

文章编号: 1000-7598(2009)05-1291-06

膨胀土堑坡雨水入渗速率的影响因素与相关性分析

李雄威^{1,2}, 孔令伟¹, 郭爱国¹

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.常州工学院 土木建筑工程学院, 常州 213002)

摘要: 从土体初始含水率和降雨强度 2 个影响因素出发, 通过现场试验分析了膨胀土堑坡雨水入渗速率的变化特性。试验结果表明, 对于膨胀土堑坡, 一定雨强连续的降雨才能使水分持续有效的入渗; 土体含水率的变化主要取决于降雨的历时, 而不是降雨强度。雨水入渗过程中, 随着土体初始含水率的降低, 坡面侵蚀程度有所降低。降雨强度较小时, 雨水对坡面侵蚀不大; 随着降雨强度的增加, 坡面侵蚀逐渐加剧, 但侵蚀程度逐渐收敛。植被的存在会改善土体的渗透性, 同时也将大大降低雨水对坡面的侵蚀。

关键词: 膨胀土堑坡; 裂隙; 雨水入渗; 侵蚀

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Effects and correlation analysis of infiltration velocity of expansive soil cut slope

LI Xiong-wei^{1,2}, KONG Ling-wei¹, GUO Ai-guo¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Civil Engineering & Architecture, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: From the viewpoints of considering the two effects of initial water content and rainfall intensity, infiltration velocity characteristics of expansive soil cut slope is studied through the field test. The results show that the water can infiltrate effectively only under the condition of successive rainfall in a certain intensity. The water content variety of slope is controlled by the successive time of rainfall, but not the intensity. The erosion amount is decreased with the reduction of water content. When the rainfall intensity is small, the rainfall makes little erosion on the slope surface. The erosion amount increases with the enhancement of rainfall intensity, but the value is gradually convergent. When the slope is covered by vegetation, the permeability is strengthened, but the erosion scale is lightened greatly.

Key words: expansive soil cut slope; fissure; rainfall infiltration; erosion

1 引言

裂隙的存在及其发展变化对膨胀土边坡的稳定有着重要的影响, 文献[1]的研究发现, 对于膨胀土边坡, 持续的蒸发会导致膨胀土水分丧失、土体开裂, 从而为降雨的入渗打开方便之门, 导致土体强度衰减而发生渐进性破坏, 说明蒸发效应导致土体裂隙的开展是边坡发生灾变的一个重要前提。

许多学者为揭示膨胀土边坡的变形机制与规律, 开展了一系列现场人工降雨和天然降雨的试验研究。现场人工降雨模拟试验揭示了降雨入渗所致的土-水相互作用机制^[2], 获得了降雨强度、坡度及

坡高与滑坡的内在关系^[3], 并对边坡渐进性破坏过程进行了有效的描述^[4]; 而在自然环境下, 对膨胀土堑坡在降雨、蒸发过程中变形特征的研究表明, 降雨是导致边坡变形的最直接气候因素^[5]。以上研究工作的重点主要是边坡的降雨入渗过程, 但试验中均只考虑降雨强度的影响, 而没有考虑土体裂隙分布的影响, 这与膨胀土边坡雨水入渗的特征不符。

由于边坡表层土体含水率的变化反映了土体蒸发开裂的过程, 所以本文拟用现场试验的方法与将膨胀土堑坡雨水入渗速率与土体初始含水率和降雨强度联系起来, 从而对堑坡雨水入渗过程进行客观描述。

收稿日期: 2008-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.10872210); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (No. kzcx2-yw-150); 交通部西部交通建设科技项目 (No. 200631878530)。

第一作者简介: 李雄威, 男, 1976 年生, 博士, 主要从事非饱和土力学, 土质边坡和桩土共同作用方面的研究。E-mail: lixww@126.com

2 试验方案

试验场地位于广西南宁市郊外，当地属于亚热带季风气候，阳光充足，气候温和，雨量充沛，干湿季节分明。现场开挖在原场地进行，见图 1。将边坡分设为裸土区和植草区，坡度为 16°，坡高为 2.4 m，植草区铺设的草皮为马尼拉草。边坡的土层剖面见图 2，地面以下有红褐色的弱膨胀土和灰白色的强膨胀土分布。



