

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.002

# 蒸发条件下膨胀土裂隙开裂间距和宽度

林 辉, 吴珺华

(南昌航空大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330063)

**摘 要:** 从力平衡条件出发, 推导了膨胀土裂隙开展间距和宽度的表达式, 据此提出了开裂最大间距和宽度的概念, 经比较与现场实测结果较一致, 并对其与不同参数的关系进行了讨论。当相邻裂隙间距超过最大间距时, 在相邻裂隙之间会生成新的裂隙; 当相邻裂隙间距小于最大间距时, 相邻裂隙之间不会生成新的裂隙, 此时裂隙的宽度不会超过最大宽度。最大间距和最大宽度反映了裂隙的最终形态, 可作为蒸发条件下膨胀土裂隙最终发育规模的判定依据。

**关键词:** 蒸发; 裂隙; 最大间距和宽度; 膨胀土

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)06-0008-04

## Analysis of Cracking Space and Width of Expansive Soil under Evaporation Conditions

LIN Hui, WU Junhua

(College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China)

**Abstract:** The expression of spacing and width of expansive soil cracks were deduced from the aspect of force-balance. Thus the concept of maximum space and width of crack were proposed accordingly and they were verified and consistent with the site test results. The relationships among different soil parameters were discussed in detail. The new cracks do not appear until the space of neighboring cracks is greater than the maximum space. Opposite, when the adjacent crack spacing is less than the maximum spacing, no new cracks will appear between adjacent cracks and the width of cracks will not be greater than the maximum width. The maximum space and width reflect the final shape of the fracture. It can be used to determine the final development scale of the expansive soil fissure under evaporation conditions.

**Keywords:** evaporation; crack; maximum space and width; expansive soil

膨胀土吸水膨胀, 失水收缩, 易产生干缩裂隙<sup>[1-2]</sup>。蒸发条件下, 土体水分丧失, 基质吸力增加, 土体表面产生张拉力导致开裂, 部分能量得以释放, 此时的裂隙称之为初始裂隙。若水分继续蒸发, 除了初始裂隙继续不断的变宽加深外, 有可能在两相邻裂隙之间产生新的裂隙, 称之为二次裂隙<sup>[3]</sup>。由于土体在初次开裂时部分能量已经得到释放, 二次裂隙的深度和宽度比初始裂隙的要小, 且与初始裂隙有一定的间距, 称为二次间距<sup>[4]</sup>。初始裂隙与二次裂隙混在一起, 形成复杂的多边形网格, 加速了

水分的入渗和蒸发, 极大地破坏了土体结构和性能, 导致土体强度降低, 产生失稳滑坡等工程问题<sup>[5]</sup>。因此, 开展膨胀土开裂问题研究具有重要理论和实际意义。

国内外许多学者开展了关于土体的开裂研究。邓刚等<sup>[6]</sup>基于简化固结理论, 对蒸发条件下土体的开裂进行了有限元数值模拟。Konard 等<sup>[7-8]</sup>、郑少河<sup>[9]</sup>、吴珺华等<sup>[10]</sup>分别根据现场试验和弹性力学理论, 建立了非饱和和膨胀土初始开裂的理论模型, 分析归纳了不同土性参数与裂隙发展深度的关系。

收稿日期: 2018-07-20

修稿日期: 2018-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51869013, 51408291); 江西省自然科学基金资助项目(20181BAB216033); 南昌航空大学研究生创新基金资助项目(YC2018070)

作者简介: 林 辉(1993—), 男, 福建宁德人, 硕士研究生, 研究方向为非饱和土基本性质。E-mail: 185123069@qq.com

通讯作者: 吴珺华(1985—), 男, 江西吉安人, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土基本性质研究。E-mail: wjhncu0791@126.com

