

积水入渗稳定时近饱和土中封闭气泡含量试验研究

吴争光¹, 张 华²

(1. 深圳市岩土工程有限公司, 广东 深圳 518028; 2. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 含有与大气不相连通的封闭气泡且饱和度接近100%的土体称为近饱和土体。通过室内土柱一维积水入渗模型试验, 研究了入渗稳定时土壤类型、干密度和初始含水率对近饱和土体中封闭气泡的含量以及气相逸出率的影响, 分析了3种影响因素对封闭气泡体积的影响趋势和影响机理。试验结果表明: 土样孔隙中封闭气泡的体积随土样干密度的增大而减小; 当土样初始含水率超过某一临界含水率时, 土样孔隙中封闭气泡的逸出随初始含水率的增加显著减少; 由于黏性土达到渗流稳定需要的时间较砂性土长, 因而砂性土的气相逸出率要明显小于黏性土的气相逸出率。通过试验揭示了实际土体入渗中的一些物理现象, 为更好地理解土壤入渗过程和建立数值模拟模型提供了试验数据。

关键词: 近饱和土; 封闭气泡; 积水入渗; 试验研究

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)02-0274-06

作者简介: 吴争光(1985-), 男, 硕士, 主要从事非饱和渗流和边坡稳定性分析、基坑支护设计与研究工作。E-mail: wuzg0918@163.com。

Experimental study on entrapped air content in quasi-saturated soil subjected to steady ponded water infiltration

WU Zheng-guang¹, ZHANG Hua²

(1. Shenzhen Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518028, China; 2. China Three Gorges University, Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China)

Abstract: The quasi-saturated soil is defined as a soil with entrapped air and saturation close to 100%. A series of one-dimensional ponded water infiltration tests are designed and conducted in laboratory. The influence factors of entrapped air content in the quasi-saturated soil, such as soil types, dry density and the initial water content, are studied. The influence mechanisms are analyzed and discussed. The results show that the volume of entrapped air decreases as dry density increase; the escape of entrapped air is more difficult when the initial water content increases above a critical water content; the escape ratio of entrapped air in sand is smaller than that in clay because of the relatively longer time to reach stable state of infiltration for the clay. Some physical phenomena in real soil infiltration are shown. The results provide test data for better understanding of soil infiltration process and numerical modelling.

Key words: quasi-saturated soil; entrapped air; ponded water infiltration; experimental study

0 引言

入渗是水分进入土壤的过程, 是自然界水循环中的一个重要环节。水文学研究地表产流问题, 农田水利学中研究灌溉或降雨后土壤水分分布问题, 水资源评价中研究降雨对浅层地下水的补给问题, 农业及环境学研究化肥、农药及污染物随水分迁移问题等, 都要涉及到土壤水分入渗^[1]。而水分在进入土壤的过程中, 土壤孔隙空气占据的孔隙体积逐渐减少, 部分气体在水相流动的驱动下被排出土体之外, 部分气体溶解到水中被带走, 另一部分气体则被封闭在土壤孔隙中形成封闭气泡^[2-3]。含有与大气不相连通的封闭气泡且饱和度接近100%的土体称为近饱和土体^[4]。封闭气

泡的存在阻碍了水相的流动, 使土体的渗透性能降低, 从而对土体的入渗能力产生不可忽视的影响^[5]。因此, 研究在积水入渗过程中土壤孔隙内的封闭气泡含量及其影响因素, 有利于更清楚的了解水在土壤中的入渗过程, 对岩土工程、农业灌溉和水资源评价具有重要的指导意义。

国内外关于封闭气泡的研究表明, 封闭气泡的含量与土样的种类、干密度、初始含水率及土样的饱和方式有关, 但大多只涉及到某种初始条件下(比如某干密度, 或是某初始含水率)封闭气泡在土样中的大

