

DOI: 10.11779/CJGE201806018

降雨条件下压实黄土水分入渗规律模型试验研究

朱才辉, 张世斌

(西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 以西北地区黄土高填方工程为研究背景, 在自行研发水分迁移特性测试设备的基础上, 开展了重塑压实黄土在降雨入渗条件下的水分迁移特性室内模型试验, 获得了不同压实度下黄土的“电阻率-饱和度”Archie模型和“饱和度-基质吸力”Fredlund-Xing模型及参数变化规律, 建立了基于土电阻率的基质吸力幂指数预测公式; 研究了不同压实度黄土在不同雨型条件下的入渗特征及其入渗速率、饱和度、电阻率等随时间和土层深度的变化规律。研究结果表明: ①雨型不同, 压实黄土的入渗特征各异, 小雨下入渗线呈“Y”型(最大入渗深度 $H_{\max}=0.20\sim0.35\text{ m}$), 大雨下呈“D”型($H_{\max}=0.55\sim0.65\text{ m}$), 暴雨下呈倒“V”字型($H_{\max}>0.8\text{ m}$), 入渗速率与雨量正相关, 与土层深度和压实度反相关; ②土体电阻率变化规律与饱和度变化过程相反, 基质吸力预测值和实测电阻率变化方向一致; ③采用土电阻率方法可以为深入探索黄土高填方的长期变形机制和稳定性预警或灾害防治提供一个新的途径。

关键词: 压实黄土; 降雨入渗; 饱和度; 土电阻率; 基质吸力

中图分类号: TU444 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)06-1117-08

作者简介: 朱才辉(1983-), 男, 陕西商南人, 博士, 副教授, 从事黄土力学与工程、隧道工程及数值仿真研究。E-mail: zhucaihui123@163.com。

Rainfall infiltration laws of compacted loess based on laboratory model tests

ZHU Cai-hui, ZHANG Shi-bin

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the high loess-filled embankment projects in north western regions of China, the model test apparatus is developed to investigate the water migration of compacted loess under different rainfall infiltrations. An electrical resistivity model versus saturation degree (named Archie model) and a matric suction model versus saturation degree (called Fredlund-Xing model) are established, and then the power exponent prediction formula for electrical resistivity versus matric suction is also obtained. The evolution laws of infiltration ratio, saturation degree and electrical resistivity of compacted loess with time and depth under different types of rainfall and compaction degrees are revealed through a large amount of laboratory experiments. The results show that: (1) The rainfall infiltration features of compacted loess are very different. The infiltration line exhibits “Y” shape under light rain (the maximal infiltration depth H_{\max} is equal to 0.20~0.35 m), it appears to be “D” shape under heavy rain ($H_{\max}=0.20\sim0.35\text{ m}$), and it is inverted “V” shaped under intense fall ($H_{\max}>0.8\text{ m}$). (2) There is a positive correlation between the infiltration ratio and the rain capacity, negatively correlated with soil depth and compaction degree. (3) The electrical resistivity method for soils can provide a new way for exploring in depth the long-term deformation mechanism and stability prediction or disaster prevention of high loess-filled embankments.

Key words: compacted loess; rainfall infiltration; degree of saturation; soil electrical resistivity; matric suction

0 引言

近年来, 西北黄土地区的上山建城、机场开发、大型工厂兴建等黄土高填方地基工程屡见不鲜, 而其出现的长期变形及稳定性问题往往是关乎工程成败的关键, 以延安新区、吕梁机场等为例^[1-4], 填料及原地基多是以非饱和黄土为主, 高填方地基的工后沉降和稳定性与临近水环境和地基内部水分场变化关系密切, 降雨入渗作用对填方地基及其上部建筑物的损害

作用已有大量实证, 在此不赘述, 究其原因, 主要是对压实黄土的入渗特性了解不够深入或未采取适当监控、防渗措施所致。因此, 采取简便易行的方法来研究压实黄土在降雨条件下的入渗规律, 对于分析预测其长期变形和强度变化规律具有重要的工程实际意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678484); 陕西省黄土力学与工程重点实验室基金项目(16JS073)

收稿日期: 2017-03-07

压实黄土属于超固结重塑黄土,研究其基质吸力、饱和度(含水率)状态具有重要意义,陈正汉等^[5]认为只有当土的结构、应力状态、温度及孔隙水中溶质的成分与浓度保持不变、且水分是单调变化时,含水率与吸力之间才有一一对应关系;除此之外,文献[6~10]从土壤电阻率的角度来研究土的强度、变形及水敏特性,查甫生等^[6]认为,对于颗粒组成、孔隙水化学成分和外界温度不变或变化极小的非饱和土来说,其电阻率仅取决于含水率大小,基于此,研究得到了非饱和重塑膨胀土的基质吸力与电阻率结构参数 R_e 之间的函数关系呈抛物线型,从而可预测出非饱和土的基质吸力。De Vita 等^[8]以火山灰堆积的浅层滑坡土为研究对象开展室内试验,研究了不同粒径条件下火山灰土的电阻率-含水率-基质吸力之间的关系,认为在基质吸力低于 10 kPa 时,电阻率与吸力呈直线关系,此后呈现出复杂的非线性关系,该关系可以采用多项式拟合得到。此后,Piegari 等^[9]采用 V-G 模型^[11]来预测基质吸力,从而达到预测大范围三维区域内土体的基质吸力分布规律,并将其应用于火山灰堆积体边坡的稳定性预测中。上述基于电阻率来研究压实黄土的吸力特性研究文献也较少。

