

岩质边坡表层黏性客土抗裂特性试验研究

宋京雷, 何伟, 郝社锋, 蒋波, 刘瑾, 卜凡, 宋泽卓

An experimental study of the anti-cracking characteristics of foreign-clay based on rock slope

SONG Jinglei, HE Wei, HAO Shefeng, JIANG Bo, LIU Jin, BU Fan, and SONG Zezhuo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究

An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials

喻永祥, 郝社锋, 蒋波, 刘瑾, 李明, 李伟, 宋泽卓 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 174-181

基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析

An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation

李彦奇, 黄达, 孟秋杰 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 141-150

岩质边坡复合型破坏机制的改进运动单元法研究

Investigation on combined failure mechanism of rock slope based on the improved kinematical element method

张科, 侯杰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 95-101

基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟

A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model

马文著, 徐衍, 李晓雷, 陈敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 150-160

基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的岩质开挖边坡稳定性研究

A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models

穆成林, 裴向军, 裴钻, 张引, 习朝辉 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 150-158

基于高分子复合材料改良砂土三轴剪切试验研究

Triaxial shear test of sand improved by polymer composite

王龙威, 刘瑾, 奚灵智, 武立林, 郑川, 祁长青 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 149-157



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008025

岩质边坡表层黏性客土抗裂特性试验研究

宋京雷^{1,2}, 何伟^{1,2}, 郝社锋^{1,2}, 蒋波^{1,2}, 刘瑾³, 卜凡³, 宋泽卓³

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏南京 210018; 2. 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心, 江苏南京 210018; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏南京 211100)

摘要: 客土喷播是当前对于裸露岩质边坡生态修复的一种常用技术。然而, 边坡表层黏性客土在干旱的气候条件下, 内部水分大量流失将容易产生干缩、开裂现象, 进而影响坡面的整体稳定性, 以及表面植被的生长。本文针对边坡表层黏性客土开裂问题, 通过改变土体厚度, 以及制备不同聚氨酯(PU)浓度的高分子复合黏性客土, 开展一系列室内蒸发试验, 以分析土体表面裂隙发育特征, 并结合数字图像处理技术(PCAS), 对裂隙网络的几何形态进行定量分析, 进一步探究土体厚度和高分子添加剂浓度对其裂隙发育的影响。

关键词: 岩质边坡; 黏性客土; 土体厚度; 高分子材料; 裂隙发育特征

中图分类号: TU411.91

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0144-06

An experimental study of the anti-cracking characteristics of foreign-clay based on rock slope

SONG Jinglei^{1,2}, HE Wei^{1,2}, HAO Shefeng^{1,2}, JIANG Bo^{1,2}, LIU Jin³, BU Fan³, SONG Zezhuo³

(1. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210018, China; 2. Technology Innovation Center for Ecological Monitoring & Restoration Project on Land (Arable), Ministry of Natural Resources, Nanjing, Jiangsu 210018, China; 3. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: Foreign-clay spraying is currently a common technology for ecological restoration of exposed rock slopes. However, under arid climate conditions, the large amount of internal water loss of the foreign-clay on the slope surface will easily cause shrinkage and cracking, which will affect the overall stability of the slope and the growth of surface vegetation. In this paper, aiming at the problem of cracking of the foreign-clay on the slope surface, by changing the thickness of the soil, polymer composite foreign-clay with different polyurethane (PU) concentrations is prepared to analyze the development characteristics of cracks through a series of indoor drying tests. In addition, particles (Pores) and cracks analysis system (PCAS) are used to conduct a quantitative analysis of the geometry of crack network, so as to further explore the influence of soil thickness and polymer additive concentration on fracture development.

