

草本植物根系对黄河故道区非饱和土特性的影响

张伟伟^{1,2}, 江朝华¹, 程 星², 凌 成³, 金 秋⁴

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 苏交科股份有限公司, 江苏 南京 210017;
3. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210011; 4. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要:为研究草本植物根系对沙质土壤非饱和特性的影响, 试验测定了黄河故道区 3 种含草本植物(狗牙根、高羊茅、香根草)根系土体和裸地素土的土-水特征曲线, 将得到的土-水特征曲线与 Brooks-Corey 公式进行了拟合, 并据此推导了含草本植物根系沙土的孔隙半径变化指数和非饱和渗透系数函数。结果表明: 相比裸地素土, 含草本植物根系沙土的进气值降低, 持水性增强, 含狗牙根、高羊茅、香根草根系的沙土平均孔隙半径分别是裸地素土的 26 倍、12 倍、59 倍, 当饱和度为 25%~70% 时, 在相同饱和度下, 含草本植物根系沙土比裸地素土的渗透系数提高了 2~3 个数量级; 草本植物根系使黄河故道区沙土产生了团聚体效应。

关键词:根-土复合体; 非饱和土; 土-水特征曲线; 草本植物根系; 渗透系数函数; 黄河故道

中图分类号: TU411.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2017)01-0073-06

Effects of root systems of herbs on characteristics of unsaturated soil in old course of Yellow River//ZHANG Weiwei^{1,2}, JIANG Chaohua¹, CHENG Xing², LING Cheng³, JIN Qiu⁴ (1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Transportation Institute Co., Ltd., Nanjing 210017, China; 3. Nanjing Yangtze River Management Bureau, Nanjing 210011, China; 4. Jiangsu Research Institute of Water Conservation, Nanjing 210017, China)

Abstract: In order to study the effects of root systems of herbs on unsaturated characteristics of the sandy soil, experiments were conducted to determine the soil-water characteristic indices of bare soil and vegetated soil around the root systems of three herbs (*Cynodon dactylon*, *Festuca arundinace*, and *Vetiveria zizanioides*) in the old course area of the Yellow River. Based on the soil-water characteristic curves fitted with the Brooks-Corey equation, functions of the pore radius change index and the unsaturated permeability coefficient were established. The results show that, compared with the bare soil, the air-entry value of the vegetated soil decreased, and the water-holding capacity increased. The average values of the soil pore radius of the vegetated sandy soil with *Cynodon dactylon*, *Festuca arundinace*, and *Vetiveria zizanioides* were 26 times, 12 times, and 59 times that of the bare soil, respectively. The permeability coefficients of the vegetated soil were two to three orders of magnitude higher than that of the bare soil with the same saturation within a range from 25% to 70%. The results show that the root systems of herbs formed aggregates in unsaturated sandy soil in the old course of the Yellow River.

Key words: root-soil composite system; unsaturated soil; soil-water characteristic curve; root systems of herbs; permeability coefficient function; old course of Yellow River

植物根系与土壤相互作用机理一直是土壤学研究的热点, 国内外学者大多从力学效应和水文效应两个方面开展研究, 力学效应研究方面主要通过拉拔锚固试验测定根系的抗拉特性, 通过直剪试验或三轴试验测定根-土复合体强度指标。李建兴等^[1-2]等通过试验分别揭示了根-土复合体抗剪强度与草本植物根系分布特征(根长密度、根表面积密度等)、分形维数等因素的关系; 而王元战等^[3-4]在重塑含草根

土的强度特性研究中, 发现存在最优含根率, 使土壤在该含根率下强度最高。除了根系含量的影响, Docker 等^[5]注意到, 对于粉质黏土, 植物根系对土体抗剪强度增强效应还与土体的含水量有关。

在水文效应方面的作用研究则多集中于植物根系如何增加土坡入渗和抑制径流。张莹等^[6]通过试验测定了黄土区 4 种草本、4 种灌木根-土复合体的渗透系数, 发现在表层土中, 草本植物根系的导水

