

文章编号: 1674-599X(2020)04-0010-07

## 香根草根系对膨胀土渗透性影响试验研究

陶坚<sup>1</sup>, 王桂尧<sup>1</sup>, 常婧美<sup>2</sup>, 黄永刚<sup>1</sup>, 邓鹏<sup>1</sup>, 赵亚<sup>1,3</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 中交一公局第五工程有限公司, 北京 100024; 3. 湖南信息学院 管理学院, 湖南 长沙 410151)

**摘要:** 为研究植被根系对弱膨胀土渗透性的影响, 通过不同含根量密度的弱膨胀土试样的变水头渗透试验, 分析弱膨胀土试样渗透性随含根量变化的规律, 并应用 SEEP/W 软件对降雨引起的边坡不同位置处的体积含水量进行分析。研究结果表明: 香根草根系含根量密度越大, 试样在标准温度下的渗透系数也越大; 降雨阶段, 体积含水量的升高幅度与含根量和高程成正比; 降雨停止后, 体积含水量的降低速度与含根量成反比, 降低幅度与高程成正比。

**关键词:** 弱膨胀土; 香根草; 渗透特性; 体积含水量

中图分类号: U416.1<sup>+</sup>67 文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.002

### Experimental study on the effect of vetiver root system on the permeability of expansive soil

TAO Jian<sup>1</sup>, WANG Gui-yao<sup>1</sup>, CHANG Jing-mei<sup>2</sup>, HUANG Yong-gang<sup>1</sup>, DENG Peng<sup>1</sup>, ZHAO Ya<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Branch 5, First Engineering Bureau, China Communications Construction Corporation, Beijing, 100024, China;

3. School of Management, Hunan Information University, Changsha 410151, China)

**Abstract:** In order to study the influence of vegetation roots on the permeability of weak expansive soil, through variable head permeability tests of weak expansive soil samples with different root content densities, the law of permeability of weak expansive soil samples changing with root content is analyzed, and use SEEP/W software to analyze the volumetric water content at different positions of the slope caused by rainfall. The result shows: the permeability coefficient of the sample at standard temperature will also increase When the root density of the vetiver root system increases. The greater the permeability coefficient of the sample at standard temperature. During the rain period, the increase in volumetric water content is proportional to the root content and elevation. After the rain stopped, after the rainfall ceases, the rate of decrease of the volumetric water content is inversely proportional to the root content, and the rate of decrease is proportional to the elevation.

**Key words:** weakly expansive soil; vetiver; permeability characteristic; volumetric moisture content

香根草根系须根发达、强度高, 对温度和湿度的耐受能力强, 再生、分蘖能力较强等特点, 被广泛应用于路基边坡和水库边坡等防护结构<sup>[1]</sup>。考虑到膨胀土易“吸水膨胀, 失水收缩”的变形特性<sup>[2-3]</sup>,

湖北省当阳市采用香根草为主要治理生物, 对窑马路、汉宜路、皂当路等膨胀土路段进行生态治理, 以香根草的篱笆作用、根系作用和蒸腾作用, 验证了香根草的护坡工程效益、生态效益和经济效益<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2020-03-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578082); 湖南省教育厅科学研究项目资助(18C1578); 长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2020SS25)

作者简介: 陶坚 (1997-), 男, 长沙理工大学硕士生。

所以针对香根草膨胀土护坡的雨水入渗研究尤为重要。降雨对膨胀土植被边坡的影响机理与普通边坡不同,不仅与膨胀土特有的结构性质有关,还与根系稳固边坡土体的作用有关,对此许多学者进行了大量的研究<sup>[5-8]</sup>。李永乐<sup>[9]</sup>等人对黄河大堤非饱和土渗透特性进行试验研究,得出了非饱和土的渗透系数为非常量,且渗透系数与基质吸力呈反相关,与围压和含水量呈正相关。李雄威<sup>[10-11]</sup>等人对广西膨胀土进行现场渗透试验和植物根系加筋作用的力学试验,并在试验结果的基础上,对膨胀土路堑边坡植被防护进行数值模拟研究,得出了植被在很大程度上改变了土体的渗透性,根系作用会增强土体的渗透能力。崔颖<sup>[12]</sup>等人对非饱和压实膨胀土进行了渗透特性试验,得到了给定吸力及净围压的条件下,非饱和压实膨胀黏土水渗透系数为一个常数,与渗透水头大小无关,而渗透速度与渗透水头大小呈线性关系,与吸力和围压的函数呈线性相关。平扬<sup>[13]</sup>等人在考虑裂隙的情况下,对降雨入渗条件下的膨胀土边坡进行稳定性分析,表明:随着雨水入渗的持续,膨胀土边坡的安全系数逐渐下降,但是有无土体开裂,其计算结果相差较大。黄金<sup>[14]</sup>通过对香根草根系的力学研究和茎、叶水文效应的分析,评价香根草护坡对稳定边坡表层土体的加固效果。同时,为植被护坡工程技术规范和标准的制定、提供了试验和理论依据。还有学者对降雨条件下,雨水入渗不同土体与不同防护方式进行了研究<sup>[15-17]</sup>。但针对香根草根系对膨胀土边坡雨水入渗的影响研究鲜见。因此,作者拟通过香根草根系加筋膨胀土的渗透试验,研究含根量变化对土体渗透性的影响,并应用 SEEP/W 软件对降雨引起边坡的不同位置体积含水量的变化进行分析,为实际工程提供借鉴和参考。

