

基质势梯度作用下非饱和土水分迁移研究

李彦龙¹, 汪留松¹, 王铁行²

(1. 许昌学院 土木工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了评估基质势梯度对水分迁移的驱动效应, 开展了非饱和土在基质势梯度作用下的水分迁移试验. 试验结果表明, 对于含水量分布于 8%~24% 的非饱和土而言, 基质势梯度对非饱和土中水分迁移的驱动效应是显著的, 且水分迁移量随着基质势梯度的增大而增加. 进而建立了非饱和土中的水分迁移量与初始基质势梯度之间的统计关系式, 二者之间大体上呈线性关系.

关键词: 基质势梯度; 非饱和土; 水分迁移

中图分类号: TU 411

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)06-0847-05

Moisture migration of unsaturated soil due to matric suction gradients

LI Yanlong¹, WANG Liusong¹, WANG Tiehang²

(1. School of Civil Engineering, Xuchang College, Xuchang, Henan 461000, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to assess the driving effect of matric potential gradient on moisture migration in unsaturated soil, the moisture migration experiment due to matric potential gradients was carried out. The driving effect of matric potential gradient was remarkable as to unsaturated loess with 8%~24% water content and the moisture migration quantity increase with the increase of the initial matric potential gradient. A statistical relationship between matric potential gradient and the moisture migration amount is established. The statistic relation shows that the moisture migration amount in unsaturated soil has a linear relation with the initial matric potential gradient in general.

Key words: matric potential gradients; unsaturated loess; moisture migration

非饱和土是由气-液-固三相所组成的多相多组分系统, 由热力学第二定律可知, 当无外因作用时, 系统会自发地达到能量平衡; 而土体内水分的迁移现象正是系统中能量逐渐趋于平衡的表现. 重力势、温度势和基质势是引起非饱和土中水分迁移的主要驱动力. 目前, 重力势对非饱和土中水分迁移的驱动效应已有了较为明确的确定方法^[1]; 温度势对非饱和土中水分迁移的影响较为复杂, 主要表现为水分迁移和热量传输的耦合作用, 该方面的相关成果相对较多^[2-5].

基质势对非饱和土中水分迁移的相关研究也较多, 学者们往往采用初始含水量均匀的土样, 研究其在蒸发作用^[6-8]或外部水分入渗作用^[9-11]下水分场的变化规律以及水分场变化对土体工程力学性质的影响. 上述水分迁移的机理为: 初始含水量均匀的土样在蒸发作用或外部水分入渗下, 其内部含水量会变为非均匀状态, 从引起非饱和

土体内基质势梯度的存在, 继而引起水分的迁移. 因此, 可以把蒸发和入渗作为水分迁移的外因, 把由蒸发和入渗而引起的基质势梯度作为水分迁移的内因. 但是, 绝大多数非饱和土在天然状态下的含水量并非均匀分布, 其内部本身存在着基质势梯度, 对于初始含水量非均匀的非饱和土来讲, 其在自身内部基质势梯度作用下的水分迁移规律, 即能力再平衡规律至今却鲜有报道. 鉴于此, 本文将采用初始含水量非均匀的土样, 并严格控制其含水量梯度, 研究其在自身基质势梯度作用下的水分迁移规律.

1 试验

1.1 试验内容

选择西安市南郊 Q₃ 黄土制样, 其塑性指数为 16.2, >0.075 mm、0.075~0.005 mm 和 <0.005 mm 的颗粒所占的比例分别为 55.1%、28.2% 和

16.7%，属于粉质粘土，比重为 2.67。天然状态下黄土的干密度分布于 $1.3 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 之间^[12]，本试验中土样的干密度取天然状态下黄土干密度的平均值(1.5 g/cm^3)以排除干密度对试验结果的影响。制样时，使土样的含水量沿土样的长度方向均匀变化以使土样内存在一个初始的含水量梯度，以便于通过土水特征曲线来确定其基质势梯度。采用 $20 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$ 的长方体有机玻璃盒分段制样(图 1)。

