

文章编号: 1008-2786-(2015)3-365-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000046

气阻作用下堆积碎石土渗透规律

董辉^{1,2} 罗潇¹ 史超¹ 罗有为¹

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院 湖南 湘潭 411105; 2. 湘潭大学流变力学研究所 湖南 湘潭 411105)

摘 要: 降雨过程中, 堆积碎石土渗透特性改变是触发滑坡等灾害的主要因素。碎石土中封闭气泡阻碍水相流动, 从而对雨水入渗产生影响。通过自制渗流沉降综合测试仪, 进行入渗试验, 探究不同雨强(1.2 mm/min、1.6 mm/min、2.0 mm/min)下, 碎石土的渗透规律与沉降变形。通过 Seep/w 软件耦合 Air/w 软件进一步分析不同雨强下气阻作用对湿润锋迁移速度的影响。结果表明: 入渗深度-时间曲线存在阶梯状趋势, 即湿润锋迁移速度首先随表层土含水率的突增迅速增加至最大值(约 30~40 mm/min), 然后随气压的增加缓慢减小, 最后湿润锋迁移速度随气压减小略微增大, 湿润锋平均迁移速率(无积水状态)随雨强的增大趋近线性增长; 碎石土沉降变形在入渗过程中经历缓慢增长、急剧增大、逐渐停滞三个阶段, 雨强为 2.0 mm/min 时, 碎石土发生急剧沉降变形时间最早(约 50 min); 碎石土渗透系数与干密度呈线性负相关关系。

关键词: 碎石土; 滑坡; 渗透规律; 气阻作用; 雨强

中图分类号: P642.11

文献标志码: A

堆积碎石土是风化卸荷、残坡积等复杂成因形成的第四纪土与石块的二重介质混合体, 其作为坡体物质或滑体物质广泛分布于我国构造运动强烈的西南及西北地区。降雨过程中, 非饱和堆积碎石土渗透特性改变是触发滑坡、泥石流等降雨诱发型灾害的主要因素^[1]。天然边坡大多为非饱和土坡, 因此, 探究非饱和堆积碎石土的渗流规律对预防滑坡、泥石流等地质灾害至关重要。

土体非饱和渗流是水与土壤气体在土壤孔隙中相互替代的过程。李宁^[2]等运用非饱和土 VG 模型与改进的 Green-Ampt 入渗模型对 Mein-Larson 降雨入渗模型进行改进, 提出了降雨诱发浅层滑坡的简化计算模型。该模型既运用了非饱和土的特性, 又考虑了坡面倾角对雨水入渗的影响, 且能用于两种降雨形式下的边坡浅层稳定性估算, 但模型未提及土中气体对降雨入渗的影响。由于雨水入渗过程中, 一部分气体在水相流动的驱动下被排出土体, 而

大部分气体不易排出, 被封闭在土壤孔隙中, 产生气体压力, 从而对雨水入渗速率产生影响, 进而对边坡稳定性产生不可忽略的影响。国内外学者针对气阻作用对非饱和土的渗流特性影响进行了相关研究。Hammecker^[3]等通过大量试验研究表明, 入渗时湿润区下部气体会被压缩, 且气压增加显著; 孙东梅等^[4]考虑水相和气相的流动, 将多孔介质中的孔隙水和孔隙气作为研究对象, 建立了水-气二相流数学模型, 分析了一个均质土层在降雨入渗下非稳定渗流问题, 得出气相的存在对水流的入渗起阻滞作用; 张杰等^[5]结合彭振阳等^[6]对入渗过程湿润区分层假定和 Wang 等^[7]基于试验提出的考虑气体影响的修改 Green-Ampt 模型, 建立了考虑气阻作用下分层假定的雨水入渗计算分析模型。虽然不少学者对封闭气泡的阻渗作用给出了一定的量化关系, 适于降雨条件下边坡入渗分析, 但这些研究考虑的是积水状态下, 气阻作用对边坡入渗影响, 并且均限于

收稿日期(Received date): 2014-08-13; 修回日期(Accepted): 2014-10-11。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(No. 51108397; No. 51308485); 湖南省自然科学基金项目(12JJ4006)。[Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51108397, 51308485) and Natural Science Foundation of Hunan Province (Grant No. 12JJ4006).]

作者简介(Biography): 董辉(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 环境地质灾害, [Dong Hui, male, Ph.D., associate professor, majoring in environment geology hazard.] E-mail: aneurin.h.d@gmail.com

土体为均质体的范围内。由于堆积碎石土物质组成复杂、结构分布不规则,运用以上计算模型难以准确分析在气阻作用下水入渗过程。同时,学者们对不同雨强下气阻作用影响入渗关注很少,也有待进一步的研究。

为此,本文针对堆积碎石土渗透与沉降变形性质,研制了综合测试仪。选用湖南长(沙)株(州)(湘)潭城际铁路湘潭段水竹湾隧道洞口斜坡堆积碎石土进行室内一维入渗试验,模拟人工降雨,测量湿润锋深度随时间的变化以及入渗过程的碎石土沉降变形。同时,运用非饱和土 VG 模型与试验参数,利用 Seep/w 软件耦合 Air/w 软件建立考虑气阻作用的无积水入渗模型,进一步分析不同雨强下气阻作用对湿润锋迁移速度的影响。研究结果为研究降雨引起堆积碎石土滑坡变形的动态机理与探求滑坡启动预报模型提供理论依据。