Lecocq 等<sup>[11]</sup>进行了土体开裂的模型试验,分析了土体在失水条件下裂隙的形成和发育规律,建立了考虑时间效应的裂隙宽度表达式。唐朝生等<sup>[12]</sup>通过室内试验,研究了黏性土干缩裂隙的发生发展与温度之间的关系,运用计算机图像处理技术,对不同温度下形成的干缩裂隙的表面结构特征进行了定量分析。孙即超等<sup>[13]</sup>提出了初次开裂后,随着水分的继续损失,当土体达到临界条件时发生二次开裂的概念,理论推导了相应的间距公式。在裂隙开裂间距的研究上,出现的初始裂隙和相继出现的二次裂隙具有一定的规律,采用随机方法进行模拟有一定的局限性<sup>[14]</sup>。Konrad 等<sup>[8]</sup>采用有限元获得的应力分布与实际情况差异较大,不能合理解释土体的开裂机理。Chertkov 等<sup>[15-16]</sup>根据实验结果进行统计,主要包括土层厚度与裂隙间距的关系及开裂间距测量方法。这些成果对土体开裂机理及防治措施的研究起到了积极的推动作用。自然状态下的膨胀土经历了多次干湿循环,裂隙形态基本形成。从实际工程应用上讲,工程师们所需考虑的是裂隙最终发育形态。本文从力平衡条件出发,对膨胀土裂隙之间的土体进行分析,推导出了土体裂隙的最大间距和最大宽度表达式,并对不同参数的影响程度进行了敏感性分析。

## 1 裂隙最大间距和宽度

### 1.1 受力分析

裂隙产生后,土体的力学形态与开裂之前相比有明显的变化,土体在沿着裂隙面的方向上有着不同程度的收缩,表层土体的收缩变形要大于底层的收缩变形,因此实际裂隙形态多为倒三角形(见图 1(a))或梯形(见图 1(b))。当土层较薄时,裂隙形态可近似看作矩形。为便于研究,我们假设裂隙形态为矩形,即裂隙顶底部的宽度相同(见图 1(c))。

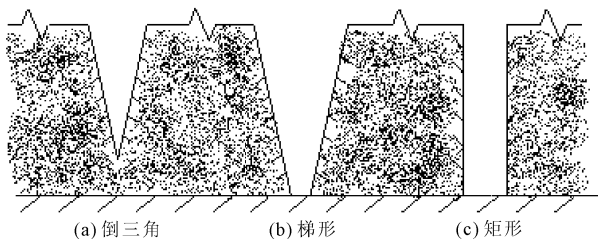


图 1 常见的裂隙形态

开裂后模型及微体单元如图 2 所示,裂隙深度为  $H$ ,相邻裂隙间距为  $L$ ,以  $y = 0$  处的平面作为分界

面。由于上部土体开裂,裂隙之间的土体有向内侧收缩的趋势,被研究土体在该裂隙面底部  $x$  向方向上受到水平力的作用,方向与土体运移趋势方向相反。

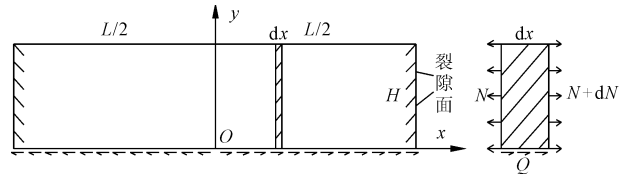


图 2 开裂后计算模型及微体单元

在水平方向  $x$  处任取一微体单元,长  $dx$ ,为简单起见,不考虑微体单元自重及外荷载作用,微体单元承受均匀内力  $N$ ,底部承受水平剪力  $Q$ 。由平衡方程  $\sum F_x = 0$  得:

$$N + dN - N + Q = 0, \text{即: } dN + Q = 0 \quad (1)$$

式中: $dN = bHd\sigma_x$ ,  $b$  为微体单元宽度; $\sigma_x$  为  $x$  向应力; $Q = \tau bdx$ ; $\tau$  为剪应力。代入式(1)中,得:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{\tau}{H} = 0 \quad (2)$$

通常情况下,裂隙面处的水平位移最大,两相邻裂隙中间位置的水平位移为零。由土力学原理可知,通常情况下(不考虑剪胀软化),由于土体能够承受的极限拉应变很小,故可假定裂隙底部处剪切应力  $\tau$  与该点水平位移  $u$  成正比,即令  $\tau = -Cu$ ,  $C$  为水平阻力系数,  $kPa/cm$ ;"-" 表示应力与位移的方向相反。

土体任意点的水平位移  $u$  由约束位移  $u_0$  和变湿位移  $\alpha\Delta W \cdot x$  组成,即:

$$u = u_0 + \alpha\Delta W \cdot x \quad (3)$$

式中: $\alpha$  为收缩系数; $\Delta W$  为  $x$  处的含水率变化量,本文中称为变湿。式(3)对  $x$  求二阶导,得:  $\frac{d^2u}{dx^2} = \frac{d^2u_0}{dx^2}$ 。由虎克定律,我们有  $\sigma_x = E\varepsilon_x = E \frac{du_0}{dx}$ , 故

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = E \frac{d^2u_0}{dx^2} = E \frac{d^2u}{dx^2}。$$

