

文章编号: 1000-7598 (2009) 07-2069-06

气候影响下膨胀土工程性质的 原位响应特征试验研究

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, 江苏 常州 213002)

摘 要: 以广西膨胀土为研究对象, 考虑气象因素的影响, 通过现场试验对膨胀土的胀缩变形、变形模量与渗透特性进行了原位跟踪测试。结果表明, 较小的降雨量就可以使表层土体的含水率和膨胀状态达到极限。对降雨过程而言, 自然状态下膨胀土雨水入渗的影响深度是有限的; 膨胀土变形模量随含水率的增加以幂函数的形式逐渐降低; 当含水率较低、裂隙较发育时, 土体的渗透性会大大提高, 而植被的存在也会较大幅度地改善土体渗透性, 为深入认识膨胀土边坡的灾变机制提供了依据。

关 键 词: 膨胀土; 胀缩性; 模量; 渗透性; 植被

中图分类号: TU443

文献标识码: A

Field response characteristic test of expansive soil engineering behavior under effect of atmosphere

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: The swelling-shrinking deformation, deformation modulus and permeability of expansive soil are tracked and measured in Nanning, Guangxi considering the effect of atmosphere. The test results are just as follows. Firstly, a low rainfall may lead water content and swelling state to the limit value, and the influence depth of infiltration is finite while raining. Secondly, the deformation modulus is decreased with the increase of water content following the forms of power function. Finally, when the water content is low, the fissure is developed and the permeability is improved greatly; meanwhile, the permeability is also strengthened with the vegetation covered, which is useful to recognize the disastrous mechanism of expansive soil slope.

Key words: expansive soil; swelling-shrinking characteristic; modulus; permeability; vegetation

1 引 言

膨胀土黏土矿物含量较高, 以蒙脱石、伊利石和高岭石为主, 容易吸水膨胀失水收缩。在大气与土壤之间水分和能量的交换过程中, 膨胀土的工程性质逐渐发生改变, 强度不断衰减, 从而引发灾难性的工程问题, 造成生命财产的损失和环境的恶化^[1-2]。在大气降雨和蒸发的作用下土体内部水分发生干湿循环的周期性变化, 在此过程中不均匀的胀缩会使土体产生无序的破裂裂缝。由于土体完整性遭到破坏, 导致土体工程性质发生较大改变, 特别是降雨

时, 当雨水入渗一定时间或雨后, 土体强度进一步的降低会引起膨胀土边坡失稳, 进而发生渐进性破坏^[3-4]。因此, 深入研究膨胀土在大气影响下的工程性质, 是深入认识膨胀土边坡灾变机制的重要内容之一。

针对大气影响下膨胀土的工程性质, 许多学者已开展了大量的室内试验研究^[5-8], 但室内试验状态与自然环境相差较大, 难以全面反映膨胀土在气候作用下的真实性状。为了获得大气作用下膨胀土的有效特性, 本文在文献[4]研究基础上, 利用业已建立的膨胀土边坡原位监测系统和设立的小型气象

收稿日期: 2008-10-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10872210); 交通部西部交通建设科技项目 (No. 200631878530); 岩土力学与工程国家重点实验室资助项目 (No. SKLZ0803)。

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

站, 采取多种试验手段跟踪测试了膨胀土含水率、胀缩变形、变形模量和渗透特性随气候变化的演化规律, 以揭示大气作用下膨胀土工程性质的原位响应特征。

2 场地条件与试验方案

2.1 试验场地概况^[4]

试验场地位于广西南宁市郊外。该地区属于亚热带季风气候区, 阳光充足, 气候温和, 雨量充沛, 干湿季节分明。试验区的土层剖面 and 土体物理力学性质指标见表 1, 该场地地面以下含有弱~强膨胀性的红褐色黏土和灰白色黏土, 泥岩是不透土层。

