

DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2009.06.020

# 非饱和膨胀土裂隙扩展性状与工程效应分析

李雄威<sup>1,2</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 冯欣<sup>1</sup>, 郭爱国<sup>1</sup>

(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:** 采用自编软件对蒸发过程中不同含水率广西南宁膨胀土裂隙分布的数码拍摄图像进行了二值化处理和自动化分形统计, 并结合膨胀土的现场渗透试验和变形模量测试, 初步建立了土体裂隙分布与含水率、渗透系数及变形模量的关系。研究表明, 二值化像素和分形维数统计的方法均是对膨胀土裂隙的平面描述, 而渗透性和变形模量的演化性状可以描述膨胀土裂隙的发育状态, 并能客观反映裂隙影响下膨胀土的工程性质。

**关键词:** 膨胀土; 裂隙率; 分维; 渗透性; 变形模量

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-4431(2009)06-0075-06

## Fissure Propagation Behavior and Engineering Effects of Unsaturated Expansive soil

LI Xiong-wei<sup>1,2</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, FENG Xin<sup>1</sup>, GUO Ai-guo<sup>1</sup>

(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 fissure digital picture of various water content expansive soils from Nanning, Guangxi during the progress of evaporation is treated by the method of two-value pixels. The automated statistic of fissure fractal dimension is also carried out by using programmed software in this paper. Moreover, combined with field permeability and deformation modulus test, the relationship of fissure distribution, water content, coefficient of permeability and deformation modulus is initially established. The results show that the statistic of two-value pixels and fractal dimension depicts the fissure in view of plane, and evolution behavior of permeability and deformation modulus can describe the developing state of expansive soil fissure, and reflect the soil engineering characteristic influenced by fissure objectively.

**Key words:** expansive soil; fissure ratio; fractal dimension; permeability; deformation modulus

膨胀土的强度受裂隙影响这一现象早已引起研究者的关注, Terzaghi K<sup>[1]</sup> 首先注意了裂隙对强度的重要作用; Skempton A W<sup>[2]</sup> 通过超固结的强度研究也曾指出, 硬粘土含有许多构造间断, 具有层面和节理等形式。在裂隙平面开展问题方面, 胡卸文<sup>[3]</sup> 认为裂隙发育主要分为平行斜裂、水平及斜裂和羽形排列等 3 种形式, 并利用强度试验分析裂隙倾角、裂隙数量和隙壁粘土厚度等因素对土体力学性能的影响效应; 袁俊平<sup>[4]</sup> 采用灰度熵作为裂隙分布和发展的量化指标, 发现粘土的强度指标受饱和度与裂隙度的影响。而对膨胀土裂隙

收稿日期: 2008-10-26.

基金项目: 国家自然科学基金(10872210), 交通部西部交通建设科技项目(200631878530)和岩土力学与工程国家重点实验室资助项目(SK1Z0803).

作者简介: 李雄威(1976-), 男, 博士, E-mail: lixw@126.com

深度的研究,目前尚停留于理论推测分析,有待深入探讨。

在自然环境中,不均匀分布的裂隙将土体分割成不同大小的土块,由于完整性受到破坏,土体强度大幅度降低。在相同含水率情况下,裂隙性膨胀土比同类非开裂土体具更大渗透性。孔令伟等<sup>[5]</sup>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,为降雨的入渗打开方便之门,导致土体强度衰减进而发生渐进性破坏,这说明蒸发效应导致土体裂隙的扩展是边坡发生灾变的一个重要前提。

迄今为止,人们认识到膨胀土的裂隙性弱化了其强度,同时也会增强土体渗透性,从而导致雨水入渗后深部土体强度的进一步衰减。深入认识在蒸发脱湿过程中,膨胀土在不同含水率条件下的裂隙分布规律,以及渗透性与变形模量的演化性状,显得极有意义,然而真正从现场试验出发进行的系统研究工作尚不够充分。基于上述考虑,作者重点对膨胀土的裂隙分布与渗透、变形机理随含水率变化特性开展现场试验研究,以加深对膨胀土工程性状的认识。

