

干湿循环作用下植被混凝土结构演化

晏国顺¹,周明涛²,高家祯²,胡旭东²,尉军耀³

(1. 华电西藏能源有限公司大古水电分公司,西藏 山南 856200;
2. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北 宜昌 443002;
3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710000)

摘要:选取植被混凝土生态基材为研究对象,制备6种初始含水率分别为13%、19%、25%、31%、37%、43%的试样。通过烘干法和叠式饱和法分别模拟脱湿和增湿过程,采用土壤收缩仪测量试样宏观胀缩量,Matlab软件提取试样表面裂隙几何特征,探究干湿循环作用下植被混凝土结构演化规律。结果表明:试样在常温下的干缩过程可分为急剧收缩阶段、平缓收缩阶段和稳定阶段3个阶段;干湿循环过程中,试样收缩量与膨胀量近乎等量;裂隙发育过程主要体现在裂隙宽度、总长度及总面积随循环次数增加而增大;初始含水率过低或过高,均易使植被混凝土发生湿胀干缩破坏;初始含水率31%试样的裂隙平均宽度、裂隙总面积、裂隙长度和表面收缩率均最小,31%为生产实践的最佳含水率。

关键词:植被混凝土;干湿循环;裂隙;初始含水率

中图分类号:TU45 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)06-0033-07

Evolution of vegetation concrete structures under action of drying-wetting cycles//YAN Guoshun¹, ZHOU Mingtao², GAO Jiazhen², HU Xudong², WEI Junyao³(1. Dagu Hydropower Branch, Huadian Tibetan Energy Co., Ltd., Shannan 856200, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Power China Northwest Engineering Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: The vegetation concrete ecological base material was selected as the research object, and the samples with six levels of initial water contents of 13%, 19%, 25%, 31%, 37%, 43% were prepared. The dehumidification and humidification processes were simulated by drying method and stacking saturation method respectively. The macroscopic expansion and shrinkage of samples were measured by soil shrinkage meter, and the geometric characteristics of cracks on the surface of samples were extracted by Matlab software. The structural evolution law under the action of drying-wetting cycles was studied. The results show that the drying shrinkage process of the samples at laboratory temperature is manifested as three stages, including sharp shrinkage stage, smooth shrinkage stage and stable stage. During the drying-wetting cycles, the shrinkage and expansion of the samples are almost equal. The crack development process is mainly reflected in the increase of crack width, total length and total area with the increase of cycle times. If the initial water content is too low or too high, the wet expansion and dry shrinkage damage is easily occurred. The average crack width, crack total area, crack length and surface shrinkage of the samples with 31% initial water content are the smallest, which is the optimum water content in production practice.

Key words: vegetation concrete; drying-wetting cycle; crack; initial water content

湿胀干缩变形是岩土体基本性质之一,降雨和干旱交替变化影响下,边坡土体常常经历反复的干湿循环和胀缩变形^[1]。植被混凝土作为一种典型人造复合生态基材,由种植土、水泥、有机物料和外加剂以干质量比100:8:5:4均匀混配后,再添加

适量水而成,隶属于弹塑性材料,主要用于营造裸露岩质边坡的植被生境,具有较强的抗冲刷性^[2-3]。作为边坡防护基材,植被混凝土能够保持边坡浅层稳定的同时,创造一种与土壤相似的多孔结构和环境条件,有利于坡面植被的生长发育和水土保持,适用

基金项目:中国华电集团公司科研基金(121JD201800018);国家重点研发计划(2017YFC0504902-02)
作者简介:晏国顺(1981—),男,高级工程师,硕士,主要从事水电工程建设管理研究。E-mail: 9896140@qq.com
通信作者:周明涛(1979—),男,教授,博士,主要从事边坡生态修复技术研究。E-mail: zmt@ctgu.edu.cn

于坡度 $45^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 各类裸露边坡^[4], 现已广泛应用于全国各地, 并取得了较好的生态效益。工程应用中, 伴随着气候变化及干湿循环的影响, 植被混凝土也不可避免地产生大量纵横交错的干缩裂隙。虽然少量的裂隙发育可以有效改善基材的孔隙结构, 对植被生长起到一定的促进作用, 但其带来的负面影响更大, 如大量裂隙发育导致基材结构稳定性劣化而脱落、崩裂, 使工程寿命达不到设计年限。同时, 大量干缩裂隙亦会增强水分入渗和蒸散能力, 进而加速修复坡体的水土流失, 降低生态基材固土保肥性能^[5], 导致岩质边坡植被逐渐凋零, 严重影响生态修复效果。