Keywords: rock slope; foreign-clay; clay thickness; polymer materials; crack development characteristics

当前, 在高速公路、铁路、港口以及能源开发等基础工程建设过程中, 因大量开挖土石方形成很多裸露

的岩质边坡, 不仅破坏了原有的植被与土壤, 导致当地生态环境严重失衡, 而且在降雨条件下极易发生水

收稿日期: 2020-08-11; 修订日期: 2020-09-27

基金项目: 江苏省自然资源科技项目(KJXM2019028); 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心开放课题(2020)

第一作者: 宋京雷(1984-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害、水工环地质研究工作。E-mail: 676505165@qq.com

通讯作者: 刘瑾(1983-), 女, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要从事环境地质工程、地质灾害监测研究。E-mail: jinliu920@163.com

土流失,诱发崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害,危害人民的生命财产安全^[1-4]。对于这类工程问题的治理,传统的护坡技术如护面墙、干砌石、浆砌石、喷混凝土护坡等,虽然能够显著地改善坡体的稳定性^[5-6],但其绿化效果较差,同时不能满足生态治理的需求,与当前可持续发展的理念相违背^[7-10]。因此,岩质边坡植被护坡技术应时而生,并已成为岩质边坡生态护坡技术的一个重要组成部分。岩质边坡不同于土质边坡,由于其裸露边坡表面创伤面没有土壤覆盖,水热容量小,有机质、N、P等营养元素的难以形成和富集,故不能满足植被生长所必须的环境条件,不利于植物的定居和生长^[11]。因此,岩质边坡生态修复的首要任务是在边坡表面构建一定厚度的人工土壤层或生态基质层(即客土层)^[12]。客土喷播的厚度受到边坡类型、边坡坡度和降水等因素的影响^[13]。一般而言,当基质层厚度较小,植被根系在垂直方向上的生长会受到限制,不利于植被生长;而基质层厚度较大时,则容易导致基质层发生失稳破坏。基质层厚度的选择是否合理影响其稳定性和植被的生长。此外,干旱条件下造成喷播客土的干缩、开裂也是边坡生态修复工程中一种常见的自然现象。龟裂所产生的土体表面裂隙网络在很大程度上会改变其内部应力场以及渗流场,从而弱化整体结构,同时也为外部水体入渗,以及内部水分、营养物质流失提供了“便捷通道”,引发一系列工程地质灾害^[14-17]。由此可见,龟裂对客土层的稳定性、植被的正常生长影响极大。

针对上述问题开展室内干燥试验,以探究不同厚度黏性土的干缩开裂特征,并在此基础上,采用聚氨酯作为客土改良材料,通过变化其浓度以研究该材料对黏性土干燥失水、表面裂隙发育的影响。最后结合数字图像处理技术(PCAS),对土体表层裂隙网络的几何形态进行定量分析。

1 试验材料及方案

1.1 试验材料

干燥试验用黏性土取自南京某工地下蜀土,呈黄褐色,天然含水率20%~27%,比重2.71,塑限22%,液限36.7%,塑性指数14.7。试验所用高分子材料为聚氨酯型高分子(Polyurethane,简称PU),在自然状态下为浅黄色黏稠状液体,具有一定的透明度,密度 1.18 g/m^3 ,固形物含量85%,胶凝时间300~1 800 s, pH值为7,黏稠度650~700 MPa·s,可任意比例水溶,且具备无污染、使用便捷、经济效益高等优点,此外还能够涵养

水分,促进植被生长。

1.2 试样制备

利用ab胶将规格为60目的砂纸粘于放置土样的容器底部,以较为贴近地模拟自然条件下摩擦效应对土体干缩、开裂的影响。容器四壁均匀地涂上凡士林以减少边界摩擦力所产生的试验误差。在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下烘烤试验土体8 h后磨碎,过2 mm筛。

设定试样含水率(w)为60%。将与水混合完全的土样根据试验所设厚度($h=3, 6, 9, 12\text{ mm}$)倒入内径为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 的正方形塑料容器中,机械振动3~5 min,使土样与容器内壁紧密接触,同时排除试样内部的气泡,盖上容器盖静置24 h。根据土体厚度由小到大,试样编号依次记为S1、S2、S3、S4。

在水土混合时添加相应浓度的聚氨酯,其掺入质量(m_p)由式(1)计算所得。试验设定聚氨酯浓度分别为0.25%、0.5%、0.75%、1.00%。根据聚氨酯浓度由小到大,试样编号依次记为S5、S6、S7、S8。

$$m_p = m_s \times w \times w_p \quad (1)$$

式中: m_p ——聚氨酯的掺入质量/g;

m_s 、 w ——干土、水的质量/g;

w_p ——聚氨酯的浓度/%。

1.3 试验方法

将静置完毕的试样置于 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温箱进行干燥,分2个阶段进行记录。第一阶段:每隔1 h对各组试样称重,记录读数,持续12 h;第二阶段:在第一阶段完成之后,每隔12 h对试样称重,记录读数,直至每两次读数之差小于1 g,试验结束。