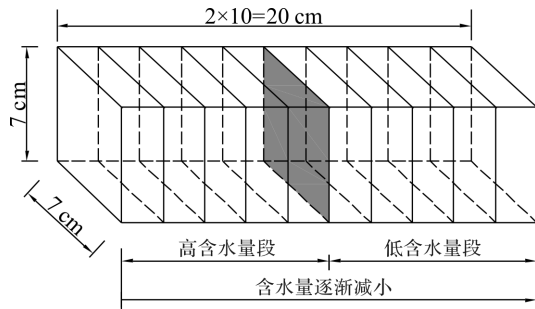


图 1 土样的示意图

Fig. 1 Diagram of samples

制样时，沿有机玻璃盒长度方向将其分割为 10 等份，每 2 cm 一段，分别控制每一段的含水量。由此，沿土样长度方向，以土样长度方向的中点为界限，可以将土样分为低含水量段和高含水量段。低含水量端和高含水量端的含水量分别为土样含水量的最小值和最大值。土样的含水量梯度和对应的含水量取值范围见表 1。

表 1 土样的含水量梯度和对应的含水量范围

Tab. 1 Moisture gradient of soil samples and corresponding water content range

含水量梯度%/cm	土样编号	含水量范围/%
0.2	S1	8~12
	S2	12~16
	S3	16~20
	S4	20~24
0.4	S5	8~16
	S6	16~24
0.6	S7	8~20
	S8	12~24
0.8	S9	8~24

试验时，将土样放进恒温箱(25°C)以排除温度对试验结果的影响。分别在试验的第 7 d、14 d 和 21 d 通过微波炉烘干法测量土样的含水量。所有试验步骤均严格遵守现行的《土工试验方法标准》(GB/T 50123-1999)。

1.2 试验结果

含水量梯度分别为 $0.2\%/ \text{cm}$ 、 $0.4\%/ \text{cm}$ 、 $0.6\%/ \text{cm}$ 和 $0.8\%/ \text{cm}$ 的土样的水分场的动态变化见图 2~5。可以看到图 2~5 中曲线与横轴逐渐趋于平行，即随着试验时间的增加，土样低含水量段的含水量不断增加，高含水量段的含水量不断减小。该现象的原因如下：较高的含水量对应着较低的基质势，反之，较低的含水量对应着较高的基质势。当无外界做功时，能量会自发地从高能量区向低能量区传递。