2.2 试验方案

2.2.1 膨胀土胀缩变形特性

自然状态的膨胀土会经常经历降雨吸湿和蒸发脱湿的过程, 而在这一过程中, 膨胀土的物理性质往往随着含水率的变化而发生变化。为了分析膨胀土在自然条件下胀缩变形性质的变化规律, 设计了如图 1 所示的测试装置。

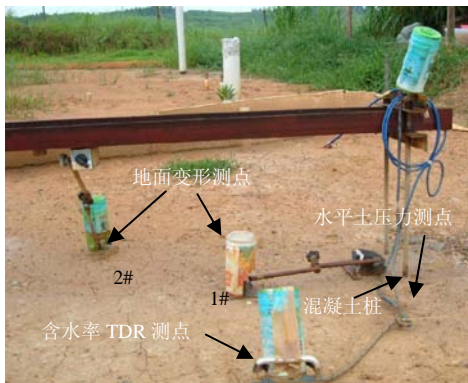


图 1 地表变形、含水率和土压力测点布置

Fig.1 The distribution of monitoring gauge of deformation, water content and soil pressure

试验区内的膨胀土主要为灰白色膨胀土, 固定装置由横梁和现浇混凝土桩组成。测试时间为 2006 年 5 月 20 日—2006 年 10 月 9 日, 每天 18: 30 测

试 1 次, 期间经历了一个完整的雨季。具体试验方案如下:

①用土钻法和 TDR 系统测试土体含水率

使用土钻法, 对试验位置附近 1.5 m 深度范围内土体重力含水率进行测试, 测试频率为每月 2~4 次, 降雨时测试频率加密。测试周期为 2005 年 5 月 15 日—2006 年 11 月 15 日。使用 TDR 的 TRIME P3 表层式水分探头, 直接插入土体, 测试表层 0.2 m 深度以内土体的平均体积含水率。

②用百分表监测地表土体竖向变形

在地表用百分表设置了 2 个竖向位移观测点, 百分表 1 距桩边 0.15 m, 百分表 2 距桩边 0.85 m, 本文以百分表 2 的竖向位移定义为地表土体的位移。

③用土压力盒测试土体的水平向膨胀力

利用土压力盒测试土体的水平向变形特性, 压力盒设置在 0.2 m 深度处, 背靠混凝土桩。

2.2.2 膨胀土变形模量特性

依据《岩土工程勘察规范》^[9]和《公路路基路面现场测试规程》^[10], 采用载荷板试验(载荷板直径为 30 cm, 厚 2 cm)获得蒸发过程中不同含水率下浅层灰白色膨胀土的变形模量。每次试验前均对地表 0.1 m 深度范围内的土体取样, 测试平均重力含水率。为了保持不同含水率下的试验成果连续有效, 荷载最大加到 100 kPa, 并且最后进行高含水率下的载荷板试验。

2.2.3 膨胀土渗透特性

原位渗透试验参考《土工试验规程》^[11]中的试坑注水法。试验中采用的是自制的双环渗透仪, 其中内环直径为 22.6 cm、高 15 cm, 外环直径为 45.2 cm、高 15 cm, 壁厚 2~3 mm。环体下部设 5 cm 刃口, 刃口倾斜角为 10°~15°, 方便插入土体并防止边壁渗漏。

针对现场灰白色强膨胀土、红褐色弱膨胀土和植草后土体的渗透性进行测试, 测试内容包括土体

表 1 现场试验场地土层剖面及土体物理力学性质指标
Table 1 The section of strata and physico-mechanical indexes of soils

土层 顺序	厚度 /m	岩性描述	密度 /(g/cm ³)	含水率 /%	液限 /%	塑性 指数 /%	黏粒含量 < 5 μm	自由 膨胀率 /%	收缩 系数	缩限 /%	50 kPa 膨胀率 /%	饱和和渗透系数 /(10 ⁻⁹ m/s)
1	0.6	黏土, 红褐色, 可塑, 裂隙发育, 弱膨胀性	1.97	25.2	45.6	23.2	40	55	0.16	15.8	-0.44	5.87
2	0.6	黏土, 灰白色, 可塑, 裂隙发育, 中强膨胀性	1.89	32.8	77.8	48.7	64	98	0.30	19.5	-0.62	1.27
3	0.5~0.8	黏土, 棕黄色, 硬塑状	1.97	26.6	49.0	26.9	46	70	0.56	16.1	-1.48	
4	2.2~2.8	泥岩, 青灰色, 强风化	2.13	19.6	34.4	18.1	24					