最后,结合数字图像处理技术(PCAS),针对裂隙网络图像的构成要素,提出裂隙率(R_{sc})、裂隙数量(N_f)、土块数量(N_a)、裂隙总面积(S)、裂隙平均长度(L_{av})以及宽度(W_{av})等基本度量指标,进行定量分析。

2 试验结果

2.1 厚度对黏土体干缩特性的影响

图1为不同厚度试样含水率随时间变化的规律,4种试样的曲线整体变化趋势相似。随着试样厚度的增加,曲线逐渐右移,较小厚度试样的蒸发速率明显高于同等条件下,较大厚度的试样,能够更快地达到残余阶段,这也说明较大厚度试样持水能力更强。同时,试样蒸发速率受其厚度影响较大的主要原因,为较大厚度试样内部水分含量高,能够在试验过程中长时间持续提供水分,因此S4能够维持稳定蒸发率的时间更长,状态更加稳定。

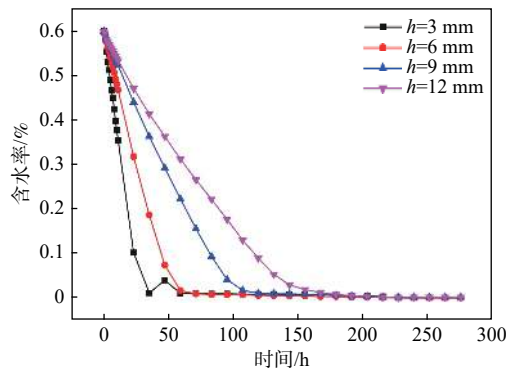


图 1 不同厚度试样的含水率-时间关系曲线
Fig. 1 Relationship of water content and time of samples with different thicknesses

由表 1 可得, 土体表面裂隙率(R_{sc})与裂隙总面积(S)随试样厚度的增加而增加, 二者的增幅分别为 32.15%、13.65%、19.17% 与 32.18%、13.68%、17.99%, 表现出 R_{sc} 与 S 随试样厚度而发生变化的规律相似。试样产生裂隙的平均长度(L_{av})、平均宽度(W_{av})也随着厚度的增加而增加。然而, 试样表面产生的裂隙数量(N_f)以及因裂隙发育而切割形成的土块数量(N_a)随试样厚度的增加而逐渐减少。另外如图 2 所示, 试样表面的分形维数(F_D)^[18]与裂隙节点(F_N)均随其厚度的增大而呈现出下降趋势, 这表明, 土体表面裂隙发育及其破碎程度很大程度上受到土体厚度的影响, 即厚度越小, 表面裂隙率越小, 但其破碎程度越高(图 3)。随着土体厚度增加至一定值时, 其影响程度趋于稳定。分形维数 F_D 与裂隙节点 F_N 的定义如下:

$$\log P = \frac{F_D}{2} \times \log A + C \quad (2)$$

式中: P ——开裂块区的周长;

A ——与之对应的块区面积;

C ——常数。

上述参数均可在 PCAS 中自动获得。

裂隙节点 F_N 的定义为: 裂隙网络任何支路的终端, 或网络中两个及更多支路的互连公共点, 拐点除外。

综上所述得到本次试验的最优试样厚度为 12 mm, 故将其设定为后续试验中试样的制备厚度。

2.2 聚氨酯浓度对黏土体干缩特性的影响

由图 4(a)可直观地看出, 各试样含水率均随时间的增长呈下降趋势, 且在 0~125 h 内呈近似线性下降, 而后趋于稳定。对于同一厚度的试样($h=12$ mm), 改变聚氨酯水溶液的浓度将对土体含水率的变化产生影响, 如添加较低聚氨酯浓度的试样(S5、S6)可在一定程度上提高土体的持水能力, 但提升效果不明显,

表 1 不同厚度试样表面开裂参数统计表

Table 1 Statistics of cracking parameters on the surface of the samples with different thicknesses