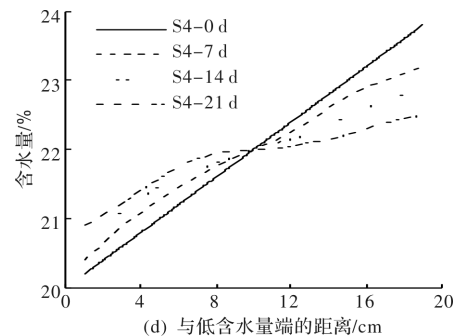
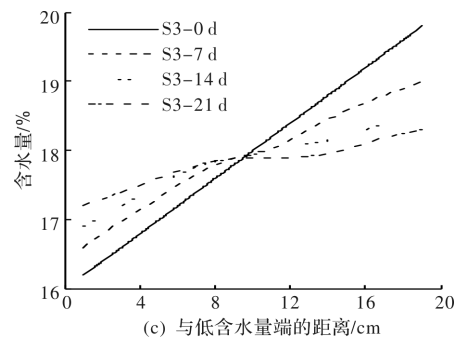
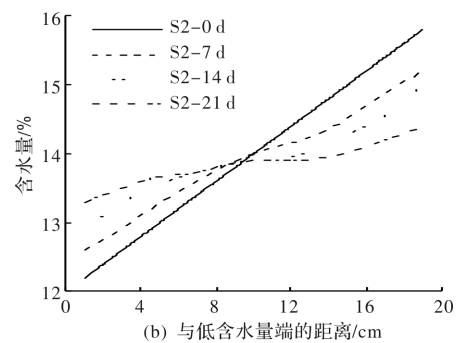
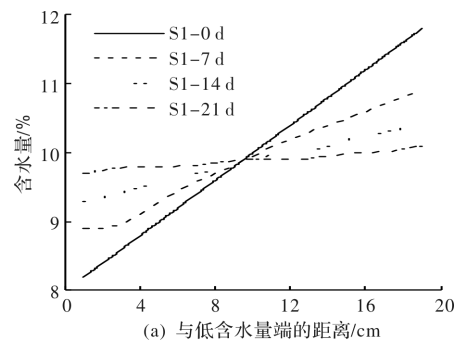
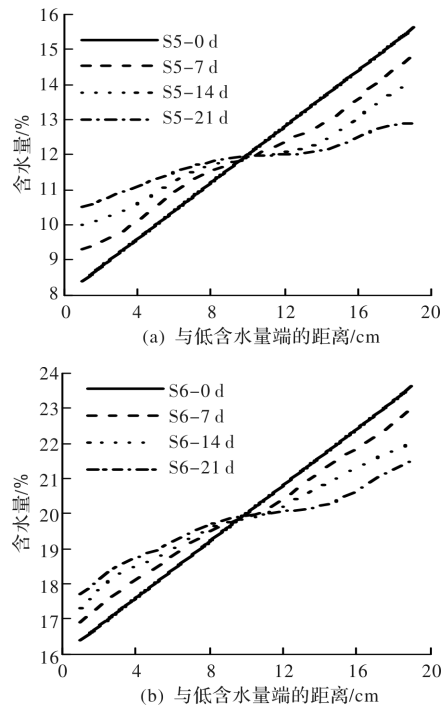
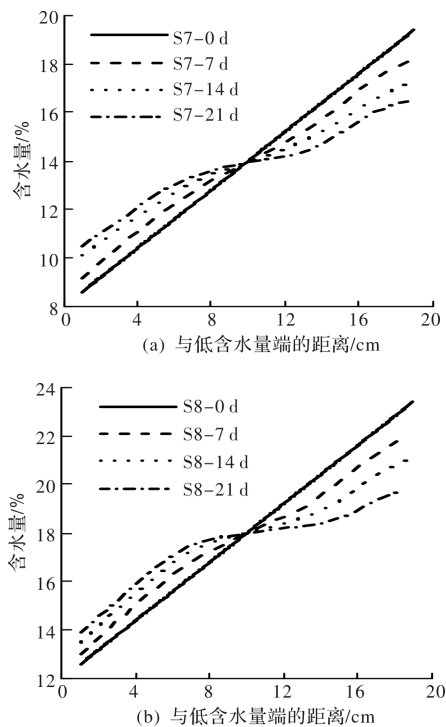


图 2 土样水分场的动态变化 ($\text{grad}T=0.2\%/ \text{cm}$)

Fig. 2 Dynamic changes of sample water field ($\text{grad}T=0.2\%/ \text{cm}$)

图3 土样水分场的动态变化 ($\text{grad}T=0.4\%/cm$)Fig. 3 Dynamic changes of sample water field ($\text{grad}T=0.4\%/cm$)图4 土样水分场的动态变化 ($\text{grad}T=0.6\%/cm$)Fig. 4 Dynamic changes of sample water field ($\text{grad}T=0.6\%/cm$)

土样 S1~S9 在第 21 d 时的水分场见图 6, $\Delta\omega_i$ 为土样两端含水量的差值。从图 6 中可以看到, $\Delta\omega_1$ 、 $\Delta\omega_3$ 、 $\Delta\omega_5$ 、 $\Delta\omega_7$ 和 9 分别为 0.4%、1.1%、2.4%、6.0% 和 6.8%, 呈递增趋势, 代表土样 S1、S3、S5、S7 和 S9 在第 21 d 时的水分场的曲线与横轴的夹角也不断增加; $\Delta\omega_2$ 、 $\Delta\omega_4$ 、