将  $\tau$  和  $\frac{d\sigma_x}{dx}$  的表达式代入(3)并整理得:

$$\frac{d^2u}{dx^2} - F^2u = 0 \quad (4)$$

式中: $F = \sqrt{\frac{C}{EH}}$ 。方程的通解为:

$$u = M \cdot \text{ch}(Fx) + N \cdot \text{sh}(Fx) \quad (5)$$

式中: $M$ 、 $N$  为待定常数; $\text{sh}(x)$ 、 $\text{ch}(x)$  分别为双曲正弦、双曲余弦函数。

模型边界条件为:

$$u = 0, x = 0; \sigma_x = 0, x = \pm L/2 \quad (6)$$

可求得:  $M = 0, N = \alpha \Delta W / (F \cdot \text{ch}(FL/2))$ 。代入式(5)中,有:

$$u = \frac{\alpha \Delta W}{F \cdot \text{ch}(FL/2)} \cdot \text{sh}(Fx) \quad (7)$$

式(7)即为计算模型底部水平位移的表达式。将其代入由此可求得  $x$  向应力  $\sigma_x$  和剪应力  $\tau$  分别为:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E\alpha \Delta W \left[ \frac{\text{ch}(Fx)}{\text{ch}(FL/2)} - 1 \right]; \\ \tau &= \frac{\alpha \Delta W \cdot C}{F \cdot \text{ch}(FL/2)} \cdot \text{sh}(Fx) \end{aligned} \quad (8)$$

## 1.2 最大间距和最大宽度

式(8)是土体开裂后,裂隙底部  $x$  向方向的应力表达式。当土体在距离自由边界(裂隙面)  $l$  处的  $\sigma_x$  达到土体的抗拉强度  $\sigma_t$  时,在相邻初始裂隙之间将再次开裂。实际工程中,我们关注的是裂隙最终发育的间距和宽度。由于土体的最大  $x$  向应力发生在  $x = 0$  处(相邻裂隙的中间位置),将  $x = 0$  代入  $\sigma_x$ , 并令  $\sigma_x = \sigma_t$ ,有:

$$\sigma_{x \max} |_{x=0} = E\alpha \Delta W \left[ \frac{1}{\text{ch}(FL/2)} - 1 \right] = \sigma_t \quad (9)$$

反解  $L$ , 可求得裂隙最终发育形成的最大间距  $L_{\max}$  为:

$$L_{\max} = \frac{2}{F} \text{arch} \left( \frac{E\alpha \Delta W}{E\alpha \Delta W + \sigma_t} \right) \quad (10)$$

将  $x = L_{\max}$  代入式(7)中,可得最大宽度  $\delta_{\max}$  的最终表达式:

$$\delta_{\max} = \frac{2\alpha \Delta W}{F} \text{th} \left( \text{arch} \left( \frac{E\alpha \Delta W}{E\alpha \Delta W + \sigma_t} \right) \right) \quad (11)$$

式(10)和式(11)是土体开裂后,裂隙最终发育形成的最大间距和最大宽度。最大间距  $L_{\max}$  的物理意义如下:当相邻裂隙的间距  $l$  超过  $L_{\max}$  时,其最大  $x$  向应力将大于土体的抗拉强度,土体将再次开裂,形成二次裂隙;若二次裂隙与初始裂隙之间的间距仍超过  $L_{\max}$  时,土体仍会开裂,形成多次裂隙,直至裂隙间距小于  $L_{\max}$ 。最大宽度  $\delta_{\max}$  的物理意义如下:当相邻裂隙之间不再生成新裂隙时,这两条裂隙的宽度不会超过  $\delta_{\max}$ 。土体裂隙附近表层处的水平应力较小,原因在于该处能量的释放及边界自由的缘故。随着与裂隙距离的增加,表层土体约束越来越大,水平应力也不断增大,在相邻裂隙中间位置的水平应力将达到最大。若该处水平应力超过土体的抗

拉强度,则该处又会出现裂隙。裂隙生成后,土体能量得到释放,内部应力重新分布,水平应力又小于土体的抗拉强度。随着水分的继续蒸发,水平应力又逐渐增大,若新裂隙与原有裂隙的间距仍大于最大间距,则在其中间位置仍会产生裂隙。若其小于最大间距,则水分的继续蒸发不会在其间形成新裂隙。因此  $L_{\max}$  和  $\delta_{\max}$  实质上反映了裂隙的最终形态,最大间距越大,相应的最大宽度也要大,说明土体越不容易开裂,土体抗裂性能好。因此  $L_{\max}$  和  $\delta_{\max}$  可作为蒸发条件下裂隙最终发育规模的判定依据。