作用强于灌木。肖本林等^[7]在灌木对黄土边坡的加固效应研究中认为,植物根系对边坡稳定性的水文效应包括根系吸水消耗孔隙水压力,据此建立了依赖于根系密度和土壤含水率的根-土复合体的抗剪强度函数。

上述研究大都基于饱和土强度和渗流理论,只考虑植物根系对饱和土壤特性的影响,然而在涉及多因素耦合影响的实际问题中,如降雨入渗下生态边坡的稳定性分析^[8-10]以及植被发育岸坡在水位变动下的稳定分析^[11-12]等,均应考虑植物根系作用下的非饱和土强度和饱和-非饱和渗流。随着非饱和土理论在岩土工程界的应用日趋成熟,有必要在植物根系与土颗粒相互作用研究中分析土壤基质吸力的变化影响和非饱和渗透系数的变化规律。

笔者在前人研究应力状态^[13]、吸力范围^[14]、温度^[15]等因素对土壤非饱和特性影响的基础上,开展黄河故道区含草本植物根系沙土和裸地素土的基质吸力特性试验,试图从土壤结构变形角度对草本植物根系影响沙土非饱和特性的机制作出分析。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验依托淮安市黄河故道干河下段(二河至涟水石湖段)治理工程。黄河故道西起河南省兰考东坝头,流经豫、鲁、皖、苏4省,至江苏省滨海县套子口入黄海。黄河裹挟的泥沙造就了黄河故道地区冲积平原的地貌,其中沙土约占黄河故道地区土地总面积的30%,是以黄泛沉积物母质发育而成,属黄潮土亚类,其土质松散、黏结性差、透水性强。以沙土为主要成分的河坡纵向高差大,流速大,水流挟沙能力强,在暴雨和径流冲刷下,堤坡、滩面、河坡面雨淋沟随处可见,构成边坡浅层失稳的隐患。为治理当地沙土质岸坡的水土流失问题,考虑采用植草护坡。根据工程前期地质勘察资料,试验区裸地土壤主要理化指标如下:土体湿密度 1.91 g/cm^3 ,孔隙率44.75%,天然含水率13.6%,现场土质以砂壤土为主。

1.2 试验草本植物

试验区地处暖温带与亚热带交汇处,多年平均气温 14°C ,日照 $1\,907\sim2\,531\text{ h}$,多年平均降雨量 945.7 mm ,降雨分布不均,70%的降雨量集中在7—9月,多年平均水面蒸发量 851.4 mm 。遵循因地制宜的原则,选择狗牙根、高羊茅、香根草3种适应性好、根系发达、抗逆性较强的草本植物作为研究对象。

a. 狗牙根。狗牙根为多年生草本植物,根系呈根状茎和匍匐枝,节间长短不一,分蘖节在发达的匍匐茎上不断分生,而分蘖节上又生成走茎,新老茎节

交织成网,在土壤中互相穿插。该草种为乡土植物,喜光稍耐阴,在轻盐碱地上生长较快,覆盖度高,耐践踏^[16]。

b. 高羊茅。高羊茅为多年生草本植物,冷季型草坪草之一,适宜生长在寒冷潮湿和温暖潮湿过渡带,在肥沃、潮湿的土壤条件下生长最好,最适宜pH值为 $5.5\sim7.5$ ^[17]。由于其耐旱和耐践踏的特性,多用作公园、运动场等固土护坡草坪草。

c. 香根草。香根草为多年生草本植物,原产于地中海地区,目前我国江苏、浙江、福建及四川等地均有引种。根系网络3~4个月可生长至1 m,一年可达2~3 m,是目前世界上根系最长的草本植物。香根草对土壤的适应能力非常强,能在缺乏黏粒的砂土和盐分浓度很高的盐碱土中正常生长^[18]。