1 试验研究

1.1 仪器研制

图 1 为渗流沉降综合测试仪示意图。根据试验要求,设计了由恒压循环供水装置、渗流沉降发生装置和测量装置 3 个部分组成的试验仪器。

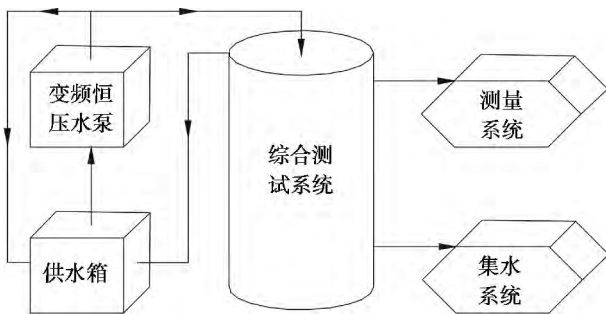


图 1 碎石土渗流沉降综合测试仪示意图

Fig. 1 Sketch of the instrument for measuring gravel soil permeability and settlement

恒压循环供水装置由变频恒压供水泵、供水箱和供水管道等组成。由于自来水中含有气泡会对试验产生影响,需采用沸水进行试验。渗流沉降发生装置由沉降测量装置、碎石土入渗装置和支撑收集装置组成。沉降测量装置包括雾状降水喷头、位移传感器等。碎石土入渗装置由内径 300 mm、高度 850 mm 的机玻璃圆筒制成。在圆筒侧壁安装 4 个阀门,用于连接压力测量装置。在底盖设有渗流孔,

用来收集渗流量。支撑收集装置包括支撑底座、测量铁架台与集水系统。测量铁架上标有刻度,可精确调整上下水头差,满足试验要求。测量系统主要测量水头压力、流量及碎石土变形。由于试验压力不大,故选用测量精度高的玻璃测压管测量。流量测量主要采用体积法或质量法^[8]。碎石土变形由沉降测量装置量测。图 2 为渗透沉降综合测试仪实物图。



图 2 综合测试仪实物图

Fig. 2 Diagram of the integrated test equipment

1.2 材料选取

图 3 为水竹湾隧道洞口斜坡的堆积碎石土。室内实验测定的碎石土的基本物理指标见表 1。将级配曲线与文献^[9-11]中碎石土级配平均值进行对比,其结果说明试验用的碎石土具有级配代表性(图 4)。

所选取的土样中,最大颗粒粒径为 80 mm。按规程^[8]规定,圆筒渗透仪内径应大于试样最大粒径的 10 倍。邱贤德等^[12]要求试样的直径不应小于试



(a) 取土现场

(b) 堆积碎石土近照

图 3 堆积碎石土

Fig. 3 Aggregate gravel soil

表1 天然状态下碎石土的基本物理指标
Table 1 Physical parameters of natural gravel soil

干密度	天然含水率	比重	孔隙率	最大干密度	最佳含水率	饱和含水率
Dry density	Natural moisture	Specific gravity	Porosity	Maximum density of soil	Optimum moisture content	Saturated water content
$\rho/(g/cm^3)$	$w/\%$	G_s	$n/\%$	$\rho_{max}/(g/cm^3)$	$w/\%$	$w_{sat}/\%$
1.85	5	2.56	27.66	2.08	8	14.95

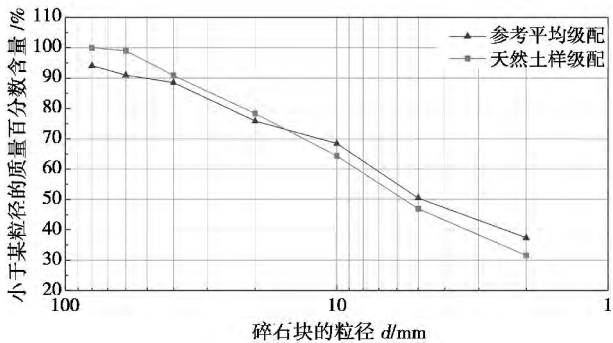


图4 碎石土级配曲线对比
Fig. 4 Contrast of gradation curves about gavel soil

料最大直径的5~6倍。朱国胜等^[13]研究粗粒料渗透试验尺寸效应规律,得出渗透仪直径与试验材料 d_{85} 之比不宜小于6(d_{85} 为粒径曲线纵坐标上小于某粒径含量为85%所对应的粒径)。综合以上研究成果,选择粒径小于60 mm的土样进行试验(天然级配的特征值 d_{85} 为28.9 mm)。在此将粗料定义为大于2 mm的固体颗粒,其含量用 P_2 表示。依据下式,土样按比例等质量替换超粒径颗粒^[8]:

$$P_i = \frac{P_{oi}}{P_2 - P_{dmax}} P_2 \tag{1}$$

式中 P_i 为替代后粗粒某粒组含量(%), P_2 为>2 mm粒径土的含量(%), P_{oi} 为原级配某粒组含量(%), P_{dmax} 为超粒径颗粒含量(%)。

1.3 研究方案设计

依据水竹湾隧道洞口斜坡的坡积碎石土基本物理指标,研究不同降雨条件下,堆积碎石土的入渗规律与沉降变形。试验设计了7大组试验,每组作平行试验3次,共21组试验(表2)。同时,测量不同干密度下碎石土对应的饱和渗透系数与饱和含水率。