初始渗透系数和稳定渗透系数。初始渗透系数指双环渗透仪开始试验时液面下降 5 mm 时的测试值，稳定渗透系数指土体的渗透过程趋于稳定时的测试值，具体计算过程参见规范^[1]。每次渗透试验前均对地表 0.1 m 深度范围内的土体取样，测试平均重力含水率，从而获得蒸发过程中不同地表土体含水率情况下土体的渗透特性。

3 试验结果与分析

3.1 含水率变化特性

监测周期内不同深度土体重力含水率变化的最大幅值（最大值与最小值的差值）和不同时间、不同深度下土体重力含水率对比如图 2、3 所示。由图可见，不同深度土体含水率随时间经历了吸湿和脱湿过程，含水率往复波动，其中 0.2 m 深度范围内的土体含水率随时间波动幅度最大，为此，将 0.2 m 深度内土体定义为表层土体。

测试周期内 TDR 测点处表层土体的平均体积含水率与降雨量的对比如图 4 所示。由图可见，初

始状态表层土体体积含水率基本在 23 % 左右。雨季来临后，随着降雨的发生，表层土体体积含水率迅速增加，但并不随着降雨量的增减而增加或减小，降雨期间表层土体含水率基本维持在 48 % 左右。在较长时间没有降雨发生时，表层土体体积含水率会持续下降。

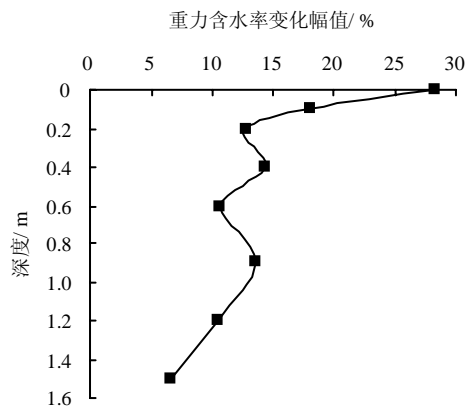


图 2 不同深度土体含水率变化最大幅值
Fig.2 The amplitude of water content variation at different depths

