

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.03.024

# 上覆强透水层的双层土质边坡降雨入渗特征

王述红, 何 坚, 王 帅, 阮文俊  
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为研究浅层强透水的双层土质边坡降雨渗流特征,建立均质粉土与砂土-粉土的土柱、边坡模型,依据基质吸力与含水率的控制方程,分析了土层渗透性、地下水、坡度对饱和区成形影响.结果表明:砂土-粉土柱产生饱和区,既因土层渗透差导致雨水在砂土底层蓄积,又因粉土表面的渗流速度陡降;砂土-粉土边坡饱和区在土层界面首先产生,在纵向上以界面为中心逐渐往各土层内扩展,同时沿土层界面往坡顶上发展,其延伸长度随着地下水位升高而逐渐增大,但地下水位2 m与1 m时,坡度越大,延伸长度越小;地下水位与坡度均影响土层界面的初始饱和度.

**关 键 词:** 降雨入渗;非饱和土;地下水;坡度;成层土质边坡

**中图分类号:** P 641      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)03-0438-07

## Rainfall Infiltration Characteristics of Double-Layered Soil Slope Covered by a Highly Permeable Stratum

WANG Shu-hong, HE Jian, WANG Shuai, NGUYEN Vantuan  
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: HE Jian, E-mail: hejian95@foxmail.com)

**Abstract:** In order to study the rainfall infiltration characteristics of double-layered soil slope covered by a highly permeable stratum, the soil column and slope model of homogeneous silt and sand-soil were established respectively, and the governing equations according to the matric suction and water content were used to analyze the effect of permeability, ground water level and slope angle on the formation of saturated zone. The results showed that the formation of saturated zone in sand-soil column is caused by the water accumulation under the sand layer due to the permeability difference, and the dramatically decrease of seepage velocity in the surface of the silt layer. The saturated zone is initially formed in the interface of the soil layer in the sand-soil slope and develops along the interface till to the upper boundary of the slope. In the meanwhile, it gradually develops into the soil layers and up to the interface of layers in the longitudinal direction. The extension length along the soil interface gradually increases with the increase of the groundwater table, but when the groundwater table is 2m and 1m, the extension of the saturated zone is reduced with the increases slope angle. The initial saturation degree is affected by groundwater table and slope angle.

**Key words:** rainfall infiltration; unsaturated soil; underground water; slope angle; layered soil slope

降雨是诱发边坡滑坡最主要的自然诱因,能引起严重的生命财产损失<sup>[1]</sup>. 降雨一方面使雨水蓄积在土体内部增大自重,另一方面雨水降低土内负孔隙水压力(基质吸力),削弱非饱和土体强度,边坡极易形成滑动面,诱发滑坡<sup>[2-3]</sup>. 因此,研究降雨引起的饱和区域的产生时间、部位与形态

对边坡稳定性的影响有重要意义。

Chen 等通过监测数据发现滑动面基质吸力降低是滑坡发生的关键因素<sup>[4]</sup>; Collins 等发现土体渗透特性会影响边坡饱和和区域产生的部位, 引发深层或浅层不同的滑坡<sup>[2]</sup>. 曾玲等则通过数值模拟对均质边坡的饱和区形态和特征进行研究<sup>[5]</sup>. 不同土层结构与降雨条件导致边坡内不同部位产生饱和区, 并对边坡破坏的模式产生影响. 同时, 降雨引起地下水运动并显著影响边坡的稳定性<sup>[6]</sup>. 综上, 饱和区成形并导致边坡失稳是降雨与地质环境相互作用的结果。

上述研究对象为均质边坡, 然而, 自然条件下, 边坡常成层分布. 层状土根据土质可分成: 1) 弱透水性的细质土覆盖强透水性的粗质土; 2) 强透水性的粗质土覆盖弱透水性的细质土<sup>[7]</sup>. 由于填土以及废土堆积, 边坡表层堆积土质疏松透水, 在弱透水层的界面处易蓄积滞水, 影响边坡稳定性, 因此引发了对强透水土-弱透水土边坡的关注. 本文以广泛存在的砂土与粉土组合, 分析砂土-粉土边坡在不同坡度、地下水位、降雨强度下的渗流规律与土层界面含水特征, 对比均质粉土边坡, 分析了成形机理差异, 为后续研究滞水提供参考。

## 1 双层土边坡渗流基本理论

### 1.1 非饱和土渗流基本理论

Richards 将 Darcy 定律运用到非饱和土渗流中, 获得适用于非饱和土瞬态流的基本控制方程<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_w r_w \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (1)$$

其中:  $H$  为总水头;  $k_x$  为  $x$  方向渗透系数;  $k_y$  为  $y$  方向渗透系数;  $Q$  为施加在边界的流量;  $m_w$  为土水特征曲线 (SWCC) 曲线斜率;  $r_w$  为水容重;  $t$  为时间。