试验具体步骤为:首先依据试验要求配置试样,并将其分层装入圆筒内,每层土样之间进行刮毛,保证土样的均匀性与整体性,让其静置24 h。然后,组装各系统,标定试验要求雨强,模拟人工降雨。再利用摄像机记录试验过程及现象,记录湿润锋迁移距

离、碎石土沉降量与时间的关系。最后,对土样由下至上进行低水头饱和,静置12 h后测量渗透系数 k ,并进行温度校正。调整上下水头差,重复测试渗透系数,求取平均值。

表2 试验方案
Table 2 Test scheme

方案编号	初始干密度	初始含水率	降雨强度
Scheme No.	Initial dry density	Initial moisture content	Rainfall intensity
	$\rho_d/(g/cm^3)$	$w/\%$	$p/(mm/min)$
1	1.85	5	1.2
2	1.85	5	1.6
3	1.85	5	2.0
4	1.75	5	1.2
5	1.8	5	1.2
6	1.9	5	1.2
7	1.95	5	1.2

2 试验结果与讨论

2.1 水分入渗深度与时间关系

通过观测不同时间湿润锋所处深度,得出湿润锋迁移速率,分析不同雨强对入渗速度的影响。图5为不同降雨强度下,湿润锋迁移距离、湿润锋迁移速率分别与时间的关系曲线。因试验雨强均小于碎石土饱和渗透系数,整个过程土表未出现积水。在入渗初始阶段,湿润锋迁移深度显著增加,湿润锋迁移速率增大至最大值(约30~40 mm/min)。主要原因是由于在重力梯度与水压梯度的共同作用下,土表层含水率急剧上升,部分气泡逸出,导致湿润锋迁移速率迅速上升。随着降雨持续进行,由于表土层细裂隙逐渐封闭,湿润锋前的气泡被驱赶到一定深度后无法逸出,形成封闭气泡^[3]。而封闭气泡的存在,使得孔隙中的过水断面减少并促使细小颗粒土体堵塞孔道。同时,水流必须绕过封闭气泡流动,水流的路径变得弯曲,水流阻力增加。因此,湿润锋推移速度出现减缓趋势。雨强为1.2 mm/min曲线在6~24 min和42~51 min范围以及雨强为

1.6 mm/min 曲线在 33~45 min 范围入渗速率相对较低(图 5)。鉴于在长时间、一定强度连续降雨作用下,“水力梯度”克服了孔隙中气泡的阻力及土中粘滞阻力,雨水就能渗透^[14]。所以,当气压增大到某一值,碎石土内部孔隙通道逐渐疏通,孔隙连通性增加,入渗阻力减小,湿润锋迁移速率略微增大。雨强从 1.2 mm/min 增大至 2 mm/min,湿润锋平均迁移速率从 1.641×10^{-4} m/s 增大至 2.407×10^{-4} m/s。由此可得:湿润锋平均迁移速率随雨强增大趋近线性增长。

2.2 碎石土沉降与时间的关系

记录入渗过程中位移传感器在不同时间显示的读数,确定碎石土沉降与时间的关系。沉降变形与时间的关系经历 3 个阶段。鉴于碎石土自重作用,试样在静置过程中颗粒骨架结构不断调整趋于稳定,并且碎石土颗粒对水分入渗响应具有滞后性。水分入渗初始阶段,碎石土变形不大,不同雨强下的沉降速率均小于 3×10^{-3} mm/min,沉降量缓慢增加,如图 6 所示。随着雨水不断入渗,内部渗透力和自重应力增加,颗粒骨架结构重新调整,在雨水渗透整个土样后,沉降速率突增至 1.5 mm/min 左右,碎石土明显变形。最后,沉降变形随时间发展逐渐停

滞,总沉降量维持在 4 mm 左右。

由于雨强增大,相同时间碎石土的入渗量增加,水土耦合作用更加显著。碎石土发生急剧沉降变形的时间逐渐提前(图 6)。随着雨强(1.2 mm/min、1.6 mm/min、2 mm/min)的逐渐增大,最大沉降变形速率分别发生在 100 min、70 min 与 50 min。由此可以推测,无积水入渗过程中,随着雨强的增大,碎石土变形导致碎石土抗剪强度减小,从而造成滑坡的历时可能减小。

2.3 干密度对渗透特性的影响

利用研制仪器进行渗透试验,得出 $V-J$ 关系曲线。在水力梯度较小的初始段,渗透速度与渗透坡降呈现近似直线的递增关系。随着水力梯度继续增加,碎石土结构发生变化,水在碎石土中的流动已从层流转变为紊流,渗透系数逐渐变小,其结果如图 7 所示。对于宽级配、大孔隙的材料,层流状态很难满足。Schweyer^[15]研究表明,低压实度与高压实度材料的水力梯度 J 分别在 0.2~0.3 和 0.3~0.5 内可满足水流层流状态。日本 JISA1218T-1979^[16]中将砂的水力梯度上限规定为 0.3。因此,取水力梯度小于 0.3 时的平均渗透系数为碎石土的渗透系数,并得出干密度与渗透系数的关系曲线(图 8)。利用