## 1 复合膨胀土渗透试验

### 1.1 试验试块制备

土取自湖南省长沙市芙蓉路某开挖边坡的棕红色弱膨胀土,其物理参数为:最优含水率为 20.5%,最大干密度为  $1.61 \text{ g/cm}^3$ ,塑限为 23.9%,液限为 53.5%,塑性指数为 29.6。土取回后,将其风干、碾碎和过 2 mm 筛,按照最优含水率、最大干密度、90%的压实度进行制样,试样尺寸  $61.88$

$\text{mm} \times 40 \text{ mm}$ ,底面积为  $30 \text{ cm}^2$ 。

为了真实地还原香根草在生态护坡中的作用,根据现有文献资料的研究成果,结合膨胀土性质、草根形态特点、生长情况、耐受条件<sup>[2-4]</sup>对香根草根系进行筛选,选用直径约为 1 mm,长度约为 7 mm,长势良好的香根草根系作为加筋土的试验根系。

### 1.2 试验方案

按照李珍玉<sup>[18]</sup>等人统计,以不同土层深度香根草根系的生物量为参考依据,分别选取土层以下 10,20,30,40 cm 处的含根量作为渗透试样含根量的取值标准,分别为 2 700,2 000,1 300,700 根/ $\text{m}^2$ ,渗透试验试样底面积为  $30 \text{ cm}^2$ ,则试样含根量为 8,6,4,2 根/ $30 \text{ cm}^2$ 。

### 1.3 试验结果与分析

变水头管内面积  $0.25 \text{ cm}^2$ ,试样的高度为 4 cm,过水面积为  $30 \text{ cm}^2$ 。试验结果:素土平均渗透系数为  $1.81 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,含根量密度为 700,1 300,2 000,2 700 根/ $\text{m}^2$  时,平均渗透系数分别为  $4.22 \times 10^{-4}$ , $4.25 \times 10^{-4}$ , $5.48 \times 10^{-4}$ , $6.76 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。

由试验结果可知,含有香根草根系加筋膨胀土试样的平均渗透系数明显高于素膨胀土试样的。当含根量为 2 700 根/ $\text{m}^2$  时,其渗透系数是素土的 3.73 倍,并且随着含根量的增加,膨胀土试样的渗透系数越大。表明:香根草根系可在一定程度提高膨胀土的渗透性。有根系膨胀土的渗透系数较无根系膨胀土的有大幅度提高。其原因为:①水在土体下渗时,土体表面的悬挂毛细水达到饱和状态后,剩余水分因重力作用沿孔隙向下运动,植物根系打开过水通道,导致单位时间内过水量的增加,渗透系数增大。②无根系土湿润峰附近的土体为非饱和状态,封闭气泡将土体中大孔隙堵塞,水分经过小孔隙向下运动,导致土体中过水断面的面积减小和渗流路径的长度增加,以致于下渗过程相对较长。而有根系膨胀土的根系穿插和生长使土体中封闭气泡的数量减少、有效过水面积增加、渗透系数增大。③植物根系生长所产生的大孔隙与团粒结构,使得土体单位时间内的渗水量增加、渗透系数增大。

