技术措施提供了依据。本文所得结果, 在采用这一工程技术措施进行设计及计算时有重要参考价值。

本文研究表明, 在取得不同质地的土壤和砂料的水分运动参数的实测数据基础上, 采用数学模拟的方法是进一步研究本课题的重要途径。

本试验仅对甘肃西峰黄土及三种不同粒径组成的砂层进行了研究, 对于同类别的土壤以及其它大孔隙的当地材料(如煤渣等)的阻水及减渗作用, 尚待进一步研究。此外对于砂层的存在, 使入渗的非线性过程转为线性过程的机理, 也有待进一步分析论述。

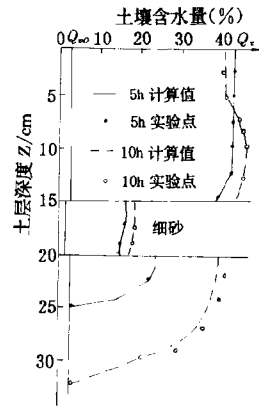


图 4 数值模拟计算与试验实测
土壤水分剖面对比图

参 考 文 献

- 1 姚贤良,程之生等编著. 土壤物理学. 北京: 农业出版社, 1986, 290~295
- 2 雷志栋等. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988, 223~231
- 3 D. 希莱尔著, 尉庆丰译. 土壤物理学概论, 1985
- 4 叶自桐. 用于分析有突变土层界面和水流峰面的非饱和土壤水运动的时间差分格式. 水利学报, 1987, (8).
- 5 王金平. 蒸发条件下层状土壤水分运动的数值模拟. 水利学报, 1989, 5
- 6 L D Moore, J D Eigel. Infiltration into two-layered soil profiles. Transactions of the ASAE, 1981 1496~1503
- 7 R J Hanks and S A Bowers. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soils. Soil Soc Am Proc, 1962, 530~534
- 8 王文焰, 张建丰. 室内一维土柱入渗试验装置系统的研究及应用. 土壤学报, 1991, 28(4): 447~451