1.3 试样采集与制备

试验需要含草本植物根系复合土体试样,在研究区选定一块常年撂荒地,其上仅有部分杂草,大部分表土裸露,除去杂草后,划定3块草本植物生长的 $10\text{ m}\times10\text{ m}$ 的试验小区,狗牙根、高羊茅通过播撒草种植,香根草通过截枝无性繁殖,在河坡上建植草坪,将其用于含草本植物根系沙土特性研究的试验材料。

经过1a生长期后,在试验区通过取土钻不断深挖,将狗牙根、高羊茅、香根草的根系完整取出,小心除去根系周围土颗粒,观测3种草本植物的根系长度和根系特征(表1),再用取土器取出直径约为200 mm、高度约为300 mm的近圆柱形含草本植物根系沙土试样,采用保鲜膜密封,保证根系新鲜、完整,土壤水分接近现场,带回实验室后立即放在切土盘上,用削土刀切削土样,同时转动切土盘,将土样削成直径 61.8 mm 、高度 150 mm 的标准试样。

表1 试验区3种草本植物的根系特征参数

草本植物	根系深度/ cm	根系范围内平均值			根系形态
		根表面积密度/ ($\text{cm}^2\cdot\text{cm}^{-3}$)	根长密度/ ($\text{cm}\cdot\text{cm}^{-3}$)	根重密度/ ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$)	
狗牙根	10	0.75	1.96	5.57	交织网状
高羊茅	40	2.55	4.51	17.97	深直根系
香根草	100	3.98	10.26	35.22	致密网络状

1.4 含草本植物根系沙土基质吸力特性试验

采用张力板法(轴平移)直接测量土体基质吸力,在一受大气压力的水容器底部装一陶瓷板,其上放置试样,由于土中的水压力等于水容器中的水压力,只需控制孔隙气压力值,再测定其对应吸力下的含水量,即可得到相应土体试样的土-水特征曲线。

试验装置如图1所示,其中压力板仪采用美国Soil Moisture设备公司生产的1600型压力板仪,内有高进气值陶瓷板,本次试验中所用高进气值陶瓷板进气值为 500 kPa 。

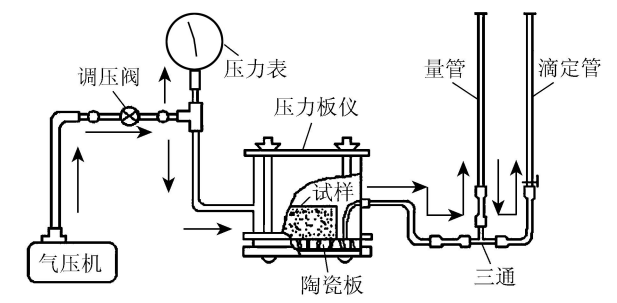


图1 轴平移测定基质吸力试验装置

将陶瓷板下面的空气排净,并充满水,以保证试样水量变化可由量管读数读出,且试样内孔隙水压力为零。再将试验土样放入压力室,使饱和土样与饱和高进气值陶瓷板充分接触,饱和的高进气值陶瓷针头一端插入土中,另一端由充满蒸馏水的连接管连到压力室外的压力量测系统上。

针头插入非饱和土后迅速封闭压力室,增加压力室内的气压,防止量测系统中的水受到进一步张拉,直到作为零读器的水银塞保持不动,达到平衡,读出量管读数。逐级施加空气气压并测量量管水量,以便反算含水量。施加最后一级空气压力后,称量试样质量,烘干后计算含水量,再利用两次量管体积读数差,反算不同吸力值下的试样含水量。

2 试验结果与分析

2.1 含草本植物根系沙土的土-水特征曲线

计算孔隙水压力与孔隙气压力的差值作为基质吸力值 u ,对应的含水量换算为土壤的饱和度 S ,将结果绘制在半对数坐标中(图2),以方便观察每种试验土样的进气值和残余饱和度。