图 1 现场试验边坡
Fig.1 The field test slope

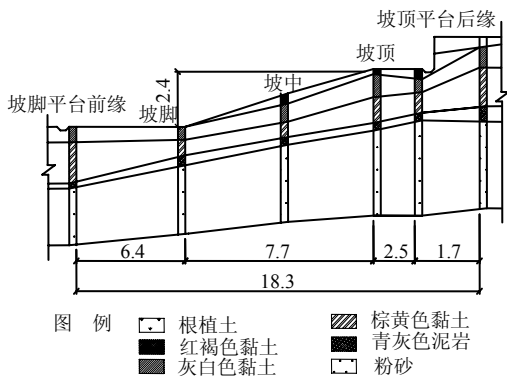


图 2 边坡剖面 (单位: m)
Fig.2 The slope section plane(unit: m)

现场设置小型气象站，可对降雨量和蒸发量进行实时监测，同时采用土钻法测试边坡土体含水率。降雨时，边坡径流量的观测采用容积法，该方法是将坡面的径流汇集到坡脚处开挖的集水井中，同时记录集水井的充水时间。在监测过程中，依据监测目的的不同，准备了长×宽×高为 20 cm×20 cm×30 cm 的小桶，并对容积刻度进行了标注，精度可达 10 mL。

根据水量平衡原理，即

$$I = P - E - T - R \quad (1)$$

式中： I 为地表净入渗量； P 为降雨量； E 为蒸发量； T 为植物蒸腾量； R 为径流量。

在已知地表净入渗量和入渗时间后，可求得边坡土体的入渗速率：

$$v = \frac{I}{tA} \quad (2)$$

式中： v 为地表入渗速率； t 为降雨历时； A 为土坡面积。

对边坡雨水入渗速率和土体含水率以及降雨强度的相关关系展开研究，可以获得边坡雨水入渗过程的规律。监测时间段内同时还对集水井中径流的含泥量进行测定，即单位体积汇集水中土颗粒的干重。该物理量可以定义为侵蚀量，用于表征降雨对坡面冲刷的程度。现场试验的监测期为 2006 年雨季。

3 膨胀土塹坡雨水入渗过程分析

在降雨过程中，坡体的水量变化与土体的渗透特性息息相关。现场试验中，在不同初始蒸发条件下分别测试了径流发生前后边坡的渗透特性以及坡面的侵蚀特性，试验对象包括裸土区和植草区。

3.1 膨胀土塹坡雨水入渗特性

降雨过程中，边坡渗透的典型过程如图 3 所示，可以看出，在降雨初期，不论是植草区还是裸土区，雨水都是完全入渗，而随着雨水入渗量和降雨量的增加，裸土区先于植草区产生径流，说明植草区的降雨更容易入渗。不同降雨时刻，边坡裸土区和植草区产生径流的时间见图 4。

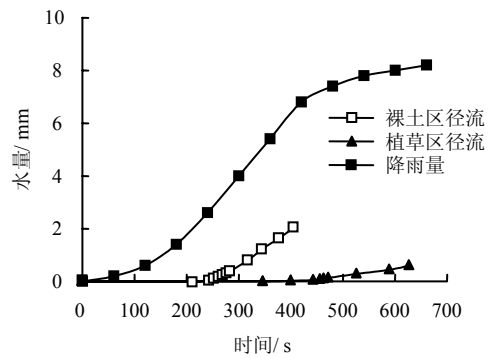


图 3 2006 年 6 月 27 日起始降雨条件下边坡水量变化
Fig.3 The water characteristic of slope in the process of initial rainfall on 6-27, 2006