致存在范围, 对于土样的种类、干密度和初始含水率对封闭气泡含量的影响趋势缺少一定的试验研究, 其影响机理的分析也不多见^[6]。

本文基于室内一维积水入渗试验, 初步研究了入渗稳定时土样的性质、初始干密度和初始含水率对近饱和土体中的封闭气泡的体积及逸出的影响, 分析了各个因素对封闭气泡体积的影响趋势和影响机理。

1 室内一维积水入渗试验

1.1 试验方案

室内用于一维积水入渗试验的土样分别为粉土质砂(SM)和低液限黏土(CL)(按照 GBJ145-90 分类)。其中, #1 土样为粉土质砂(SM), 取自某建筑回填土, #3 土样为低液限黏土(CL), 取自三峡库区某滑坡, #2 土样为#1 和#3 土样部分粒组混合土。3 种土样的基本物理参数见表 1, 颗粒级配曲线如图 1 所示, 3 种土样的黏粒含量逐渐增多, 塑性依次增强。

表 1 试验土样基本物理参数表

Table 1 Physical parameters of samples

土样编号	比重 G_s	液限 w_L /%	塑限 w_p /%	塑性指数 I_p
#1	2.68	27.2	16.2	11.0
#2	2.70	33.9	17.3	16.5
#3	2.77	45.8	18.7	27.1

表 2 一维积水入渗试验参数及试验结果统计表

Table 2 Parameters and results of one-dimensional ponded water infiltration tests

土样 编号	试验 编号	初始含水 量 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$	比重 G_s	孔隙 比 e	入渗前初始气体 体积 V_{ad}/cm^3	入渗后封闭气 泡体积 V_a/cm^3	气相逸出 率 $E_a/\%$	入渗稳定 时间 t/h
#1	1-1-1	5.8	1.18	2.68	1.26	479.5	101.7	78.8	1.5
	1-2-1	5.8	1.39	2.68	0.93	395.8	73.1	81.5	24
	1-3-1	5.8	1.53	2.68	0.75	331.5	65.0	80.4	24
	1-1-2	10.2	1.18	2.68	1.26	427.7	90.4	78.9	1.5
	1-2-2	10.2	1.39	2.68	0.93	334.0	69.5	79.2	24
	1-3-2	10.2	1.53	2.68	0.75	266.4	61.5	76.9	24
	1-1-3	14.8	1.18	2.68	1.26	374.7	106.2	71.7	1.5
	1-2-3	14.8	1.39	2.68	0.93	272.0	80.4	70.5	24
	1-3-3	14.8	1.53	2.68	0.75	197.9	74.8	62.2	24
#2	2-1-1	5.7	1.18	2.70	1.28	483.7	67.2	86.1	24
	2-2-1	5.7	1.39	2.70	0.95	399.5	54.7	86.3	24
	2-3-1	5.7	1.53	2.70	0.77	338.7	52.7	84.4	55
	2-1-2	9.8	1.18	2.70	1.28	436.5	59.5	86.4	6.4
	2-2-2	9.8	1.39	2.70	0.95	344.2	44.9	87.0	24
	2-3-2	9.8	1.53	2.70	0.77	277.7	42.0	84.9	32.3
	2-1-3	14.8	1.18	2.70	1.28	378.5	83.6	77.9	4.9
	2-2-3	14.8	1.39	2.70	0.95	276.4	69.4	74.9	24
	2-3-3	14.8	1.53	2.70	0.77	202.8	61.5	69.7	48
#3	3-1-1	6.1	1.18	2.77	1.34	489.8	60.0	87.8	24
	3-2-1	6.1	1.39	2.77	1.00	406.7	43.2	89.4	96
	3-3-1	6.1	1.53	2.77	0.81	346.7	39.6	88.6	291
	3-1-2	10.7	1.18	2.77	1.34	436.5	55.6	87.3	24
	3-2-2	10.7	1.39	2.77	1.00	344.2	40.9	88.1	72
	3-3-2	10.7	1.53	2.77	0.81	277.7	38.7	86.1	151.3
	3-1-3	15.0	1.18	2.77	1.34	385.9	94.1	75.6	8.5
	3-2-3	15.0	1.39	2.77	1.00	285.1	54.9	80.7	48
	3-3-3	15.0	1.53	2.77	0.81	212.3	38.4	81.9	150.9