## 1 试验

### 1.1 场地概况<sup>[5]</sup>

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。对原场地进行现场开挖,浅层有红褐色膨胀土和灰白色膨胀土分布,土体胀缩特性见表1,根据膨胀潜势等级判定标准<sup>[6]</sup>,红褐色粘土为弱膨胀土,灰白色粘土为强膨胀土。

表1 膨胀土胀缩特性

土样	自由膨胀率/%	收缩系数	缩限/%	体缩率/%	50 kPa 膨胀率/%
红褐色膨胀土	55	0.16	15.8	5.2	-0.44
灰白色膨胀土	98	0.44	19.5	20.4	-0.085

### 1.2 方案

1)对蒸发过程不同含水率土体表面裂隙的开展状态进行现场实时拍照,记录裂隙的开展过程。图形尺寸依据现场比例尺裁剪为30 cm×30 cm实际尺寸,测试土类分为红褐色弱膨胀土和灰白色强膨胀土。

2)对蒸发过程不同含水率下灰白色膨胀土进行原位渗透试验。试验的基本操作过程参考《土工试验规程》(SDS 01-79)中的试坑注水法,采用的是自制双环渗透仪,其中内环直径22.6 cm,高15 cm;外环直径45.2 cm,高15 cm,渗透性测试内容包括土体初始渗透系数和稳定渗透系数。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,从而获得地表土体不同含水率时的渗透特性。

3)对蒸发过程中不同含水率下浅层灰白色膨胀土进行现场变形模量的测试。试验方法依据岩土工程勘察规范(GB50021-2001)和公路路基路面现场测试规程(JTJ059-95),采用载荷板试验(载荷板直径30 cm,厚度2 cm)。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,且最后进行高含水率下的试验。

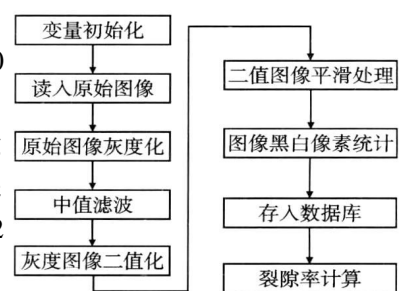


图1 裂隙率二值化处理程序框图

## 2 膨胀土裂隙展布特性与工程效应分析

### 2.1 膨胀土表面裂隙的二值化法统计

结合数码相机在现场蒸发过程中对不同含水率膨胀土裂隙分布的拍摄图像,利用MATLAB软件编制程序对土体裂隙图片进行二值化处理,处理过程如图1。

裂隙率定义为 
$$P = \frac{\text{黑色像素数目}}{\text{总像素数目}} \quad (1)$$

不同含水率时,红褐色弱膨胀土和灰白色强膨胀土表面裂隙的灰度图像经降噪处理后的结果见图2和图3,经过计算统计,不同含水率下土样的裂隙率见表2。计算中,裂隙界限的灰度值经过反复试算后获得。

不同含水率下,红褐色弱膨胀土和灰白色强膨胀土裂隙率与含水率的关系对比见图4。试验结果表明,对于膨胀土而言,裂隙率和含水率成良好的线性关系。裂隙率与含水率的线性回归关系如式(2)和式(3)。

红褐色弱膨胀土裂隙率  $P_1 = -0.019 1w_1 + 1.028 5, 7.7 \leq w_1 \leq 27.7$  (2)

灰白色强膨胀土裂隙率  $P_2 = -0.071 w_2 + 2.610 5, 12.0 \leq w_2 \leq 30.7$  (3)