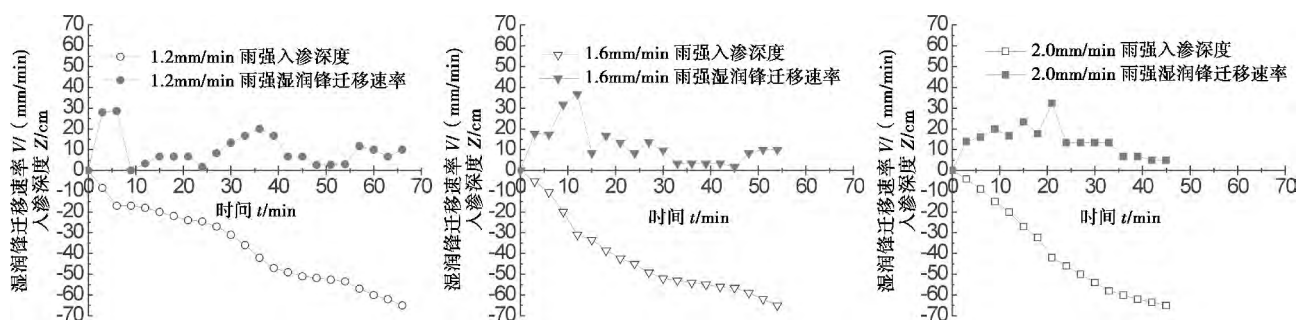


图 5 碎石土水分入渗深度与时间的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of water infiltration depth of gravel soil and time

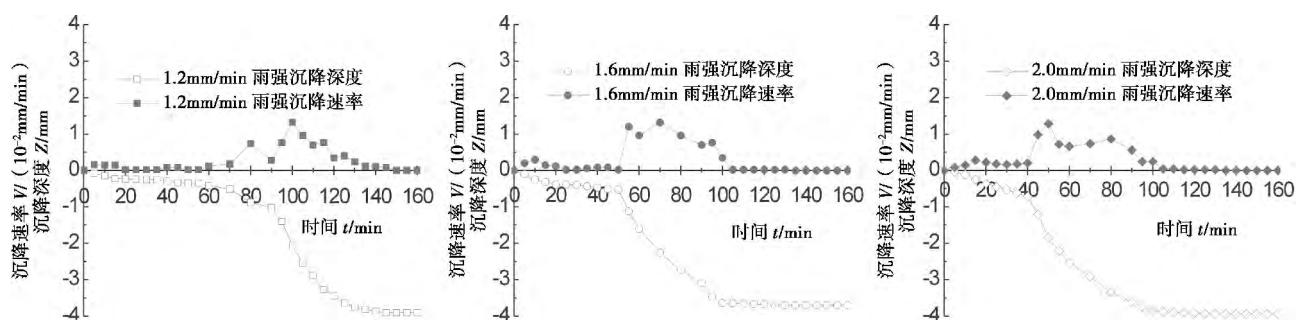


图 6 水分入渗过程碎石土累积沉降与时间的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve of gravel soil accumulated settlement and time in the water infiltration process

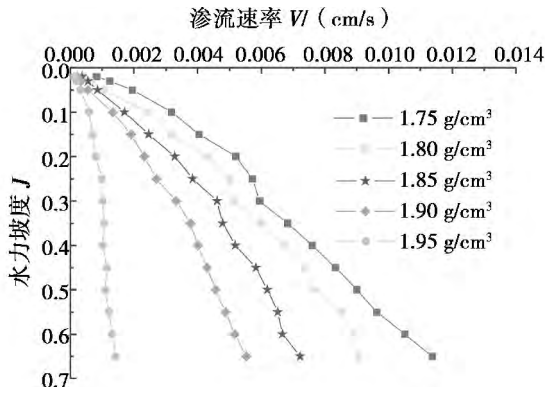


图 7 不同干密度碎石土渗透试验的 $V-J$ 关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of v and J in different dry density gravel soil permeability test

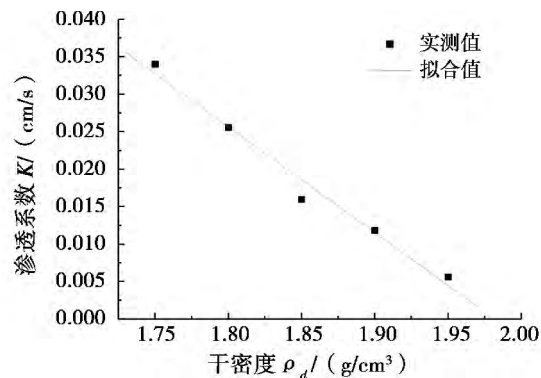


图 8 干密度与渗透系数的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve of permeability coefficient and dry density

饱和器成样,测得碎石土饱和含水率,计算对应的孔隙率(表 3)。

将测得的试验结果与渗透系数参考值^[17]进行比较,发现仪器测得碎石土渗透系数在砾砂和中砂之间,说明设计的仪器具备较好的适用性。

初始干密度的增加,碎石土更加密实,初始孔隙比减小,过水断面减少,进而使平均渗流速度降低。

表 3 试验结果

Table 3 Test results

编号 No.	干密度 Dry density $\rho_d / (\text{g}/\text{cm}^3)$	渗透系数 Permeability coefficient $K / \%$	饱和含水率 Saturated water content $\text{sat} / \%$	孔隙率 Porosity $n / \%$
1	1.75	0.034 03	17.45	30.54
2	1.80	0.025 55	15.85	28.53
3	1.85	0.015 95	14.95	27.66
4	1.90	0.011 83	13.71	26.05
5	1.95	0.005 59	11.88	23.17