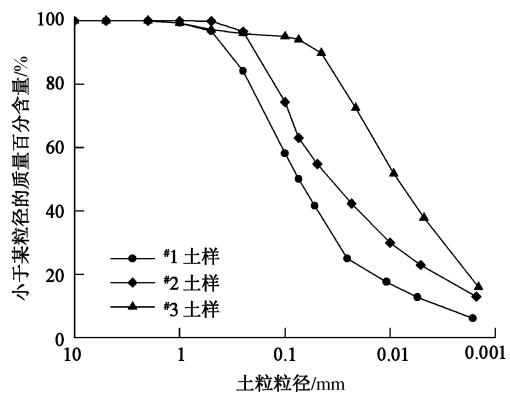


图 1 三种试验土样的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curves of three kinds of soil samples

将 3 种土样按 3 种干密度和 3 种初始含水率分别进行竖直土柱一维积水入渗试验, 试验参数列于表 2, 试验编号第一个数字代表土样编号, 第二个数字代表干密度编号, 第三个数字代表初始含水率编号。试验时, 按设计的干密度和初始含水率, 一次制备 4 个土柱试样, 土柱分层击实在直径 6 cm、高 50 cm 有机玻璃筒中, 每个试验土柱下方放置滤纸和透水石, 试样分 8 层击实, 每层高 4.5 cm, 土柱长 36 cm, 土柱上表面放置滤纸。在土柱顶部放置常水头马氏瓶, 保持积水深度为 10 cm, 同时开始记录入渗时间, 待观察

到湿润锋推进到大约 9, 18, 27 cm 及底部出现稳定渗流时, 依次停止试验, 并迅速取下马氏瓶, 水平放置土柱, 迅速取土测量该时刻的剖面含水率^[7]。

1.2 试验结果

由于篇幅有限, 本文只列出一组积水入渗试验剖面含水率结果, 如图 2 所示。对于同一干密度和初始含水率的 4 个土柱, 计算出土柱完全饱和时的含水率 w_{sat} , 并与 4 个时刻剖面含水率分布数据绘于同一坐标轴中, 可以看出一维积水入渗试验中湿润锋随时间推进的过程。图 2 所示土样初始含水率 w_0 为 9.8%, 干密度 ρ_d 为 1.39 g/cm^3 , 在入渗 43 min 后, 湿润锋推进到 9 cm 深度, 表层土含水率接近饱和含水率, 中部传输区含水率只有 28%; 在入渗 106 min 后, 湿润锋到达 18 cm 左右, 表层含水率超过饱和含水率, 主要是下部土柱水回流造成试验误差, 传输区含水率增高到 30% 左右, 表明土中气体随时间排走; 在入渗 214 min 后, 湿润锋推进到 27 cm 左右, 传输区含水率略有增加; 在入渗 1440 min 后, 土柱基本形成稳定渗流, 实测中下部稳定含水率为 32% 左右, 但距离饱和含水率还有 3% 左右的差距, 表明封闭气泡占据了部分土体孔隙。

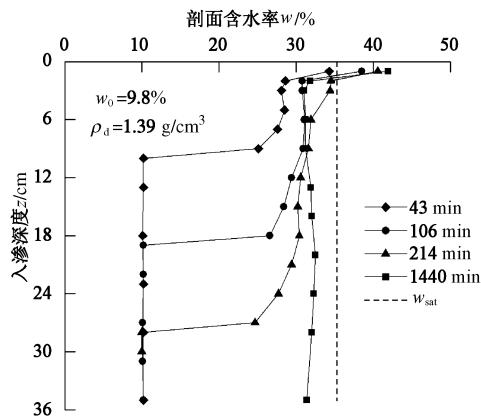


图 2 一维积水入渗含水率随时间变化曲线(2-2-2)