以往文献中,在研究土体水分场演化规律多采用数值方法^[12]、室内试验方法^[13]、离心模型试验^[14]、原位测试方法^[15~21]等方法。王铁行等^[12]应用自行编制的有限元程序,模拟黄土路堤在降雨入渗下湿软区随时间的演化过程,认为湿软区域大小随着密度减小而增大,增加路基土体密实度了防止雨水入渗危害。王桂尧等^[13]采用高度为 40 cm 的室内土样试验来模拟路基填土的实际情况,研究了表面热辐射温度(25℃~65℃)、压实度(0.83~0.96)、降雨强度(10.0~37.5 mm/d)等 3 个因素下非饱和土水分运移规律,结果认为提高压实度能显著减少水分运移变化。张建红等^[14]利用土工离心机开展了非饱和土中含水率的变化和污染物的迁移机理的一维模型试验研究,但由于室内试验的局限性,廖盛修^[15]、钱鸿缙等^[16]、李大展等^[17]、刘保健等^[18]、黄雪峰等^[19~20]、姚志华等^[21]在不同黄土地区开展了不同规模的现场浸水试验,用于分析原状黄土的入渗及湿陷变形规律,对黄土地区基础设施建设和黄土相应规范条文的建立起到了巨大的推动作用,然而,降雨对压实黄土的入渗特征研究成果及其在黄土高填方工程中应用却鲜有报道。

鉴于此,本文试图针对压实黄土在降雨条件下的入渗特征及其室内测试方法方面开展一些尝试性探索工作。由于土壤基质吸力的室内或原位测试难度较大,测试持续时间长且有一定滞后现象,本文拟在恒定室温下开展压实黄土电阻率与饱和度(含水率)的关系

及饱和度与基质吸力的大量标定试验,建立电阻率-饱和度-基质吸力的函数关系,探索一种通过直接测试土壤电阻率来间接获取非饱和土基质吸力的预测方法,进而基于自行研发的“含水率-电阻率-吸力”联合测定系统,来模拟分析不同降雨量条件下的压实黄土入渗规律,为黄土高填方地基的降雨入渗特性研究探索出一条新的途径。

1 试验方案及试验设备

本次试验所需要的土样均取自于延安新区某工程施工现场,取土的深度为 5.5~6.0 m;本次试验所用的土样均为重塑黄土,其主要物理指标参数:颗粒比重 $G_s=2.70$,液限 $w_l=28.7\%$,塑限 $w_p=21.4\%$,天然含水率 $w_0=11.6\%$,根据轻型击实试验,可得到本试验中黄土的最优含水率 $w_{op}=16.0\%$,最大干密度 $\rho_{dmax}=1.77 \text{ g/cm}^3$ 。

为了探索压实黄土的电阻率-饱和度-基质吸力关系,针对不同压实度黄土分别制定三组平行试样,其中 2 组先测定不同压实度、含水率下重塑压实黄土的平均电阻率和饱和度关系,另外一组土样用于在非饱和土三轴仪器上测定其在无荷载条件下的土水特征曲线,具体实验方案如下:

(1)采用自行研发的测试桶(试验设备如图 1(a)所示,参考文献[4]),开展不同干密度(压实度)黄土 $\rho_d=1.33 \text{ g/cm}^3$ ($\lambda=0.75$)、 1.42 g/cm^3 ($\lambda=0.80$)、 1.50 g/cm^3 ($\lambda=0.85$)、 1.54 g/cm^3 ($\lambda=0.87$)、 1.58 g/cm^3 ($\lambda=0.89$)、 1.61 g/cm^3 ($\lambda=0.91$) 及在不同质量含水率 w 为 10%, 12%, 14%, 16%, 18%, 20% 条件下的电阻率-饱和度关系试验。

(2)与此同时,在自行研制的非饱和三轴仪上(如图 1(b)所示)对平行试样的进行无应力状态下的土水特征曲线测试。测试期间不施加轴向压力进行增湿,保持每个试样所施加的围压 σ_3 和孔隙气压 u_a 相等,来测量其在不同含水率下所对应的孔隙水压 u_w 的大小,利用吸力 $\psi=u_a-u_w$ 来计算所需要的吸力值。

(3)为了模拟不同雨型下压实黄土中水分迁移规律,以标准雨型为参考,持续时间均按照 24 h 计算,即小雨雨量 0~10.0 mm/d(本文 7.1 mm/d)、大雨雨量 25.0~49.9 mm/d(35.4 mm/d)、暴雨雨量 50.0~99.9 mm/d(99.1 mm/d),采用自行研发的电阻率-体积含水率联合测试设备(如图 1(c)所示,试样筒采用绝缘材料钢化玻璃制作,高度 0.8 m,内径 0.3 m,沿着试样筒外径方向,每隔 0.1 m 高度处分别钻孔布置一组 TDR 测试探头和一对电阻片,采用土壤水分计和电阻箱来测试体积含水率和电阻率,试样的测试位置剖面如图 1(d)所示),模拟不同压实度($\lambda=0.75, 0.80, 0.85, 0.87, 0.89, 0.91$)黄土在最优含水率 $w_{op}=16\%$

情况下进行降雨入渗试验, 需要说明的是: 本次在模拟不同雨型时, 试样顶部采用多孔钢板、滤纸与土样接触, 在同一试样顶部上采取逐级增补水量、缓慢喷淋的方式, 待连续 24 h 降雨模拟完成后, 将顶部采用塑料薄膜和凡士林涂抹密封, 防止水分蒸发。