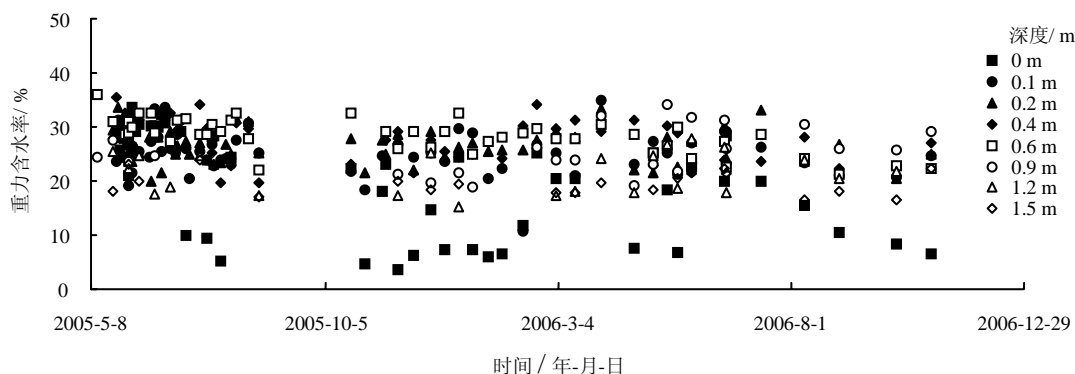


图 3 土体重力含水率时程变化
Fig.3 The curve of water content and time

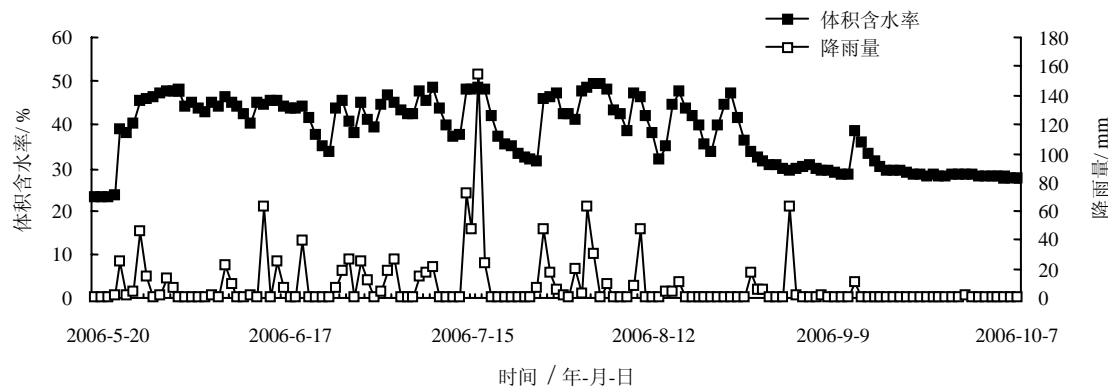


图 4 2006 年雨季里表层土体体积含水率与降雨量对比
Fig.4 The contrast of water volume content and rainfall in rain season of 2006 a

3.2 胀缩变形特性

在 2006 年的雨季中，地表竖向位移和降雨量

的关系如图 5 所示。由图可见，降雨后地表含水率的增加，直接造成地表的隆起，并且随着降雨量的

增加地表隆起量逐渐增加，且逐渐趋于稳定值，说明降雨入渗的深度是有限的。气候持续干旱时，地面沉降持续增加，从地表隆起的第2个峰值（2006年7月15日后）可以看出，当雨季中出现一段时间的干旱后，再次降雨引起的地表竖向位移要大于前期雨季的地面变形，主要原因有：经历干湿循环后，土体绝对变形的增加和土体收缩过程中存在不可恢复的变形；雨季中的持续干旱期造成地面裂隙的扩展，使雨水向深处渗透，造成深部土体膨胀变形。

2006年雨季中表层土体水平膨胀力和降雨量的关系见图6。由图可以看出，0.2m深度范围内土体的水平向膨胀力与降雨量的相关关系较强，在持续降雨的时期，土体水平向膨胀力峰值基本维持在45 kPa左右。而当无降雨发生时，地表水平膨胀力也会持续降低，这是因为随着表层土体含水率逐渐降低，土体产生收缩变形，从而引起水平向膨胀力

的降低。同时可以看出，在雨季较长的时间里土体水平膨胀力都维持在35~45 kPa范围内。

埋设土压力盒时，为了使盒面与土体紧密接触，对土压力盒施加了一个较小的水平压力，由于初始测试时土体含水率会大于此后持续蒸发过程中土体含水率，所以在持续蒸发过程中，由于土体的收缩使得土体水平膨胀力相对于初始值会趋于负值。

综合以上分析认为，雨季中土体表层含水率的变化和胀缩特性与降雨过程密切相关，而表层土体含水率、竖向膨胀变形和水平膨胀力的峰值并不取决于降雨量的大小，较小的降雨量就可以使表层土体的物理特性发挥到极限，这使得表层土体在雨季中长期处于含水率较高、竖向和水平向膨胀变形最大的状态，同时对降雨过程而言，自然状态下雨水入渗影响深度是有限的。