Fig. 2 Curves of water content of one-dimensional ponded water infiltration (2-2-2)

2 封闭气泡含量的影响因素

本文所研究的土体中的封闭气泡, 指土体在积水入渗稳定时, 土体孔隙中的气相的体积, 包括内部联通的气相和完全封闭的气泡。入渗稳定以土柱完全湿润, 底部出现稳定渗出水流为标准, 具体每组试验稳定的时间见表 2。封闭气泡的含量用土体中气相的体积 V_a 表示, 同时, 定义土体气相饱和度为土体气相体积与孔隙体积的比值。通过试样已知指标初始含水率 w_0 、干密度 ρ_d 、试验土柱的体积 V 、试样的比重 G_s , 以及试样入渗稳定后剖面含水率的平均值, 可以计算

出该状态下土柱内封闭气泡体积 V_a 。各组试验封闭气泡体积和气相饱和度计算结果列于表 2。

2.1 封闭气泡体积 V_a 的影响因素

按上述方法计算得到的封闭气泡的体积 V_a 与土样的种类、初始含水率及干密度的关系如图 3 和图 4 所示。图中结果表明:

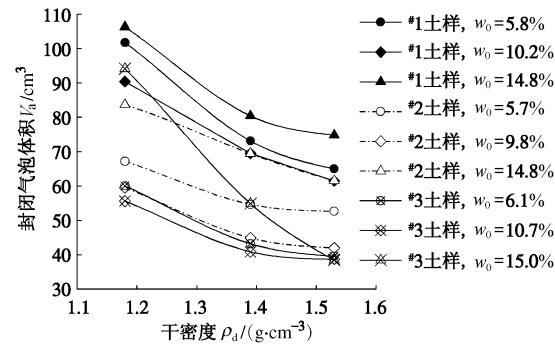


图 3 入渗稳定后试样内封闭气泡体积与试样干密度关系曲线

Fig. 3 Relationship between dry density and volume of entrapped air after infiltration

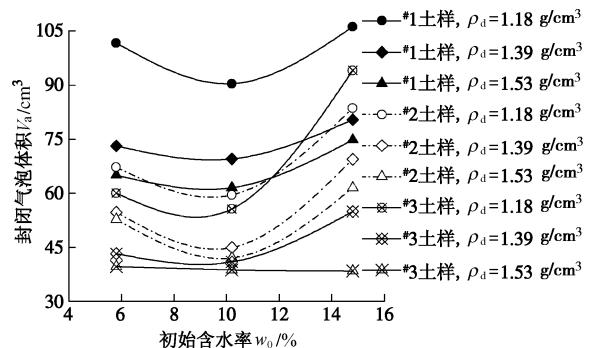


图 4 入渗稳定后试样内封闭气泡体积与试样初始含水率关系曲线

Fig. 4 Relationship between initial water content and volume of entrapped air after infiltration

(1) 砂性土中的封闭气泡体积较大, 黏性土中的封闭气泡体积较小。当初始含水率较大时, 黏性土中的封闭气泡的体积随干密度的减小迅速增大, 如图 3 中#3 土样(黏性土)在初始含水率为 15%、干密度为 1.18 g/cm^3 时, 试样中的封闭气泡体积已超过#2 土样中的封闭气泡的体积, 接近#1 土样(砂性土)中封闭气泡的体积。从表 2 的数据可知, 当初始含水率和干密度相同时, 砂性土中气相饱和度较大, 黏性土中气相饱和度较小, 但是砂性土达到渗流稳定的时间明显比黏性土达到渗流稳定的时间少, 其后 3.2 节的研究表明土体排气达到稳定的时间远比水相渗流达到稳定的时间长。