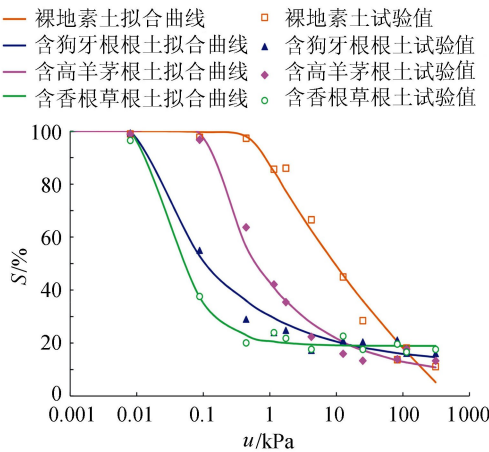


图2 4种试验土样的土-水特征曲线

含草本植物根系沙土较裸地素土进气值有所减小,土-水特征曲线更陡,即当吸力增大时饱和度呈现出较快的变化趋势;而含草本植物根系沙土相较裸地素土的残余饱和度增加,说明其持水性增强。

为利用土-水特征曲线进一步推定试样土样的渗

透系数函数,需要用数学模型刻画曲线。土-水特征曲线常用的数学拟合模型有3参数的 Brooks-Corey 模型(BC 模型)和4参数的 van Genuchten 模型(VG 模型)、Fredlund-Xing 模型(FX 模型)^[19-21],其中, VG 模型和 FX 模型在精度上优于 BC 模型,但是 BC 模型形式简洁,且物理意义明确,故采用 BC 模型拟合试验所得土-水特征曲线,BC 模型为

$$S = (1 - S_r) \left(\frac{u_a}{u} \right)^\lambda + S_r \quad (1)$$

式中: S_r 为残余饱和度; u_a 为进气值; λ 为孔隙半径分布指数, λ 越大,孔隙结构越丰富,反之孔隙结构越单一。

将试验数据导入 Origin 软件,基于式(1),采用非线性拟合算法,计算得出相应的拟合参数和相关系数如表2所示。

表2 4种试验土样土-水特征曲线拟合参数

试验土样	u_a	S_r	λ	R^2
裸地素土	0.516	0.035	0.192	0.962
含狗牙草根土	0.018	0.119	0.329	0.935
含高羊茅草根土	0.086	0.069	0.386	0.971
含香根草根土	0.009	0.189	0.938	0.919

表2拟合结果表明,4种试验土样的拟合相关系数均在0.90以上,说明BC模型可以有效应用于黄河故道区植被发育土壤的土-水特征的定量描述。由于 u_a 值表征的是空气刚进入土壤孔隙时的对应吸力,所以与土壤最大孔隙半径呈负相关,可以得出4种土壤的最大孔隙半径大小顺序为含香根草根土、含狗牙草根土、含高羊茅草根土、裸地素土; λ 值反映的孔隙结构丰富度大小顺序为含香根草根土、含高羊茅草根土、含狗牙草根土、裸地素土。

2.2 草本植物根系对土壤孔隙结构的影响

为定量研究草本植物根系对土壤孔隙结构的影响,根据文献[19]的成果,定义综合孔隙大小和丰富度的加权孔隙半径 $\bar{R}$ 为

$$\bar{R} = \frac{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r f(r) dr}{\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} f(r) dr} \quad (2)$$

式中: r 为土壤孔隙半径; $f(r)$ 为土壤孔隙体积分布的概率密度,即孔径分布在 r 附近单位区间的概率; $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 分别为土壤中最大、最小孔隙半径。

根据上述定义,若 dr 范围内孔隙充满水,则 $f(r)dr$ 为该范围内孔隙水体积占土壤孔隙总体积的百分比,结合土壤饱和度的定义可知 $\int_{R_{\min}}^R f(r)dr = S(R)$,其中 $S(R)$ 为土壤中孔径小于 R 的孔隙中充满水时土壤对应的饱和度。

