

冻结温度对植被混凝土生态基材冻胀特性的影响

周明涛, 胡欢, 杨平, 许文年

(三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对高寒气候条件下, 因工程扰动造成的众多岩石裸露边坡亟待生态修复的现状, 选取植被混凝土这一典型人造复合生态基材为研究对象, 研究了冻结温度变化对其冻胀特性的影响。结果表明, 植被混凝土作为弹塑性材料, 在试验设定的负温环境中均将产生冻胀现象, 其冻胀历时随冻结温度的升高逐渐增大, 而冻胀率随冻结温度的降低呈极为显著的线性减小趋势; 同一冻结温度条件与冻胀变形稳定时, 在植被混凝土中将形成近似稳定的温度场, 且试样中的温度降低幅度随着植被混凝土与冷源距离的增大逐步减弱; 冻结温度场将明显改变水分在植被混凝土内的分布状况, 冻结温度越低越不利于试样中水分的自由迁移。

关键词: 冻结温度; 植被混凝土; 生态基材; 冻胀

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0253-04

中图分类号: P642.5, U417.2

Influence of Freezing Temperature on Frost Heave Characteristics of Vegetation Growing Bases of Concrete

ZHOU Ming-tao, HU Huan, YANG ping, XU Wen-nian

(College of Civil Engineering & Architecture, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: In the frigid area, the slope disturbed by the engineering projects was exposed with rocks, and needed ecological restoration urgently. Vegetation growing concrete chosen to be the typical compounded growing base material for the study to explore the influence of the freezing temperature on frost heave characteristics. The results show that as a elastic plastic material, all the vegetation growing concrete came up with frost heave under condition of given negative temperature, the development duration of frost heave increased with the rising of the freezing temperature while frost heave decreased slightly with the dropping of it. Under the same freezing temperature and the time of stable freezing, the approximate steady temperature field in the vegetation growing concrete was formed and the temperature drop gradually decreased with the increase of the distance between vegetation growing concrete and the source of coldness. Freezing temperature field significantly altered the moisture distribution in the growing base of concrete where the lower the temperature, the less freely the moisture moved.

Keywords: freezing temperature; vegetation growing concrete; growing base material; frost heave

高寒高海拔地区能源与交通的开发和利用给原本极端脆弱的区域生态环境带来毁灭性的破坏, 因工程扰动造成的众多裸露边坡亟待生态修复。针对这方面的研究与工程实践, 国内尚处于起步阶段, 仅有少许研究对高寒气候条件下人工生态基材的基本物理性质(自然密度、含水率、空隙率、比重、pH 值、最大持水量)、养分含量(全氮、有效磷、有效钾、有机质)及植物生长状况(发芽率、群落组成、根系)作出了测试和评价^[1-4]。当温度低至一定条件时, 含水物体产

生冻结是自然界必然现象, 生态基材也难所避免。由于冻结过程中水的相变影响, 生态基材的体积发生膨胀, 并引起内部结构不断变化, 伴随将产生一系列的微裂缝^[5-7]。作为弹塑性材料, 生态基材的这种微裂缝在冰融化后绝大部分是不可逆的, 从而严重影响了自身结构的稳定性和耐久性。植被混凝土(vegetation-growing concrete, VGC)是典型的人造复合生态基材, 其固体部分由 4 种原材料按一定比例混合而成(植生土、水泥、腐殖质和植被混凝土绿化添加剂),

收稿日期: 2012-11-12

修回日期: 2013-01-22

资助项目: 三峡大学博士启动基金“植被混凝土生态基材胀缩恢复性研究”(KJ2011B006); 国家自然科学基金项目“植被混凝土生态防护基材微生物活性的变化机制与增强方法的研究”(51278281)

作者简介: 周明涛(1979—), 男(汉族), 湖北省保康县人, 博士, 主要从事边坡生态防护及植被修复技术方面的研究。E-mail: zmt@ctgu.edu.cn。

该生态基材自发明以来,已在温度条件较高的国内众多地区得到了广泛应用,且取得了巨大的生态、社会和经济效益^[8]。因此,选取植被混凝土生态基材为研究对象,探讨冻结温度变化对其冻胀特性的影响,旨在为高寒高海拔地区陆地边坡受损植被的生态修复提供技术基础。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

前人研究表明,当温度条件高于冻结起始温度时,大多数土体不会发生冻结现象(大多数土体的冻结起始温度位于 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近)^[5,9-10]。同时,为了使试验结果具有较强的普遍性和实用性,再结合我国高寒地区的气候温度状况,试验选取 $-5, -10, -15$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 共 4 个不同水平的冻结温度值作为试验影响水平。供试装置由混凝土冻融试验机改装而成(图 1)。试验中关闭补水系统进出口,控制试样的含水率为 27% 不变;调整底板温度为试验选取的冻结温度值($-5, -10, -15$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$),并将顶板温度始终控制在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,让生态基材试样在无压且封闭的环境中由下而上单向恒温自由冻结,由数据采集仪和电子计算机自动连续记录试样的高度变化值和热敏电阻温度计读数;当试样的高度位移变化量在 2 h 内小于 0.01 mm 时,表明植被混凝土试样已冻胀,停止单次试验监测。试验中,每一冻结温度梯度分别进行 5 次平行试验。