非饱和土含有气体, 水在土体入渗时会受到气压的影响, 气压与土体内的孔隙水产生压力差, 即基质吸力 (负孔隙水压力). 基质吸力与含水率相关, 两者关系通常使用 SWCC 曲线来描述. SWCC 能被 van Genuchten 模型准确表征<sup>[9]</sup>:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left( 1 + \left( \frac{S}{\alpha} \right)^n \right)^m}. \quad (2)$$

其中:  $\theta$  为体积含水率;  $S$  为基质吸力;  $\theta_s$  为饱和含水率;  $\theta_r$  为残余含水率;  $\alpha$ ,  $n$  和  $m$  为水分特征曲线形状参数, 且  $m = 1 - 1/n$ , 对应渗透系数方程计算式<sup>[10]</sup>为

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad (3)$$

$$k = k_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2. \quad (4)$$

式中:  $k_s$  为土体饱和时的渗透系数;  $S_e$  为相对饱和度。

### 1.2 含地下水的双层土含水-吸力控制方程

非饱和土含水率呈非线性变化, 而基质吸力分布较为规律, 以吸力表征含水率的方法可以表示双层土边坡的含水情况. 以地下水位线为界将土体分为正、负孔隙水压力区, 建立模型见图 1。

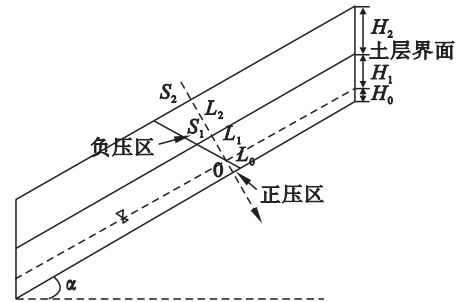


图1 含地下水的双层土边坡模型

Fig. 1 Double-layered slope model containing groundwater

初始时土体内部基质吸力平行坡面线性分布, 地下水位线处吸力为 0, 各层的表面吸力分别为  $S_1, S_2$ , 设吸力分布函数为  $S(l)$ , 则第一层土内吸力为

$$S(l) = \frac{l}{L_1} S_1, \quad (L_0 \leq l \leq L_1). \quad (5)$$

由式(2)与式(5)获得底部第一层土非饱和区域的含水率方程为

$$\theta(l) = \theta_{r_1} + \frac{\theta_{s_1} - \theta_{r_1}}{\left[ 1 + \left[ \frac{l}{L_1 \alpha_1} S_1 \right]^{n_1} \right]^{m_1}}, \quad (L_0 \leq l \leq L_1). \quad (6)$$

类似地, 对于第二层土, 则有

$$\theta(l) = \theta_{r_2} + \frac{\theta_{s_2} - \theta_{r_2}}{\left[ 1 + \left[ \frac{L_1 - l}{L_2} (S_1 - S_2) + S_1 \right]^{n_2} / \alpha_2^{n_2} \right]^{m_2}}, \quad (L_1 \leq l \leq L_1 + L_2). \quad (7)$$

在土层界面处施加一个连续吸力边界,

$$S_1 = \frac{L_1}{L_1 + L_2} S_2. \quad (8)$$

将式(8)分别代入式(6), 式(7), 则含地下水的双层土边坡吸力与含水率控制方程为

$$\left. \begin{aligned} \theta(l) &= \theta_{r_i} + \frac{\theta_{s_i} - \theta_{r_i}}{\left[ 1 + \left[ \frac{l}{(L_1 + L_2) \alpha_i} S_2 \right]^{n_i} \right]^{m_i}}, \\ (L_{i-1} \leq l \leq \sum_{i=1} L_i, L_0 = 0, i = 1, 2); \\ \theta(l) &= \theta_s, \quad (0 \leq l \leq L_0). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中  $\theta_{r_i}, \theta_{s_i}, \alpha_i, n_i$  和  $m_i$  为各层土水特征参数。

2 土柱入渗研究

2.1 土柱模型参数

如图 2 所示,建立土柱模型,土柱内设置一系列监控点,相邻监控点距离 1 m. 为对比均质与双层土柱入渗特征,用横向中线将土柱划分为上下两层土,当上下层为粉土时,是均质粉土柱;当上层为砂土、下层为粉土时,则是砂土-粉土柱,材料特征见图 3. 使用 ABAQUS 中 CPE4P 单元进行