$\Delta\omega_6$ 和 $\Delta\omega_8$ 分别为 1.1%、1.6%、3.8% 和 6.8%。较大的夹角表明土样内部的水分场还未达到未定状态。该现象的原因可以归结为初始含水量梯度的不同而造成的, 较大的含水量梯度意味着较高的基质势梯度, 土样内部较高的能量差致使其需要较长的时间达到能量平衡状态。

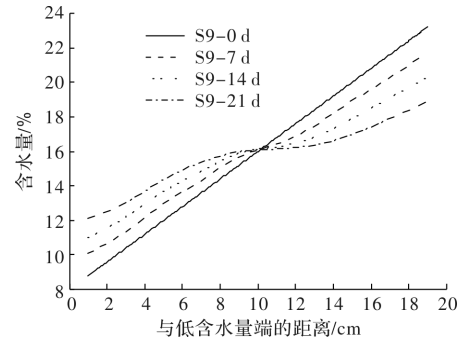
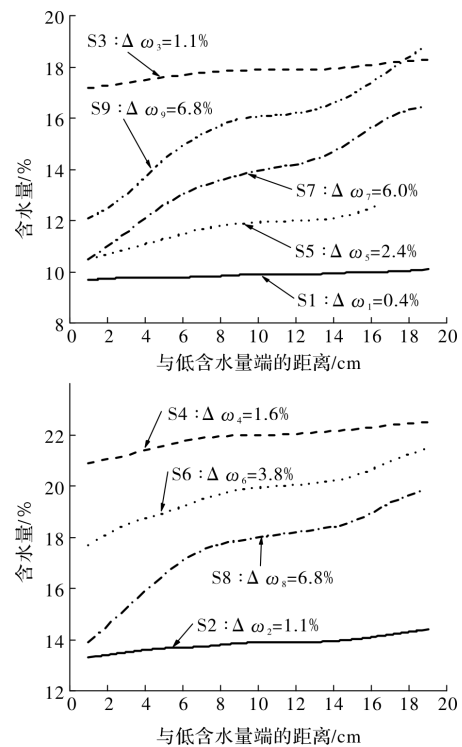
图5 土样水分场的动态变化 ($\text{grad}T=0.8\%/cm$)Fig. 5 Dynamic changes of sample water field ($\text{grad}T=0.8\%/cm$)

图6 黄土土样的水分场 (21 d)

Fig. 6 Water field of loess samples (21 d)

2 水分迁移量与基质势梯度的关系

2.1 基质势梯度的确定

忽略非饱和土土水特征曲线的滞后性, 非饱和土的含水量与基质势之间为单值对应关系。因此, 可以通过非饱和土的含水量梯度来表征其基质势梯度。本文采用 VG 土水特征曲线模型, 其表达式如下^[13]:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha h)^n)^m} \quad (1)$$

式中: θ 为体积含水量; θ_r 为残余含水量; θ_s 为饱和含水量; h 为吸力水头(m); α 、 m 、 n 为系数, $m=1-1/n$. 由式(1)可得基质势的表达式:

$$h = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

即: 土样的饱和含水量为 29.3%, 即 θ_s ; 参数 θ_r 、 α 、 n 按文献[14]取值. 将上述参数带入式(2)中便可以获得土样的土水特征曲线(图7). 计算得到含水量 8%、12%、16%、20% 和 24% 的非饱和黄土土样的基质势分别为 612 kPa、320 kPa、218 kPa、164 kPa 和 128 kPa. 从图7中可以看到, 含水量 8%~24% 的土样的基质势基本上为线性分布, 因此在计算基质势梯度时, 把土样的基质势按线性分布来处理. 计算得到土样 S1~S9 的初始基质势梯度分别为: 12.8 kPa/cm、4.5 kPa/cm、2.4 kPa/cm、1.6 kPa/cm、16.7 kPa/cm、4.0 kPa/cm、18.3 kPa/cm、8.3 kPa/cm、19.0 kPa/cm.