(2) 干密度对封闭气泡体积的影响明显。图 3 显示, 初始含水率相同时, 随干密度的增加, 入渗稳定后试样中的封闭气泡体积逐渐减小。在干密度较小

时, 曲线较陡, 表明封闭气泡体积递减速率较快, 在干密度较大时, 曲线趋于平缓, 表明封闭气泡体积递减速率较慢。

(3)入渗稳定后试样内封闭气泡的体积与试样的初始含水率关系显著。图 4 及表 2 中试验结果显示, 在初始含水率较小时, 试样内封闭气泡体积和气相饱和度随初始含水率的增加略微减小, 在初始含水率较大时, 试样内的封闭气泡体积和气相饱和度随初始含水率的增加显著增大。在干密度较大的黏性土中, 初始含水率对试样内封闭气泡体积的大小影响不显著。

2.2 气相逸出率 E_a 的影响因素

土体中的气体在入渗水流的带动下, 部分气体随水流一起被运送到土体之外, 少部分气体溶解在水流中, 剩下的气体则被封闭在土体的孔隙中形成封闭气泡。在入渗过程中, 试样中的气相体积较入渗前逐渐减少, 待渗流稳定之后, 土体中气相体积趋于稳定。定义气相逸出率为试样入渗过程中逸出气体的体积与入渗前试样中气相体积的比值, 如式(1)所示, 本文主要讨论入渗趋于稳定时刻气相逸出率与干密度和初始含水率的关系,

$$E_a = \frac{V_{a0} - V_a}{V_{a0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, E_a 为气相逸出率 (%), V_{a0} 为入渗前试样内气相体积 (cm^3), V_a 为入渗后试样内气相体积 (cm^3)。

通过计算得到的气相逸出率随试样干密度和初始含水率变化关系曲线如图 5, 图 6 所示。

从图 5 可以看出, 对于同一种土样, 初始含水率较大者, 其气相逸出率较小。大部分情况下, 随着干密度增大, 气相逸出率呈递减趋势。如#1 和#2 含水率较高的土样, 干密度 1.18 g/cm^3 时的气相逸出率比 1.53 g/cm^3 时要高 $7\% \sim 10\%$, 表明密实土样中的气相比疏松土样中的气相较难排出。在初始含水率较小时, 气相逸出率随干密度增大而减小的趋势不明显, #1~#3 土样在初始含水率为 $6\% \sim 10\%$ 时, 气相逸出率相差不到 2% , 但是黏性土中气相逸出率已经达到 85% , 比砂性土中要高 $5\% \sim 8\%$ 。

#3 土样在初始含水率为 15.0% 时, 气相逸出率随干密度的增大而逐渐增大的现象与另外两种土样的试验结果相反, 这可能与黏性土中气相逸出稳定较水相渗流稳定需要的时间更长有关(见后文分析), 在干密度较小 (1.18 g/cm^3 , 1.39 g/cm^3) 时, 水相渗流稳定而气相逸出还未稳定, 该组试验结束时土样中还有能逸出而没有来得及逸出的气泡, 导致测得的气相逸出率小于实际的气相逸出率。而在干密度为 1.53 g/cm^3 时, 入渗时间长达 150.9 h (见表 2), 水相渗流与气相渗流均基本稳定, 测得的气相逸出率与实际的气相

逸出率基本接近。最终导致图 5 中气相逸出率随干密度的增加而增大的变化趋势。

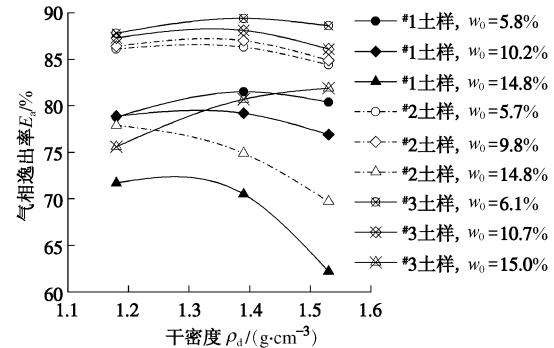


图 5 入渗稳定后试样内气相逸出率随试样干密度变化关系曲线

Fig. 5 Relationship between dry density and escape ratio of air after infiltration