渗透系数与干密度存在线性负相关关系,随着干密度的增大,渗透系数逐渐减小。干密度从 $1.75 \text{ g}/\text{cm}^3$ 增大到 $1.95 \text{ g}/\text{cm}^3$,渗透系数从 $3.4 \times 10^{-2} \text{ cm}/\text{s}$ 减小到 $5.6 \times 10^{-3} \text{ cm}/\text{s}$ 。将数据进行线性回归分析,得到相应拟合方程式:

$$K = -0.1412\rho_d + 0.27981 \quad (2)$$

式中 K 为堆积碎石土的饱和渗透系数, ρ_d 为堆积碎石土的干密度。式(2)的相关系数 R 为 0.992 05。其相关系数 $R > r_{0.001}$,因此,滑坡研究中可用于干密度判断其渗透性能,达到针对性治理的目的。

3 入渗数值分析

为了探究雨水入渗过程中碎石土内部不同位置基质吸力、空气压力等细观参数随时间的变化趋势,进而分析不同雨强下,碎石土在空气阻力作用下的入渗规律。研究中进一步采用软件 Seep/w 耦合软件 Air/w 对碎石土入渗试验进行考虑气阻作用的有限元入渗模拟,并将模拟结果与试验结果进行对比分析。

数值模拟利用 Van Genuchten 模型(VG)来描述非饱和土的两个水力特性, Van Genuchten^[18]关于土-水特征曲线的函数表达式为:

$$\theta(\psi_w) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha^{-1} |\psi_w|)^n]^m} & \psi_w < 0 \\ \theta_s & \psi_w \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 θ 为体积含水率(%) ; ψ_w 为孔隙水压力(kPa) ; $|\psi_w|$ 为 ψ_w 的绝对值; θ_s 为饱和含水率(%) ; θ_r 为残余含水率(%) ; n, m, α 是曲线形状参数,且 $m = 1 - 1/n$, α 的单位是(kPa)。

孔隙水压力水头为:

$$h_w = \psi_w / \gamma_w \quad (4)$$

式中 h_w 为孔隙水压力水头(m) ; γ_w 为水的重度(N/m^3)。

若考虑气阻的影响,非饱和土内孔隙气压力、孔隙水压力及水头压力存在以下形式:

$$\psi = \psi_w - \psi_a \quad (5)$$

式中 ψ 为水头压力(kPa) ; ψ_a 为孔隙气压力(kPa)。

相应的水力传导方程的函数表达式为:

$$K(\psi) = \begin{cases} K_s \frac{\{1 - (\alpha^{-1} |\psi|)^{n-1} [1 + (\alpha^{-1} |\psi|)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha^{-1} |\psi|)^n]^{m/2}} & \psi < 0 \\ K_s & \psi \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 $|\psi|$ 为基质吸力; K_s 为饱和渗透系数 (m/s)。

根据达西定律, 可得:

$$i_w = k(\psi) \left(1 - \frac{dh_w}{dz} \right) \quad (7)$$

式中 i_w 为入渗率 (m/s); z 为湿润锋的深度 (m)。

因试验过程中土表未出现积水, 利用水量平衡原理, 可得:

$$i_w dt = p dt \quad (8)$$

$$p dt = (\theta(\psi_w) - \theta_i) dz \quad (9)$$

式中 p 为降雨强度 (mm/min); θ_i 为初始含水率 (%)。

考虑降雨入渗下非饱和土体孔隙气体的流动, 假设环境温度恒定, 气体流动控制方程^[19]如下:

$$\left(\frac{\theta_a}{RT} + \rho_a m_w \right) \frac{\partial \psi_a}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_a k_a}{\gamma_{oa}} \frac{\partial \psi_a}{\partial z} + \frac{\rho_a^2 k_a}{\rho_{oa}} \right] + \rho_a \gamma_w m_w \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (10)$$

式中 k_a 为气体传导系数 (m/s); θ_a 为气体体积含量 (%); ρ_a 为气体密度 (kg/m³); γ_{oa} 为初始气体重度 (N/m³); ρ_{oa} 为初始气体密度 (kg/m³); R 为理想气体常数; T 为温度 (°C)。

运用软件 Seep/w 耦合 Air/W 软件, 求解式 (3) ~ (10)。

模型尺寸为高 650 mm, 直径 300 mm 的土柱。土柱顶部根据雨强大小设定无积水流量边界, 周壁为不透水边界, 由于土柱顶、底部与大气相通, 在土柱顶、底部设定气压边界条件为 0 kPa。数值计算采用 4 节点 4 边形等参单元模拟, 共 2 046 个单元, 1 950 个节点。通过实验根据水竹湾隧道洞口斜坡的坡积碎石土基本物理指标设定参数, 具体参数见表 4。此外, 计算孔隙气体渗流运动采用的孔隙气体导水系数与碎石土的体积含水量的关系如图 9 所示。

表 4 碎石土参数

Table 4 Gravel soil parameters

θ_r / %	θ_s / %	θ_i / %	α kPa	n	m	K_s / (m/s)
2.76	27.6	9.05	0.5	2.6	0.615	1.595e-4

图 10 为入渗量测数据与数值模拟数据的对比。对比结果表明: 不同雨强下, 数值模拟的湿润锋迁移曲线的走势与物理试验大致相同。试验与模拟的湿润锋平均迁移速率也基本相同, 最大相对误差 < 15%。该数值模型具有较好的可靠性与适用性。