## 2 参数影响分析

研究表明,最大间距和最大宽度主要受收缩系数、最大变湿、变形模量、抗拉强度、水平阻力系数等因素的共同影响。分析了不同参数对裂隙最大间距  $L_{\max}$  和最大宽度  $\delta_{\max}$  的影响,具体结果见图 3 ~ 图 8。可以看出,在其它参数一定的条件下,随着模量  $E$  的增加,  $L_{\max}$  逐渐减小,但变化幅度不大。当胀缩系数  $\alpha$ 、最大变湿  $\Delta W_{\max}$  和水平阻力系数  $C$  小于某值时,  $L_{\max}$  随着  $\alpha$ 、 $\Delta W_{\max}$ 、 $C$  的增加而急剧减小,表现出典型的非线性特征;当其超过某值时,  $L_{\max}$  的减小速率明显变缓,最终趋于一定值。  $L_{\max}$  随着裂隙深度  $H$  和抗拉强度  $\sigma_t$  的增大而增加,表现出一定的非线性。随着  $\alpha$ 、 $\Delta W_{\max}$ 、 $H$  和  $\sigma_t$  的增加,  $\delta_{\max}$  逐渐增大,表现为非线性,但非线性程度不明显。  $\delta_{\max}$  随着  $E$  的增加而有所增加,但增加幅度不明显。当  $C$  小于某值时,  $\delta_{\max}$  随着  $C$  的增加而急剧减小;  $C$  超过该值时,  $\delta_{\max}$  的减小速率变缓,最终趋于一定值。从图 3 ~ 图 6 中我们发现,在一定条件下,土体裂隙的最大间距存在极小值,这表明当裂隙开展到一定程度时,水分的继续丧失仅会导致已有裂隙的加深加宽,不会生成新的裂隙,裂隙形态基本保持稳定。