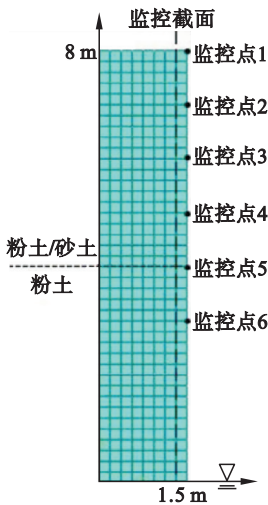


图 2 土柱模型  
Fig. 2 Soil column model

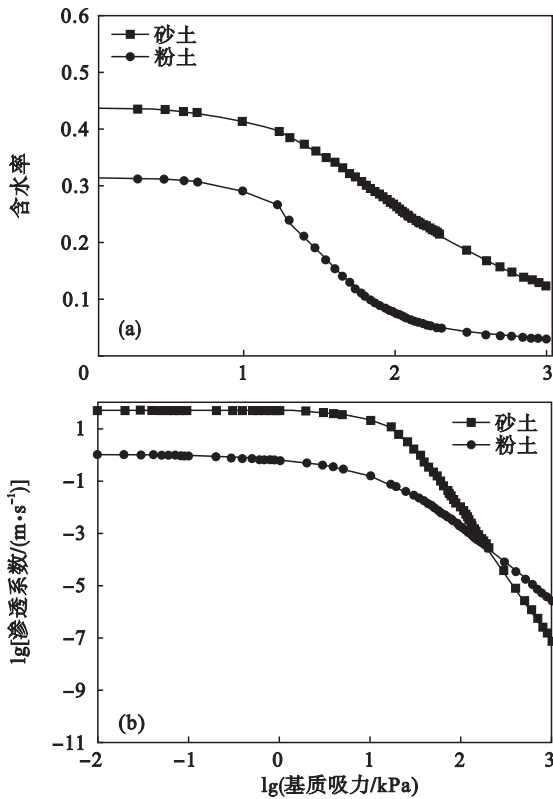


图 3 SWCC 与渗透系数曲线

Fig. 3 Curves of SWCC and permeability coefficient  
(a)—含水率与基质吸力关系;  
(b)—渗透系数与基质吸力关系.

渗流计算,四边形单元尺寸为 0.2 m,设置 5 种不同降雨强度:(2,4,6,8,10) × 10<sup>-6</sup> m/s.

2.2 入渗土柱的特征分析

降雨强度为 6 × 10<sup>-6</sup> m/s,如图 4 所示,砂土-粉土柱内土层界面处饱和度迅速增大,饱和度大于上下层土体,在纵向剖面上,土层界面处饱和度分布整体呈现“凸”状.随着降雨持续,土层界面处首先产生饱和区,由砂土层饱和区和粉土层饱和区两个部分组成.粉土层纵向剖面呈现“饱和-非饱和-饱和”分布,其中上部饱和区则为“降雨产生的饱和区”.砂土层底部首先产生饱和区,在饱和区的纵向深度上,粉土层大于砂土层.

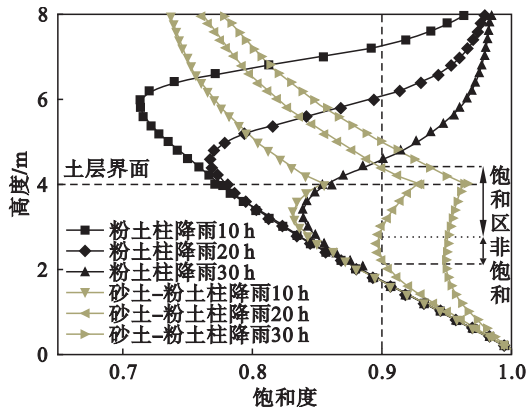


图 4 饱和度在纵向剖面上分布  
Fig. 4 Saturation distribution over the longitudinal section

分别选砂土-粉土柱的监控点 5 和粉土柱监控点 1,在降雨强度为 8 × 10<sup>-6</sup> m/s 时获得饱和区成形时间,见图 5. 两类土柱产生饱和区的时间均随着降雨强度的增大而逐渐减少,而砂土-粉土柱产生饱和区的时间与粉土柱存在时间差,并随着降雨强度的增大而逐渐减小,时间差由 24.2 h (降雨强度 2 × 10<sup>-6</sup> m/s) 逐渐减小到 6.0 h (降雨强度 1 × 10<sup>-5</sup> m/s). 在降雨导致的饱和区纵向长

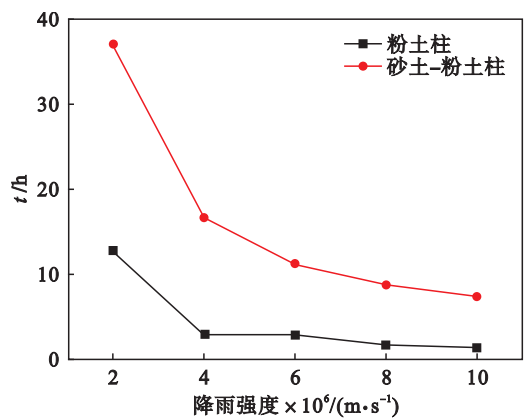


图 5 不同降雨强度下饱和区产生时间  
Fig. 5 Formation time of saturated zone under different rainfall intensities