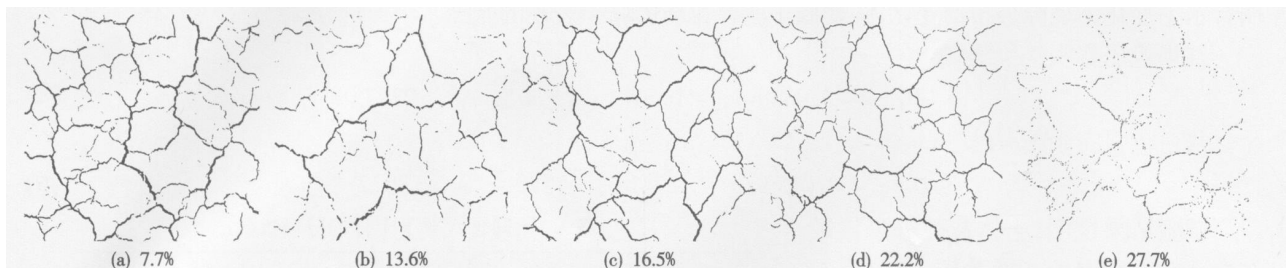


图2 不同含水率下红褐色膨胀土表面裂隙二值化图像

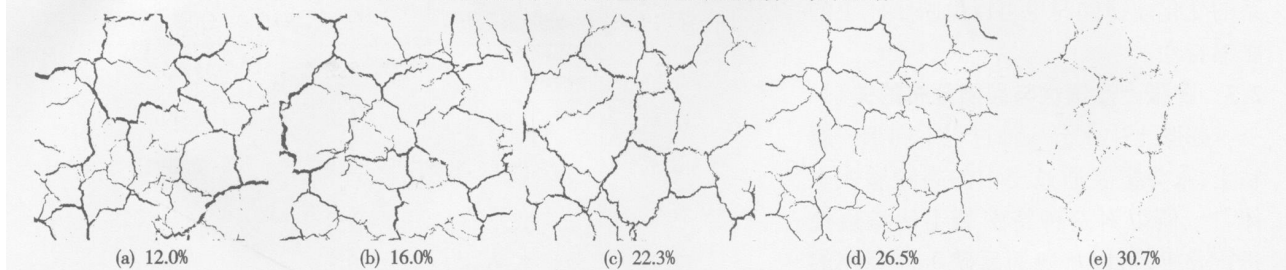


图3 不同含水率下灰白色膨胀土表面裂隙二值化图像

表 2 不同含水率下土样的裂隙率

红褐色弱膨胀土				灰白色强膨胀土			
土样含水率/%	黑像素/个	白像素/个	土样裂隙率/%	土样含水率/%	黑像素/个	白像素/个	土样裂隙率/%
7.7	5 088	585 312	0.86	12.0	9 815	5 55 785	1.74
13.6	4 172	543 028	0.76	16.0	8 544	569 856	1.48
16.5	3 878	539 322	0.71	22.3	5 924	546 076	1.07
22.2	4 137	598 263	0.69	26.5	4 148	557 452	0.74
27.7	2 796	634 804	0.44	30.7	2 296	568 904	0.40

由图 4 可以看出, 单位含水率变化导致裂隙率的变化, 强膨胀土要明显强于弱膨胀土。裂隙率与含水率的相关特性, 也反映出膨胀土胀缩特性的差异。

### 2.2 膨胀土表面裂隙的分形维数统计

分形理论应用于自然界中各种现象的研究已有几十年的历史, 在岩土工程中, 岩土体裂隙结构特征、孔隙分布和渗流特性等也常常用到分形理论<sup>[7-9]</sup>。粘性土样表面干缩裂缝网络虽然不严格遵循自相似原理, 但是具有统计意义上自相似的分形结构。通过“数格子”的方法可计算裂缝网络的分形维数。为了能有效处理复杂的裂缝网络, 在 AutoCAD 平台基础上, 用 AutoLISP 语言 (LISP 即 LISP Processor 缩写) 编制裂隙分维统计程序, 对前文土样裂隙的二值化图形进行处理。红褐色弱膨胀土含水率 7.7% 时, 分维人工计算和程序计算结果见图 5, 可见程序统计结果可信, 可以准确表示裂隙的分维数。