## 2 香根草护坡渗透性的数值模拟

根据实际边坡含根量,选取相应的渗透系数。通过模拟渗流对边坡不同位置处的体积含水量的

变化规律进行耦合分析, 得出降雨条件下不同含根量对边坡渗透性的影响。

## 2.1 渗流分析模型建立

结合膨胀土边坡物理参数试验结果, 应用 SEEP/W 软件, 建立边坡模型, 模拟各种工况对边坡降雨条件下雨水入渗的影响。建立坡高为 20 m, 坡度为 45° 的边坡模型, 特征点的位置按根土分界面、分界面下 1 m、分界面下 3 m 3 种情况设置。通过测定特征点的体积含水量变化规律, 分析坡体特征点的渗流特征, 具体位置如图 1 所示。

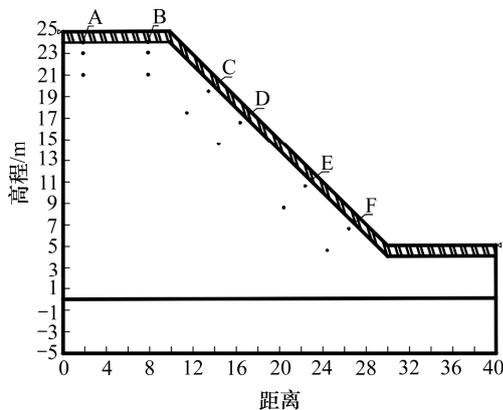


图 1 边坡特征点位置分布

Fig.1 Location distribution of slope feature points

考虑到膨胀土与降雨条件的区域性特征<sup>[18]</sup>, 取其平均降雨量为前期稳态分析的降雨强度, 并将稳态分析的结果用于后期瞬态分析的初始状态。瞬态分析的总时长设置为 96 h, 前 48 h 为持续降雨阶段, 后 48 h 为无降雨阶段。在该条件下, 对不同植被覆盖率的边坡渗透规律进行统计分析。

数值模型采用坡顶、坡面及坡底为入渗边界。若降雨强度大于土体的入渗能力, 假定: 坡面不会产生积水; 模型底部为不透水边界, 边坡两侧为透水边界。为简化计算, 设地面孔隙水压力为 0, 降雨强度以每小时平均降雨量表示, 选取降雨等级为中雨, 1 mm/h。为了更加方便对数值模拟后的香根草加筋效果进行对比, 在设定的 96 h 观察期内, 每隔 12 h, 记录一次素土与不同含根量各特征点的体积含水量。通过转换渗透系数, 对素土与不同含根量所有特征点的体积含水量进行汇总分析。

## 2.2 数据分析

### 2.2.1 含根量对特征点体积含水量的影响

同一深度(坡面下 1 m)处, 不同含根量的各特征点体积含水量变化规律如图 2 所示。从图 2 可

以看出, 在坡面下 1 m 处为有根系分布区域与无根系分布区域的分界面, 含根量对坡顶和坡面不同高程的雨水入渗的影响趋势一致。在 0~48 h 的降雨阶段, 体积含水量升高, 速度先慢后快。48~96 h 内的无降雨阶段, 体积含水量呈缓慢降低趋势。在同一时刻, 不同含根量的体积含水率相比, 2 700 根的 > 2 000 根的 > 1 300 根的 > 700 根的。在降雨阶段, 由于根系的存在使土体渗透性增大, 根土复合体中含水量也随之增高; 无降雨阶段, 雨水逐渐渗入土体内部, 根系含量越高, 根土复合体的体积含水量越大, 雨水向下渗透的速度越慢。表明: 根系能显著增加膨胀土的保水能力。

从图 2(a)~(d)中可以看出, A、B、C、D 点位于坡顶和坡面上部, 高程较高。在初始状态, 无根系边坡特征点雨水入渗量小, 体积含水量大。随着降雨时间的延长, 一直保持最大含水量。持续降雨 15 h 后, 体积含水量的增长趋势变缓, 有植被覆盖的膨胀土, 边坡雨水入渗量减小, 体积含水量增长趋势增强且含水量超过裸坡的。降雨停止后, 有植被覆盖的膨胀土边坡含水量的下降趋势强于无植被覆盖边坡的, 而且其含水量均低于无植被边坡的。原因: 在降雨初始阶段, 纵横交错的香根草根系结构, 会将板结密实的土体散开, 土体孔隙增大, 根系与土的接触面形成了新通道, 构成了良好的导水通道, 使降雨入渗的渗流路径变短。因此, 对于边坡同一高程处的断面, 含有香根草根系边坡的雨水入渗较快, 含根量越高, 根系保水能力越好, 含水量越高。持续降雨 15 h 后, 边坡上部的雨水入渗通道基本贯通, 含有根系的土体顺着根系生长方向形成多个渗水通道。无根系的土体沿着土颗粒间的缝隙缓慢流动, 而特征点下部基本无香根草根系生长, 雨水入渗速度呈缓慢入渗状态。有根系的边坡土体对于上部渗入的雨水量偏多, 但无法及时排出, 导致体积含水量逐渐增大。而无根系边坡土体上部雨水入渗量少, 下部通道可以及时排出, 因此体积含水量不会迅速增大。