结合毛细定律:

$$r = \frac{2T_s \cos \alpha}{u} \quad (3)$$

式中: T_s 为液体表面张力; α 为固体颗粒和液体表面的接触角。将式(2)与式(3)联立,可建立 $\bar{R}$ 与基质吸力和饱和度的关系:

$$\bar{R} = 2T_s \cos \alpha \frac{\int_{S_r}^1 u^{-1} dS}{\int_{S_r}^1 1 dS} \quad (4)$$

将式(1)作为式(4)的补充方程,推导可得

$$\bar{R} = 2T_s \cos \alpha \frac{u_a^{-1}}{1 + \lambda^{-1}} \quad (5)$$

根据表面科学理论,当温度恒定时,液体的表面张力 T_s 以及固体、液体之间的接触角 α 是一个常数^[19],且本文的研究重点是含草本植物根系沙土相对于裸地素土孔隙结构的变化,所以认为土样温度恒定,定义含草本植物根系沙土孔隙半径与裸地素土的孔隙半径比值为 $\Delta \bar{R}$,则有

$$\Delta \bar{R} = \frac{u_{ba} \frac{1 + \lambda_b^{-1}}{u_{ha} \frac{1 + \lambda_h^{-1}}{1}}}{u_{ha} \frac{1 + \lambda_h^{-1}}{1}} \quad (6)$$

式中: u_{ba} 、 λ_b 分别为裸地素土的进气值和孔隙半径分布指数; u_{ha} 、 λ_h 分别为含草本植物根系沙土的进气值和孔隙半径分布指数。

根据表2数据计算得含狗牙根根、高羊茅根、香根草根的沙土平均孔隙半径变化指数分别为26、12和59,结合表2中孔隙结构丰富度结果可以认为,试验草本植物根系改善了沙土松散的结构,形成了丰富的大空隙,这源于植物根系通过联结、缠绕等作用在土壤中形成一定量的团聚体,相比裸地素土颗粒,团聚体之间形成的是大孔隙。大孔隙受的吸力小,在吸湿过程中优先吸水。所以,土壤团聚体较好时,大孔隙数量多,孔隙中水分排出时,土壤基质吸力仅发生较小的增加;与之相反,当土体比较松散时,低吸力下保持的水分数量少,水分较难排出,一旦这些水分排出时,吸力就有较大的增加,香根草和狗牙根是网状根系,所以相比高羊茅的深直根,这种“团聚效应”更为明显。

2.3 草本植物根系对非饱和渗透系数的影响

土样饱和时的渗透系数用室内环刀法可简单测得,裸地素土、含狗牙根根土、含高羊茅根土、含香根草根土的饱和渗透系数分别为18.15 mm/h、37.80 mm/h、48.39 mm/h和68.66 mm/h,而非饱和渗透系数随土体饱和度变化且变动范围很大而难以直接精确测量,所以考虑采用其他方法间接推测非饱和渗透系数随饱和度的变化关系。

Mualem^[20]提出土壤非饱和渗透系数与基质吸力之间有如下关系:

$$k_r = S_e^{1/2} \left[\frac{\int_0^{S_e} dS/u(S_e)}{\int_0^1 dS/u(S_e)} \right]^2 \quad (7)$$

其中 $k_r = k/k_s$ $S_e = (S - S_r)/(1 - S_r)$

式中: k_r 为相对渗透系数; k_s 为饱和渗透系数; S_e 为相对饱和度。将式(1)代入式(7)积分,可得基于BC模型和 Mualem 理论的非饱和土渗透系数函数:

$$k = k_s \left(\frac{S - S_r}{1 - S_r} \right)^{2.5 + 2\lambda^{-1}} \quad (8)$$