近年来, 国内外专家和学者对干湿循环过程中土体裂隙结构变化进行了较多的探析与研究。周健等^[6]研究表明随着干湿循环次数的增加, 膨胀土边坡的裂缝逐渐变宽变深, 胀缩变形不断增加, 土体黏聚力明显下降, 边坡稳定系数减小。吴珺华等^[7]对干湿循环下膨胀土的胀缩性能进行了研究, 发现最终膨胀率、最终收缩率和膨胀变形与干湿循环次数成反比。Wang 等^[8]对粉质黏土的研究表明, 随着含水率的增加, 土体强度随之降低, 且土体的微观结构缺陷度与干湿循环次数明显正相关。随着技术的发展, 得益于高清晰裂隙图像获取方法, 如数码相机拍照法^[9]、计算机断面成像技术 (CT 法)^[10]等, 干湿循环作用下土体裂隙的分析由定性逐渐向定量方面发展。黎伟等^[11]采用室外数码成像和 Matlab 二值化像素统计法对膨胀土表面裂隙的发展规律进行了分析, 研究发现干湿循环作用下膨胀土的裂隙会逐步发育, 且其主要体现在裂隙总面积与总长度的增加。褚卫军^[12]发现红黏土试样裂隙在第二次烘干时出现, 且随着烘干时间的延续, 裂缝宽度增大、长度变长、条数增多。张家俊等^[13]利用矢量图技术对裂隙图像进行矢量化处理, 成功提取了裂隙的多个几何要素。曹树刚等^[14]通过二值图像, 定量地得到了有效的煤岩细观裂隙特征参数。以上研究为干湿循环下植被混凝土研究提供了参考。

目前, 对于植被混凝土这种弹塑性生态护坡基材, 国内学者亦对其稳定性进行了初步探讨, 如周明涛等^[15]对冻融循环作用下植被混凝土的冻胀融沉和抗剪强度进行了分析研究, 夏振尧等^[16]建立并验证了植被混凝土初期强度的多元非线性回归模型。然而, 已有研究均未涉及干湿循环条件下植被混凝土裂隙发育及演化规律。因此, 本文以植被混凝土为研究对象, 基于室内干湿循环模拟试验, 测定植被混凝土的湿胀干缩变形量, 并采用 Matlab 二值化像素统计法和矢量图技术获取表面裂隙参数 (裂隙面

积、宽度及长度等), 定量分析裂隙特征, 直观描述植被混凝土裂隙的发育状况和规律, 旨在揭示植被混凝土湿胀干缩变形规律, 为其结构稳定性及耐久性的改善奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验原材料包括种植土、水泥、有机物料、外加剂和水。天然土料取自宜昌市区某土场, 经过测定, 其比重为 2.58, 干密度为 1.79 g/cm^3 , 天然含水率为 16.3%, 孔隙率为 40.18%, 液限为 31.7%, 塑限为 16.9%。土壤颗粒级配曲线见图 1。天然土料取回后, 经晒干、捣碎、过 2 mm 细筛, 取筛下物作为本试验种植土。水泥为 P · O 32.5 普通硅酸盐水泥, 干密度为 3.10 g/cm^3 。有机物料选取干燥松树锯末, 烘干且过 2 mm 细筛后, 取筛下物, 其干密度为 0.46 g/cm^3 。外加剂为发明专利产品, 是由三峡大学委托宜昌绿野环保工程有限责任公司生产的植被混凝土绿化添加剂。绿化添加剂主要成分包括含铁、磷、钙、硅元素的矿粉、保水剂、复合肥等^[17], 表现出弱酸性, 能够中和基材水泥碱性。保水剂可以增强基材保水保肥性能, 复合肥可提高微生物数量, 利用微生物对矿质元素的释放作用, 改善基材空间结构, 达到改善基材 pH、肥力、保水性、结构等理化性状的目的。水选取市政自来水。将上述处理好的种植土、水泥、有机物料、植被混凝土绿化添加剂按干质量比 100 : 8 : 5 : 4 均匀混配。由 X 射线衍射仪分析植被混凝土的矿物组成, 结果显示: 石英、钠长石、伊利石、方解石、蒙脱石、白云石的质量分数分别为 56%、14%、10%、9%、8% 和 3%。