从图 2 中还可以看出, 15~48 h 内, 无根系边坡含水量小于植被覆盖边坡的。降雨停止后, 从第 48 h 开始, 含有根系边坡各特征点的体积含水率, 呈逐渐下降趋势; 无根系边坡体积含水率还在继续增加, 一段时间后, 开始缓缓下降。这是由于坡面积水造成坡内渗流仍在继续, 因此无根系边坡的最终入渗量大于有根系边坡的。

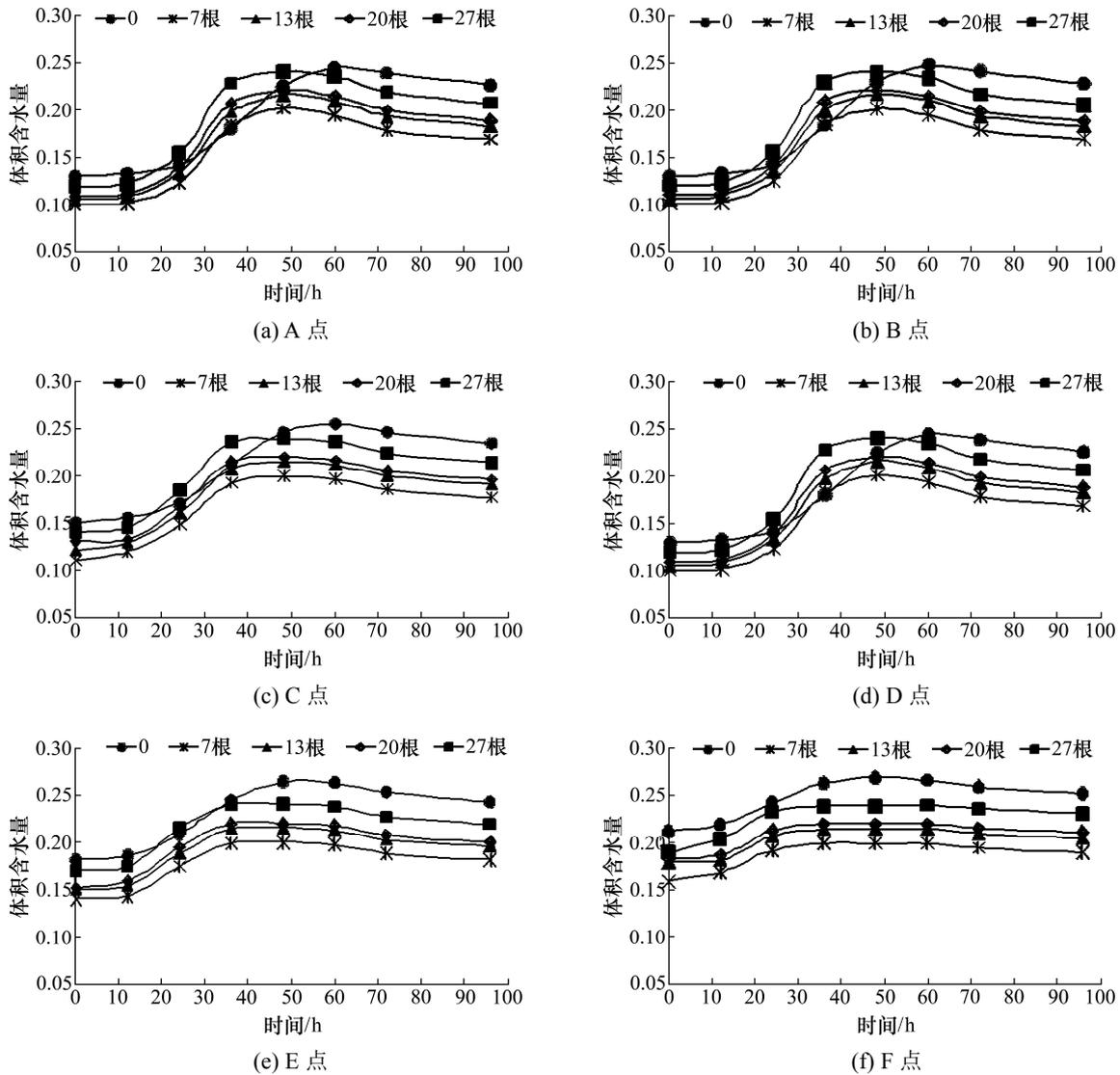


图 2 不同高程处特征点的体积含水量变化曲线

Fig.2 Volumetric moisture content of monitoring points at different elevations

从图 2(e)~(f)中可以看出, E、F 点处于坡面偏下部的位 置, 高程较小, 导致水头差较小, 雨水难以排出, 使得无根系边坡的体积含水量始终高于有根系边坡的。

2.2.2 高程对特征点体积含水量的影响

对各含根量密度的不同高程特征点的体积含水量进行统计, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, A 点位于坡顶, C、D、E、F 位于边坡斜面上, 高程依次减小。对于素土边坡和不同含根量边坡, 其初始阶段与降雨阶段各特征点的体积含水量: A < C < D < E < F。高程越大, 体积含水量越小, 高程相差越大, 体积含水量相差幅度越大。无降雨阶段, 体积含水量随时间延长缓慢减小, 下降趋势较平缓, 下降幅度与高程成正比。原因: ①当特征点所

处位置较高时, 水的势能较高, 水头与地面水头相差较大, 导致在特定时间内水的渗透速度快, 渗入量也随之增大, 所测特征点位置处体积含水量的上升速度越快且升高幅度越大。②降雨停止后, 由于水的势能和水头差的原因, 使得位置越高的特征点在单位时间内, 雨水排出速度较快, 含水量降低幅度较大。

2.2.3 深度对其体积含水量的影响

对边坡雨水入渗作 Seep/W 分析时, 特征点分别设置 3 个不同深度, 距离坡体上表面的 1 m、2 m、4 m 处。植草层的深度可达 1 m。因此, 距离坡面上 1 m 处的特征点处于含有根系与不含根系的土层分界面, 2 m 和 4 m 处的特征点处于无根系土层, 其渗透速度与规律如图 4 所示。