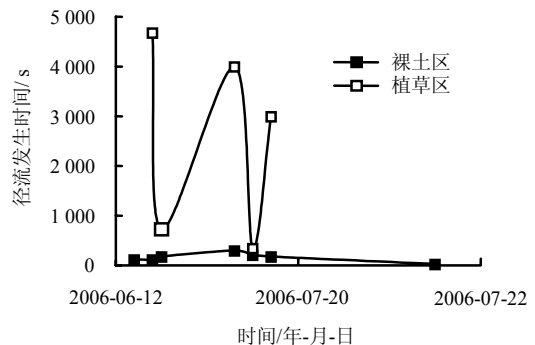


图 4 不同降雨时刻边坡径流产生的时间
Fig.4 The runoff occurred time at different moments

由图 4 可知，在降雨过程中，植草区的径流发生时间远远滞后于裸土区，说明植草区和裸土区的渗透性相差较大。

(1) 径流前膨胀土壑坡雨水入渗特性

在降雨过程中，坡体产生径流前的降水除了蒸发基本都以入渗为主，而入渗过程与土体的含水率和降雨强度紧密相关。对于膨胀土，地表土体的含水率反映了土体的开裂程度，而降雨强度反映了给水能力，这 2 个因素都决定了土体的初始渗透特性。

在表 1 和表 2 现场实测数据基础上，对边坡裸土区和植草区径流前的入渗速率进行分析，得到入渗速率与土体初始含水率和降雨强度的拟合关系。

裸土区径流前入渗速率 v_1 拟合公式为

$$v_1 = 1.22 \times 10^{-8} - 5.29 \times 10^{-8} w_1 + 0.033q$$

$$R^2 = 0.98, q \geq 3.3 \times 10^{-6}$$
(3)

式中： w_1 为裸土区坡面土体含水率； q 为降雨强度 (m/s)； R 为相关系数。

植草区径流前入渗速率 v_2 拟合公式为

$$v_2 = -4.76 \times 10^{-8} + 3.70 \times 10^{-8} w_2 + 0.028q$$

$$R^2 = 0.90, q \geq 1.1 \times 10^{-6}$$
(4)

式中： w_2 为植草区坡面土体含水率。

表 1 裸土区土体初始含水率、降雨强度和径流发生前入渗速率

Table 1 The initial water content, rainfall intensity and infiltration velocity before the runoff occurred at bare zone

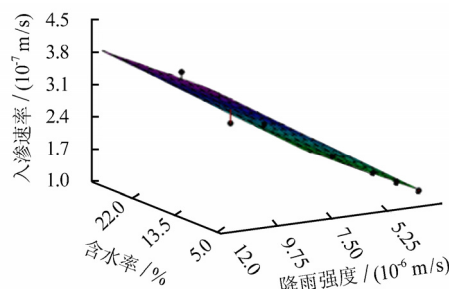
日期 / 年-月-日	坡面土体 含水率/%	降雨强度 /(10 ⁻⁶ m/s)	径流发生 时间/s	地表入渗速率 /(10 ⁻⁷ m/s)	
				实测值	计算值
2006-06-14	14.0	12.0	120	4.1	3.9
2006-06-16	12.0	3.3	120	1.2	1.2
2006-06-17	24.7	3.3	180	1.2	1.1
2006-06-25	7.7	3.3	300	1.2	1.2
2006-06-27	23.1	7.8	214	2.3	2.6
2006-06-29	16.7	3.3	180	1.2	1.1
2006-07-17	30.0	5.0	30	1.7	1.6

表 2 植草区土体初始含水率、降雨强度和径流发生前入渗速率

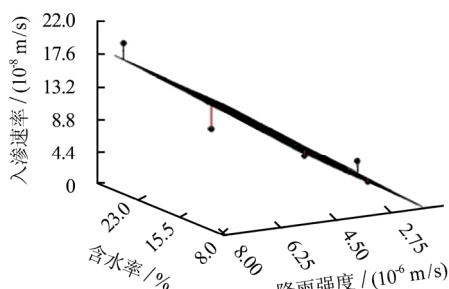
Table 2 The initial water content, rainfall intensity and infiltration velocity before the runoff occurred at vegetation covered zone