根据表2数据可计算得黄河故道区4种试验土样的渗透系数曲线如图3所示。图3表明,4种非饱和试验土样的渗透系数随饱和度呈非线性增长。当饱和度低于25%时,4种试验土样的渗透性差异较小,而当饱和度为25%~70%时,3种含草本植物根系沙土比裸地素土的渗透系数提高了2~3个数量级,香根草最高可提高土壤渗透系数3个数量级。可见草本植物根系显著增强了土体的渗透性,这与 Docker 等^[5,21-22]关于非饱和土渗透特性的试验和观测结果基本一致,说明草本植物根系增加雨水入渗的效应不可忽略。而随着饱和度逐渐提高至70%以上,含草本植物根系沙土的渗透系数仍高于裸地素土,但提高幅度已大大降低。

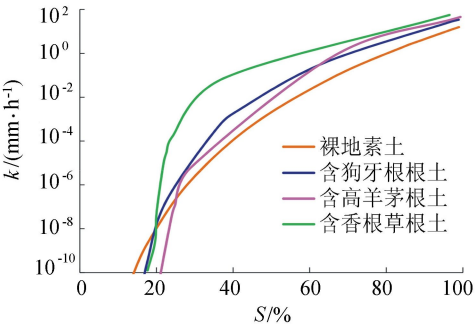


图3 含草本植物根系沙土与裸地素土的渗透系数曲线

根据上述结果,分析其原因为:在入渗初期,由根系腐烂、穿插形成的根孔,在土壤中形成广泛连续的大孔隙孔隙,使得土壤水分和溶质形成优先水流,导致水分在运动过程中不与土体发生充分的相互作用,而是直接快速地进入土壤深层,所以低饱和度时,植物根系增加入渗的效应并不明显,随着孔隙水压力的增大,饱和度为25%~70%时,草本植物根系在土壤中形成的大量大孔隙逐渐体现优势,使含草本植物根系沙土的渗透系数大幅增加,但是随着含草本植物根系沙土中大孔隙逐渐趋于饱和(饱和度达70%以上),入渗水流转向小孔隙运动,此时含草本植物根系沙土的孔隙优势被削弱,其与裸地素

土的渗透系数的差距逐渐缩小。

3 结 论

- a. 含草本植物根系沙土比裸地素土进气值降低,残余饱和度提高;4 种试验土样 BC 模型的拟合相关系数均在 0.9 以上,说明 BC 模型可以应用于黄河故道区植被发育土壤的土-水特征曲线模拟。
- b. 草本植物根系影响沙土基质吸力和渗透系数的机理在于根系通过缠绕、穿插等作用在土壤中形成了丰富的团聚体和大孔隙,改变了黄河故道区沙土的松散结构。
- c. 优势大孔隙使含草本植物根系沙土在中饱和度和(25% ~70%)时对土体的渗透性增强显著,植物根系增加雨水入渗的效应在饱和-非饱和渗流研究中不可忽略。

参考文献:

[1] 李建兴,何丙辉,湛芸,等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(10): 144-152. (LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (10): 144-152. (in Chinese))

[2] 夏振尧,周正军,黄晓乐,等. 植被护坡根系浅层固土与分形特征关系初步研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(增刊 2): 3641-3647. (XIA Zhenyao, ZHOU Zhengjun, HUANG Xiaole, et al. Preliminary study of relationship between shallow soil reinforcement and fractal characteristics of vegetation roots in biotechnical slope protection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (Sup2): 3641-3647. (in Chinese))

[3] 王元战,刘旭菲,张智凯,等. 含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(8): 1405-1410. (WANG Yuanzhan, LIU Xufei, ZHANG Zhikai, et al. Experimental research on influence of root content on strength of undisturbed and remolded grassroots-reinforced soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (8): 1405-1410. (in Chinese))

[4] 栗岳洲,付江涛,余冬梅,等. 寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(7): 1370-1383. (LI Yuezhou, FU Jiangtao, YU Dongmei, et al. Mechanical effects of halophytes roots and optimal root content for slope protection in cold and arid environment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (7): 1370-1383. (in Chinese))

[5] DOCKER B B, HUBBLE T C T. Quantifying root-

reinforcement of river bank soils by four Australian tree species [J]. Geomorphology, 2008, 100 (3): 401-418.