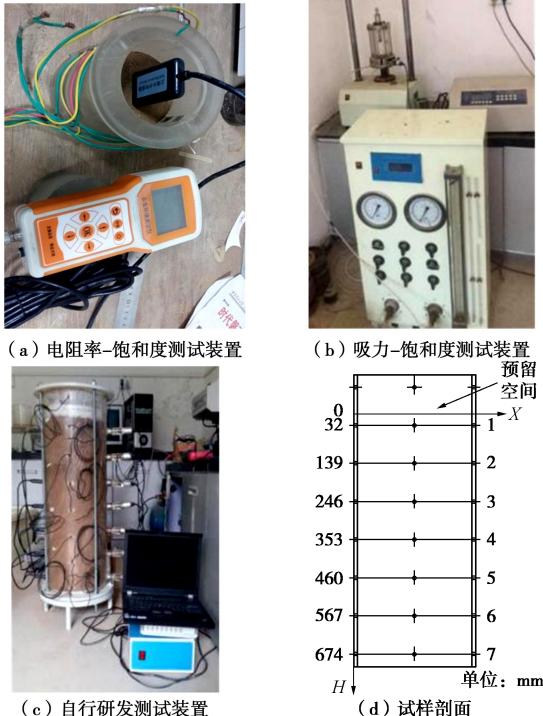


图 1 模型试验测试设备

Fig. 1 Model tests apparatus

2 电阻率-饱和度-基质吸力关系

2.1 电阻率与饱和度关系

根据如前所述的试验方案开展不同压实度情况下电阻率-饱和度标定试验, 得到二者曲线关系如图 2 所示。由图 2 可见, 压实黄土的电阻率 ρ 与饱和度 SI 函数关系可用 Archie 模型^[22]来描述:

$$\rho = a_0(SI)^{b_0}, \quad (1)$$

式中, 参数 a_0 , b_0 与压实度的关系如图 3 所示, 参数 a_0 与压实度 λ 呈直线增长关系, 可以用数关于压实度 λ 的直线函数表示, b_0 随压实度 λ 变化不大, 基本处在 $-2.57 \sim -3.06$ 之间, 变化不大, 可以近似取平均值 -2.81 。

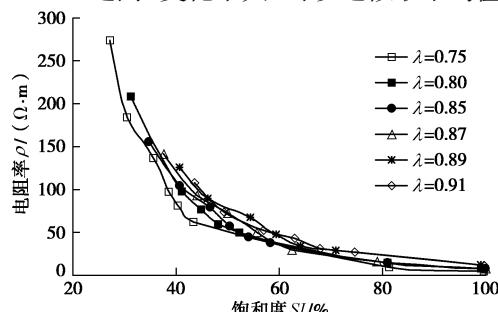


图 2 压实黄土电阻率与饱和度关系

Fig. 2 Relationship between resistivity and saturation degree

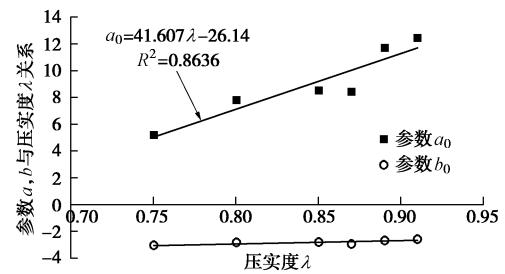


图 3 压实黄土基质吸力与电阻率关系

Fig. 3 Relationship between resistivity and matric suction

2.2 基质吸力与饱和度关系

通过室内非饱和土三轴仪在无荷载增湿条件下得到的不同压实度黄土土水特征曲线(饱和度-基质吸力)如图 4 所示。

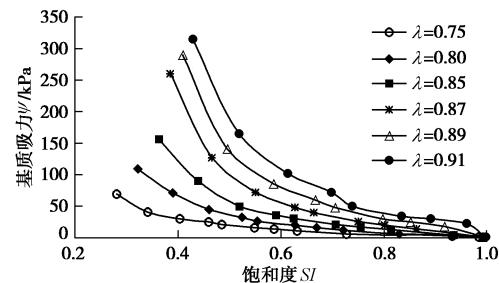


图 4 压实黄土基质吸力与饱和度关系

Fig. 4 Relationship between matric suction and saturation degree

有学者提出了各自的土水特征曲线预测公式^[5, 11, 23], 本文以 Fredlund-Xing 提出的经典公式来描述压实黄土的土水特征曲线:

$$\theta_w = \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^b \right] \right\}^c} \quad (2)$$

式中 θ_w 为体积含水率 (%); θ_s 为饱和体积含水率 (%); 其中 $\theta_w/\theta_s = SI$; ψ 为基质吸力 (kPa); a 是与进气值有关的参数 (kPa); b 是当基质吸力大于进气值后与土体脱水速率有关的参数。将式 (2) 中的基质吸力 ψ 表示为饱和度 SI 的函数,

$$\psi = a \left[e^{\left(\frac{1}{SI} \right)^c} - e \right]^{\frac{1}{b}} = A \left[e^{(SI)^B} - e \right]^C \quad (3)$$

式 (3) 左边公式较为复杂, 为了简化将其公式简化为右边的简化公式, 其中参数 A , B , C 与压实度 λ 的关系如图 5 所示。 A 与压实度 λ 呈复杂指数增长关系, 参数 B 随压实度 λ 基本呈线性增大关系, 其变化幅度较小, 基本在 $0.76 \sim 1.65$ 之间变化, 参数 C 随压实度 λ 基本呈线性减小关系, 基本处在 $0.55 \sim 1.01$ 之间变化, 如图 5 所示。