日期 / 年-月-日	坡面土体 含水率/%	降雨强度 /(10 ⁻⁶ m/s)	径流发生 时间/s	地表入渗速率 /(10 ⁻⁸ m/s)	
				实测值	计算值
2006-06-16	22.5	1.1	4 680	1.4	1.3
2006-06-17	28.2	4.7	727	6.1	9.3
2006-06-25	8.4	3.3	4 000	4.4	4.9
2006-06-27	26.6	7.8	347	20.0	18.0
2006-06-29	19.4	3.3	3 000	4.4	5.3

拟合式 (3) 和式 (4) 的曲面图形见图 5。可以看出，在径流开始前，土体的入渗速率主要由降雨强度决定，随着雨强的增加土体入渗速率逐渐增加，含水率引起入渗速率的变化要比雨强引起的变化小 1~2 个数量级。根据非饱和土力学理论^[6]，裂隙间非饱和状态膨胀土块的渗透系数都极小，径流前的雨水大部分通过裂隙渗透到边坡深处，所以径流前地表土体入渗速率反映出雨水在裂隙中渗透的特性。



(a) 裸土区



(b) 植草区

图 5 径流前地表土体入渗速率与含水率和雨强关系
Fig.5 The relationship of infiltration velocity, water content and rainfall intensity before runoff occurred

(2) 径流后膨胀土壑坡雨水入渗特性

由于膨胀土具有吸湿膨胀的特性，而且膨胀土中裂隙分布的尺度有限，当给水强度大于渗透速率时，地表开始产生径流。在表 3 和表 4 现场实测数据基础上，对边坡裸土区和植草区开始径流后 5 min 的平均入渗速率进行分析，得到入渗速率与土体初始含水率和降雨强度的拟合关系。

裸土区径流后 5 min 的入渗速率 v_3 拟合公式为

$$v_3 = -1.89 \times 10^{-7} - 2.51 \times 10^{-7} w_3 + 0.13q - 7.82 \times 10^3 q^2 + 1.55 \times 10^8 q^3$$

$$R^2 = 0.98, q \geq 2.0 \times 10^{-6}$$
(5)

式中： w_3 为裸土区坡面土体含水率 (m/s)。

植草区径流后 5 min 的入渗速率拟合公式为

$$v_4 = -6.16 \times 10^{-8} - 2.64 \times 10^{-7} w_4 + 0.06q - 3.63 \times 10^3 q^2 - 7.78 \times 10^7 q^3$$

$$R^2 = 0.98, \quad q \geq 3.3 \times 10^{-6} \quad (6)$$

式中： w_4 为植草区坡面土体含水率 (m/s)。

表 3 裸土区土体初始含水率、降雨强度和径流发生后 5 min 入渗速率
Table 3 The initial water content, rainfall intensity and five-minute infiltration velocity after the runoff occurred at bare zone

日期 / 年-月-日	坡面土体含水率 / %	5 min 平均降雨强度 / (10 ⁻⁶ m/s)	地表入渗速率 / (10 ⁻⁷ m/s)	实测值	计算值
2006-06-14	14.0	17.0	4.7	4.7	5.0
2006-06-16	20.0	2.0	0.2	0.2	0
2006-06-17	24.7	3.3	0.6	0.6	1.1
2006-06-25	7.7	3.3	1.7	1.7	1.5
2006-06-27	23.1	13.0	5.1	5.1	4.8
2006-06-29	16.7	3.3	1.2	1.2	1.3
2006-06-30	35.0	21.0	4.7	4.7	4.6

表 4 植草区土体初始含水率、降雨强度和径流发生后 5 min 入渗速率

Table 4 The initial water content, rainfall intensity and five-minute infiltration velocity after the runoff occurred at vegetation covered zone

日期 / 年-月-日	坡面土体含水率 / %	5 min 平均降雨强度 / (10 ⁻⁶ m/s)	地表入渗速率 / (10 ⁻⁸ m/s)	实测值	计算值
2006-06-16	22.5	21.0	25.0	25.0	25.0
2006-06-17	28.2	4.7	5.9	5.9	5.9
2006-06-25	8.4	3.3	8.8	8.8	8.8
2006-06-27	26.6	7.8	16.0	16.0	16.0
2006-06-29	19.4	3.3	4.4	4.4	4.8
2006-06-30	35.0	21.0	22.0	22.0	22.0