[6] 张莹,毛小青. 寒旱环境黄土区草本与灌木植物根系导水作用研究 [J]. 中国科技博览, 2009 (27): 252-253. (ZHANG Ying, MAO Xiaoqing. Study on hydrologic effects of herb and shrub roots in frigid and arid-semiarid loess area [J]. China Science and Technology Review, 2009 (27): 252-253. (in Chinese))

[7] 肖本林,罗寿龙,陈军,等. 根系生态护坡的有限元分析 [J]. 岩土力学, 2011, 20 (6): 1881-1885. (XIAO Benlin, LUO Shoulong, CHEN Jun, et al. Finite element analysis of eco-protection slope through roots [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 20 (6): 1881-1885. (in Chinese))

[8] HU X S, BRIERLEY G, ZHU H L, et al. An exploratory analysis of vegetation strategies to reduce shallow landslide activity on loess hillslopes, Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Journal of Mountain Science, 2013, 10 (4): 668-686.

[9] 常金源,包涵,伍法权,等. 降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨 [J]. 岩土力学, 2015, 18 (4): 995-1001. (CHANG Jinyuan, BAO Han, WU Faquan, et al. Discussion on stability of shallow landslide under rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 18 (4): 995-1001. (in Chinese))

[10] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等. 青藏高原东北部黄土区灌木植物根系护坡效应的数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (9): 1877-1884. (LI Guorong, HU Xiasong, MAO Xiaoqing, et al. Numerical simulation of shrub roots for slope protection effects on loess area of northeast Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (9): 1877-1884. (in Chinese))

[11] 黄井武,陈晓平,王盛. 水位变动对库岸古滑坡稳定性影响研究 [J]. 黑龙江大学学报, 2012, 3 (2): 22-27. (HUANG Jingwu, CHEN Xiaoping, WANG Sheng, et al. Stability of bank ancient landslide under water level fluctuations [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2012, 3 (2): 22-27. (in Chinese))

[12] 张登,简文彬,叶琪,等. 尾矿库边坡时变分析模型及其应用 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (3): 835-840. (ZHANG Deng, JIAN Wenbin, YE Qi, et al. A time-varying analytic model of tailings slope and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (3): 835-840. (in Chinese))

[13] 胡孝彭,赵仲辉,倪晓雯. 应力状态对土-水特征曲线的影响规律 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41 (2): 150-155. (HU Xiaopeng, ZHAO Zhonghui, NI Xiaowen. Influence of stress state on soil-water characteristic curve [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41 (2): 150-155. (in Chinese))

[14] 杨红,邵孝侯,张林,等. 天津滨海地区 3 种典型土壤水分物理特性 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39 (4): 431-435. (YANG Hong, SHAO Xiaohou,