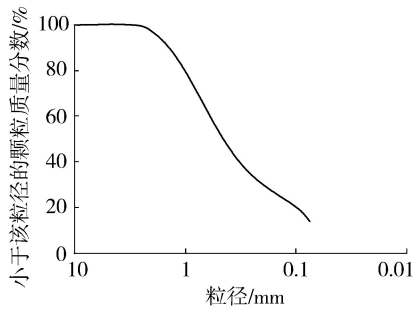


图 1 土壤颗粒级配曲线

植被混凝土属于二次重塑弹塑性材料, 其试样制备方法遵循 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》中的规定。由 GBJ 112 — 87《膨胀土地区建筑技术规范》表 C 可知, 大气影响急剧层深度为地表以下的 2 ~ 5 cm 范围, 结合植被混凝土工程应用中含水率实况, 将初始含水率 w_0 设置为 13%、19%、25%、31% 和 37%, 饱和含水率设置为 43% (已通过

试验测定)。用直径61.8 mm、高度2 cm的环刀采用击实法制作相同密度的3组试样,分别记为对照组A、平行组B、平行组C,每组均设置3个平行试样。对照组A试样制作完成后放在20℃恒温培养箱中养护7 d,然后在自然状态下进行脱湿。同时,平行组B和C试样养护完成后直接用于室内干湿循环模拟试验。

1.2 试验方法

采用土壤收缩仪直接测量养护完成后的对照组A试样在室温(20℃±2℃)下的垂直变化量,每2 h测定一次,记为宏观收缩量。对养护后的平行组B和C试样开展干湿循环模拟试验,依次为脱湿、拍照、增湿3个过程,全部完成视为一次循环。

采用台式鼓风干燥箱(DHG-9035A)脱湿平行组B、C试样,控制烘箱温度为40℃,每2 h取出试样,并利用改装的土壤收缩仪测量胀缩状况,且称重,至重量变化小于0.1 g时脱湿停止。然后采用GDB-1型叠式饱和器加湿试样,浸泡时保持水覆盖全部试样,试样最上部透水石表面露出水面,以保证试样中的气体及时排出,每2 h取出试样测量胀缩状况,且称重,至完全饱和时加湿停止。当干湿循环次数达到设定的总次数5次,或试样已完全破坏无法进行下一次干湿循环试验时视为崩解,停止试验。每次脱湿完成后,采用高分辨率相机对试样顶面拍照,拍摄在有日光灯的封闭室内进行,采用三脚架固定相机,以保证相机与试样间距和位置始终保持一致。

1.3 数据处理

由于相机拍摄的照片为RGB彩色图像,为了精确地提取出裂隙,以利于定量分析,需进行预处理工作。首先,利用Photoshop软件对获取的有关裂隙的高像素彩色图像进行倾斜矫正和区域选取预加工,并转化为灰度图像;然后运用Matlab软件对图像二值化处理和杂点去除,设置阈值将裂隙区转变为黑色,土块区转变为白色,并去除区域内孤立多余的黑点;最后,利用矢量图处理软件生成轮廓线矢量图和中心线矢量图,采用AutoCAD软件统计轮廓线矢量图的裂隙面积、宽度等参数,统计中心线矢量图的裂隙长度。试样和环刀之间的间隙不计为裂隙。

根据试样表面裂隙的几何特征,借鉴相关学者^[11,13]提出的裂隙面积率、裂隙长度比、裂隙平均宽度和表面积收缩率4种指标进行定量分析。采用式(1)~(4)分别计算裂隙面积率 δ_1 、裂隙长度比 δ_2 、裂隙平均宽度 δ_3 和表面积收缩率 δ_4 。

$$\delta_1 = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i \tag{1}$$

$$\delta_2 = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n l_i \tag{2}$$

$$\delta_3 = \frac{\bar{l}}{d} \tag{3}$$

$$\delta_4 = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \tag{4}$$

式中: A_i 为第*i*条裂隙所占面积,mm²;A为试样表面积,mm²; l_i 为第*i*条裂隙长度,mm; $\bar{l}$ 为裂隙平均长度,mm; $\bar{d}$ 为裂隙平均间距,mm; A_0 为试样初始表面积,mm²,即环刀内径表面积3 000 mm²; *n*为裂隙的总条数。