2.3 基质吸力与电阻率关系

将式 (3) 中的饱和度 SI 用式 (1) 中的电阻率 ρ

来表示，则基质吸力 Ψ 完全可以表示为电阻率 ρ 的函数，这样就可以得到基质吸力 Ψ 与电阻率 ρ 的关系，如图 6 所示。

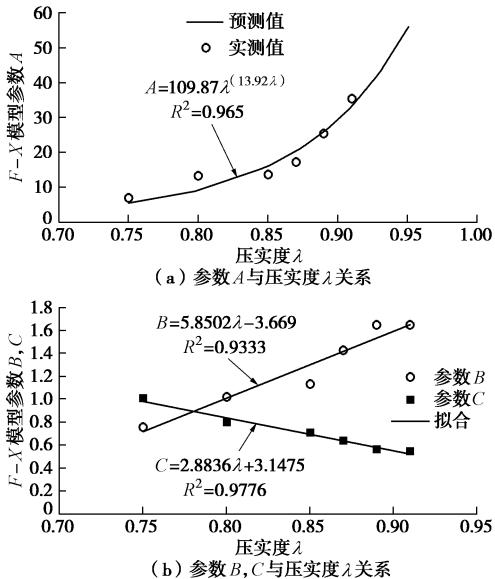


图 5 参数 A , B , C 与压实度 λ 关系

Fig. 5 Relationship between parameters A , B and C and compaction degree

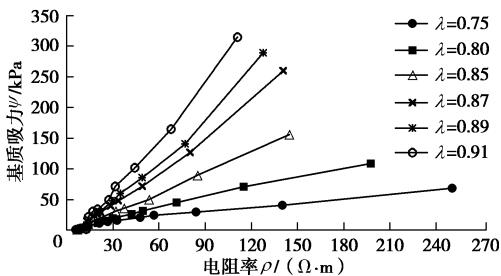


图 6 压实黄土基质吸力与电阻率关系

Fig. 6 Relationship between resistivity and matric suction

基质吸力 Ψ 与电阻率 ρ 之间可采用幂指数函数关系来表示：

$$\Psi = A \left[e^{\left(\frac{a_0}{\rho} \right)^{\frac{B}{b_0}}} - e \right]^C \quad (4)$$

可见，由于土体的饱和度 SI 在基质吸力 Ψ 和电阻率 ρ 之间存在一个良好的“桥梁”作用，因此，采用上式进行基质吸力的预测是完全可行的，式(4)中的参数 A , B , C 为与压实黄土基质吸力相关的系数，参数 a_0 , b_0 为与压实黄土电阻率相关的系数，上述 5 个参数均与压实度 λ 呈一定的函数关系，其建议取值如下： $A=109.87\lambda^{(13.92\lambda)}$; $B=5.8502\lambda-3.669$; $C=-2.8836\lambda+3.1475$; $a_0=41.607\lambda-26.14$; $b_0=-2.81$ 。

需要说明的是：上述参数仅为在室温 25°C 和无应力状态下的延安某地区压实黄土的定量测试结果，在工程实际中应用时，应考虑到温度、应力状态和区域性差异等，需要对上述参数进行重新室内试验标定。

从图 6 中可见，电阻率与基质吸力之间的变化趋势呈正相关，电阻率越高，导电性能越差，反映了土体内部孔隙液越少，从而直接反映出土颗粒之间的基质吸力越大的现象，且这种正相关现象随着压实度的增大表现更为强烈，表明：稍微增加压实度，可以将土体的基质吸力提高到一个很可观的程度，更有利于黄土高填方的长期变形和稳定。

3 降雨条件下压实黄土的渗透特性分析

3.1 饱和度随时间变化规律

为了研究在不同压实度情况下，压实黄土在降雨入渗期间的水分竖向迁移规律，进行了 6 组试验，不同压实度下，当降雨入渗稳定时左旭时间分别为 247 h ($\lambda=0.75$)、254 h ($\lambda=0.80$)、267 h ($\lambda=0.85$)、283 h ($\lambda=0.87$)、317 h ($\lambda=0.89$)、387 h ($\lambda=0.91$)，现取 $\lambda=0.75$, $\lambda=0.85$, $\lambda=0.91$ 分别在经历小雨、大雨、暴雨等这 3 种情况下的试验结果进行分析，如图 7 所示。结合图 1(d) 中给出的 1~7 层深度的 H 位置及图 7 中可以看出：

(1) 不同压实度的试样在水分入渗的过程中，第 1 层在最表层，其饱和度变化最为明显，变化的幅度比较大，变化速度也是最快的，第 2 层和第 3 层较第一层次之，每次降雨之后都是饱和度迅速上升，然后慢慢下降达到一个基本稳定的过程。

(2) 第 4 层和第 5 层在小雨和大雨阶段，其饱和度都是先迅速上升，然后向深层入渗慢慢达到一个稳定的过程。但是到了暴雨阶段，在压实度较小时，4, 5 层的饱和度都是先很快增加，然后再慢慢下降达到一个基本稳定的过程；在压实度较大时，这两层呈现的是饱和度先较快上升，然后上升的趋势变得缓慢，后期不再下降而是缓慢达到稳定。

(3) 每个试样的第 6 层饱和度较其上层变化缓慢，在压实度较低时，大雨时候才慢慢渗到第 6 层，并且此层的饱和度都是刚开始迅速上升，然后上升的趋势变慢，最终达到一个稳定状态。

(4) 第 7 层饱和度在小雨、大雨情况下基本无变化，在暴雨阶段，随着水分的慢慢入渗，水分到达该层时，体积含水率急剧上升，然后上升趋势变得缓慢，最终达到一个基本稳定状态，且在暴雨阶段中，水分到达试筒最底层时，会有少量水分从仪器底部的排水口渗出，表明大雨情况下，其渗透深度已超过 0.8 m。

(5) 综合对比可知：随着压实度的增大，水分的入渗深度逐渐变小，压实度较小时，试样的孔隙比较大，在相同的降雨量情况下，水分入渗的速率也就越快，上层土体孔隙水逐渐增多，孔隙水压力变大，导致吸力变小，而下层的吸力大于上层的吸力，在下层