从图 6 可以看出, 试样干密度相同时, 气相逸出率随试样初始含水率的增加显著降低。尤其在初始含水率较大 ($w_0 > 9.8\%$) 时, 如#1 土样在干密度 1.53 g/cm^3 , 初始含水率 $w_0 = 14.8\%$ 时气相逸出率比 $w_0 = 5.8\%$ 时要降低 18% 左右。与前面图 3 和图 4 显示结果相同, 砂性土气相逸出率总体上要明显小于黏性土的气相逸出率。然而, 通常认为砂性土中孔隙结构比黏性土简单, 气体应该更加容易排出, 试验结果却正好相反。

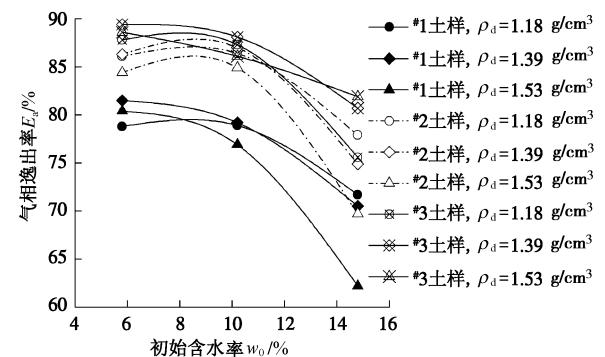


图 6 入渗稳定后试样内气相逸出率随试样初始含水率变化关系曲线

Fig. 6 Relationship between initial water content and escape ratio of air after infiltration

考虑到土体中气相逸出可能与时间有关, 于是增加一组试验方案, 研究水相渗流稳定之后土柱内封闭气泡体积是否随入渗时间的延长而发生变化。试验选择#2 土样, 初始含水率为 10.8% , 干密度为 1.18 g/cm^3 。土柱内封闭气泡含量随入渗稳定后入渗时间变化的关系如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 封闭气泡含量随入渗时间的延长而逐渐减少并趋于稳定。在水相渗流达到稳定时, 封闭气泡含量约 65 cm^3 , 保持水相渗流继续试验, 入

渗稳定后历时 60 h 封闭气泡含量只有 40 cm^3 左右, 历时 60 h 以后, 封闭气泡含量基本无明显变化。表明在水相渗流趋于稳定之后, 试样内的气泡还在随入渗水流逸出, 即气相逸出达到稳定的时间比水相渗达到稳定的时间长。因此, 在相同的入渗时间条件下, 黏性土中的气泡是否容易逸出还需要更精确的试验去验证。

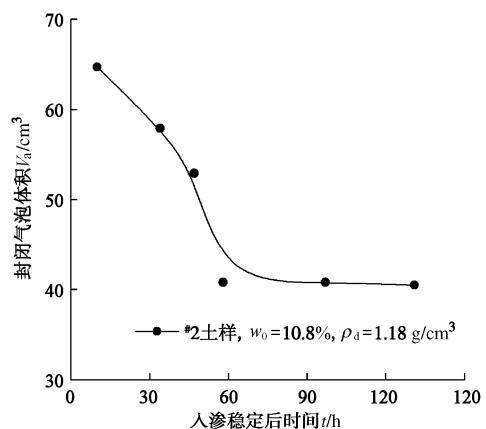


图 7 入渗稳定后试样内封闭气泡体积随入渗稳定后时间延长而变化的关系曲线

Fig. 7 Change of volume of entrapped air with time after infiltration

3 封闭气泡含量的影响机理分析

3.1 干密度对封闭气泡含量的影响机理

从上面的试验结果与数据分析可知, 入渗稳定后封闭气泡的体积 V_a 和逸出率 E_a 均与试样的干密度成负相关关系, 即试样干密度越大, 入渗稳定后封闭气泡体积越小, 气泡逸出越困难。分析原因: ①在初始含水率一定时, 试样的干密度越大, 试样的孔隙比越小, 孔隙中气相体积越小, 入渗稳定之后土样中封闭气体的体积也越少; ②随着干密度的增大, 试样更加密实, 试样中的孔隙体积减小的同时, 可以容许水流及气体通过的孔隙通道更加曲折, 水流在驱赶气体逸出时流过的路径更长, 阻力更大, 气相逸出更加困难; ③孔隙越细小, 在颗粒相互接触的“瓶颈”处由于毛细张力(基质吸力)的作用, 容易形成弯液面, 进一步阻碍气相的流动^[8]。