拟合式 (5) 和式 (6) 的曲面图形见图 6。可见，坡体产生径流后的入渗速率随降雨强度的增加逐渐收敛，趋于稳定，但随初始含水率的减少逐渐呈线性增加。可以看出，大的降雨强度并不能使雨水迅速入渗，一定降雨强度连续的降雨才能使水分持续入渗，而前期土体含水率较小、裂隙较发育的状态有利于雨水的入渗。

2005 年 6 月，降雨量和边坡坡中位置土体含水率的对应关系见图 7，6 月上旬降雨量较大持续时间约为 10 d；6 月中旬基本无雨；6 月下旬雨量较小，持续时间也约为 10 d。从土体含水率的变化情况可以看出，无降雨时土体含水率会逐渐降低，强降雨时土体表层含水率略大于弱降雨时的情况，但不同强度的降雨量在经过相近的降雨历时后深层土体含水率比较接近，说明膨胀土边坡土体含水率的变化

主要取决于降雨的历时，而与降雨强度关系不大。这主要是由膨胀土边坡的雨水入渗特性所决定。

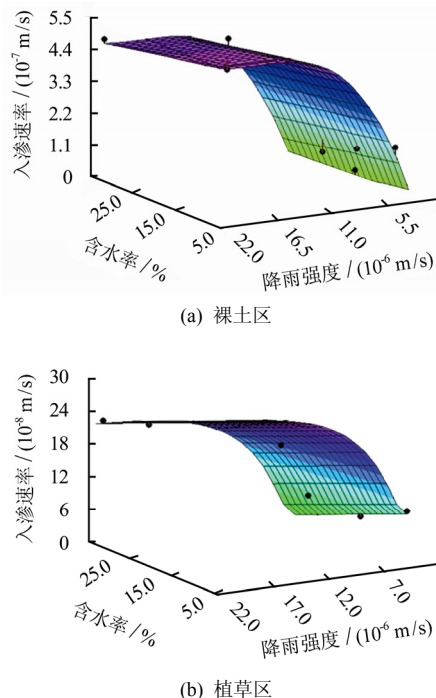


图 6 径流后 5 min 地表土体的入渗速率与初始含水率和雨强关系

Fig.6 The relationship of five-minute infiltration velocity, initial water content, rainfall intensity after the runoff occurred

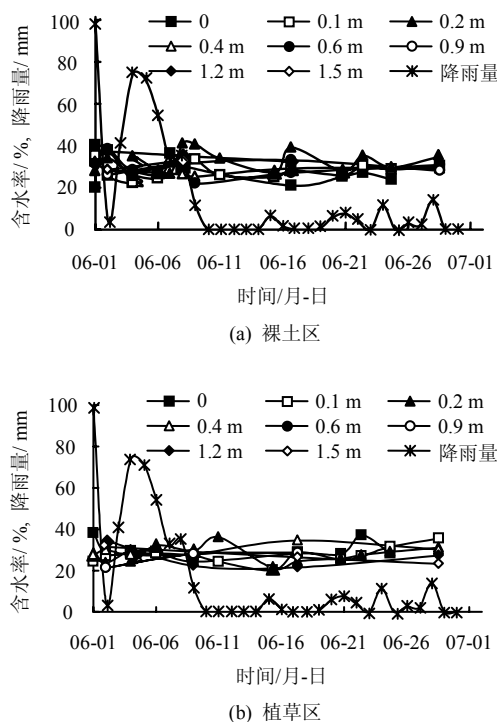


图 7 降雨量和边坡坡中位置土体含水率的对应关系(2005年)
 Fig.7 The relationship of water content and rainfall at the middle position of slope

3.2 膨胀土壑坡雨水侵蚀特性

坡面侵蚀量，用每毫升径流中的含泥量表示，具体测试数据见表 5、6。不同时间裸土区和植草区侵蚀量结果对比见图 8，可见裸土区的坡面侵蚀量普遍要高于植草区。

表 5 不同初始含水率和降雨强度下裸土区坡面侵蚀量
Table 5 The erosion amount under different conditions of initial water content and rainfall intensive at bare zone