的吸力和水分的自重作用下, 水分又逐渐向下层迁移, 直至达到一个平衡状态, 水分不再向深处迁移, 这时, 上层的饱和度先增大再减少, 下层的饱和度逐渐增大。

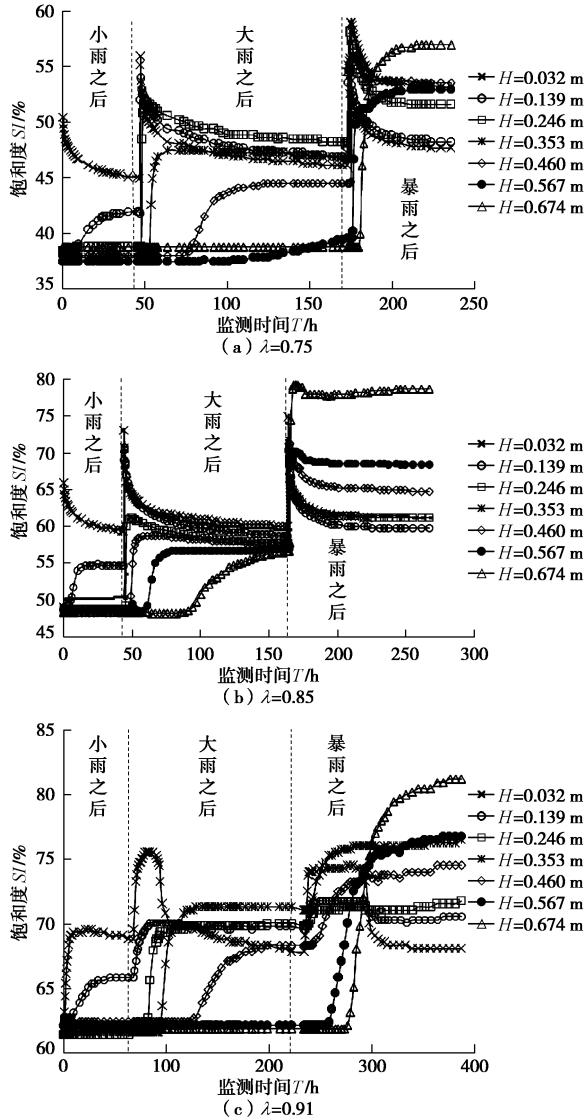


图7 不同深度处压实黄土饱和度随时间变化曲线

Fig. 7 Saturation degrees at various depths with time under different rainfall patterns

3.2 降雨入渗速率分析

黄土高填方工程土方平衡设计中, 对压实黄土的含水率要求为最优含水率 $w_{op} \pm 1\%$, 本文选取击实试验所获取的 $w_{op}=16\%$ 。以初始状态为基准, 其水分向下入渗期间, 假设距离顶面的深度 H (m) 处的水分初至所需时间为 t (h), 则不同深度处水分的入渗速率 $v=H/t$ (m/h) 如图 8 (a)、(b) 所示, 可知:

(1) 在不同降雨条件下和不同压实度条件下, 重塑压实黄土的水分竖向入渗速率呈现出非线性特性, 入渗速率随着土体深度的增加而逐渐降低, 随着降雨量的增大其入渗率加快。

(2) 假定水分入渗至某高度处其入渗速率为零时的深度为其最大入渗深度 H_{max} , 实验结果表明: 小

雨情况下, $H_{max}=0.35$ m ($\lambda=0.75$), $H_{max}=0.25$ m ($\lambda=0.85$), $H_{max}=0.20$ m ($\lambda=0.91$); 在大雨情况下, $H_{max}=0.65$ m ($\lambda=0.75$), $H_{max}=0.57$ m ($\lambda=0.85$), $H_{max}=0.55$ m ($\lambda=0.91$); 在暴雨情况下, 水分在试样最底部均有渗出现象, 而本实验的试样高度最大为 0.8 m, 如果实验时间足够长, 则其最大入渗深度将超过 0.8 m。对比可见: 黄土中水分的入渗速度随着黄土试样压实度的变大而减缓; 在不同雨型下, 对入渗深度也有很大的影响, 随着降雨量的增加, 入渗的深度也显著加深。

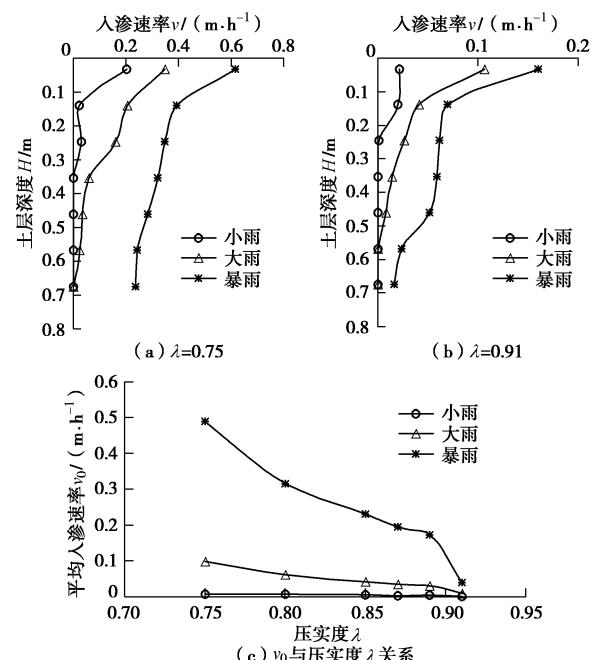


图8 入渗速率 v - 深度 H - 压实度 λ 关系

Fig. 8 Infiltration rate versus depth under different compaction degrees

为了对比不同雨型和不同压实度下水分入渗速率, 将不同深度 H 处的水分入渗速率 v 进行加权平均, 得到其加权平均入渗速率 v_0 , 如图 8 (c) 所示。可知:

(1) 不同雨型下、不同压实度下水分的加权平均入渗速率 v_0 随着压实度 λ 的增大而迅速减小, 表明压实度的增加使得土体内部的孔隙比降低, 水分通过能力较差, 表现为入渗速率减小的现象。

(2) 降雨量越大其入渗速率越快, 暴雨, 大雨和小雨工况下的平均入渗速率之比约为 50 : 10 : 1, 可见不同雨量情况下, 压实黄土的入渗速率存在较大的差异, 在实际黄土高填方工程中, 压实度增加很小的幅度, 就可以获得非常可观的阻水能力, 防止降雨入渗而引起“湿陷性恢复”现象。

3.3 电阻率 - 饱和度变化规律分析

为了对比不同雨型、不同压实度条件下水分入渗达到稳定状态后的土体“电阻率 - 饱和度”相互关系及随深度的变化规律, 选取 $\lambda=0.75$, 0.85 和 0.91 三

种情况下的饱和度 SI -电阻率 ρ -土层深度 H 关系曲线, 如图 9 所示。从图 9 可见:

(1) 实测不同深度 H 处的饱和度 SI 和电阻率 ρ 变化趋势恰好相反, 随着深度的增加, 小雨下表层土体饱和度 SI 略有下降, 而电阻率 ρ 呈上升趋势, 但相对于初始状态大幅减小, 表明水分入渗改善了电流通道, 由于雨量较小最大入渗深度有限 ($0.20\sim0.35$ m), 其下层土体的饱和度基本不变 ($SI-H$ 曲线呈“Y”型), 则其电阻率也基本不变, 但由于受到周围温度环境的少许影响, 电阻率实测值存在微小波动。

(2) 在大雨和暴雨情况下, 由于雨量相当于小雨的 $5\sim10$ 倍, 其水分供给量充足, 大雨情况下水分可渗透到地表以下 $0.55\sim0.65$ m, 其 $SI-H$ 曲线呈“D”型, 而暴雨情况下渗透深度已超过 0.8 m, 其 $SI-H$ 曲线呈正倒“V”型, 总体而言, 随着雨量的增大, 土体饱和度增加量越高, 电阻率降低越多, 而随着压实度 λ 的增大, 其饱和度 SI 增大幅度呈降低趋势, 电阻率 ρ 的降低程度呈减小趋势, 表明压实度 λ 的增大, 土体的孔隙度越小, 水分入渗通过的能力越低, 饱和度上升的空间越小, 导电性能也呈降低趋势。

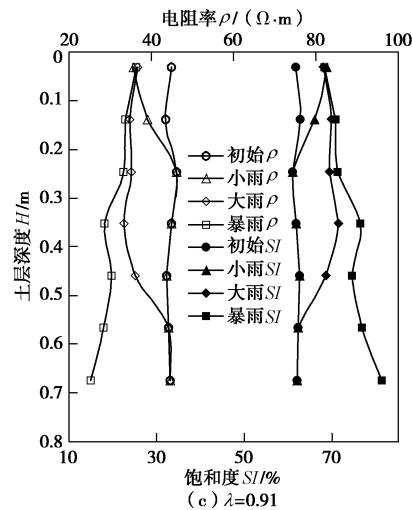
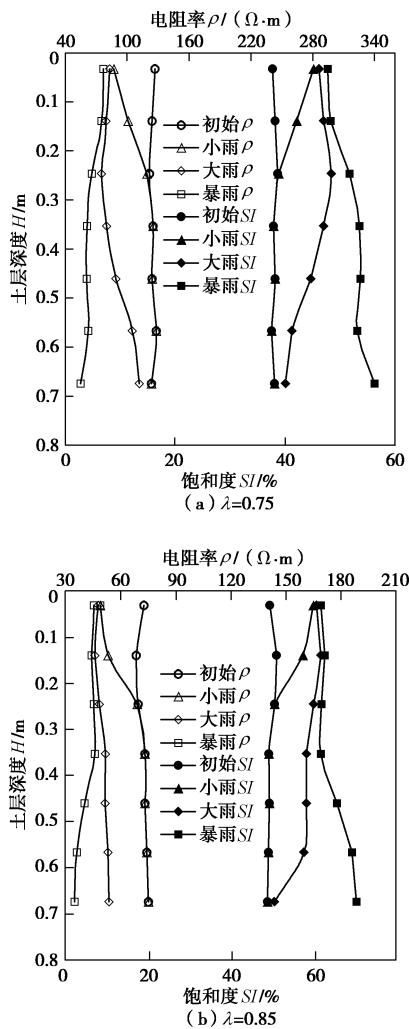


图 9 不同压实度下 $SI-\rho-H$ 关系

Fig. 9 $SI-\rho-H$ curves under different compaction degrees

由于本次试验过程中同时测定了不同深度 H 处的饱和度 SI 和电阻率 ρ 变化趋势, 为了验证饱和度 SI 和电阻率 ρ 之间的函数关系式(1)的合理性, 特选取 $\lambda=0.85, 0.91$ 两种情况下的实测电阻率与预测公式(1)计算得到的曲线对比情况, 如图 10 所示。