3.2 初始含水率对封闭气泡含量的影响机理

入渗稳定时封闭气泡的逸出率 E_a 与试样的初始含水率为负相关关系, 即随着试样初始含水率的增加, 逸出率 E_a 逐渐减小, 气泡逸出越困难。根据非饱和土中水相和气相 4 种赋存形式(完全连通, 部分连通, 内部连通和完全封闭)^[9]可以解释这种现象, 当试样的初始含水率较小时, 入渗前气体在试样中基本处于

完全连通状态, 在入渗水流的驱赶下, 孔隙中的气体容易排出, 逸出率大。随着试样初始含水率的增加, 入渗之前孔隙中的气体处于部分连通状态, 被封闭的气泡则较难在水相流动过程中排出, 随着初始含水率进一步增加, 气相连通程度进一步降低, 气相逸出更加困难。

入渗稳定后封闭气泡的体积与试样的初始含水率不是单调关系, 而是随着试样初始含水率的增加, 先略微减小后逐渐增大, 即存在一个临界含水率 w_k , 本文试验中 w_k 约在 10% 左右。当初始含水率 $w_0 \leq w_k$ 时, 试样孔隙中的气体基本处于完全连通或大部分连通状态, 在水相入渗时气相较易逸出, 从气相逸出率来看, 在干密度的相同土样中, 初始含水率 6% 和 10% 左右时的气相逸出率相差不大。当初始含水率在这一范围变化时, 随着初始含水率增加, 水相占据的孔隙体积也增加, 初始气相体积减少, 在逸出率基本相同的情况下, 入渗稳定后试样中的封闭气泡体积就会减小。当初始含水率 $w_0 > w_k$ 时, 随着初始含水率的增加, 入渗前试样孔隙中的气体逐渐从部分连通趋于内部连通或完全封闭状态, 在水相入渗过程中, 被封闭气体的逸出通道大部分被水相阻塞, 气相逸出率显著降低。

3.3 土壤类型对封闭气泡含量的影响机理

通常认为黏土颗粒一般为片状或针状, 颗粒之间联结较弱, 颗粒排列近似于平行, 呈片堆结构或片架结构, 具有较大的比表面积, 水流在黏土颗粒之间流动绕过的路径弯曲程度较大, 导致封闭气泡在黏性土中的逸出速率较小。砂性土颗粒较大, 颗粒之间主要以点对点接触, 呈单粒结构, 水相和气相在砂性土中连通性较好, 气相逸出较通畅。表 2 试验结果也显示黏性土试样水相渗流达到稳定的时间, 明显比砂性土试样达到稳定的时间长。但是试验结果也显示砂性土逸出率比黏性土小, 其中原因估计是入渗稳定时间不同造成的。图 7 试验结果显示, 入渗稳定后, 随着入渗时间进一步增长, 孔隙中的部分封闭气体泡可以被入渗水流带出土体之外, 土体中封闭气泡的体积在较长时间之后才趋于稳定。砂性土在水相入渗基本稳定后, 气相可能还有部分没有逸出, 试验测量的封闭气泡体积偏大。而对于黏性土, 水相渗流趋于稳定的时间较长, 气泡逸出逐渐趋于稳定, 试验测量的封闭气泡体积比较接近最终稳定值。

4 结论与讨论

本文基于室内一维积水入渗试验, 分析了一维土柱在水相入渗稳定后, 土壤类型、初始含水率和干密度对土体孔隙中的封闭气泡的体积的影响趋势及影响

机理, 得出以下结论:

(1) 在土壤类型和初始含水率相同时, 土样干密度越大, 入渗稳定后封闭气泡体积越小, 气相逸出越困难。原因在于: ①试样的干密度越大, 试样中的孔隙体积越小, 水相入渗稳定后试样中封闭气体的体积也越少; ②随着干密度的增大, 试样越密实, 可以容许水流及气体通过的孔隙通道更加曲折, 水相和气相流动路径增长, 阻力增大, 气相逸出也越困难; ③孔隙越细小, 在颗粒相互接触的“瓶颈”处毛细张力越显著, 形成的弯液面进一步阻碍了气相流动。

(2) 在土壤类型和干密度相同时, 试验显示存在一个临界含水率 w_k (本文试验的3种土样的临界含水率约在10%左右)。当初始含水率 $w_0 \leq w_k$ 时, 试样孔隙中的气体基本上处于完全连通或大部分连通状态, 在水相入渗时气相较易逸出, 气相逸出率相差不大。当初始含水率 $w_0 > w_k$ 时, 随着初始含水率的增加, 入渗前试样孔隙中的气体逐渐从部分连通趋于内部连通或完全封闭状态, 在水相入渗过程中, 被封闭气体的逸出通道大部分被水相阻塞, 气相逸出率显著降低。

(3) 试验结果显示黏性土试样水相渗流达到稳定的时间明显比砂性土的时间长, 而砂性土气相逸出率总体上明显小于黏性土的气相逸出率, 初步估计是入渗稳定时间不同造成的试验误差。进一步试验结果显示, 在水相渗流基本达到稳定之后, 土体中封闭气泡仍可以继续随水流排出, 直至趋于稳定。

本文的研究揭示了实际土体入渗中的一些物理现象, 探索了积水入渗稳定之后所形成的近饱和土中封闭气泡的含量及其影响因素, 为更好地理解土壤入渗过程和建立数值模拟模型提供了试验数据。

参考文献:

- [1] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. (LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Sen-chuan. Soil water dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese))
- [2] CONSTANTZ J, HERKELRATH W N, MURPHY F. Air encapsulation during infiltration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, **52**: 10 - 16.
- [3] JAOUDAT Touma, MICHEL Vauclin. Experimental and numerical analysis of two-phase infiltration in partially saturated soil[J]. Transport in Porous Media, 1986, **1**: 27 - 55.
- [4] SAKAGUCHI A, NISHIMURA T M Kato. The effect of entrapped air on the quasi-saturated soil hydraulic conductivity and comparison with the unsaturated hydraulic conductivity[J]. Vadose Zone Journal, 2005, **4**: 139 - 144.
- [5] 李援农. 不同灌溉方式入渗条件下的土壤空气阻滲特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (LI Yuan-nong. Study on soil air reduction infiltration characteristics under different irrigation method[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [6] 张华, 吴争光. 封闭气泡对土壤渗透性影响的研究进展[J]. 三峡大学报(自然科学版), 2009, **31**(4): 52 - 56. (ZHANG Hua, WU Zheng-guang. Review on the effect of entrapped air on soil permeability[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2009, **31**(4): 52 - 56. (in Chinese))
- [7] 张华, 吴争光. 封闭气泡对一维积水入渗影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(增刊): 132 - 137. (ZHANG Hua, WU Zheng-guang. Experimental study on the effect of entrapped air on one-dimensional ponded water infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(S0): 132 - 137. (in Chinese))
- [8] HONIG J A, MURPHY J A. Antecedent water content and air encapsulation effects on physical properties of sand root zone material[J]. Journal of Turfgrass Science, 2001, **77**: 24 - 37.
- [9] 包承纲. 非饱和压实土的气相形态及其与孔隙压力消散的关系[C]// 第五届土力学及基础工程学术会议论文选集. 北京: 工业出版社, 1979. (BAO Cheng-gang. The air form in compressed unsaturated soil and its relationship to pore water pressure dissipation[C]// The 5th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Beijing: Industry Press, 1979. (in Chinese))