2 结果与分析

2.1 室温下试样宏观收缩量变化

由土壤收缩仪测定的宏观垂直收缩量得出对照组A试样在室温下的自由收缩时程曲线如图2所示。由图2可知,植被混凝土的收缩曲线可分为3个阶段:急剧收缩阶段、平缓收缩阶段和稳定阶段。急剧收缩阶段发生于试验初期2 h内,不同初始含水率的试样在此时段内快速收缩,其最大收缩量达0.4 mm。2 h后,试样收缩变缓,进入平缓收缩阶段,此时段内收缩量随时间增加而缓步增加。最后,试样收缩逐渐趋于停止,呈现出稳定状态,各试样收缩量达最大值。从不同初始含水率试样对比来看,最终收缩量随初始含水率的增加呈逐渐增大的趋势,其中在初始含水率19%~25%间相差不大。线缩率表示试样宏观垂直收缩量与初始高度之比,用百分数表示。计算得出初始含水率13%试样的最终线缩率最小,为6.25%;初始含水率43%试样的最终线缩率最大,达到13.35%。同时,随着初始含水率的增加,达到稳定阶段的时间也相应变长。其中初始含水率13%试样的收缩稳定时长为100 h,而初始含水率43%试样的收缩稳定时长则增加到180 h。这是由于相同尺寸的试样在同一环境下,其空气温度和湿度均相同,则收缩速率和水分的蒸发速度都

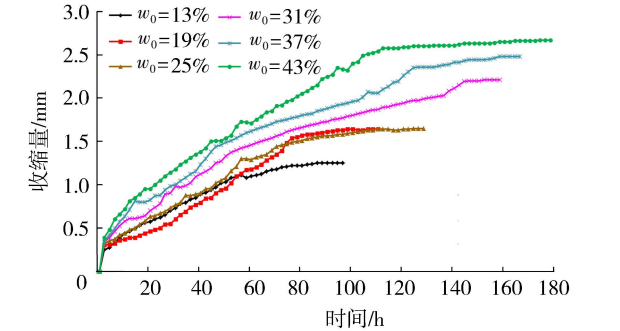


图2 对照组A不同初始含水率试样在室温下的自由收缩时程曲线

应相同,因此达到收缩稳定时长的时间与试样初始含水率成正比。

2.2 干湿循环下试样胀缩量变化

取平行组 B、C 试样胀缩量的平均值,得到干湿循环作用下植被混凝土胀缩时程曲线如图 3 所示。由图 3 可知,经历多次干湿循环后,植被混凝土试样的收缩量与膨胀量近乎相等,说明植被混凝土收缩或膨胀后无法恢复的变形量较小。其中无法恢复的变形量包括:①水泥水化后期的较小化学减缩量;②土体结构遭到破坏后难以恢复的变形。从不同初始含水率试样来看,初始含水率 13% 试样变形量最小,初始含水率 43% 试样变形量最大,收缩量与膨胀量均随初始含水率的增加而增加。由于初始含水率 13% 和 43% 试样在 192 h 后发生崩解破坏导致试样完整性受损,无法进行变形量的测定,故第 5 次干湿循环后无测量数据。前 24 h 时段初始含水率 43% 试样的变形量最大,为 4.58 mm;初始含水率 13% 试样变形量最小,为 1.95 mm,均明显大于图 2 中室温下对照组 A 试样的收缩值。