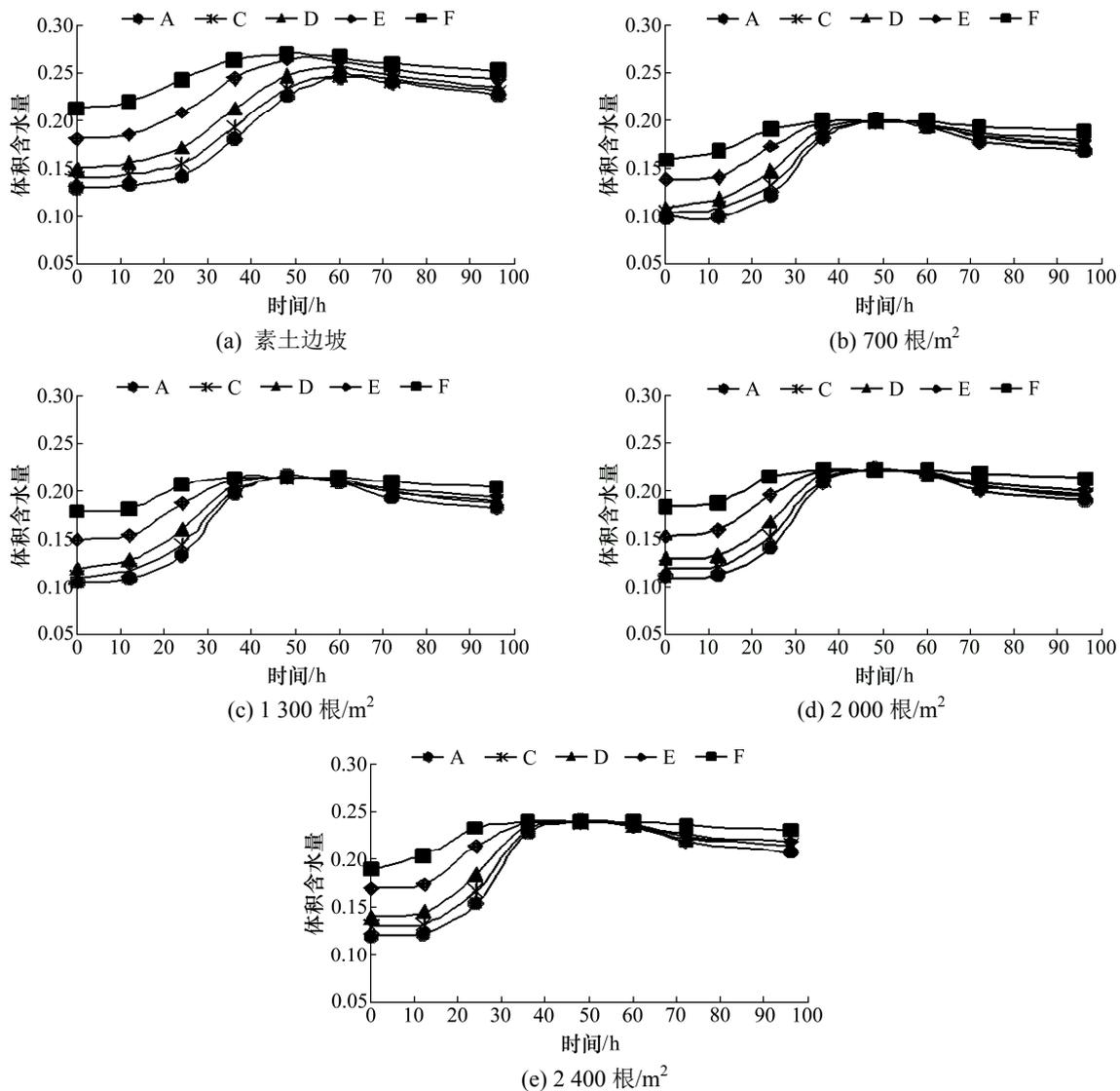


图3 不同含根量密度特征点的体积含水量变化曲线

Fig.3 Volumetric moisture content of monitoring points with different root contents

从图4可以看出,无论膨胀土边坡表面有无植被覆盖,在降雨阶段,特征点深度越浅,含水量增长速度越快。当位于坡面以下较深位置时,含水量逐渐下降趋于平缓。降雨停止后,特征点深度越浅,体积含水量的降低速率越快。降雨初始阶段坡面上1 m与2 m处特征点的含水量保持一致。含根量越高,2个位置特征点含水量的增长速度出现分离的起始时间越短。素土边坡在降雨20 h左右开始分离,含根量为2700根/m<sup>2</sup>的边坡在10 h左右开始分离。但分离后的含水量增长规律保持一致,距离坡面越近的特征点其含水量增长越快。降雨停止后,含有根系边坡1 m与2 m位置处特征点,其含水量持平,随着时间延长,体积含水量缓慢降低且降幅相同。而位于4 m位置处特征点的体积含水量,

在降雨阶段,呈先降后升趋势;降雨停止后,含根越多的边坡体积含水量上升幅度越大,无植被覆盖的边坡体积含水量保持不变。原因:雨水向边坡内部入渗,所需时间随边坡内部的孔隙增多而减小。含根量较低时,降雨后20 h的雨水入渗深度达1 m,该处特征点的体积含水量迅速增大,坡面下2 m处含水量无明显变化。含根量较高时,降雨10 h左右,坡下1 m处的含水量开始增加,2 m处的含水量增大时刻随含根量增加逐渐缩短。由于含根量的增加,雨水入渗通道增加,渗透系数变大,入渗速度加快。降雨停止后,靠近坡面的土体含水量逐渐降低,基质吸力增加使边坡整体稳定性提高。含水量的降低幅度与高程成正比,1 m处特征点的体积含水量略高于2 m处特征点的,高程越大,水的势能