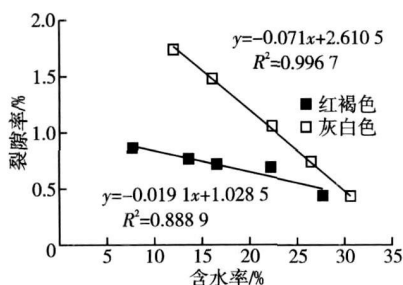


图4 土样裂隙率和含水率的关系

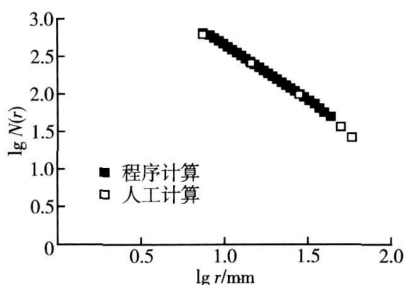


图5 红褐色弱膨胀土(7.7%)裂隙盒维统计对比

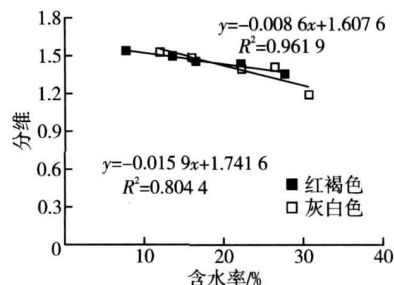


图6 土样分维与含水率关系

不同含水率下, 红褐色弱膨胀土和灰白色强膨胀土表面裂缝的分形维数对比如图 6 和表 3 所示。土样表面裂隙的分形维数随含水率的降低而逐渐变大, 说明含水率越低裂隙越发育使得干缩裂隙形态变的越复

杂、越不规则<sup>[9]</sup>。膨胀土表面裂隙的分维与含水率的关系基本成线性分布而且相关性较好,其线性回归公式见式(4)与式(5)。可见,单位含水率变化所导致的分维变化,灰白色强膨胀土要明显大于红褐色膨胀土,表明含水率变化下裂隙分布的变化,强膨胀土明显比弱膨胀土表现的剧烈。

红褐色弱膨胀土分维

$$D_1 = -0.0086w_1 + 1.6076, \quad 7.7 \leq w_1 \leq 27.7 \tag{4}$$

灰白色强膨胀土分维

$$D_2 = -0.0159w_2 + 1.7416, \quad 12.0 \leq w_2 \leq 30.7 \tag{5}$$

试验结果说明,土体裂隙分形维数与含水率成一定的相关关系,其相关关系的变化规律同时也可以反映膨胀土的胀缩特性。

2.3 膨胀土渗透性与裂隙分布的关系

膨胀土中水分入渗过程不同于一般粘土,水分主要通过土中的裂隙渗入土体<sup>[10]</sup>。所以对这种特殊裂土的渗透性进行分析,可以从侧面反映土体裂隙的分布状态。

表3 不同含水率下土样的分形维数

红褐色弱膨胀土		灰白色强膨胀土	
土样含水率/%	分形维数 D	土样含水率/%	分形维数 D
7.7	1.55	12.0	1.53
13.6	1.50	16.0	1.49
16.5	1.46	22.3	1.40
22.2	1.44	26.5	1.41
27.7	1.36	30.7	1.18

1)土体表层裂隙分析 在现场分别选取不同初始含水率的表层土体(0—10 cm)进行原位渗透试验。在试验过程中,注水到指定的高度后,测求表层土体的初始渗透系数。现场实测数据表明,初始渗透系数量测的土体浸水深度基本为10 cm以内。

土体初始渗透系数与含水率关系见图7(a),可见,土体的初始渗透系数随含水率的升高而降低,并逐渐收敛于 $1 \times 10^{-6}$  m/s处。现场测得的土体初始渗透系数与含水率呈现出强烈的非线性。将数据分段整理见图7(b),灰白色膨胀土初始渗透系数由缓变向陡变的过度点含水率为15.3%,红褐色土为13.2%。均要略小于2种土的缩限(19.5%, 15.8%)。可见,表层土体失水过程中,土体含水率大于缩限时主要表现为表层土体的收缩,表层土体含水率小于缩限后,随着深部土体含水量的逐渐降低,表层土体裂隙向深处快速发展,从而导致土体表层裂隙宽度和深度都变大,使初始渗透系数迅速增加。