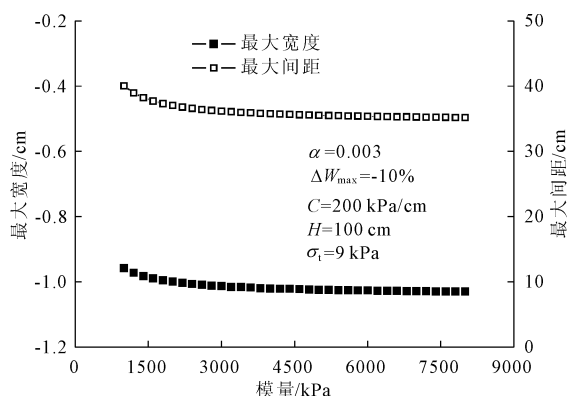


图 3 最大间距和最大宽度与模量的关系

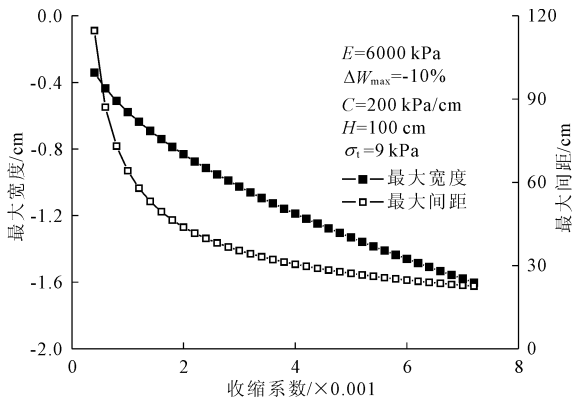


图 4 最大间距和最大宽度与收缩系数的关系

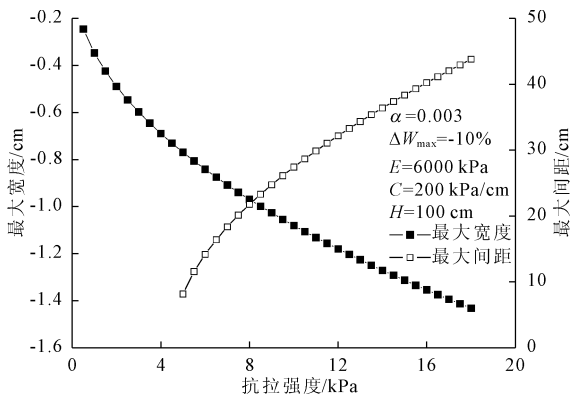


图 8 最大间距和最大宽度与抗拉强度的关系

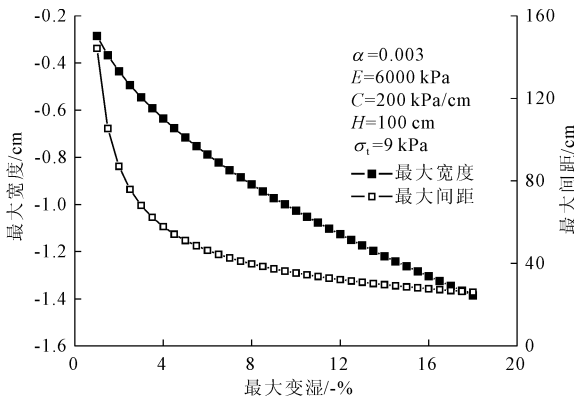


图 5 最大间距和最大宽度与最大变湿的关系

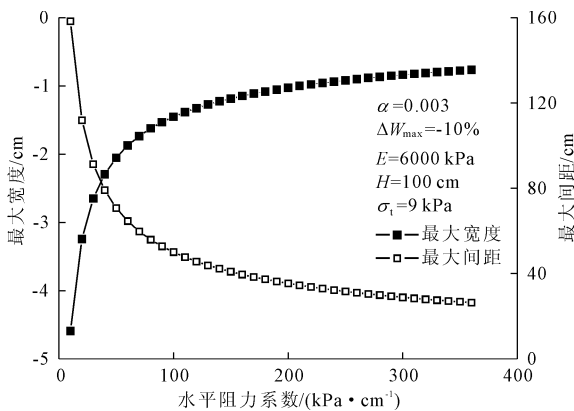


图 6 最大间距和最大宽度与水平阻力系数的关系

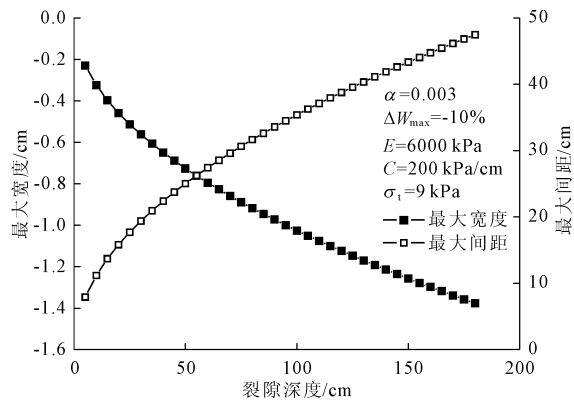


图 7 最大间距和最大宽度与裂隙深度的关系

### 3 结 论

(1) 从力平衡条件出发,推导了裂隙开展的间距和宽度的表达式,据此提出了开裂最大间距和宽度的概念,提出了最大间距和最大宽度的概念,可用于判定裂隙最终规模的依据。

(2) 分析了不同参数对膨胀土开裂最大间距和最大宽度的影响,认为其与土体的收缩系数、最大变湿、变形模量、抗拉强度、水平阻力系数等因素密切相关。相同条件下,变形模量越大,最大间距和最大宽度缓慢减小,但变化幅度不明显。收缩系数和最大变湿越大,最大间距迅速减小,存在极小值;而最大宽度逐渐增大,与收缩系数呈较好的线性关系。水平阻力系数越大,最大间距和最大宽度均迅速减小,存在极小值。裂隙深度和土体抗拉强度越大,最大间距和最大宽度均逐渐增大,呈现出较好线性关系。

(3) 在一定条件下,土体裂隙的最大间距存在极小值,表明当裂隙开展到一定程度时,水分的继续丧失仅导致已有裂隙的加深加宽,不会生成新的裂隙,裂隙形态基本保持稳定。

### 参考文献:

[1] 曾召田,刘发标,吕海波,等.干湿交替环境下膨胀土变形试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):72-76.  
 [2] 崔 激,张志耕,闫澍旺.膨胀土的干湿循环性状及其在边坡稳定性分析中的应用[J].水利与建筑工程学报,2010,8(5):24-27.  
 [3] Morris P H, Graham J, Williams D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992,29(2):263-277.