度方面,雨强  $8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  时,由图 6 可知,对比均质粉土柱,砂土 - 粉土柱产生饱和区存在一个“间隔时间”,雨水从土体表面到土层界面需要一定入渗时间. 粉土柱的饱和区长度在整个过程中近似线性增长,而砂土 - 粉土柱在达到“间隔时间”后,饱和区长度为指数型增长.

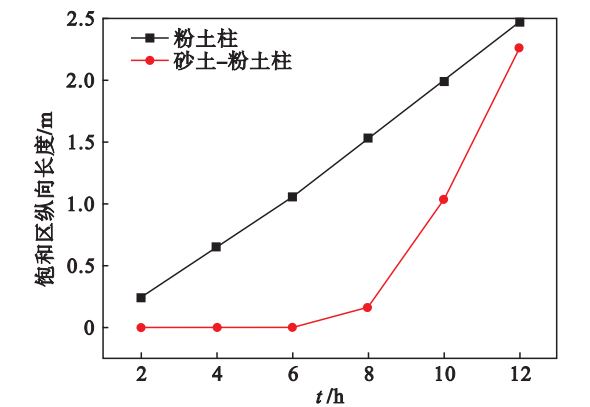


图 6 不同降雨时间的饱和区长度

Fig. 6 Length of saturated zone in different rainfall times

当雨强为  $8 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  时,选取粉土柱监控点 1 至 3,与砂土 - 粉土柱监控点 4,5,6 的饱和度随时间变化曲线见图 7. 粉土柱表面最先产生饱和区,随着降雨持续,饱和区逐渐深入. 砂土 - 粉土柱则在土层界面首先饱和,滞后粉土柱 7.18 h,之后粉土层监控点 6,砂土层监控点 4 依次达到饱和.

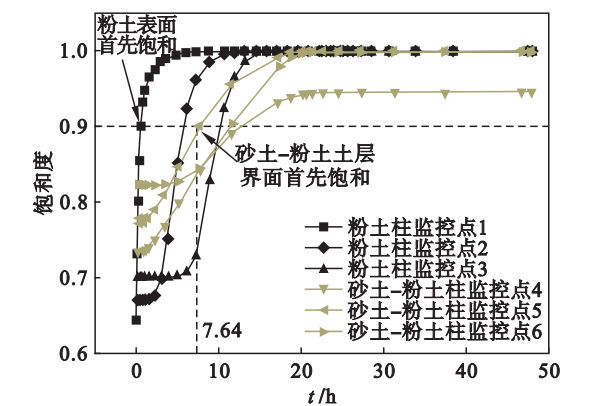


图 7 监控点饱和度随时间变化曲线

Fig. 7 Saturation-time curves of the monitoring points

为了探究砂土 - 粉土柱的饱和区产生机理,分析纵向剖面上渗流速度曲线与饱和区边界位置关系,如图 8 所示. 粉土柱纵向渗流速度存在渗流速度陡降部分,陡降曲线的中心恰好与对应时刻的饱和区底部边界重合,饱和区底部边界随着渗流速度陡降曲线中心逐渐往土体深部运移. 砂土 - 粉土柱渗流速度降低程度较粉土柱平缓,饱和区的下边界均在流速降低的曲线段内,土层界面

的渗流速度陡降程度因持续的降雨而增强.

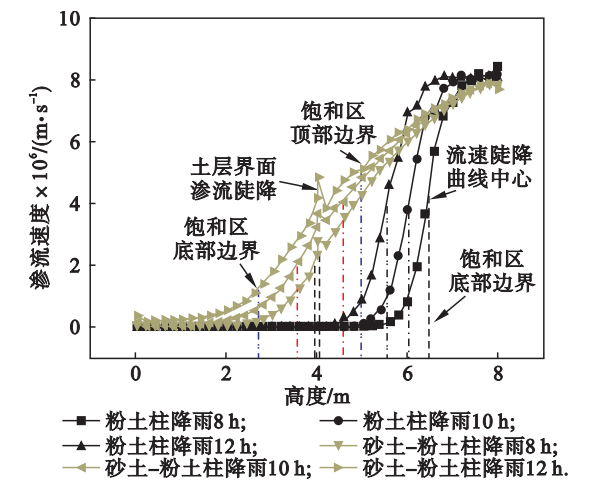


图 8 纵向剖面上渗流速度分布

Fig. 8 Seepage velocity distribution in the longitudinal profile

砂土 - 粉土柱产生饱和区主要包含两方面原因:1)入渗至砂土的雨水蓄积在砂土层底部,而由于粉土渗透性较砂土低,土层界面渗流速度陡降,雨水在粉土层上方蓄积,导致砂土层饱和区产生;2)入渗至粉土层的雨水渗流速度存在陡降,饱和区底部边界存在渗流速度差,导致雨水浅层蓄积,形成粉土层内的饱和区.