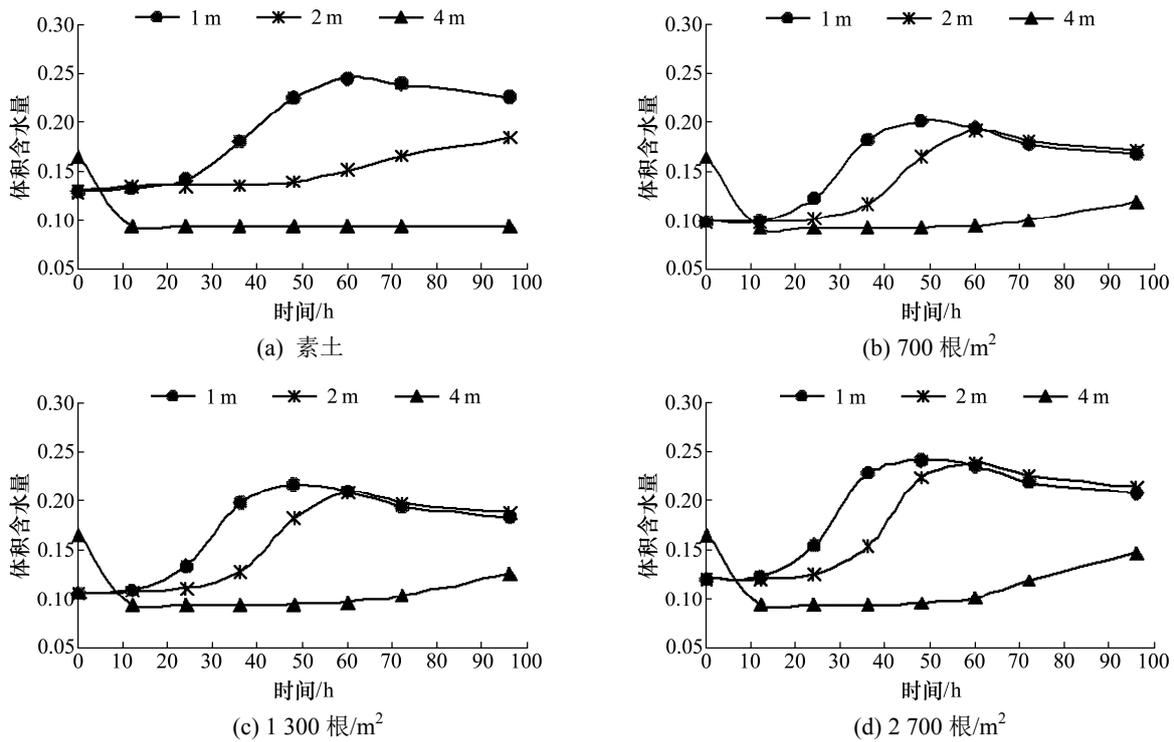


图 4 特征点 A 处体积含水量变化图

Fig.4 Volumetric moisture content at point A

越大, 水头差越大, 单位时间内排出的水越多。当特征点位于坡下 4 m 位置处时, 因距离坡面较远, 雨水入渗需要较长时间才能渗入该位置。但由于坡面及坡底处的雨水入渗使地下水位升高, 从而使该位置的体积含水量升高。含根量增加, 雨水入渗量会增多, 地下水位上升幅度增大, 特征点处体积含水量增加幅度也随之增大。

### 3 结论

1) 香根草根系的存在会显著增大膨胀土的渗透性。含根量越多, 香根草根系加筋膨胀土的渗透性越大。

2) 降雨阶段, 含根量增多, 根土复合体含水量也随之增大, 体积含水量升高, 速度先慢后快。当雨水入渗通道基本贯通后, 体积含水量升高, 速度加快。无降雨阶段, 根系的存在会提高膨胀土的保水能力, 含根量越多的土体, 雨水渗出速度越慢。

3) 降雨阶段, 体积含水量升高幅度与高程成正比。测量点高程增大, 相应测量点体积含水量的升高幅度越大。同一时刻, 高程越大的位置, 体积含水量越低。无降雨阶段, 体积含水量逐渐缓慢减小, 下降趋势变平缓, 下降幅度与高程成正比, 高

程越大, 体积含水量的下降幅度越大。

4) 降雨阶段, 越接近表面的位置, 体积含水量上升速度越快。降雨停止后, 越浅的位置出现降低趋势的时刻越早。位于坡面下部 4 m 处的特征点, 由于雨水入渗的时间较长, 其含水量变化的主要影响因素是地下水位的变化。

### 参考文献(References):

[1] 熊燕梅,夏汉平,李志安,等.植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J].应用生态学报,2007,18(4):895-904. (XIONG Yan-mei,XIA Han-ping,LI Zhi-an,et al.Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance:A research review[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(4):895-904.(in Chinese))

[2] 郑健龙,杨和平.膨胀土处理技术、理论与实践[M].北京:人民交通出版社.2004.(ZHENG Jian-long,YANG He-ping.Expansive soil treatment technology,theory and practice[M].Beijing:China Communications Press,2004. (in Chinese))