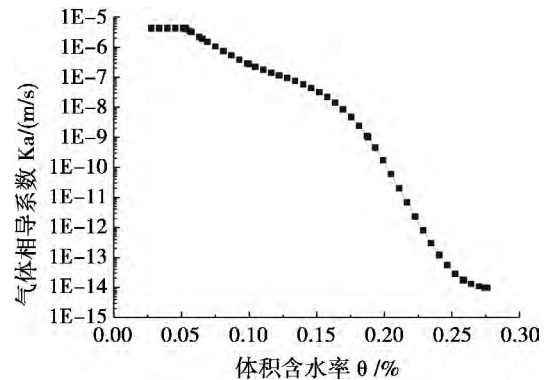


图 9 孔隙气体导水系数与体积含水量关系^[19]

Fig. 9 Pore air hydraulic conductivity vs volumetric water content^[19]

试验过程中, 水分入渗深度—时间曲线存在阶梯状趋势; 而模拟过程中, 由于数值模型未考虑碎石土内部结构在入渗过程中发生的动态变化, 湿润锋迁移速率仅随湿润区气体压力的变化发生小范围波动。

为了进一步分析气阻作用对雨水入渗影响, 根据模拟结果可得: 降雨初期, 表层土孔隙水压力 ψ_w 迅速增加, 土表层部分气泡逸出, 气体压力 (ψ_a) 相对较低, 湿润区内的基质吸力 $|\psi|$ 也迅速减小。根据水力特征曲线, 渗透系数 k 伴随 $|\psi|$ 的减小急剧上升, 初始渗流速率逐渐增至最大值, 其结果如图 11 所示。随着湿润锋向下迁移, 湿润锋附近的 ψ_a 迅速增加且逐渐接近压力峰值。当气压增大到一定值, 气泡溶解在水中可能破裂, 因此, 湿润区中部的 ψ_a 存在减小的趋势。相同雨强在不同时间内, 湿润区中 ψ_a 维持在 0.4 ~ 0.8 kPa 之间, 且 ψ_a 波动范围逐渐扩大。由于 ψ_w 与 ψ_a 共同作用, $|\psi|$ 在湿润区内基本稳定在 0.3 ~ 0.5 kPa 范围。湿润区内渗流速度 (V) 随气体压力增加 (减少) 而减少 (增加)。随着雨强从 1.2 mm/min 增大至 2 mm/min, 单位时间雨水入渗量增加, 湿润区内碎石土含水率上升, 气泡难以排出。相同时刻, 在湿润锋处的 ψ_a 同雨强的增大而增大, 且湿润区的基质吸力由 0.5 kPa 减少至 0.4 kPa。雨强为 1.2 mm/min 时, 湿润锋附近渗流速度在空气阻力的作用下在 $1.5 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-5}$ m/s 范围波动。当雨强增加到 2 mm/min, 湿润锋附近渗流速度波动范围增大至 $1.7 \times 10^{-5} \sim 3.5 \times 10^{-5}$ m/s。因此, 孔隙气压力对水流的入渗过程起阻碍作用, 且随雨强的增大, 空气阻力对入渗的影响越剧烈, 表现为气压对安全系数的降低具有明显的延时效应^[20]。

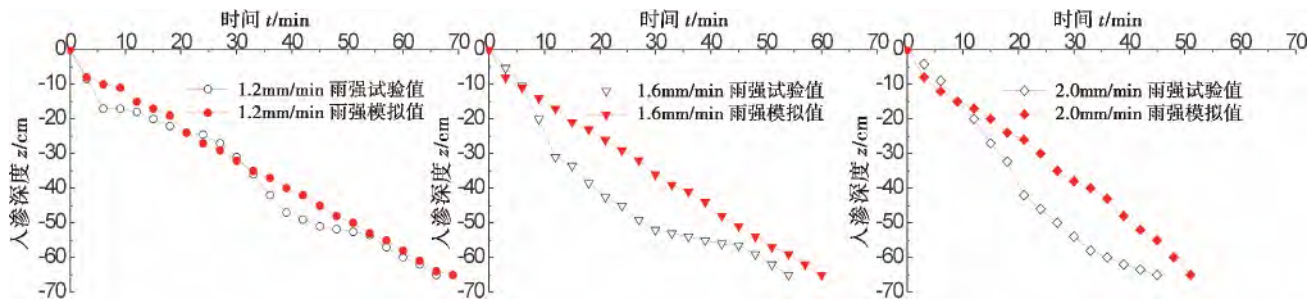


图10 碎石土入渗试验值与模拟值曲线对比

Fig. 10 Contrast of simulation value and experiment value about gravel soil permeability test