- ZHANG Lin, et al. moisture-physical characteristics of three types of soils in Tianjin Binhai area[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2011, 39(4): 431-435. (in Chinese)
 - [15] 蔡国庆, 纪小彬. 温度对非饱和土土水特征曲线的影响研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(增刊1): 161-165. (CAI Guoqing, JI Xiaobin. Effect of temperature on soil-water characteristic curve of unsaturated soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(Sup1): 161-165. (in Chinese))
 - [16] 嵇晓雷, 杨平. 狗牙根根系形态对边坡稳定性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 531-535. (JI Xiaolei, YANG Ping. Effects of roots of bermuda grass on the stability of slopes[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2013, 37(5): 531-535. (in Chinese))
 - [17] 张永杰, 王桂尧, 王玲, 等. 路堑边坡植被防护固土效果室内外试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2012, 12(3): 9-14. (ZHANG Yongjie, WANG Guiyao, WANG Ling, et al. Solidify effect of cut slope ecology protection with indoor and outdoor tests[J]. Changsha University of Science and Technology(Natural Science), 2012, 12(3): 9-14. (in Chinese))
 - [18] 吕晶, 高甲荣, 王颖, 等. 不同护坡植物对岸坡土壤性质的影响及效应分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3): 101-104. (LÜ Jing, GAO Jiarong, WANG Ying, et al. Effects of different plant revetments on the soil physical feature[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(3): 101-104. (in Chinese))
 - [19] 张雪东, 赵成刚, 刘艳. 变形对非饱和土渗透系数影响规律模拟研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(1): 132-139. (ZHANG Xuedong, ZHAO Chenggang, LIU Yan. Probability based model for influence of deformation on hydraulic conductivity function of unsaturated soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(1): 132-139. (in Chinese))
 - [20] MUALEM Y. Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach[J]. Water Resources Research, 1978, 14(2): 325-334.
 - [21] 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 Yongle, LIU Cuiran, LIU Haining, 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))
 - [22] 彭书生, 王永波, 盛谦, 等. 植被增加边坡降雨入渗对边坡稳定性影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(增刊1): 1274-1278. (PENG Shusheng, WANG Yongbo, SHENG Qian, et al. Study on enhancement of precipitation infiltration by vegetation and its effect on slope stability[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(Sup1): 1274-1278. (in Chinese))
- (收稿日期: 2016-07-21 编辑: 熊水斌)
- +++++
- (上接第 37 页)
- [10] 蒋昌波, 邓涯, 陈杰, 等. 孤立波作用下岸滩剖面变化成因的水动力数值分析[J]. 水动力研究与进展: A 辑, 2014, 29(6): 713-722. (JIANG Changbo, DENG Ya, CHEN Jie, et al. Hydrodynamic numerical study on the reasons of beach profile change under solitary wave[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2014, 29(6): 713-722. (in Chinese))
 - [11] KATO F, SATO S, YEH H. Large-scale experiment on dynamic response of sand bed around a cylinder due to Tsunami[J]. Coastal Engineering Journal, 1999, 46: 956-960.
 - [12] TONKIN S, YEH H, KATO F, SATO S. Tsunami scour around a cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 496: 165-192.
 - [13] NAKAMURA T, KURAMITSU Y, MIZUTANI N. Tsunami scour around a square structure[J]. Coastal Engineering Journal, 2008, 50(2): 209-246.
 - [14] 陈杰, 蒋昌波, 隆院男, 等. 海啸波作用下泥沙运动: IV 建筑物局部冲刷[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 832-837. (CHEN Jie, JIANG Changbo, LONG Yuannan, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: IV. local scour around structures[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 832-837. (in Chinese))
 - [15] 陈杰, 肖桂振, 蒋昌波, 等. 潜堤对海啸波作用下岸滩剖面变化影响试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2014, 11(3): 58-64. (CHEN Jie, XIAO Guizhen, JIANG Changbo, et al. Experimental study on sandy beach profile changes by tsunami waves under effect of submerged breakwater[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology(Natural Science), 2014, 11(3): 58-64. (in Chinese))
 - [16] 陈杰, 杨武, 蒋昌波, 等. 海啸波作用下直立堤局部冲刷试验研究[J]. 海洋通报, 2015, 34(6): 616-622. (CHEN Jie, YANG Wu, JIANG Changbo, et al. Experimental study of local scour around vertical breakwater by tsunami waves[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(6): 616-622. (in Chinese))
 - [17] ARIKAWA T, SATO M, SHIMOSAKO K, et al. Failure mechanism of Kamaishi breakwaters due to the Great East Japan Earthquake Tsunami[J]. Coastal Engineering Proceedings, 2012, 1(33): 16.
- (收稿日期: 2016-06-15 编辑: 郑孝宇)