试样编号	$R_{sc}/\%$	N_f	N_a	$S/\text{像素}$	$L_{av}/\text{像素}$	$W_{av}/\text{像素}$
S1	10.70	400	214	194 949	128.15	81.46
S2	14.14	181	76	257 678	207.89	133.27
S3	16.07	60	34	292 922	307.89	170.92
S4	19.15	35	29	345 635	310.49	173.90

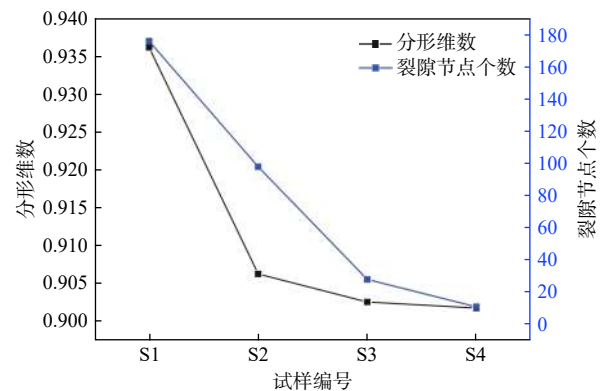


图 2 不同厚度试样表面分形维数与裂隙节点个数统计

Fig. 2 Picture of the fractal dimension and the intersection point number on the surface of the samples with different thicknesses

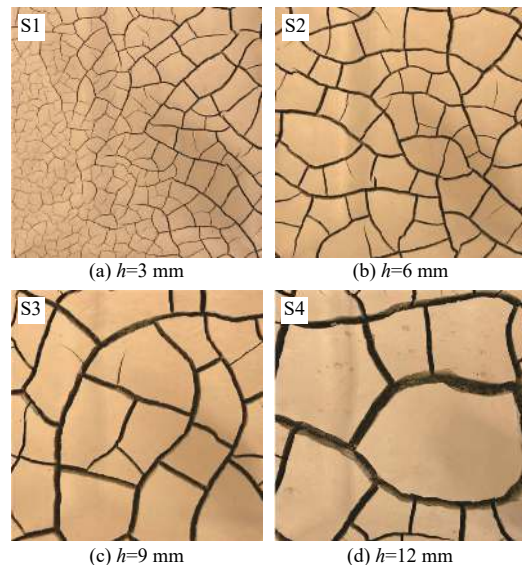


图 3 不同厚度的试样完全开裂后表面裂隙网络

Fig. 3 Surface crack network of the samples with different thicknesses after completely cracking

且当试样中聚氨酯水溶液的浓度逐渐升高时, 土体持水能力便逐渐减弱。由图 4(b)可以看出, 试样中添加聚氨酯水溶液能延缓土体水分的散失, 但效果却不明显, 论证了图 4(a)所得结论。分析图 4(c)可看出, 当试样处于较高含水率时, 聚氨酯水溶液的掺入使得水分散失变得相对稳定, 而在低含水率状态下, 聚氨酯

水溶液的掺入则基本不对试样中水分蒸发速率产生影响, 此时试样蒸发速率主要由含水率决定。综上所述, 聚氨酯水溶液的添加能够在一定程度上改良土体的持水能力, 但在本研究所选浓度范围内, 其改良效果不明显。

分析图 5 可知, 掺入聚氨酯溶液的试样其分形维数与裂隙节点个数均大于无添加的试样。表明虽然

添加低浓度的聚氨酯溶液能够提升土体的保水性, 但是不会对土体表面的开裂产生抑制作用, 反而其表面的破碎程度将被提升。此外, 分析表 2 中各项参数可知, 聚氨酯溶液浓度提升, 使得试样产生土块的数量减少, 裂隙的长度及宽度增大, 说明随着聚氨酯溶液浓度的增加, 土体产生新生裂隙数量减少, 即试样干缩开裂以主裂隙的发育为主(图 6)。