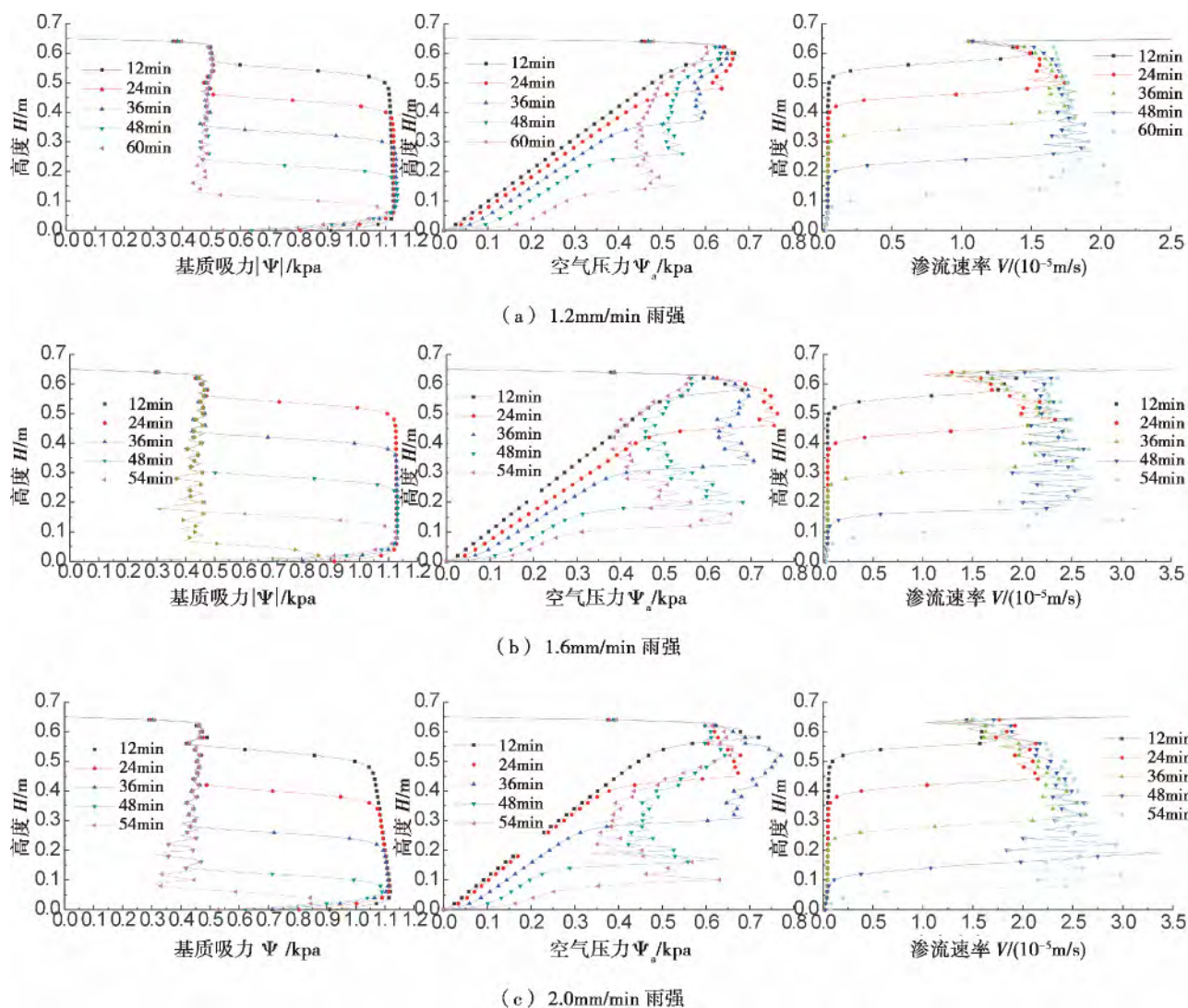


图11 不同雨强土柱高度分别与压力水头、空气压力、渗流速率之间的关系曲线

Fig. 11 Relationship between the pressure head, air pressure, the seepage rate and soil column height under different rainfall intensity

4 结论

以探究气阻作用下坡体物质或滑体物质的渗流

规律为目的,研制了针对堆积碎石土渗透特性与沉降变形研究的综合测试设备,测试堆积碎石土的渗透沉降参数,分析试验结果,并根据试验进行数值模拟,得出以下结论:

1. 堆积碎石土垂直入渗深度-时间曲线呈阶梯状。无积水状态下,湿润锋平均推移速度随雨强(1.2 mm/min、1.6 mm/min、2 mm/min)的增大基本上呈线性增长。

2. 碎石土沉降变形主要经历缓慢增长、急剧变形和逐渐停滞三个阶段。随着雨强(1.2 mm/min、1.6 mm/min、2.0 mm/min)的增加,碎石土发生最大土体变形的时间由100 min缩短到50 min。该结论对试验雨强范围的滑坡临滑时间判断具有指导作用。

3. 水力梯度0.3是碎石土饱和渗透系数变化的特征值。小于该值,饱和渗透系数基本保持不变,反之,则具有减小趋势。碎石土饱和渗透系数与干密度线性负相关。以其干密度判断渗透性能,可为滑坡现场评估提供快捷的参数指标。

4. 堆积碎石土湿润区内渗流速度随气体压力增加(减少)而减少(增加),且随雨强的增大,空气阻力对入渗的影响越显著。

参考文献(References)