由上述分析可知,砂土 - 粉土柱入渗模式与均质土柱不同,产生的饱和区在土层界面处较易产生滞水,危害边坡稳定性. 砂土 - 粉土边坡的入渗规律对上覆强透水层边坡的破坏类型与失稳机制研究有重要意义.

### 3 砂土 - 粉土边坡的渗流特征

#### 3.1 边坡模型参数

建立图 9 模型,以平行坡面的中心线划分砂土层与粉土层均等的两部分,雨水垂直坡面入渗. 考虑整体入渗情况,选取坡中为监控截面,并选择坡中截面与土层界面交界点为监控点. 选择图 3 中的材料参数,并通过式(4)与式(9)获得的饱和度与渗透系数关系导入 ABAQUS,使用表 1 中的计算方案,选择 CPE4P 计算单元,四边形单元尺寸为 1 m.

表 1 降雨计算方案  
Table 1 Rainfall calculation scheme

土体类型	降雨强度 $\times 10^6$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	地下水 位/m	坡度/(°)
粉土	6	1	30
砂土 - 粉土	4,6,8	0,1,2	20,30,40



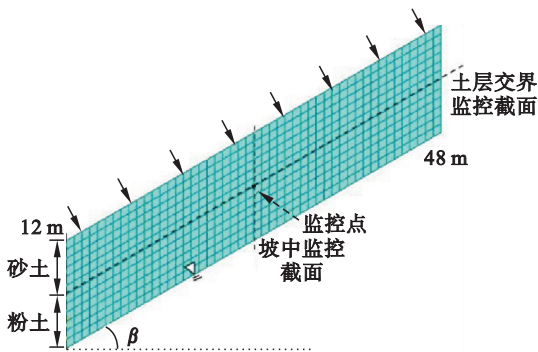


图 9 边坡模型  
Fig. 9 Slope model

3.2 边坡饱和区发展形态

当雨强为  $6 \times 10^{-6}$  m/s 时,选取地下水位 1 m、坡度  $30^\circ$  的两类边坡,如图 10 所示.砂土-粉土边坡,初始坡底土层界面处的饱和度较高,随着降雨持续,饱和区沿两个方向成形:在竖直方向上,饱和区以土层界面为中心,由坡体内部逐渐扩展至坡面与坡底;在沿土层界面的方向上,饱和区逐渐沿土层界面往坡顶发展.而对比砂土-粉土边坡,均质粉土边坡的饱和区首先在坡面产生,平行于坡面往内部深入.