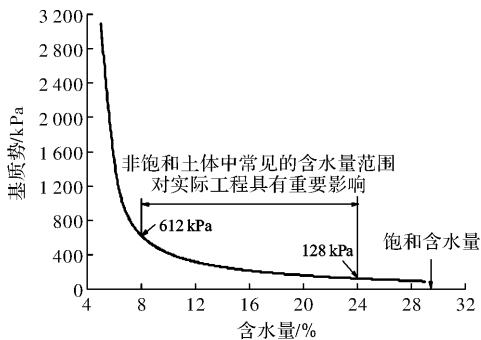


图7 黄土土样的土水特征曲线

Fig. 7 Soil water characteristic curve of loess sample

2.2 水分迁移量基质势梯度的关系

由于土样高含水量段水分的减小量与低含水量段水分的增加量基本相同, 在此, 取土样低含水量段含水量的平均增量作为土样的水分迁移量. 由于在水分迁移试验中, 同一含水量梯度下有多个初始含水量不同的土样, 分别取土样 S1~S4、S5~S6、S7~S8 的平均水分迁移量分别作为含水量梯度为 0.2%/cm、0.4%/cm、0.6%/cm 作用下的水分迁移量, 土样 S9 的水分迁移量对应 0.8%/cm 的含水量梯度. 图8为土样在 0~7 d、7~14 d 和 14~21 d 的水分迁移量.

从图8中可以看到, 水分迁移量随着含水量梯度的增加而增加, 这是由于非饱和土内较大的含水量梯度代表着较高的基质势梯度, 基质势梯度越大则其对水分迁移的驱动力就越强, 因此其迁移量也就越大. 从图8中还可以看到, 水分迁移量随着迁移时间的增加却不断地减小, 这是由于随着迁移时间的增加, 土样内部的含水量逐渐趋于

均匀分布, 土样内部的基质势梯度也随之减小.

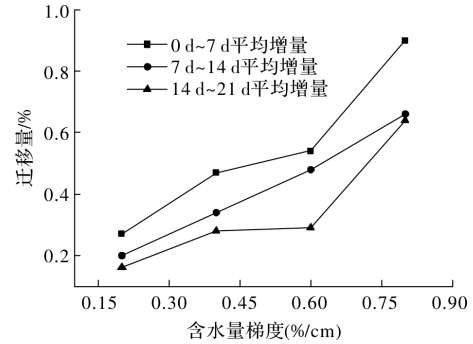


图8 不同含水量梯度作用下水分迁移量的动态变化

Fig. 8 Dynamic changes of moisture migration quantity under different water content gradients

土样在各个时间段内的基质势梯度与对应的水分迁移量见表2. 对表2中的相关数据进行拟合, 可以得到土样在各个时间段内(7 d)的基质势梯度与水分迁移量之间的关系(图9). 从图9中可以看到, 水分迁移量与初始基质势梯度近似为线性分布. 拟合所得的线性关系式如下:

$$Q = 0.033 \text{ grad}M + 0.145; R^2 = 0.7011 \quad (3)$$

式中: $\text{grad}M$ 代表基质势梯度 kPa/cm; Q 代表每个时间段内的水分迁移量, %.