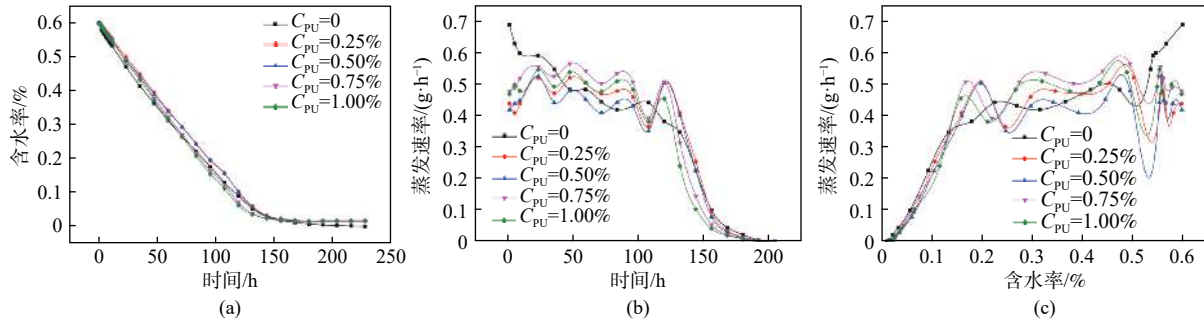


图 4 不同聚氨酯浓度试样的蒸发特征参数关系曲线

Fig. 4 Relationship of evaporation characteristic parameters of the samples with different C_{PU}

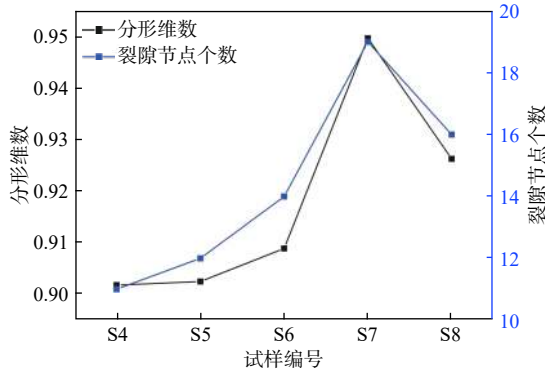


图 5 不同聚氨酯掺入浓度试样表面分形维数与裂隙节点个数统计

Fig. 5 Picture of the fractal dimension and the intersection point number on the surface of the samples with different C_{PU}

表 2 不同聚氨酯浓度的试样表面开裂参数统计

Table 2 Statistics of cracking parameters on the surface of the samples with different C_{PU}

试样编号	$R_{sc}/\%$	N_t	N_a	$S/\text{像素}$	$L_{av}/\text{像素}$	$W_{av}/\text{像素}$
S4	19.15	35	29	345 635	310.49	173.90
S5	19.02	42	29	348 008	276.25	174.6
S6	19.12	45	25	351 756	315.03	171.47
S7	20.53	44	26	372 286	347.75	185.32
S8	20.55	35	22	351 467	355.59	207.05

3 机理分析

试样在初始含水量相同的条件下, 由于蒸发作用, 试样表面水分不断减少, 使得土体内部毛细作用

逐渐增强, 底部的水分通过毛细管道不断向上补充(图 7)。图 8 表明试样底部存在的摩擦力, 将对土体的收缩变形产生限制作用, 随着试样厚度增大, 其底部摩擦力对表面的限制作用有所减弱, 甚至消失。

如图 9 所示, 聚氨酯加固土体的方式可分为包裹土颗粒、填充孔隙及连结土颗粒。聚氨酯水溶液能够快速地在试样内部形成一种稳定的, 具有一定抗拉强度的高弹弹性黏膜。随着聚氨酯水溶液浓度的增加, 这种弹性黏膜将大量“堵塞”土颗粒之间的孔隙通道, 导致土体表面的水分得不到及时补充, 从而促进了表面裂隙的发育, 加剧了土体表面的破碎程度。然而, 在“堵塞”补水通道的同时, 弹性黏膜能够对土颗粒进行包裹、团聚, 在一定程度上提升了土体的整体性, 有效地减少了因裂隙切割而产生的土块数量, 从而减缓土体表面新生裂隙发育。

4 结论

(1) 在本次试验所设定的环境条件下, 较大厚度的试样, 其干燥完全所需时间长, 表面破碎程度低, 裂隙发育方式主要以原生裂隙的继续延伸与侧向扩张为主, 新生裂隙的产生较少; 低厚度试样干缩开裂后表面更为破碎, 裂隙主要以新生裂隙的发育为主。

(2) 试样中添加 0~1% 浓度的聚氨酯水溶液能够在一定程度上提升黏性土的持水能力, 但效果不明显。故将在后续试验中进行较高浓度聚氨酯水溶液对于黏性土干缩开裂特性的研究。