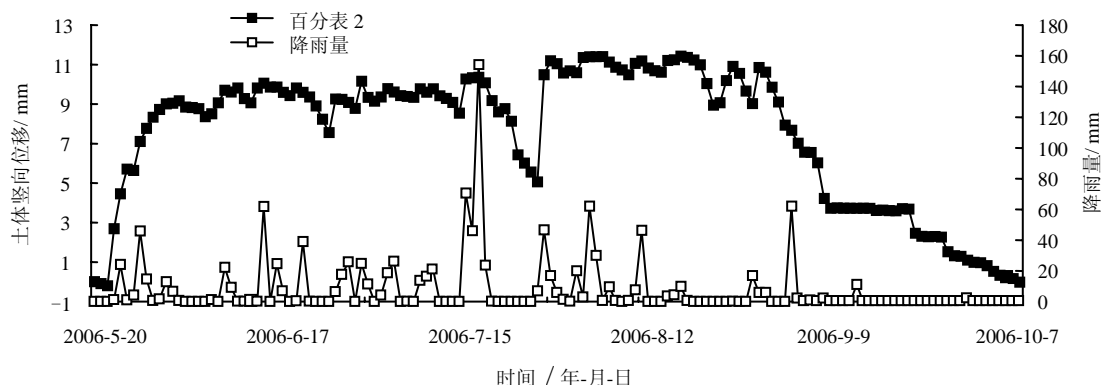


图5 2006年雨季里地表土体竖向位移与降雨量对比
Fig.5 The contrast of surface vertical displacement and rainfall in rain season of 2006 a

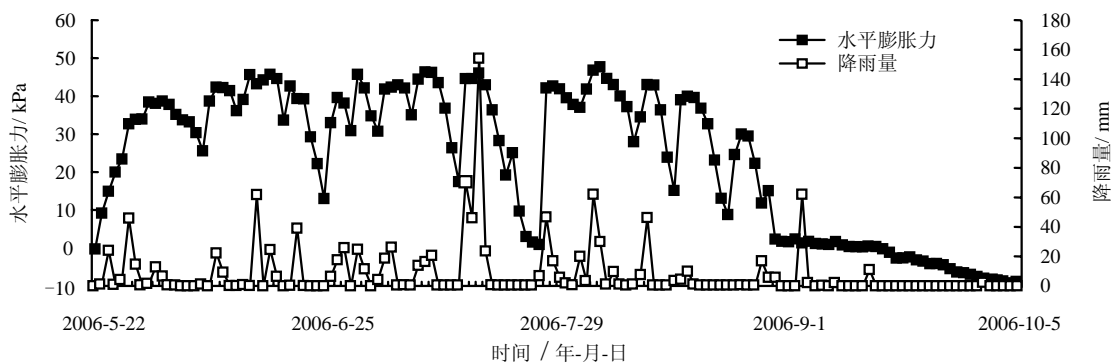


图6 表层土体水平膨胀力与降雨量对比
Fig.6 The contrast of horizontal swelling pressure and rainfall in rain season of 2006 a

3.3 变形模量特性

不同重力含水率下土体的荷载和变形关系如图7所示，依据规范进行数据整理后变形模量和含水率关系见图8。由图可见，土体含水率为地表0.1m范围内土体平均重力含水率，土体变形模量与含

水率的相关性较好，随着土体含水率的增加，土体变形模量以幂函数的形式逐渐降低。对比图7和图8可见，当含水率达到29.7%后，土体的荷载-变形曲线开始出现非线性段，土体开始产生较大范围的塑性变形，此时变形模量开始急剧降低。