3.3 边坡饱和区成形时间

选择  $30^\circ$  边坡、地下水位 1 m 的边坡,统计不

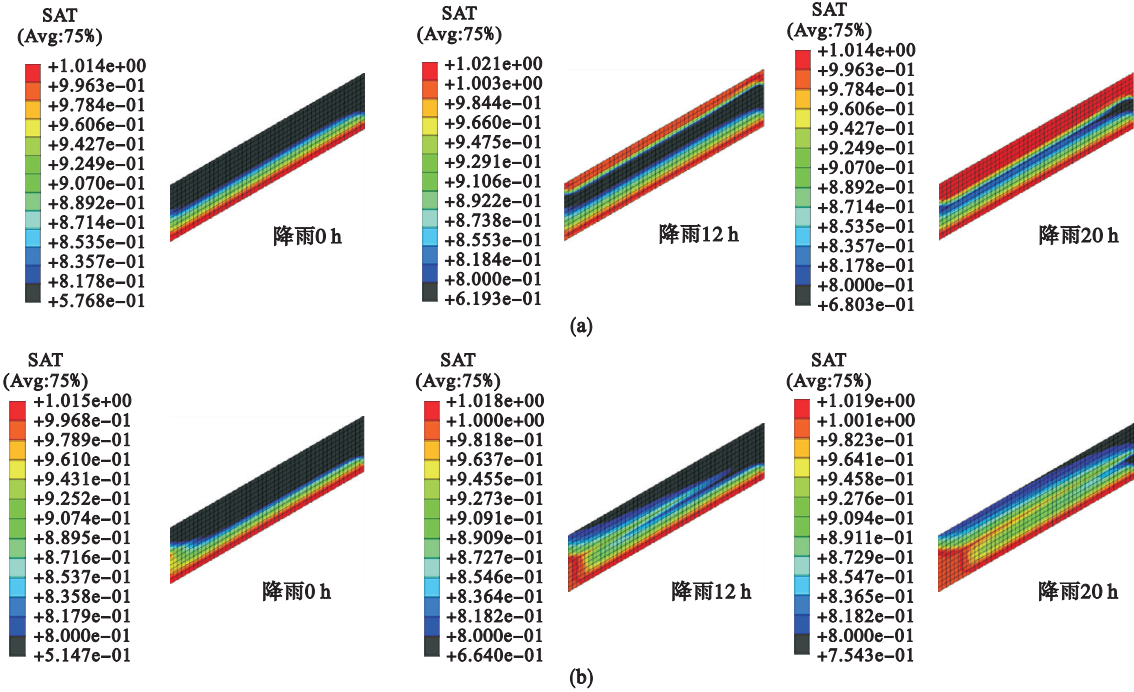


图 10 边坡饱和区开展过程  
Fig. 10 Development of the saturated zone  
(a)—均质粉土边坡;(b)—砂土-粉土边坡.

同条件下砂土-粉土边坡的监控点产生饱和区的时间,如图 11 所示.边坡产生饱和区的时间主要受降雨强度控制,降雨强度越大,相同地下水位与坡度的边坡产生饱和区的速度越快.对于相同降雨强度,坡度越大或地下水位越高,监控点产生饱和区的时间越短.

地下水位 0 m、坡度  $30^\circ$ ,地下水位 1 m、坡度  $20^\circ$  的边坡分别与地下水位 0 m、坡度  $20^\circ$  边坡饱和区产生的时间差值为  $-1.38$  h 与  $-4.44$  h (雨强  $4 \times 10^{-6}$  m/s),  $-1.15$  h 与  $-3.1$  h (雨强  $6 \times 10^{-6}$  m/s).相比坡度,地下水位对饱和区产生的促进作用更为显著,当降雨强度较小时,最为明显.

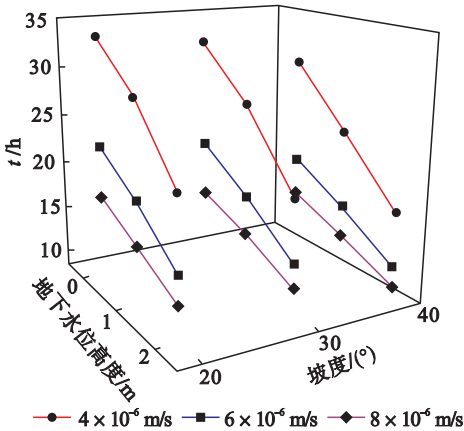


图 11 不同地质因素及雨强下饱和区成形时间  
Fig. 11 Formation time of saturated zone under different geological factors and rainfall intensities

3.4 边坡的渗流影响因素

当雨强为  $6 \times 10^{-6}$  m/s 时,获取监控点的饱和度与时间关系,如图 12 所示。相同坡度,地下水位越高,监控点初始的饱和度越大,饱和区产生越快;相同地下水位,坡度增大,监控点达到饱和更迅速。

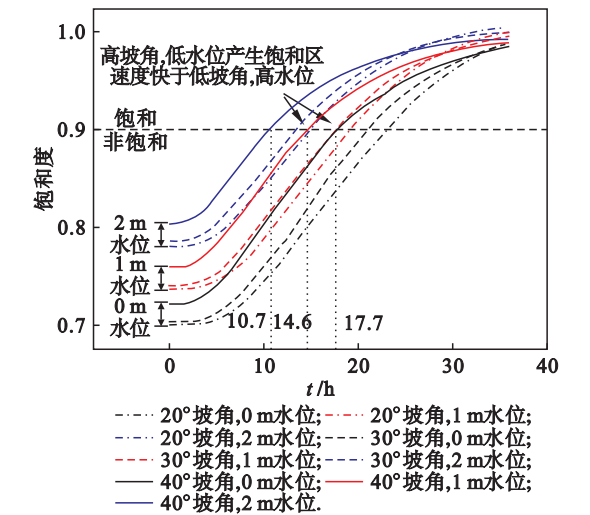


图 12 不同条件下饱和度 - 时间曲线  
Fig. 12 Saturation-time curves under different conditions

两种因素下,饱和区成形时间受地下水影响最大,高地下水位使土层界面处的初始饱和度较大。坡度增大,粉土层在垂直坡面的厚度逐渐减小,非饱和粉土层减少。因此,坡度越大,粉土层表面的初始饱和度增大。坡度与地下水位对比,产生饱和区时间:地下水位 1 m、坡度 40°边坡 < 地下水位 1 m、坡度 30°边坡;地下水位 0 m、坡度 40°边坡 = 地下水位 1 m、坡度 30°边坡 = 17.7 h,低地下水位、较大坡度边坡产生饱和区速度略大于或等于高地下水位、低坡度边坡。