[3] 王保田,张福海.膨胀土的改良技术与工程应用[M].北京:科学出版社,2008.(WANG Bao-tian,ZHANG Fu-hai. Expansive soil improvement technology and engineering application[M].Beijing:Science Press,2008.(in Chinese))

- [4] 鲍玉洪,白传荣,陈文,等.香根草、刺槐绿篱防护滑塌边坡[J].公路,2001(4):73-75.(BAO Yu-hong,BAI Chuan-rong,CHEN Wen,et al.Vetiver,robinia pseudoacacia slope protection[J].Highway,2001(4):73-75.(in Chinese))
- [5] Prada A,Civan F.Modification of Darcy's law for the threshold pressure gradient[J].Journal of Petroleum Science and Engineering,1999,22(4):237-240.
- [6] Mithcell J K.Fundamentals of soil behavior[M].New York: Wiley,1976.
- [7] Ng C W W,Shi Q A.A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J].Computer and Geotechnics,1998,22(1):1-28.
- [8] Marshall T J.A relation between permeability and size distribution of pores[J].European Journal of Soil Science, 1958,9(1):1-8.
- [9] 李永乐,刘翠然,刘海宁,等.非饱和土的渗透特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(22):3861-3865.(LI Yong-le,LIU Cui-ran,LIU Hai-ning,et al.Testing study on permeability characteristics of unsaturated soil[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(22): 3861-3865.(in Chinese))
- [10] 李雄威,孔令伟,郭爱国.气候影响下膨胀土工程性质的原位响应特征试验研究[J].岩土力学,2009,30(7):2069-2074.(LI Xiong-wei,KONG Ling-wei,GUO Ai-guo.Field response characteristic test of expansive soil engineering behavior under effect of atmosphere[J].Rock and Soil Mechanics,2009,30(7):2069-2074.(in Chinese))
- [11] 李雄威,孔令伟,郭爱国.植被作用下膨胀土渗透和力学特性及边坡防护机制[J].岩土力学,2013,34(1):85-91.(LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Permeability and mechanical characteristics of expansive soil and cut slope protection mechanism under vegetation action[J].Rock and Soil Mechanics,2013,34(1):85-91.(in Chinese))
- [12] 崔颖,缪林昌.非饱和压实膨胀土渗透特性的试验研究[J].岩土力学,2011,32(7):2007-2012.(CUI Ying,MIAO Lin-chang. Testing study of permeability characteristics of unsaturated compacted expansive soils[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(7):2007-2012.(in Chinese))
- [13] 平扬,刘明智,郑少河.降雨入渗条件下的膨胀土边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(S1):4478-4484.(PING Yang,LIU Ming-zhi,ZHENG Shao-he. Stability analysis of expansive soil slope with rainfall infiltration[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(S1):4478-4484.(in Chinese))
- [14] 黄金.香根草生物工程技术在浅层滑坡治理中的应用研究[D].重庆:重庆交通大学,2010.(HUANG Jin.The research on applying vetiveria zizanioides bio-engineering technique to curb slope surface[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2010.(in Chinese))
- [15] 廖文斌,周伏良,杨果林,等.降雨条件下锚杆框架梁加固膨胀土高边坡现场试验[J].公路工程,2018,43(2):60-63, 71.(LIAO Wen-bin,ZHOU Fu-liang,YANG Guo-lin,et al.An in-situ experiment of frame beam with anchor rod on expansive soil high slope in rainfall[J].Highway Engineering,2018,43(2):60-63,71.(in Chinese))
- [16] 鄢卫平,杨和平.有荷条件下膨胀土分级增湿变形特性试验[J].交通科学与工程,2015,31(1):21-26,32.(YAN Wei-ping,YANG He-ping.Laboratory research of expansive soil wetting in deformation characteristics under loading conditions[J].Journal of Transport Science and Engineering,2015,31(1):21-26,32.(in Chinese))
- [17] 张连杰.降雨入渗条件下膨胀土边坡稳定性分析[D].北京:中国地质大学,2016.(ZHANG Lian-jie.Stability analysis of expansive soil slope with rainfall infiltration [D].Beijing:China University of Geosciences,2016.(in Chinese))
- [18] 李珍玉,王丽锋,肖宏彬,等.香根草根系在公路边坡土体中的分布特征[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(1): 102-112.(LI Zhen-yu,WANG Li-feng,XIAO Hong-bin,et al.Distribution characteristics of vetiver's roots in highway slope[J].Journal of Basic Science and Engineering,2017,25(1):102-112.(in Chinese))