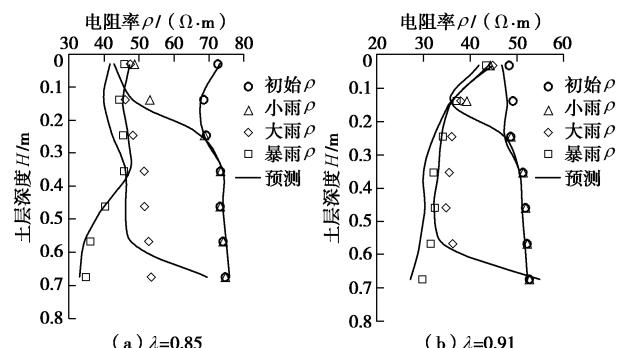


图 10 电阻率-饱和度关系的模型预测与实测对比

Fig. 10 Comparison between SI versus ρ by model predictions and measured value

由图 10 对比可见, 电阻率实测值与经验模型函数关系(1)计算值吻合度达 90%以上, 由于水分在入渗期间存在热交换, 土体内部的温度环境存在一定的变化, 电阻率必然受到一定的影响, 造成实测结果与预测结果存在一定的误差, 但总体而言, 满足工程精度要求表明: 通过测试土体不同深度处的电阻率演化过程可以实现预测土体饱和度或水分场演化规律的目的, 这为后期研究深厚黄土高填方工程内部水分场的变化规律和变形细观机制具有重要的价值。

3.4 基质吸力的预测

根据前文得到的 Archie 电阻率-饱和度模型和 Fredlund & Xing 吸力-饱和度模型关系, 建立起了电阻率-基质吸力模型, 这样就可以通过实测得到的土体电阻率来达到预测土体基质吸力的目的, 现选取不同雨型下, 压实度 $\lambda=0.85, 0.91$ 时, 渗透稳定后的不同

深度处吸力随深度变化的关系曲线, 如图 11 所示。

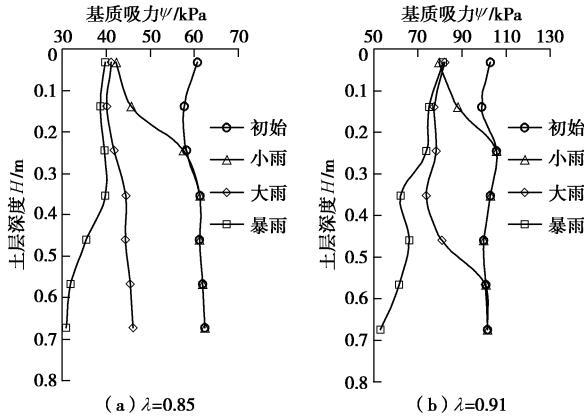


图 11 基于电阻率 - 基质吸力模型的吸力预测结果

Fig. 11 Variation of matric predicted by ρ - Ψ model

由图 11 可知:

(1) 对于同种压实度黄土, 在不同深度处的吸力随时间的变化主要与试样中水分的变化直接相关。在不同雨型下, 试样各深度处水分含量越多, 则体积含水率越大, 土体孔隙逐渐被水填满, 孔隙水压力增大, 吸力的值就越小; 相反, 水分减少, 体积含水率下降时, 吸力值就增大。不同深度处吸力的大小随时间变化的分析过程与体积含水率随时间的分析过程恰好相反。

(2) 根据非饱和土三轴试验中, 测试某一个压实度下重塑黄土的土水特征曲线时间较长, 且花费极为昂贵, 尤其在填方高度达 100 多米的黄土高填方内部, 如需实时了解其内部水分迁移和增减变化规律, 采用在土体内部预埋电阻率测试探头, 能够快速获取其水分场变化规律, 在结合室内标定试验得到的“电阻率 - 饱和度 - 基质吸力”预测公式, 可以快速提取高填方内部的饱和 - 非饱和特性, 从而对其长期变形和稳定性状态进行长期监控, 便于安全预警和灾害防治。

4 结论与讨论

本文通过自行研发的模型试验设备, 开展了压实黄土的“电阻率 - 饱和度 - 基质吸力”相互关系的室内标定试验和降雨条件下的水分入渗模拟实验, 得到如下结论:

(1) 针对不同地区的黄土及其高填方或路基工程而言, 基于室内大量标定试验, 可以通过饱和度这一“桥梁”, 建立起压实黄土的“电阻率 - 饱和度 - 基质吸力”函数关系, 从而可以快速获取高填方深层土体内部基质吸力, 这对深入分析黄土高填方或高边坡工程的长期变形细观机理和稳定性态及灾害预警具有重要的应用前景。

(2) 不同降雨条件下, 降雨量越大, 压实黄土的水分入渗深度越深, 入渗速率越大, 且随深度呈非线性衰减趋势, 此外, 不同雨型下的入渗锋面不同, 小

雨下入渗面呈“Y”型(最大入渗深度 $H_{\max}=0.20\sim0.35$ m), 大雨下呈“D”型($H_{\max}=0.55\sim0.65$ m), 暴雨下呈倒“V”型($H_{\max}>0.8$ m); 而在相同的降雨量下, 黄土压实度越高, 其入渗深度越浅, 饱和度增幅较低压实度的偏小; 基于“电阻率 - 基质吸力”预测公式可以精确地描述压实黄土的饱和 - 非饱和土水特征。