由图 13 可知,地下水位越高或坡度越大,土层界面的初始负孔隙水压力越小,在降雨 4.87 ~ 25.2 h 与 6.8 ~ 20.7 h 间,地下水位 0 m、坡度 40°边坡与地下水位 1 m、坡度 40°边坡的负孔隙水压降低速率,分别快于地下水位 1 m、坡度 20°边坡和地下水位 2 m、坡度 20°边坡。

3.5 边坡的饱和区空间特征

砂土 - 粉土边坡饱和区分别沿土层界面的上坡方向和以土层界面为中心向坡底与坡面延伸。由图 14 可知,地下水位越高,饱和区沿土层界面延伸长度增速越大。

降雨 25 h 时,地下水位 2 m 和 1 m 边坡,坡度越大,延伸长度越小,最短长度为 40 m;而地下水位 0 m 边坡,坡度越大,延伸长度越大,最长为 38.9 m。地下水位 0 m,坡度 40°与地下水位 1 m,

坡度 40°的边坡,分别在降雨 0 ~ 22 h 与 10.92 ~ 16.42 h 内,延伸长度的增速分别大于地下水位 1 m、坡度 20°与地下水位 2 m、坡度 20°的边坡。地下水位与坡度分别增大饱和区延伸长度增速,但高地下水位边坡最终延伸长度仍最大。

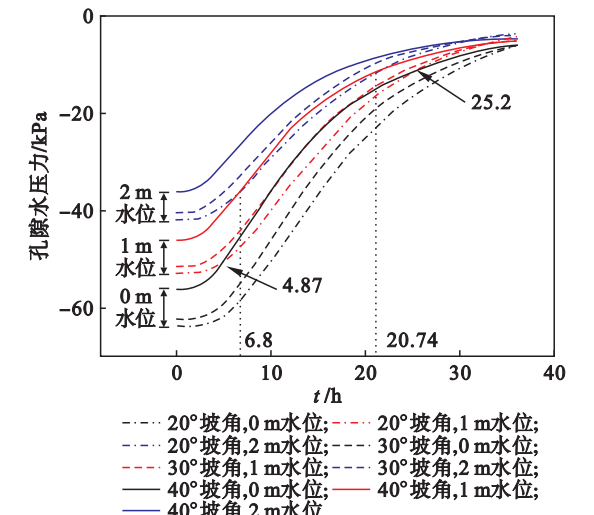


图 13 不同条件下孔隙水压力 - 时间曲线  
Fig. 13 Pore water pressure-time curves under different conditions

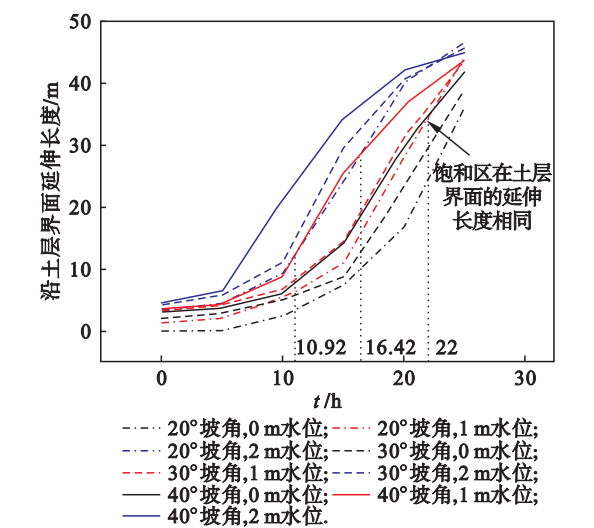


图 14 饱和区沿土层界面延伸长度曲线  
Fig. 14 Curves of extension length of the saturated zone along the soil interface

土层界面处形成的饱和区,在纵向上往坡面和坡底扩展,在粉土层成形速度远快于在砂土层,这里研究粉土层的饱和区深度,如图 15 所示。在降雨 30 h 时,地下水位 1 m 与 2 m 的边坡,饱和区深度分别呈现:坡度越大,饱和区的深度越小。而对于地下水位为 0 m 的边坡,饱和区深度则呈现:坡度越大,饱和区深度越大。坡度为 20°的边坡,饱和区深度呈现:地下水位 1 m > 2 m > 0 m;而对于坡度 40°边坡,饱和区深度则为:地下水位 0 m

> 1 m > 2 m.