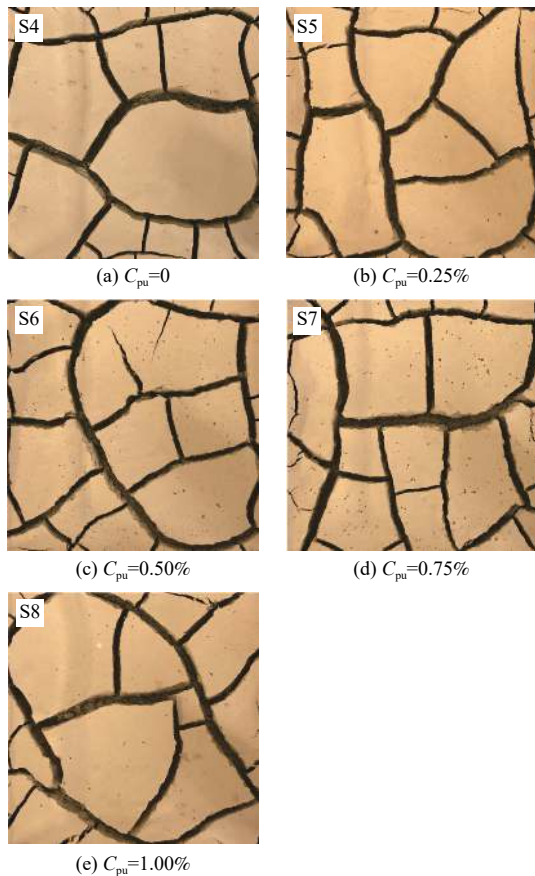


图 6 不同聚氨酯浓度的试样完全开裂后表面裂隙网络

Fig. 6 Surface crack network of the samples with different C_{PU} after completely cracking



图 7 土体内部的毛细现象示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the capillary phenomenon inside soil

参考文献 (References) :

[1] 张勇, 温智, 程英建. 四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 178 - 182. [ZHANG Yong, WEN Zhi, CHENG Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan[J].

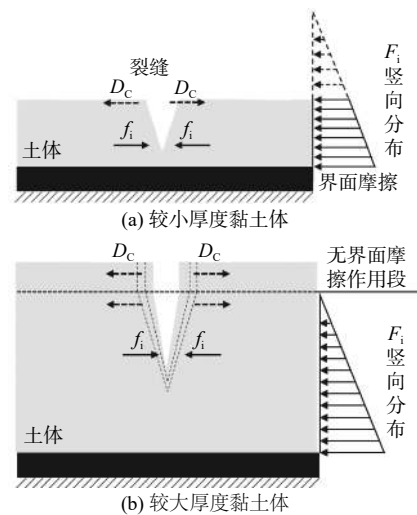


图 8 厚度影响黏性土体开裂示意图

Fig. 8 Schematic diagram of thickness affecting cracking of soil

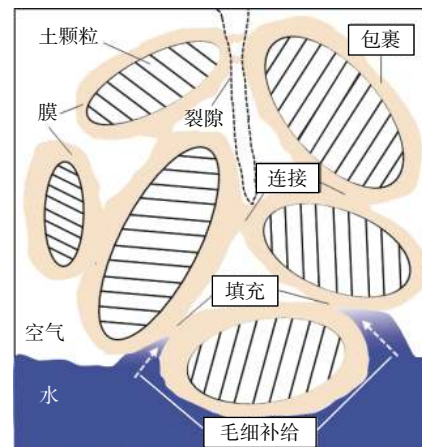


图 9 聚氨酯水溶液与土体相互作用示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the interaction between polyurethane solution and soil

Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 178 - 182. (in Chinese with English abstract)]

[2] 郭敏, 苏生瑞, 曾金. 降雨条件下堆积层滑坡变形特征及形成机理研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019, 36(3): 39 - 45. [GUO Min, SU Shengrui, ZENG Jin. Deformation characteristics and formation mechanism of accumulated landslides under rainfall conditions[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 36(3): 39 - 45. (in Chinese with English abstract)]