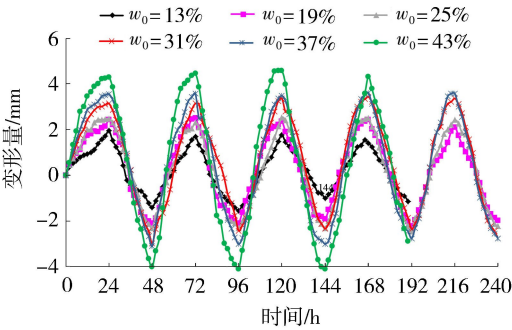


图 3 平行组不同初始含水率试样自由收缩及膨胀时程曲线

2.3 干湿循环下表面裂隙演化规律

图 4~7 为干湿循环后对照组 A 和平行组 B 试样的裂隙二值化图像,可以发现对照组 A 与干湿循环平行组 B 试样之间的差异巨大。室温下的对照

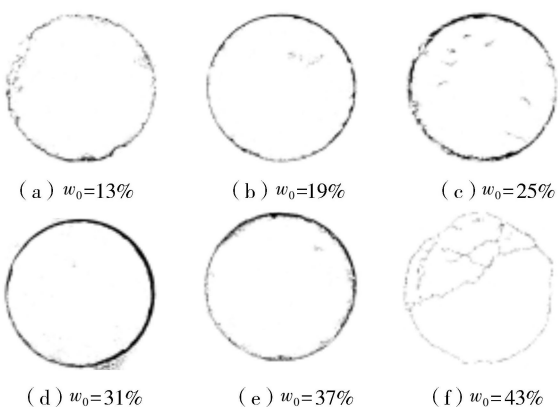


图 5 平行组 B 不同初始含水率试样在干湿循环 3 次时裂隙二值化图像

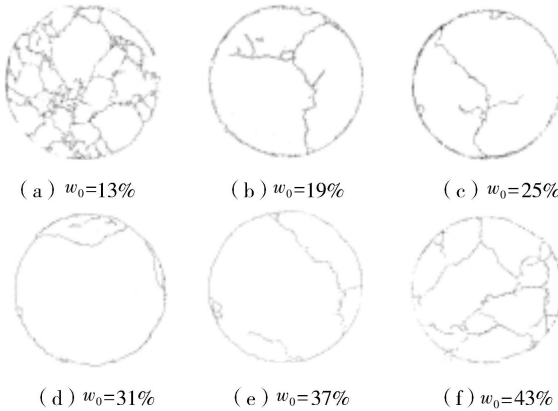


图 6 平行组 B 不同初始含水率试样在干湿循环 4 次时裂隙二值化图像

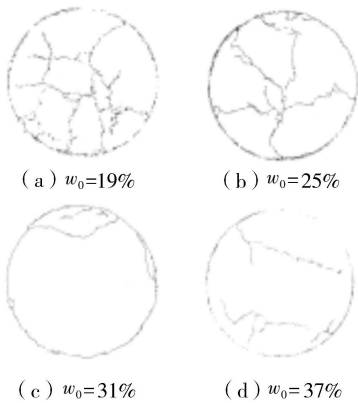


图 7 平行组 B 不同初始含水率试样在干湿循环 5 次时裂隙二值化图像

组 A 中,仅初始含水率 43% 试样在第 5 次干湿循环后出现细小裂隙,其他试样均未出现裂隙,但各试样与环刀均有不同程度的偏离,发生了体缩现象。干湿循环作用下的平行组 B 中初始含水率 43% 试样在第 2 次循环后便开始出现裂隙,其余初始含水率试样在 3 次循环后开始出现裂隙。裂隙的长度、宽度与面积均随着干湿循环次数的增加而增加,其中第 3~4 次循环间升幅最为明显。初始含水率 13% 和 43% 试样在第 5 次干湿循环后完全崩解,分解成

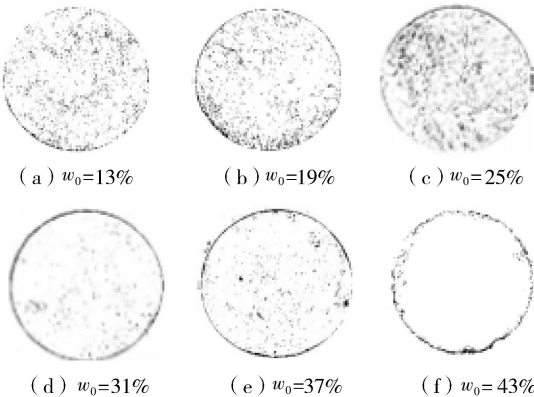


图 4 对照组 A 不同初始含水率试样在干湿循环 0 次时裂隙二值化图像

大量散块状;初始含水率 19% 和 25% 试样仅被裂隙分割成若干小块,亦产生大量裂隙,但整体性尚好;初始含水率 31% 和 37% 试样整体结构完整,仅产生少量裂隙,表现最佳。因此,植被混凝土表面裂隙度与含水率并非线性关系,初始含水率过低或过高,均易使植被混凝土发生湿胀干缩破坏。因此,边坡生态修复工程实施时,植被混凝土生态的初始含水率应控制在 $34\% \pm 3\%$ 之间,以增强工程的稳定性。

2.4 干湿循环下裂隙定量分析

干湿循环作用下裂隙平均宽度、面积率、长度比和表面积收缩率变化曲线如图 8 所示。裂隙平均宽度、裂隙面积率、裂隙长度比和表面积收缩率均随着干湿循环次数的增加而增大,并基本在第 4 次循环后趋于稳定。

由图 8(a)可见,初始含水率 13% 和 43% 试样的裂隙平均宽度在第 4 次干湿循环时达到峰值后试样破坏,而其他含水率试样的裂隙平均宽度逐渐趋于稳定。初始含水率 13% 试样的裂隙平均宽度峰值最大,达 0.23 cm,初始含水率 31% 试样的裂隙平均宽度峰值最小,为 0.12 cm。从图 8(a)和图 8(b)可见,裂隙面积率与裂隙平均宽度变化较为相似,经历 4 次循环后初始含水率 13% 和 43% 试样裂隙面积率达到峰值后试样破坏,而其他初始含水率试样裂隙面积率在 4 次或 5 次循环中趋于稳定。初始含水率 13% 试样的最终裂隙面积率最大,达 8.5%,初始含水率 31% 试样的最终裂隙总面积最小,仅为 2.4%。由图 8(c)可见,第 2 次循环时,仅初始含水率 43% 试样出现裂隙长度比,其他初始含水率试样