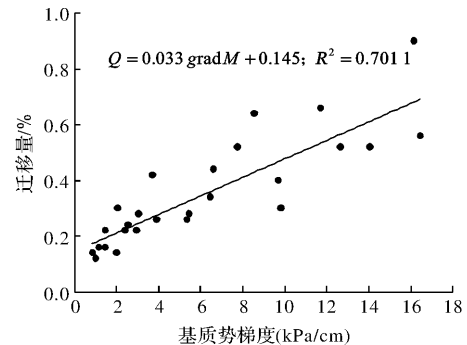


图9 水分迁移量与基质势梯度

Fig. 9 Quantity of moisture migration versus matric potential gradients

需要说明的是, 式(3)为拟合所得的统计关系式, 目的是为了反应水分迁移量与初始基质势梯度之间的关系, 因此, 在拟合分析时并未考虑土样的含水量水平. 物质运动的自发趋势是从高能量状态向低能量状态, 若忽略温度和重力的影响, 土体含水量的高低可以表征土体中孔隙水化学势能的大小, 较高的含水量意味着土体中孔隙水具有较低的化学势能, 土体内化学势能要保持平衡则必然要求能量从化学势能相对较高的区域或物质相向化学势能相对较低的区域或物质相迁移. 因此, 在试验中就表现出水分迁移量随基质势梯度的增加而增加. 二者之间所表现出的线性关系则表明了水分迁移量与基质势梯度成比例增加.

表 2 土样的基质势梯度与水分迁移量

Tab. 2 Matric potential gradient versus moisture migration quantity

土样 编号	0~7 d		7~14 d		14~21 d	
	基质势梯度	水分迁移量	基质势梯度	水分迁移量	基质势梯度	水分迁移量
	/kPa·cm ⁻¹	/%	/kPa·cm ⁻¹	%	/kPa·cm ⁻¹	%
S1	9.9	0.30	5.4	0.26	2.6	0.24
S2	3.9	0.26	3.0	0.22	2.0	0.14
S3	2.1	0.30	1.5	0.16	1.0	0.12
S4	1.5	0.22	1.2	0.16	0.9	0.14
S5	14.1	0.52	9.7	0.40	6.5	0.34
S6	3.7	0.42	3.1	0.28	2.4	0.22
S7	16.5	0.56	12.7	0.52	9.8	0.30
S8	7.8	0.52	6.6	0.44	5.5	0.28
S9	16.2	0.90	11.7	0.66	8.6	0.64

3 结语

论文针对初始含水量不均匀的非饱和土, 研究了其在自身基质势梯度作用下的水分迁移规律. 研究表明, 非饱和土中的水分在自身基质势梯度作用下会发生显著的迁移现象, 该现象深刻地揭示了, 基质势梯度是非饱和土水分迁移的驱动力. 水分在迁移规律上表现出, 由高含水量段向低含水量段迁移, 且水分迁移量随着土样初始基质势梯度的增加而增加, 二者之间大体上呈线性关系. 拟合所得的水分迁移量与初始基质势梯度之间的统计关系式可为工程所参考.

参考文献 References

[1] 王铁行, 李宁, 谢定义. 非饱和黄土重力势, 基质势和温度势探讨[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 715-718.
WANG Tiehang, LI Ning, XIE Dingyi. Gravitational potential, matrix suction and thermal potential of unsaturated loess soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 715-718.

[2] HEITMAN J L, HORTON R, REN T, et al. A test of coupled soil heat and water transfer prediction under transient boundary temperatures[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(5): 1197-1207.

[3] WANG T H, SU L J. Experimental study on moisture migration in unsaturated loess under effect of temperature[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2010, 24(3): 77-86.

[4] DEB S K, SHUKLA M K, SHARMA P, et al. Coupled liquid water, water vapor, and heat transport simulations in an unsaturated zone of a sandy loam field[J]. Soil Science, 2011, 176(8): 387-398.

[5] 李彦龙, 王俊, 王铁行. 温度梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2839-2844.
LI Yanlong, WANG Jun, WANG Tiehang. Moisture

migration of unsaturated soil due to thermal gradients[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2839-2844.

[6] 王铁行, 陈晶晶, 李彦龙. 非饱和黄土地表蒸发的试验研究[J]. 干旱区研究, 2014, 31(12): 1952-1957.
WANG Tiehang, CHEN Jingjing, LI Yanlong. Experimental re-search on the land surface evaporation of unsaturated lo-ess[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(12): 1952-1957.

[7] 李雄威, 王爱军, 王勇. 降雨蒸发作用下膨胀土湿热和裂隙特性室内模拟试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2473-2479.
LI Xiongwei, WANG Aijun, WANG Yong. Laboratory model test on moisture-heat and fissure behavior of expansive soil under action of rainfall and evaporation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2473-2479.