[3] 周杨, 刘果果, 白兰英, 等. 降雨诱发黄土边坡失稳室内试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(6): 838 - 843. [ZHOU Yang, LIU Guoguo, BAI Lanying, et al. Model test study of loess slope instability induced by rainfall[J]. Engineering Journal of Wuhan University,

- 2016, 49(6): 838 - 843. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李滨,冯振,赵瑞欣,等.三峡地区“14·9”极端暴雨型滑坡泥石流成灾机理分析[J].水文地质工程地质,2016,43(4):118-127. [LI Bin, FENG Zhen, ZHAO Ruixin, et al. Mechanism of “14·9” rainstorm triggered landslides and debris-flows in the Three Gorges area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 118 - 127. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 廖一蕾,张子新,肖时辉,等.水泥加固黏性土微观特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):4318-4327. [LIAO Yilei, ZHANG Zixin, XIAO Shihui, et al. Microstructure research on cement stabilized clays[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup2): 4318 - 4327. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 汤怡新,刘汉龙,朱伟.水泥固化土工程特性试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(5):549-554. [TANG Yixin, LIU Hanlong, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 549 - 554. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张家明,陈积普,杨继清,等.中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J].水土保持学报,2019,33(5):1-7. [ZHANG Jiaming, CHEN Jipu, YANG Jiqing, et al. Advances in biological protection of rock slopes in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]
- [8] CARAVACA F, LOZANO Z, RODRÍGUEZ-CABALLERO G, et al. Spatial shifts in soil microbial activity and degradation of pasture cover caused by prolonged exposure to cement dust[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(4): 1329 - 1335.
- [9] NAJIM K B, MAHMUD Z S, ATEA A K M. Experimental investigation on using Cement Kiln Dust (CKD) as a cement replacement material in producing modified cement mortar[J]. Construction and Building Materials, 2014, 55: 5 - 12.
- [10] EL-ATTAR M M, SADEK D M, SALAH A M. Recycling of high volumes of cement kiln dust in bricks industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 143: 506 - 515.
- [11] 李绍才,孙海龙.中国岩石边坡植被护坡技术现状及发展趋势[J].资源科学,2004,26(增刊1):61-66. [LI Shaocai, SUN Hailong. Developing trend and situations of technique to stabilize rock slope with vegetative cover in China[J]. Resources Science, 2004, 26(Sup1): 61 - 66. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 方军辉,朱德滨,程承,等.客土喷播的护坡机理及基材和施工等控制要点[J].森林工程,2014,30(3):116-119. [FANG Junhui, ZHU Debin, CHENG Cheng, et al. Mechanism of slope protection, base material mixture, and construction technology of soil spray-sowing[J]. Forest Engineering, 2014, 30(3): 116 - 119. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LUO C, GUO X P, LIU G H, et al. Green waste compost as a substitute for turfy soil in external-soil spray seeding substrate[J]. Environmental Technology, 2019: 1 - 13.
- [14] 唐朝生,施斌,崔玉军.土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J].岩土工程学报,2018,40(8):1415-1423. [TANG Chaosheng, SHI Bin, CUI Yujun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1415 - 1423. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 曾浩,唐朝生,林鑫,等.土体干缩裂隙发育方向及演化特征的层间摩擦效应研究[J].岩土工程学报,2019,41(6):1172-1180. [ZENG Hao, TANG Chaosheng, LIN Luan, et al. Interfacial friction dependence of propagation direction and evolution characteristics of soil desiccation cracks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1172 - 1180. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 唐朝生,施斌,刘春.膨胀土收缩开裂特性研究[J].工程地质学报,2012,20(5):663-673. [TANG Chaosheng, SHI Bin, LIU Chun. Study on desiccation cracking behaviour of expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 663 - 673. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 孙强,龚绪龙,张玉良,等.黏土失水干缩裂缝发育动态试验研究[J].水文地质工程地质,2014,41(5):144-147. [SUN Qiang, GONG Xulong, ZHANG Yuliang, et al. A study of the dynamic experimental of clay desiccation cracking process[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(5): 144 - 147. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王宝军,施斌,刘志彬,等.基于GIS的黏性土微观结构的分形研究[J].岩土工程学报,2004,26(2):244-247. [WANG Baojun, SHI Bin, LIU Zhibin, et al. Fractal study on microstructure of clayey soil by GIS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 244 - 247. (in Chinese with English abstract)]