在第 3 次循环后才出现裂隙长度比。在第 4 次循环后,初始含水率 13% 和 43% 试样裂隙长度比达到峰值,其他初始含水率试样裂隙长度比逐渐稳定,第 5 次循环后初始含水率 31% 试样的裂隙长度比最小。从图 8(d)中可见,各初始含水率试样的表面积收缩率随着循环次数的增加逐渐增长,在前 3 次中增长迅速,随后减缓趋于稳定。其中,初始含水率 13% 和 43% 试样的表面收缩率明显高于其他初始含水率试样。初始含水率 31% 试样的表面收缩率最低,稳定性表现最佳,再次证明该含水率的植被混凝土稳定性高,适合在生产实践中运用。

3 讨论

3.1 材料成分的影响

由于植被混凝土的特殊性,在干湿循环作用下,其结构变化与各组分(种植土、水泥、有机物料、外加剂)的特性密切相关。由于种植土的质量占植被混凝土总质量的 80%,是主要组成部分,因此干湿循环下植被混凝土结构变化与种植土的水理性质密切相关。由于种植土中的亲水性矿物伊利石和蒙脱石质量占总质量的 18%,而伊利石和蒙脱石在饱和过程中会产生 40% ~ 60% 不均匀的膨胀变形^[18],导致植被混凝土内部的薄弱部位形成微裂纹和孔隙,引起了颗粒间的联结性减弱。随着干湿循环的反复进行,水分将微裂纹和孔隙作为迁移路径,反复侵蚀土颗粒和溶解部分黏土矿物,使得孔隙不断增加,最终导致裂隙出现和结构损伤。其次,水泥生成的水化产物也会影响植被混凝土的结构变化。研究表

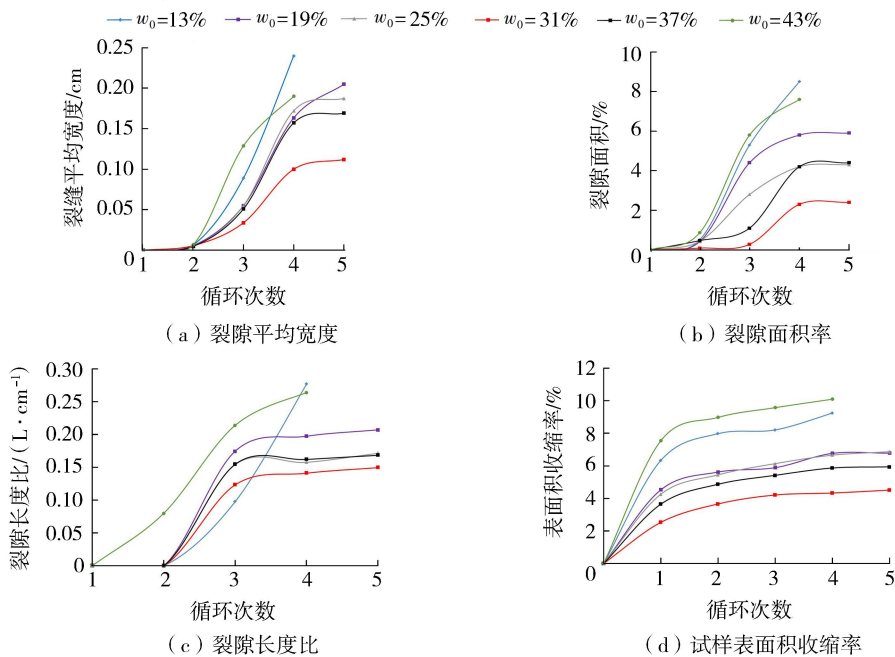


图 8 干湿循环下不同初始含水率试样裂隙平均宽度、裂隙面积率、裂隙长度比、试样表面积收缩率变化曲线

明,在脱湿过程中,水泥土内部会发生碳化反应,强度的主要提供者钙矾石晶体发生粉化解体,生成碳酸钙、硫酸钙等物质和较大的孔隙,导致强度丧失^[19]。再次,有机物料锯末虽然添入量不多,但其密度小,占植被混凝土固体总体积大,对其结构变化也有影响。Pedreno-Rojas 等^[20]发现木屑的干缩湿胀变形会引起复合材料的微观结构损伤和强度损失,证明锯末的干缩湿胀变形同样会引起植被混凝土结构损伤。最后,由于植被混凝土绿化添加剂含量较小,暂不考虑其影响。