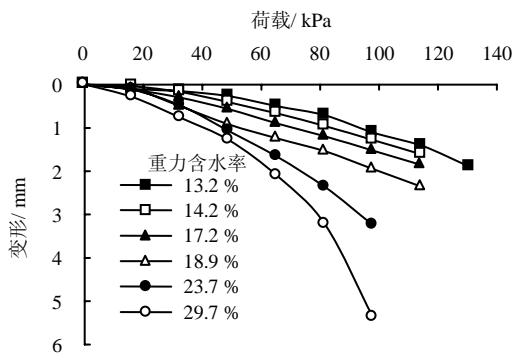


图 7 荷载和变形关系

Fig.7 The relationship of load and deformation

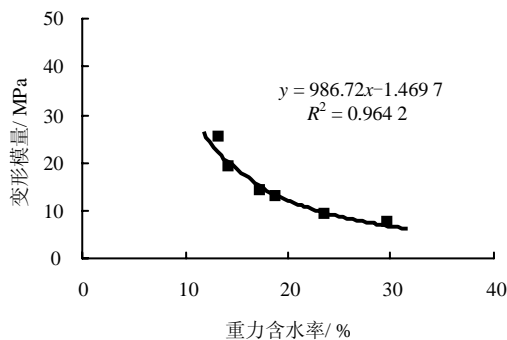


图 8 变形模量和重力含水率关系

Fig.8 The relationship of deformation modulus and gravitational water content

3.4 渗透特性

现场浅层土体基本是灰白色强膨胀土和红褐色弱膨胀土，在大气蒸发营力的作用下，表层膨胀土失水收缩而形成张拉裂缝。土体中这种裂隙的存在为降雨入渗提供了便利通道，所以，当土体处于低含水率高吸力状态时，膨胀土在降雨入渗吸湿条件下并不像非饱和土力学中所描述的那样具有极低的渗透系数^[12-14]，土体的裂隙性会极大地影响膨胀土的渗透性。

灰白色膨胀土、红褐色膨胀土和植草区土体初始渗透系数对比如图 9 所示，当含水率较低、裂隙较发育时，土体渗透性较强。随着含水率的增加，土体初始渗透系数逐渐降低，并趋于稳定。土体的稳定渗透系数见图 10 和表 2，灰白色膨胀土和红褐色膨胀土的稳定渗透系数比较接近，数量级为 10×10^{-7} ，而植草区土体的稳定渗透系数要比灰白色膨胀土和红褐色膨胀土的稳定渗透系数高一个数量级。说明植被的存在会大大改变土体的渗透特性，根系的作用会增强土体渗透能力。由此可见，膨胀土边坡覆盖植被时，根系的存在会影响膨胀土的渗透性，植被覆盖下膨胀土的渗透性会对植被护坡效果产生较大影响，在工程实践中应充分关注。

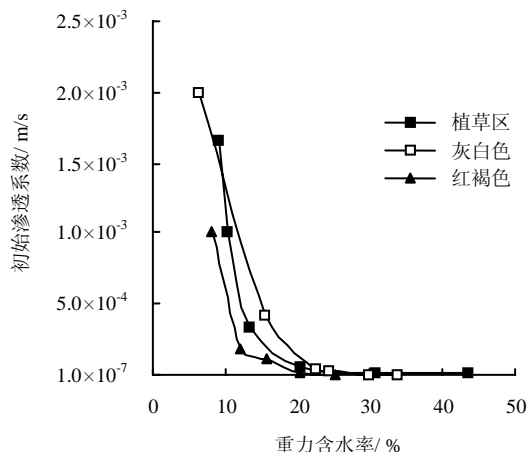


图 9 土体初始渗透系数与重力含水率关系对比

Fig.9 The contrast relationship of initial permeability coefficient and gravitational water content