- [1] Wu Jishan, Kang Zhicheng, Tian Lianquan, et al. Debris flow researches in Yunnan Jiangjiagou [M]. Beijing: Science Press, 1990: 16 - 30 [吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1990: 16 - 30]
- [2] Li Ning, Xu Jiancong, Qin Yazhou. Research on calculation model for stability evaluation of rainfall-induced shallow landslides. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1485 - 1490 [李宁, 许建聪, 钦亚洲. 降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究. [J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1485 - 1490]
- [3] Hammecker C, Antonino, Maeght J L, et al. Experimental and numerical study of water flow in soil under irrigation in northern Senegal: Evidence of air entrapment [J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54(3): 491 - 503.
- [4] Sun Dongmei, Zhu Yueming, Zhang Mingjin, et al. Analysis of rainfall infiltration process considering influence of pore air pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2307 - 2313 [孙冬梅, 朱岳明, 张明进, 等. 考虑气相影响的降雨入渗过程分析研究. [J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2307 - 2313]
- [5] Zhang Jie, Han Tongchun, Dou Hongqiang, et al. Analysis model for rainwater infiltration considering gas resistance under stratified assumption [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 35(12): 2219 - 2225 [张杰, 韩同春, 豆红强, 等. 探讨考虑气阻作用下分层假定的雨水入渗计算分析模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 35(12): 2219 - 2225]
- [6] Peng Zhenyang, Huang Jiesheng, Wu Jingwei, et al. Modification of Green-Ampt model based on the stratification hypothesis [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 59 - 66 [彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 基于分层假设的 Green-Ampt 模型改进 [J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 59 - 66]
- [7] Wang Z, Feyen J, Nielsen D R, et al. Two-phase flow infiltration equations accounting for air entrapment effects [J]. Water Resources Research, 1997, 33(12): 2759 - 2767
- [8] The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL237—1999 Specification of soil test [S]. Beijing: China Water Power Press, 1999: 114 - 123 [中华人民共和国行业标准编写组. SL237—1999 土工试验规程 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 114 - 123]
- [9] Zhang Hongming. Research on mechanics characteristics and mechanism of deformation and failure of unsaturated soil-rock mixture [D]. Changjiang River Scientific Research Institute, 2011. [张宏明. 非饱和土石混合体的力学特性及变形破坏机制研究 [D]. 武汉: 长江科学院, 2011.]
- [10] Xu Wenjie, Hu Ruilin, Tan Rujiao, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on right bank of longpan in tiger-leaoing gorge area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(06): 2170 - 2177 [徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(06): 2170 - 2177]
- [11] Wang Jia cheng. Experimental research on shear parameter of high cut slope gravel soil in badong and its engineering application [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2011. [王家成. 巴东高切坡碎石土抗剪强度参数试验研究及工程应用 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2011.]
- [12] Qiu Xiande, Yan Zongling, Liu Li, et al. Effect of particle-size characteristics on seepage property of rockfill. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 950 - 954 [邱贤德, 阎宗岭, 刘立, 等. 堆石体粒径特征对其渗透性的影响. [J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 950 - 954]
- [13] Zhu Guosheng, Zhang Jiafa, Chen Jinsong, et al. Study of size and wall effects in seepage test of broadly graded coarse materials. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2569 - 2574 [朱国胜, 张家发, 陈劲松, 等. 宽级配粗粒土渗透试验尺寸效应及边壁效应研究. [J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2569 - 2574]
- [14] Xu Jiancong, Shang Yuequan. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2264 - 2271 [许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2264 - 2271]
- [15] Schwyer H E, Burns A M. Low temperature rheology of asphalt cements III generalized stiffness-temperature relations of different asphalts [G]//Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologist, 1978.
- [16] ASTM D4989 - 90S standard test method for the apparent viscosity (flow) of roofing bitumens using the parallel plate plastometer [S]. 2004.
- [17] Collins R E. Translated by Chen Zhongxiang, Wu Wangyi. Flow of fluids through porous materials [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984: 59 [Collins R E. 陈钟祥, 吴望一, 译. 流体通过多孔材料的流动 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1984: 59]
- [18] Van Vgenuchten M T H. A closed-form equation for predicting the

- hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892–898
- [19] Geo-slope International Ltd. Air Flow Modeling with AIR/W2007 (Third Edition) [M]. Canada: Geo-slope International Ltd., 2008.
- [20] Han Tongchun, Ma Shiguo, Xu riqing. Research on delayed effect of landslides caused by air pressure under heavy rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1306–1366 [韩同春, 马世国, 徐日庆. 强降雨条件下气压对滑坡延时效应研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1306–1366]

Seepage Regulation of Aggregate Gravel Soil under the Effect of Air Entrapment

DONG Hui^{1,2}, LUO Xiao¹, SHI Cao¹, LUO Youwei¹

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China;

2. Institute of Rheological Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China)

Abstract: During the rainfall, the main factor for triggering landslides and other disasters is the changing of aggregate gravel soil permeability. Specifically, the entrapped air in gravel soils impedes aqueous phase flow, thus will have an effect on the rainwater permeability. The experiment of infiltration under different rainfall intensity (1.2 mm/min, 1.6 mm/min, 2.0 mm/min) investigates the permeability of gravel soil and sedimentation deformation by our own infiltration and sedimentation integrated tester. Then, further research will focus on the relationship between the air entrapment impact with different rainfall intensity and wetting front migration rate through Seep/w and Air/w soft wares. The results show that: there is a step-ladder trend between wetting front and time curve. More specifically, wetting front migration rate will rapidly increase with the sudden increase of the topsoil moisture to a maximum (30~40 mm/min approximately), then will slowly decrease with increased pressure. Finally the wetting front migration rate will slightly increase with the decreased pressure. The average rate of wetting front migration (without hydropressure) approaches linear growth with the increased rainfall intensity. Development of soil settlement deformation passes through three stages: slow growth, sharply rises and gradually stagnation. The minimum time (approximately 50 min) for sharp morph and sedimentation of gravel soil with the rainfall intensity is 2.0 mm/min. There is a negative linear correlation between the permeability coefficient of gravel soil and the dry density.

Key words: gravel soil; landslide; seepage regulation; air entrapment effects; rainfall intensity