3.2 常温与干湿循环下试样变化的对比分析

不同初始含水率试样在干湿循环下的收缩量均明显大于室温下试样的收缩量。由此可见,脱湿温度升高对收缩速率有明显的影响。因为较高的温度显著加快了植被混凝土的水分蒸发速度,增强了土体的干缩;另一方面,较高的温度可以促进水泥水化作用,增大了一定时间内水泥的化学收缩量。

在室温下,在试验初期 2 h 内,植被混凝土中的水泥化学收缩导致试样收缩量迅速增大。2 h 后,水泥的化学减缩效果减弱,此时整个试样的失水收缩占主导,收缩速率变缓,在土体温度稳定的情况下,水分的蒸发越来越缓慢,直至趋于稳定。而在干湿循环中,亲水性矿物的膨胀收缩变形、水泥的碳化和锯末的干缩湿胀变形的共同作用使植被混凝土内部结构的损伤随干湿循环次数的增加不断积累。3 次或 4 次干湿循环后,内部结构损伤积累到一定程度,逐步发生湿胀干缩破坏。

反复干湿过程中试样裂隙之所以增长,并最终趋于稳定,其实是试样表面和内部水分蒸发不均匀而导致应力的改变。在脱湿过程中,试样中的水分优先从试样的表层蒸发散失,并大大快于试样下层部分,导致试样内部与外部间存在一个含水量的梯度差值,致使上下部受力不均匀^[21],导致烘干时会出现上部受拉,下部受压的应力分布。当上部拉应力超过试样抗拉强度时,裂隙便随之产生。

3.3 初始含水率的影响

根据对照组 A 在室内下的自由胀缩试验可知(图 2),不同初始含水率试样在室温下收缩量的变化均不相同。而试样的收缩面积变化(图 8)比纯普通硅酸盐水泥变化^[22]要小得多。也就是说,在 7 d 标准养护后,水泥不是试样胀缩的主要影响因素。通过不同含水率对比来看,初始含水率 31% 试样的表面图片最完整,其裂隙面积率和长度均最低;由于水泥产生的化学收缩受初始含水率的影响,当初始含水率过低或过高时,植被混凝土试样发生湿胀干缩破坏程度均较大。这是因为初始含水率越大,在

干湿循环中上下部分间的含水率梯度也会较大,致使上下部受力相差越大^[22],不均匀收缩变明显,因此宏观上裂隙的发育程度也越大。同时初始含水率越大,锯末吸水膨胀量也会越大,线缩量也会越高。但初始含水率过低,试样水泥水化反应会不充分,土颗粒间粘结力变低,土体强度未达到最大值,试样失稳得较快。且试样加湿膨胀前含水率也低,此时易产生各种聚合结构,为水分的进入提供了较稳定的通道,又因为组分有机物料锯末的较强吸水性,因此在加湿过程中试样能大量吸水,使得膨胀率较大,所以过低或过高的初始含水率都会降低植被混凝土稳定性。

4 结 论

- a. 室温下,植被混凝土干缩过程依次出现急剧收缩阶段、平缓收缩阶段和稳定阶段;干湿循环过程中,试样收缩量与膨胀量近乎等量。
- b. 不同初始含水率的试样在干湿循环作用下均会产生裂隙,且裂隙平均宽度、长度及总面积均随循环次数增加而增大。
- c. 初始含水率是影响植被混凝土裂隙的关键因素,初始含水率过低或过高,均易使植被混凝土发生湿胀干缩破坏;初始含水率 31% 试样的稳定性最好,适合在生产实践中应用。

参考文献:

[1] 吴珺华,袁俊平,杨松,等. 膨胀土湿胀干缩特性试验 [J]. 水利水电科技进展,2012,32(3):28-31. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrink performance of expansive soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(3):28-31. (in Chinese))

[2] 许文年,夏振尧,周明涛,等. 植被混凝土生态防护技术理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[3] 许文年,夏栋,赵冰琴,等. 水电工程扰动区植被生态修复技术研究[M]. 北京:科学出版社,2017.