土体初始渗透系数与表面裂隙率的关系见图8,膨胀土初始渗透系数与表面裂隙率相关性较好,但表现出了强烈的非线性,初始渗透系数反映的是表层土体的裂隙特性,包含了裂隙的三维分布。强、弱膨胀土初始渗透系数与裂隙率的关系表现出了相似的规律性,现场试验数据客观地反映出不同裂隙率时表

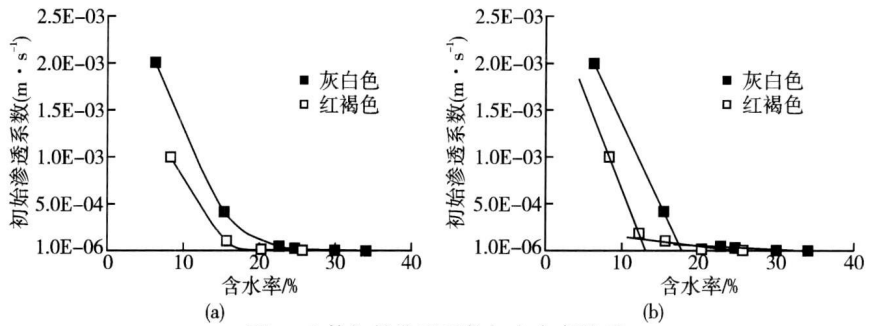


图7 土体初始渗透系数与含水率关系

层土体的初始渗透特性。在表面裂隙率较小时,强、弱膨胀土的初始渗透系数比较接近,但随着表面裂隙率的变大,强膨胀土初始渗透系数逐渐小于弱膨胀土,说明裂隙率相同时弱膨胀土沿深度方向裂隙的开展速度明显要大于强膨胀土。

2)土体深层裂隙分析 在现场分别选取不同初始含水率的灰白色表层土体进行原位连续渗透试验。在试验过程中,注水量始终维持到指定的高度,同时持续记录渗透量和渗透时间,测求土体渗透系数。

土体渗透系数与渗透时间关系见图9。可见土体渗透过程中,渗透系数随着渗透时间的延长,而逐渐减小,并在 $1 \times 10^{-6}$  m/s附近趋于收敛。渗透系数趋于稳定时,在离试坑中心3—4 m以外,钻3个2 m深的钻孔,每隔0.1 m取土样1个,平行测定其含水率。根据含水率的变化确定水分的入渗深度为50 cm,参考石庆华、许年金<sup>[11]</sup>确定膨胀土活动带影响深度的方法,这一数值可以界定为大气剧烈影响深度。