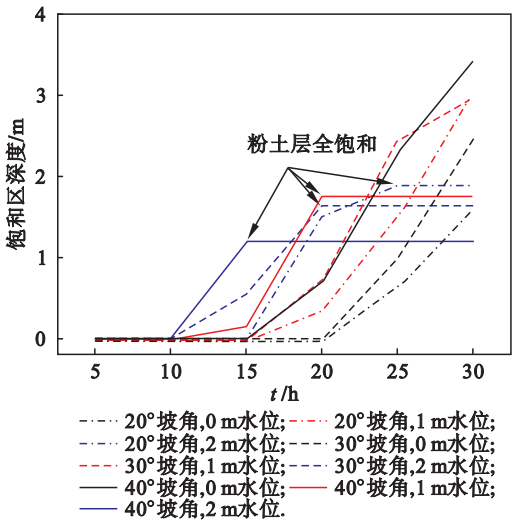


图 15 饱和区在粉土层深度曲线  
Fig. 15 Depth of the saturated zone in silt layer

地下水位 2 m 与 1 m 的边坡,非饱和粉土层厚度较小,限制了“降雨产生的饱和区”深度. 对于地下水位 0 m,非饱和粉土层相对较厚,坡度越大,土体界面初始饱和度越大,饱和区发展越迅速,深度越大.

综上,砂土 - 粉土边坡饱和区沿土层界面延伸长度与下渗深度受地下水位影响最大,主要体现在:1)高地下水位增加土层界面初始饱和度;2)地下水位升高增加土层界面初始饱和度,使非饱和土层厚度减少,同时坡度越大越会削减非饱和土层厚度,非饱和层极易饱和. 地下水与坡度共同作用,饱和区深度与延伸长度的增速呈现多样性.

4 结 论

1) 上覆强透水层边坡的饱和区沿土层界面往坡顶延伸,同时在纵向上往坡底与坡面两个方向扩展.

2) 上覆强透水层边坡的土层界面处,渗透速度的陡降导致雨水蓄积,土层界面最先形成饱和区;地下水位升高和坡度增大均提高土层界面的初始饱和度.

3) 砂土 - 粉土边坡的饱和区在沿土层界面

向坡顶延伸长度受地下水影响最大,随着地下水位升高,延伸长度的增速逐渐增大.

4) 砂土 - 粉土边坡的饱和区往粉土层下移的过程中,地下水位 1 m 和 2 m 的边坡,坡度越大,深度越小;而对于地下水位 0 m 边坡,坡度越大,深度越大.

参考文献:

[ 1 ] Lu N, Godt J W. Hillslope hydrology and stability [ M ]. Oxford: Cambridge University Press, 2013: 1 - 9.

[ 2 ] Collins B D, Znidarcic D. Stability analyses of rainfall induced landslides [ J ]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130 ( 4 ) : 362 - 372.

[ 3 ] 王述红, 何坚, 杨天娇. 考虑降雨入渗的边坡稳定性数值分析 [ J ]. 东北大学学报 ( 自然科学版 ), 2018, 39 ( 8 ) : 1196 - 1200.

( Wang Shu-hong, He Jian, Yang Tian-jiao. Numerical analysis on stability of slope considering rainfall infiltration [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2018, 39 ( 8 ) : 1196 - 1200. )

[ 4 ] Chen H, Lee C F, Law K T. Causative mechanisms of rainfall-induced fill slope failures [ J ]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130 ( 6 ) : 593 - 602.

[ 5 ] 曾铃, 史振宁, 付宏渊, 等. 降雨入渗对边坡暂态饱和区分布特征的影响 [ J ]. 中国公路学报, 2017, 30 ( 1 ) : 25 - 34.

( Zeng Ling, Shi Zhen-ning, Fu Hong-yuan, et al. Influence of rainfall infiltration distribution characteristics of slope transient saturated zone [ J ]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30 ( 1 ) : 25 - 34. )

[ 6 ] Min S K, Yuichi O, Taro U, et al. Effect of seepage on shallow landslides in consideration of changes in topography: case study including an experimental sandy slope with artificial rainfall [ J ]. *CATENA*, 2018, 161 : 50 - 62.

[ 7 ] 韩同春, 黄福明. 双层结构土质边坡降雨入渗过程及稳定性分析 [ J ]. 浙江大学学报 ( 工学版 ), 2012, 46 ( 1 ) : 39 - 45.

( Han Tong-chun, Huang Fu-ming. Rainfall infiltration process and stability analysis of two-layered slope [ J ]. *Journal of Zhejiang University ( Engineering Science )*, 2012, 46 ( 1 ) : 39 - 45. )

[ 8 ] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils [ M ]. New York: John Wiley & Sons, 1933.

[ 9 ] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [ J ]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44 : 892 - 898.

[ 10 ] Mualem Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas, methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods [ M ]. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 799 - 823.