[4] 赵冰琴,夏振尧,许文年,等. 工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J]. 水利水电技术,2017,48(2):130-137. (ZHAO Bingqin, XIA Zhenyao, XU Wennian, et al. Review on research of slope eco-restoration technique for engineering disturbed area [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(2): 130-137. (in Chinese))

[5] 周明涛,杨森,秦健坤,等. 土壤裂隙研究的回顾与展望 [J]. 土壤通报,2017,48(4):988-995. (ZHOU Mingtao, YANG Sen, QIN Jiankun, et al. Review on the research of soil cracks [J]. Chinese Journal of Soil Science,2017,48(4):988-995. (in Chinese))

- [6] 周健,徐洪钟,胡文杰. 干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(增刊2): 152-156. (ZHOU Jian, XU Hongzhong, HU Wenjie. Impact of wetting-drying cycle effects on stability of expansive soil slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (Sup2): 152-156. (in Chinese))
- [7] 吴珺华,袁俊平,杨松,等. 干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 62-65. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrinking performance of expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33 (1): 62-65. (in Chinese))
- [8] WANG D Y, TANG C S, CUI Y J, et al. Effects of wetting-drying cycles on soil strength profile of a silty clay in micro-penetrometer tests [J]. Engineering Geology, 2016, 206: 60-70.
- [9] 周伟. 膨胀土脱湿全过程裂隙演化规律研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2011.
- [10] 袁俊平,杨国俊,王敏. 干湿循环下膨胀土裂隙 CT 试验研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(12):3509-3513. (YUAN Junping, YANG Guojun, WANG Min. CT study on the fissures of expansive soil during drying and wetting cycles [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(12): 3509-3513. (in Chinese))
- [11] 黎伟,刘观仕,姚婷. 膨胀土裂隙图像处理及特征提取方法的改进[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3619-3626. (LI Wei, LIU Guanshi, YAO Ting. Improvement of methods for crack image processing and crack feature extraction of expansive soil [J]. Rock & Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3619-3626. (in Chinese))
- [12] 褚卫军. 干湿循环作用下红黏土胀缩变形特性及裂缝扩展规律研究[D]. 贵阳:贵州大学,2015.
- [13] 张家俊,龚壁卫,胡波,等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(9): 2729-2734. (ZHANG Jiajun, GONG Biwei, HU bo, et al. Study of evolution law of fissures of expansive clay under wetting and drying cycles [J]. Rock & Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2729-2734. (in Chinese))
- [14] 曹树刚,孙传猛,郭平,等. 基于改进的 C-V 模型煤岩细观裂隙图像处理及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015,34(增刊1): 3074-3081. (CAO Shugang, SUN Chuanmeng, GUO Ping, et al. Image processing and its applications of meso-crack of coal based on modified C-V model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (Sup1): 3074-3081. (in Chinese))
- [15] 周明涛,胡欢. 冻融作用对植被混凝土抗剪强度的影响[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(2): 87-91. (ZHOU Mingtao, HU Huan. Effect of freeze-thaw action on vegetation-growing concrete shear strength [J]. Science of Soil & Water Conservation, 2014, 12(2): 87-91. (in Chinese))
- [16] 夏振尧,许文年,王乐华. 植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1719-1724. (XIAN Zhenyao, XU Wennian, WANG Lehua. Research on characteristics of early strength of ecological slope-protected base material of vegetation-growing concrete [J]. Rock & Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1719-1724. (in Chinese))
- [17] 许文年,王铁桥. 混凝土绿化添加剂:CN1358685[P]. 2002-07-17.
- [18] 邓华锋,方景成,李建林,等. 含水状态对红层软岩力学特性影响机理[J]. 煤炭学报,2017,42(8):1994-2002. (DENG Huafeng, FANG Jingcheng, LI Jianlin, et al. Mechanical properties of red-bed soft rock on saturated state [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 1994-2002. (in Chinese))
- [19] 周贤良,刘长武,冯波,等. 干湿循环作用对水泥基复合充填材料的影响[J]. 工程科学学报,2019(3):1-13. (ZHOU Xianliang, LIU Changwu, FENG Bo, et al. Effects of dry-wet circulation on cement-based composite filling materials [J]. Chinese Journal of Engineering,2019 (3):1-13. (in Chinese))
- [20] PEDRENO-ROJAS M A, MORALES-CONDE M J, RUBIO-DE-HITA P, et al. Impact of wetting-drying cycles on the mechanical properties and microstructure of wood waste-gypsum composites[J]. Materials,2019, 12 (11):11-18.
- [21] CAMILLIS M D, EMIDIO G D, BEZUIJEN A, et al. Effect of wet-dry cycles on polymer treated bentonite in seawater: swelling ability, hydraulic conductivity and crack analysis[J]. Applied Clay Science, 2017,142:52-59.
- [22] 黄伟,汪时机,程明书,等. 水泥改性膨胀土在侵蚀环境下的干湿循环效应研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2): 649-659. (HUANG Wei, WANG Shiji, CHENG Mingshu, et al. Effect of dry wet cycle on cement modified expansive soil under erosion environment [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018,37(2): 649-659. (in Chinese))

(收稿日期:2019-11-27 编辑:雷燕)