其地形陡、坡降大,岷江、大渡河流经的高山峡谷区,为崩塌危岩的发生奠定了良好的地形地貌基础。

(3) 环青藏高原边缘的新构造运动强烈、活跃,地震作用强烈而频发,河流持续下切和青藏高原持续隆升,造成川藏高速公路所经地区的高陡峡谷区发生了强烈的动力作用过程,促进了危岩的形成和崩塌的发生。

(4) 川藏高速公路汶马段所经地区气候极为恶劣,暴雨集中,海拔高而存在较为广泛的季节性冻土层。暴雨和春融期间是区内崩塌落石发育的高峰期。

(5) 川藏高速公路的大规模修建,人类活动在短时间内对坡体的应力场、渗流场、温度场等产生了较大的改变,使原有的自然营力条件下形成的边坡稳定性失去平衡而导致崩塌的发生,这是工程建设期间崩塌灾害呈现大规模上升的直接原因。

(6) 川藏高速公路崩塌具有复杂的形成机制,推移式、倾倒式、坠落式和滚落式崩塌均有发育,且常与滑坡交织在一起,往往需对坡面、边坡和进行坡体综合治理才能对崩塌危岩进行有效防治。

#### 参考文献:

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 434-453.
- [2] 刘传正. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 858-868.
- [3] 柴宗新. 山崩灾害及其对策研究[J]. 灾害学, 1989(1):

72-75.

- [4] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.
- [5] 黄润秋, 陈龙生. 中国的人类活动诱发滑坡灾害: 机制及对灾害控制的意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2766-2777.
- [6] 黄润秋, 张倬元, 王士天. 论岩体结构的表生改造[J]. 水文地质工程地质, 1994, 21(4): 17-21.
- [7] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [8] 何思明, 沈均, 吴永. 滚石冲击荷载下棚洞结构动力响应[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 781-788.
- [9] 王东坡, 何思明, 葛胜锦, 等. “9·07”彝良地震诱发次生山地灾害调查及减灾建议[J]. 山地学报, 2013, 31(1): 101-107.
- [10] 方利, 车晓明. 宝天铁路增建二线滑坡与崩塌调查中的遥感技术应用[J]. 铁道工程学报, 2006(S1): 243-247.
- [11] 王念秦, 汤廉超. 黄土崩塌灾害运动机理及其离散元数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(2): 152-156.
- [12] Salciarini D, Tamagnini C, Conversini P. Discrete element modeling of debris - avalanche impact on earthfill barriers[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2010, 35(3): 172-181.
- [13] 许强, 陈伟. 单体危岩崩塌灾害风险评估方法——以四川省丹巴县危岩崩塌体为例[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1039-1046.
- [14] 吴刚, 冯文凯, 廖军, 等. 某采气场进场道路崩塌落石运动特征及防护措施[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 25-30.
- [15] 胡厚田. 崩塌与落石[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.

(上接第 11 页)

- [4] Morris P H, Graham J, Williams D J. Crack depths in drying clays using fracture mechanics [C]//Fracture Mechanics Applied to Geotechnical Engineering, ACSE, Geotechnical Special Publication, 1994: 40-53.
- [5] 杨果林, 刘义虎, 黄向京. 膨胀土处理理论与工程建造新技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [6] 邓刚, 沈珠江, 杨代泉. 黏土表面干缩裂隙形成过程的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 124-131.
- [7] Konrad J M, Ayad R. An idealized framework for the analysis of cohesive soils undergoing desiccation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(4): 477-488.
- [8] Konrad J M, Ayad R. Desiccation of a sensitive clay: Field experimental observations [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(6): 929-942.
- [9] 郑少河, 金剑亮, 姚海林, 等. 地表蒸发条件下的膨胀土初始开裂分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2229-2233.
- [10] 吴华, 袁俊平, 卢廷浩. 基于变湿应力概念的膨胀土

初始开裂分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1631-1636.

- [11] Lecocq N, Vandewalle N. Dynamics of crack opening in a one-dimensional desiccation experiment [J]. Physica A., 2003, 321(3): 431-441.
- [12] 唐朝生, 施斌, 刘春. 黏性土在不同温度下干缩裂隙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.
- [13] 孙即超, 王光谦, 孙其诚. 临界状态下非饱和土裂隙开裂间距[J]. 科学通报, 2009, 54(9): 1311-1314.
- [14] 王放, 张俊乾. 复合材料拉伸断裂过程的 Monte-Carlo 模拟[J]. 力学季刊, 2005, 26(4): 149-152.
- [15] Chertkov V Y. Using surface crack spacing to predict crack network geometry in swelling soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(6): 1918-1921.
- [16] Chertkov V Y, Ravina I. Modeling the crack network of swelling clay soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(5): 1162-1171.