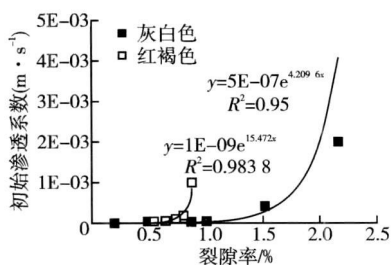


图8 土体初始渗透系数与表面裂隙率的关系

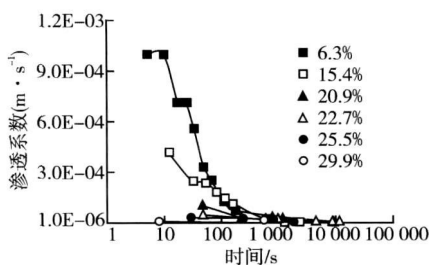


图9 不同含水率土体渗透系数与渗透时间关系

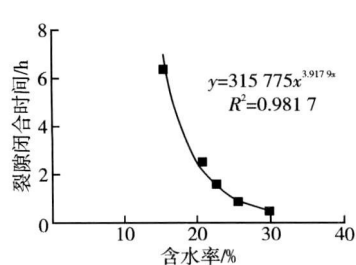


图10 土体裂隙闭合时间与含水率关系

将渗透系数  $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  定义为土体渗透区域裂隙闭合时的渗透系数, 则裂隙闭合时间整理如与含水率和土体表面裂隙率的关系整理分别见图 10 和图 11。土体裂隙闭合时间与含水率和表面裂隙率的关系均呈现较强非线性, 这与裂隙在土体深部扩展的非线性过程息息相关, 同时也反映出渗透区域内裂隙的分布特性, 它与含水率和表面裂隙率的相关性较好, 反映出裂隙在含水率减小时向土体深部逐渐扩展的特性。

现场原位渗透试验的结果表明: 初始渗透系数可以量化土体表面裂隙, 反映表层土体裂隙发育情况; 稳定渗透的影响深度可以界定膨胀土的大气剧烈影响深度; 同时, 裂隙闭合时间可以有效地反映出大气剧烈影响深度范围内土体裂隙的分布特性。

### 2.4 膨胀土变形模量与裂隙分布的关系

将土体变形模量与表面裂隙率的关系整理如图 12。可见, 土体表面裂隙率越高, 土体的变形模量越大, 但相关关系表现出强烈的非线性, 这与土体裂隙开展的规律相关。土体变形模量与表面裂隙率和含水率的关系对比见图 13, 可见高变形模量值对应着低含水率和高裂隙率; 而低变形模量值对应着高含水率和低裂隙率。膨胀土裂隙的开展过程伴随着含水率的降低和裂隙率的增加, 含水率降低土块变硬导致土块模量增加, 但由于土体中裂隙的发育, 从而使土体变形模量与表面裂隙率的相关关系表现出强烈的非线性。

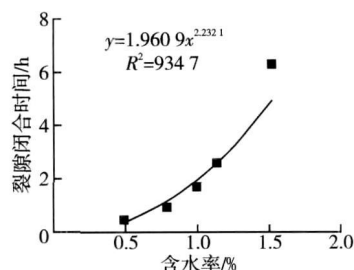


图11 土体裂隙闭合时间与表面裂隙率关系

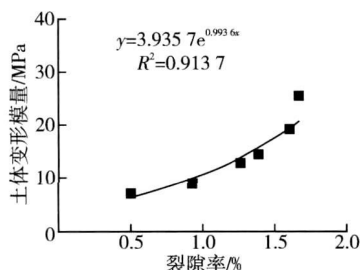


图12 土体变形模量与表面裂隙率的关系

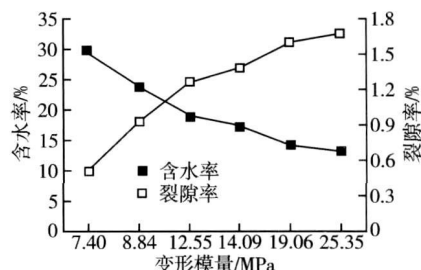


图13 土体变形模量与表面裂隙率和含水率的关系对比

以上分析结果表明, 土体含水率、渗透系数和变形模量均与土体裂隙扩展特性呈一定的相关关系, 也反映出裂隙影响下膨胀土的工程性质会发生较大改变。

## 3 结论

a. 通过自编程序用二值化像素和裂隙分形维数统计的方法对原状膨胀土表面裂隙率、裂隙分维与含水率的关系进行了量化, 分析结果表明, 在测试范围内, 膨胀土表面裂隙率、裂隙分维与含水率基本呈线性关系, 但单位含水率变化引起裂隙率和裂隙分维的变化, 强膨胀土明显要大于弱膨胀土。

b. 通过现场渗透试验对膨胀土的裂隙性进行了分析, 试验结果表明, 土体初始渗透系数与表面裂隙率的相关性较好, 其非线性的关系可以反映表层土体裂隙的发育状态; 渗透系数趋于稳定时水分入渗影响深度可定义为大气剧烈影响深度; 而裂隙闭合时间与表面裂隙率的相关性较好, 其非线性的关系可以反映大气剧烈影响深度范围内土体裂隙的扩展特性。