[8] 王晓亮, 李光范, 杜娟, 等. 降雨和蒸发对非饱和土土压力的影响[J]. 应用力学学报, 2014, 31(3): 423-427.
WANG Xiaoliang, LI Guangfan, DU Juan, et al. The influence of rainfall and evaporation on the unsaturated soil pressure[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(3): 423-427.

[9] 孙冬梅, 朱岳明, 张明进. 降雨入渗过程的水-气二相流模型研究[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 150-156.
SUN Dongmei, ZHU Yueming, ZHANG Mingjin. Water-air two-phase flow model for numerical analysis of rainfall infiltration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 150-156.

[10] 李兆平, 张弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 57-61.
LI Zhaoping, ZHANG Mi. Effects of rain infiltration on transient safety of unsaturated soil slope[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 57-61.

- the 23rd U. S. Symposium on Rock Mechanics. Berkeley:[s. n.],1982:739-760.
- [7] 李海波,刘博,冯海鹏,等.模拟岩石节理试样剪切变形特征和破坏机制研究[J].岩土力学,2008,29(7):1741-1746,1752.
LI Haibo, LIU Bo, FENG Haipeng, et al. Study of deformability behaviour and failure mechanism by simulating rock joints sample under different loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1741-1746, 1752.
- [8] 沈明荣,张清照.规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(4):713-719.
SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4): 713-719.
- [9] 罗战友,杜时贵,黄曼,等.岩石结构面峰值摩擦角应力效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1142-1148.
LUO Zhanyou, DU Shigui, HUANG Man, et al. Experimental study of stress effect on peak friction angle of rock structural plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1142-1148.
- [10] 沈明荣,张清照.规则岩体结构面的蠕变特性研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(z2):3973-3979.
SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Study on creep characteristics of regular rock mass discontinuity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(z2): 3973-3979.
- [11] 周峰,张鹏,王旭东,等.吻合度对节理力学特性影响的细观数值试验[J].南京工业大学学报(自然科学版),2015,37(2):85-90.
ZHOU Feng, ZHANG Peng, WANG Xudong, et al. Influence of matching coefficient on joint mechanics characteristics based on meso-numerical analysis[J]. Journal of Nanjing University of Technology(Natural Science Edition), 2015, 37(2): 85-90.
- [12] 宋英龙,夏才初,唐志成,等.不同接触状态下粗糙节理剪切强度性质的颗粒流数值模拟和试验验证[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):2028-2035.
SONG Yinglong, XIA Caichu, TANG Zhicheng, et al. Numerical simulation and test validation for direct shear properties of rough joints under different contact states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2028-2035.
- [13] 黄达,黄润秋,雷鹏.贯通型锯齿状岩体结构面剪切变形及强度特征[J].煤炭学报,2014,39(7):1229-1237.
HUANG Da, HUANG Runqiu, LEI Peng. Shear deformation and strength of through-going saw-tooth rock dis-continuity[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1229-1237.
- [14] Itasca Consulting Group Inc. PFC2D (particle flow code in 2D) theory and background[R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group.

(编辑 吴海西)

(上接第851页)

- [11] 毛雪松,侯仲杰,孔令坤.风积砂水分迁移试验研究[J].水利学报,2010,41(2):142-147.
MAO Xuesong, HOU Zhongjie, KONG Lingwei, et al. Experimental study on moisture migration of wind-blown sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2): 142-147.
- [12] ZHU Xianmo, LI Yushan, PENG Xianglin, et al. Soils of the loess region in China[J]. Geoderma, 1983, 29(3): 237-255.
- [13] GENUCHTEN Van M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [14] 王铁行,卢靖,岳彩坤.考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J].岩土力学,2008,29(1):1-5.
WANG Tiehang, LU Jing, YUE Caikun. Moisture migration in unsaturated loess considering temperature effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 1-5.

(编辑 桂智刚)