(3) 土体在饱和情况下电阻率不可能为 0, 而根据预测公式得到的基质吸力不为 0, 本文在饱和度较高(超过 85%)时, 采用电阻率预测吸力存在一定的误差, 可能原因是雨水向下入渗期间, 土体内部的环境温度、孔隙液成分或应力状态的微弱变化对电阻率和基质吸力产生影响, 这部分的影响尚需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 张炜, 张继文, 于永堂. 黄土高填方关键技术问题与工程实践[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(1): 12-19. (ZHANG Wei, ZHANG Ji-wen, YU Yong-tang. Key technical issues and engineering practices in project construction of loess deep filled foundation[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2016, 30(1): 12-19. (in Chinese))
- [2] 姚仰平, 车力文, 祁生钧, 等. 高填方地基蠕变沉降计算方法研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 25-31. (YAO Yang-ping, CHE Li-wen, QI Sheng-jun, et al. Study of creep settlement computation methods for high embankments[J]. Industrial Construction, 2016, 46(9): 25-31. (in Chinese))
- [3] 朱才辉, 李宁, 刘明振, 等. 吕梁机场黄土高填方地基工后沉降时空规律分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 293-301. (ZHU Cai-hui, LI Ning, LIU Ming-zhen, et al. Spatiotemporal laws of post-construction settlement of loess-filled foundation of LÜ-liang Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 293-301. (in Chinese))
- [4] 朱才辉, 李宁. 基于土电阻率的黄土高填方地基细观变形机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 640-648. (ZHU Cai-hui, LI Ning. Mesoscopic deformation mechanism of loess high-fill foundation based on soil electrical resistivity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 640-648. (in Chinese))
- [5] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 非饱和土与特殊土测试技术新进展[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 147-169. (CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, FANG Xiang-wei, et al. Recent advances of the measuring technology for unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 147-169. (in Chinese))
- [6] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 基于电阻率的非饱和土基质吸

- 力预测[J]. 岩土力学, 2010, **31**(3): 1003 – 1008. (ZHA Fu-shen, LIU Song, DU Yan-jun, et al. Prediction of matric suction of unsaturated soil based on electrical resistivity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(3): 1003 – 1008. (in Chinese))
- [7] 于小军, 刘松玉. 电阻率指标在膨胀土结构研究中的应用探讨 [J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(3): 393 – 396. (YU Xiao-jun, LIU Song-yu. Researches on application of electrical resistivity indices to the microstructure of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(3): 393 – 396. (in Chinese))
- [8] DE Vita P, DI Maio R, PIEGARI E. A study of the correlation between electrical resistivity and matric suction for unsaturated ash-fall pyroclastic soils in the Campania Region (Southern Italy)[J]. Environ Earth Sci, 2012, **67**: 787 – 798.
- [9] PIEGARI E, MAIO R Di. Estimating soil suction from electrical resistivity[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 2013, **13**: 2369 – 2379.
- [10] 董晓强, 黄凤凤, 苏楠楠, 等. 非饱和黄土受压过程中交流电阻率特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(1): 189 – 197. (DONG Xiao-qiang, HUANG Feng-feng, SU Nan-nan, et al. Experimental study of AC electrical resistivity of unsaturated loess during compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(1): 189 – 197. (in Chinese))
- [11] VAN GENUCHTEN M T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society Merican Journal, 1980, **44**: 892 – 898.
- [12] 王铁行. 非饱和黄土路基水分场的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(1): 41 – 45. (WANG Tie-hang. Moisture migration in unsaturated loess subgrade[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(1): 41 – 45. (in Chinese))
- [13] 王桂尧, 李斌, 付宏渊. 非饱和路基土水分运移的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 61 – 65. (WANG Gui-yao, LI Bing, FU Hong-yuan. Experimental study of moisture migration of unsaturated soil in embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 61 – 65. (in Chinese))
- [14] 张建红, 劳敏慈, 胡黎明. 非饱和土中水分迁移及污染物扩散的离心模拟[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(5): 622 – 625. (ZHANG Jian-hong, LAO Min-ci, HU Li-ming. Centrifuge modeling of moisture and contaminant migration in unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(5): 622 – 625. (in Chinese))
- [15] 廖盛修. 湿陷性黄土地基预浸水 [J]. 有色冶金建筑, 1983(2): 1 – 13. (LIAO Sheng-xiu. Study on presoaking of collapsible loess[J]. Nonferrous Metallurgy Construction, 1983(2): 1 – 13. (in Chinese))
- [16] 钱鸿缙, 朱梅, 谢爽. 河津黄土地基湿陷变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 1992, **14**(6): 1 – 9. (QIAN Hong-jing, ZHU Mei, XIE Shuang. Experimental study on the regularities of collapsible deformation of loess foundation in Hejin, Shanxi[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **14**(6): 1 – 9. (in Chinese))
- [17] 李大展, 何颐华, 隋国秀. Q2 黄土大面积浸水试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(2): 1 – 11. (LI Da-zhan, HE Yi-hua, SUI Guo-xiu. Study and test on immersion of Q2 loess in large area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(2): 1 – 11. (in Chinese))
- [18] 刘保健, 谢永利, 于友成. 黄土非饱和入渗规律原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(24): 4156 – 4160. (LIU Bao-jian, XIE Yong-li, YU You-cheng. In-situ testing study on infiltration in unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(24): 4156 – 4160. (in Chinese))
- [19] 黄雪峰, 陈正汉, 哈双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 382 – 389. (HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Large area field immersion test on characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 382 – 389. (in Chinese))
- [20] 黄雪峰, 李佳, 崔红, 等. 非饱和原状黄土垂直高边坡潜在土压力原位测试试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(4): 500 – 506. (HUANG Xue-feng, LI Jia, CUI Hong, et al. Distribution characteristics of earth pressure for unsaturated intact loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(4): 500 – 506. (in Chinese))
- [21] 姚志华, 黄雪峰, 陈正汉, 等. 兰州地区大厚度自重湿陷性黄土地场浸水试验综合观测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(1): 65 – 74. (YAO Zhi-hua, HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, et al. Comprehensive soaking tests on self-weight collapse loess with heavy section in Lanzhou region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(1): 65 – 74. (in Chinese))
- [22] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the AIME, 1942, **146**: 54 – 62.
- [23] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(3): 521 – 532.