日期 / 年-月-日	坡面含水率 / %	5 min 平均降雨强度 / (10 ⁻⁶ m/s)	侵蚀量 / (g/mL)
2006-6-14	14.0	17.3	0.019 3
2006-6-16	20.2	2.0	0.003 0
2006-6-17	24.7	3.3	0.010 4
2006-6-25	7.7	3.3	0.005 8
2006-6-29	35.0	20.7	0.024 8

表 6 不同初始含水率和降雨强度下植草区坡面侵蚀量
Table 6 The erosion amount under different conditions of initial water content and rainfall intensive at vegetation covered zone

日期 / 年-月-日	坡面含水率 / %	5 min 平均降雨强度 / (10 ⁻⁶ m/s)	侵蚀量 / (g/mL)
2006-6-16	22.5	21.3	0.001 0
2006-6-17	28.2	4.7	0.000 8
2006-6-25	8.4	3.3	0
2006-6-27	26.6	7.8	0.001 4
2006-6-29	19.4	3.3	0.000 5

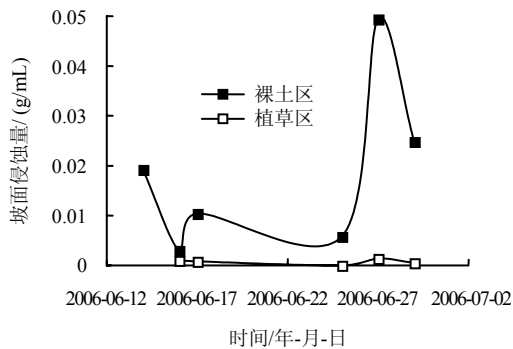


图 8 不同降雨时刻坡面侵蚀量
Fig.8 The erosion amount of slope at different rainfall times

裸土区坡面侵蚀量 e_1 与土体初始含水率和降雨强度的拟合关系为

$$e_1 = 0.017 + 0.029w_1 - (4.12 \times 10^{-8})/q \quad (7)$$

$$R^2 = 0.99, q \geq 2 \times 10^{-6}$$

植草区坡面侵蚀量 e_2 与土体初始含水率和降雨强度的拟合关系为

$$e_2 = 0.000 31 + 0.041w_2 - (2.15 \times 10^{-9})/q \quad (8)$$

$$R^2 = 0.88, q \geq 3.33 \times 10^{-6}$$

式 (7) 和式 (8) 的曲面图形见图 9。可见，随着含水率的降低，坡面侵蚀程度有所降低。降雨强度较小时，降雨强度对坡面侵蚀量的影响不大；随着降雨强度的增加，坡面侵蚀逐渐加剧，但侵蚀程度逐渐收敛。对比裸土区和植草区泥土侵蚀量与含水率和降雨强度关系可以看出，相同含水率和降雨强度情况下，降雨对植草区的侵蚀程度要远小于裸土区。

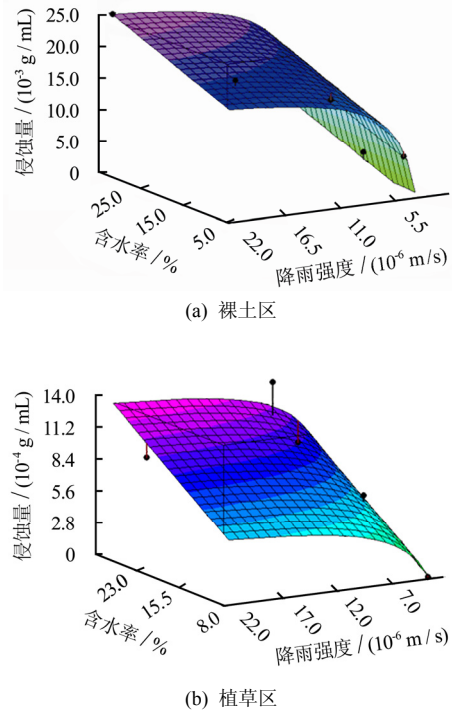


图 9 坡面侵蚀量与土体初始含水率、降雨强度关系
Fig.9 The relationship among erosion amount, initial water content and rainfall intensity