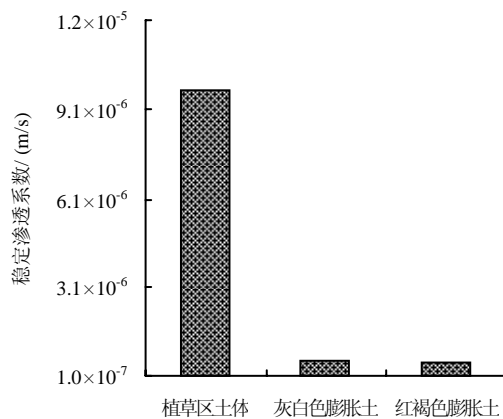


图 10 土体稳定渗透系数对比

Fig.10 The contrast of stable permeability coefficient

表 2 不同土体稳定渗透系数

Table 2 Stable permeability coefficients of different soils

土性描述	稳定渗透系数/(m/s)
植草区土体	9.78×10^{-6}
灰白色膨胀土	6.31×10^{-7}
红褐色膨胀土	5.63×10^{-7}

4 结 论

(1) 雨季中土体表层含水率的变化和胀缩特性与降雨过程密切相关，表层土体含水率、竖向膨胀变形和水平膨胀力的峰值并不取决于降雨量的大小，较小的降雨量就可以使表层土体的物理特性发挥到极限，这使得表层土体在雨季中长期处于含水率较高、竖向和水平向膨胀变形最大的状态。同时，对降雨过程而言，自然状态雨水入渗的影响深度是有限的。

(2) 膨胀土变形模量随含水率的增加成幂函数的形式逐渐降低，膨胀土边坡经历降雨后，土体强

度的衰减伴随着变形模量的降低,从而会加速边坡的变形过程。

(3) 当膨胀土含水率较低、裂隙较发育时,土体的渗透性较大。植被的存在会改善土体的渗透性,从边坡防护的角度而言,并不利于边坡的稳定,在植被防护工程实践中应给予充分关注。

需要说明的是,本文仅结合现场试验论证降雨对膨胀土工程性质的影响,而未专门分析温度的工程效应,关于膨胀土堑坡变形的湿热耦合效应及其与降雨历时的关系将另文报道。

参 考 文 献

- [1] BLIGHT G E. Interaction between the atmosphere and the earth[J]. **Geotechnique**, 1997, 42(4): 715—766.
- [2] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳性及其力学效应[J]. **岩土工程学报**, 2004, 27(6): 727—732.
- KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Yin-wei, et al. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 27(6): 727—732.
- [3] 陈铁林, 邓刚, 陈生水, 等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. **岩土工程学报**, 2006, (2): 1—6.
- CHEN Tie-lin, DENG Gang, CHEN Sheng-shui, et al. Effects of fissures on stability of unsaturated soil slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, (2): 1—6.
- [4] 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.
- [5] 刘松玉, 季鹏, 方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. **岩土工程学报**, 1999, 21(1): 9—13.
- LIU Song-yu, JI Peng, FANG Lei. Approach to cyclic swelling behavior of compacted expansive clays[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(1): 9—13.
- [6] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国, 等. 考虑水化状态影响的膨胀土强度特性[J]. **岩土力学**, 2008, 29(12): 3193—3198.
- LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength characteristics of expansive soil considering the effect of hydrous state[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3193—3198.
- [7] 杨和平, 肖夺. 干湿循环效应对膨胀土抗剪强度的影响[J]. **长沙理工大学学报(自然科学版)**, 2005, 2(2): 1—5.
- YANG He-ping, XIAO Duo. The influence of alternate dry-wet effect on the strength characteristic of expansive soils[J]. **Journal of Hunan Light Industry College**, 2005, 2(2): 1—5.
- [8] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] 建设部综合勘察研究设计院. GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [10] 交通部公路科学研究所. JTJ059—95 公路路基路面现场测试规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [11] 南京水利科学研究院. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [12] 陈建斌, 孔令伟, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的动态响应数值模拟[J]. **水利学报**, 2007, 38(6): 674—682.
- CHEN Jian-bin, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Deformation characteristics of expansive soil slopes under precipitation and evaporation[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, (11): 70—77.
- [13] 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): 1767—1772.
- 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.
- [14] 李雄威, 孔令伟, 冯欣, 等. 非饱和膨胀土裂隙扩展性状与工程效应分析[J]. **武汉理工大学学报**, 2009, (6): 75—80.
- LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, FENG Xin, et al. Fissure propagation behavior and engineering effects of unsaturated expansive soil[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2009, (6): 75—80.