c. 通过原位试验对不同表面裂隙率下土体的变形模量进行了测试, 试验结果表明, 变形模量与表面裂隙率相关性较好。

二值化像素统计的方法是对裂隙的直观统计; 分形维数统计的方法是基于分形几何理论对裂隙分布进行的数学描述; 渗透试验和变形模量测试的方法均是利用膨胀土在不同裂隙发展阶段所表现出的物理性质不同, 而进行的相关性研究。以上研究方法表明, 二值化像素和分形维数统计的方法均是对膨胀土裂隙的平

面描述,而渗透试验和变形模量测试则可以反映裂隙影响下膨胀土工程性质的变化。

### 参考文献

- [ 1 ] Tezaghi K. Stability of Slopes of Natural Clay[ C] . Proc 1st Intl Conf Soil Mech Found Eng Harvad[ A] . 1936. 161-165.
- [ 2 ] Skempton A W. Long-term Stability of Clay Slopes[ J] . Geotechnique, 1964, 14(2): 77-102.
- [ 3 ] 胡卸文, 李群丰, 赵泽三, 等. 裂隙性粘土的力学特性[ J] . 岩土工程学报. 1994(1): 81-88.
- [ 4 ] 袁俊平, 殷宗泽. 考虑裂隙非饱和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟[ J] . 岩土力学, 2004(10): 1581-1586.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] 交通部第二公路勘察设计院. 公路设计手册 路基[ M] . 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [ 7 ] 易顺民, 黎志恒, 张延中. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[ J] . 岩土工程学报, 1999(3): 294-298.
- [ 8 ] 申 晋, 朱维申, 赵阳升. 三峡永久船闸高边坡岩体裂隙分布的分形研究[ J] . 岩土工程学报, 1998, 20(5): 97-100.
- [ 9 ] 唐朝生, 施 斌, 刘 春, 等. 粘性土在不同温度下干缩裂缝的发展规律及形态学定量分析[ J] . 岩土工程学报. 2007, 29(5): 743-749.
- [ 10 ] Andreini M S, Steenhuis T S. Preferential Path of Flow Under Conventional Tillage[ J] , Geoderma. 1990(46): 85-120.
- [ 11 ] 石庆华, 许年金. 膨胀土活动带及其运动规律[ C] . 全国首届膨胀土科学研讨会论文集[ A] . 成都: 西南交通大学出版社, 1990. 75-81.

(上接第74页)

## 3 结 语

战备工程项目施工工程化管理的三维模型是为满足多点、大批量、短时间、有限资源条件下的工程项目管理模式,其既是对传统工程项目管理理论的继承和延续,更是结合战备工程项目施工工程化的诸多特点所摸索出的新型、高效、适用的项目管理模式,具有重要的理论价值与实践推广意义。

### 参考文献

- [ 1 ] 陈 光. 军事工程效益审计的方法、内容及评价指标[ J] . 沿海企业与科技, 2007(5): 147-148
- [ 2 ] 高殿森, 敖 滚. 军事工程环境影响评价公众参与探讨[ J] . 环境保护, 2004(12): 48-49
- [ 3 ] 李松林, 张 磊, 雷丽军. 军事工程造价管理存在的问题及对策[ J] . 军事经济研究, 2006, 27(4): 65-67
- [ 4 ] 张 勇, 寇进忠. 军事工程建设项目投资方案综合评价研究[ J] . 山西建筑, 2008, 34(10): 23-24
- [ 5 ] 苏 欣. 浅析新形势下加强军事工程投资经营管理[ J] . 管理创新, 2007(7): 47-47
- [ 6 ] 方建勇. CMM 与软件工程化浅析[ J] . 硅谷, 2008(4): 16-17
- [ 7 ] 杜曼玲. 王耀球物流服务工程化研究初探[ J] . 网络财富, 2008(5): 48-50