4 结 论

(1) 降雨初期不论是植草区还是裸土区，雨水都完全入渗，随着雨水入渗量和降雨量的增加，裸土区先于植草区产生径流，说明雨水在植草区更容易入渗。

(2) 有无植被覆盖下边坡土体渗透速率随初始含水率和降雨强度的变化规律相一致。在径流开始前，土体的入渗速率主要由降雨强度决定，入渗速率反映的是雨水在裂隙中渗透的特性。坡体产生径流后雨水入渗速率随降雨强度的增加逐渐收敛，趋于稳定，但随土体初始含水率的减少而逐渐成线性增加，土体裂隙较发育的状态有利于雨水的入渗。可以看出，大的降雨强度未必就能使雨水迅速入渗，一定雨强连续的降雨才能使水分持续有效的入渗，这说明膨胀土边坡土体含水率的变化主要取决于降

雨的历时,而不是降雨强度。

(3) 降雨过程中,随着土体初始含水率的降低坡面侵蚀程度有所降低。降雨强度较小时,坡面侵蚀不大,随着降雨强度的增加,坡面侵蚀逐渐加剧,但侵蚀程度逐渐收敛。植被的存在可以大大降低雨水对膨胀土边坡的侵蚀。

参 考 文 献

- [1] 孔令伟,陈建斌,郭爱国,等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1065—1073.
KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, GUO Ai-guo, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(7): 1065—1073.
- [2] NG C W W, ZHAN L T, BAO C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration[J]. **Geotechnique**, 2003, 53(2): 143—157.
- [3] TOLL D G. Rainfall-induced landslides in Singapore[J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**, 2001, 149(4): 211—216.
- [4] 詹良通,吴宏伟,包承纲,等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 151—158.
ZHAN Liang-tong, NG WANG WAI CHARLES, BAO Cheng-gang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(2): 151—158.
- [5] 陈建斌,孔令伟,赵艳林,等. 蒸发蒸腾作用下非饱和土的吸力和变形影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1967—1773.
CHEN Jian-bin, KONG Ling-wei, ZHAO Yan-lin, et al. On influence factors of suction and deformation of unsaturated soil under evaporation and transpiration effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(9): 1767—1772.
- [6] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [2] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 张诚厚,王伯衍,曹永琅. 真空作用面位置及排水板间距对加固效果的影响[J]. 岩土工程学报, 1990, (1): 45—52.
ZHANG Cheng-hou, WANG Bo-yan, CAO Yong-lang. The influence of vacuum location and the spacing of drain well on the effect of preloading improvement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1990, (1): 45—52.
- [4] 邓龙照,张兆华. 真空预压法在大型填海造陆工程中的应用[J]. 水运工程, 2006, (9): 102—105.
DENG Long-zhao, ZHANG Zhao-hua. Application of vacuum preloading method in large-scale sea reclamation project[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2006, (9): 102—105.
- [5] 郭佑雄,汪肇京,邱良芬,等. 塑料排水带堆载法在围海造陆工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 23(6): 1025—1031.
GUO You-xiong, WANG Zhao-jing, QIU Liang-fen, et al. Application of geodrain-loading method to reclamation engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 23(6): 1025—1031.
- [6] 刘兵,蔡南树,艾英铎. 大面积吹填软土地基真空预压施工工艺[J]. 水运工程, 2006, (9): 73—76.
LIU Bing, CAI Nan-shu, AI Ying-bo. Construction technology of vacuum preloading for compaction treatment of large-area hydraulically-filled soft ground[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2006, (9): 73—76.
- [7] 中华人民共和国水利部. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [8] 吴桂芬,高玉峰,魏代现,等. 真空和堆载两种预压法的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 95—98.
WU Gui-fen, GAO Yu-feng, WEI Dai-xian, et al. Study on laboratory test of vacuum and surcharge preloading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Suup.): 95—98.

上接第 1290 页