参照《土工试验方法标准(GB/T50123—2002)》^[11],将植被混凝土试样轴向冻胀伸长量与试样冻结前高度

的比值定义为其冻胀率,用百分数表示(公式 1)。

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_f} \times 100\% \quad (1)$$

式中: h ——冻胀率(%); Δh ——试验期间总冻胀量(mm); H_f ——冻结深度(mm),指试验中试样冻结前的初始高度,不包括冻胀量。

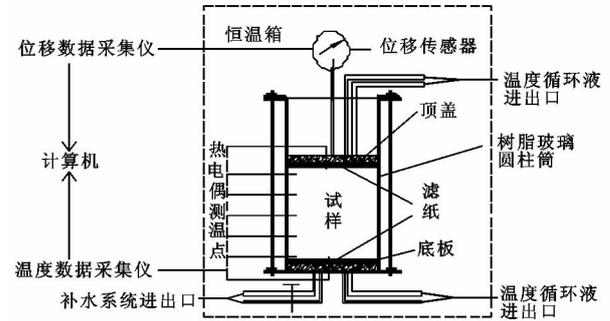


图 1 试验测试装置

1.2 供试材料及处理

供试植生土取自宜昌市区某建筑工地,其主要物理指标详见表 1。天然土料取回后,经晾晒、捣碎,并过 0.5 mm 细筛筛分后储存备用。常用的腐殖质有酒糟、锯末、秸秆、稻壳等,本试验采用木材加工厂生产的实木锯末为腐殖质,在 $103 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中干燥到其质量不再变化时,再过 2 mm 细筛筛分,以剔除体积较大的木屑。植被混凝土绿化添加剂为三峡大学的发明专利,为宜昌绿野环保工程有限责任公司生产的 LY-2 型产品。水泥为从市场购置 32.5R 普通硅酸盐水泥。试验用水采用宜昌市自来水公司供应的普通自来水。

表 1 天然土的主要物理指标

天然密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/%	塑限/%	液限/%	塑性指数	液性指数
1.37	27.3	22.7	36.4	13.7	0.34

植被混凝土试样属于二次重塑土样,其制备方法与过程遵循植被混凝土生态护坡技术设计规程^[7]及《土工试验方法标准(GB/T50123—2002)》中 3.1.6 条内容规定^[11];将供试原材料按比例(表 2)均匀混合后,加自来水适量,使其呈泥状;将泥状混合物在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的潮湿环境中静置 24 h,使原材料混合后化学反应充分,以消除该反应所产生的体积变化对试验结果的影响。

将泥状生态基材装入上述试验装置的树脂玻璃筒内,加压固结排水,直至达到试验设计的含水率 27% 时为止(含水率与要求含水率之差不大于 $\pm 1\%$);将试样高度修正到 100 mm。

表 2 植被混凝土原材料配比

原材料	植生土	水泥	有机质	植被混凝土绿化添加剂	水
干质量	100	10	8	5	适量

注:数据为质量比。

2 结果与讨论

2.1 植被混凝土冻胀时程曲线

图 2 为植被混凝土试样在不同冻结温度条件下的冻胀时程曲线。从图 2 可以看出,在冻结温度环境中,植被混凝土试样体积最终都有所增大,均出现了不同程度的冻胀现象。但是当冻结温度较高($-5,$

-10℃)时,其冻结初期却存在一段明显的“冻缩”演变历程,即植被混凝土试样的体积在冻结初期先减小,而后才逐渐膨胀。原因为当冻结温度较高(-5,-10℃)时,试样中形成的温度梯度较小,冰结锋面发展速率也相对较慢,因此在冻结初期所产生的负孔隙水压力将导致生态基材中有效应力增大,并引起试样体积减小,当这种体积减小量大于冻结所造成的体积增大量时,“冻缩”现象便会产生。随着冻结时间的推移,冻结所造成的体积增大量进一步发展,且当其超过上述体积减小量时,冻胀现象才会逐步展现出来;但是,当冻结温度较低(-15,-20℃)时,试样中的温度梯度较大,冰结锋面推进速率也较快,孔隙水以原位冻结为主,冻结初期由负孔隙水压力所引起的体积减小量很快就被较大的冻胀量所抵消,以致负位移很小或几乎没有负位移,因此难以观测到“冻缩”现象。

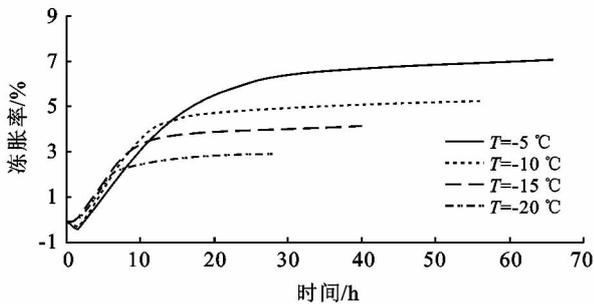


图 2 植被混凝土冻胀时程曲线

从图 2 还可以看出,植被混凝土的冻胀历时与冻结温度大小有较大关系,即当冻结温度较低时,试样发生冻胀的时间较短,随着冻结温度的升高,试样发生冻胀的时间逐步增大。其原因是由于在其它条件均相同的条件下,冻结温度大小直接影响植被混凝土的冻胀机理与冻结速率^[12-13];同上所述,冷端温度较低(-20,-15℃)的冻结过程将在试样中形成较大的温度梯度,冻结锋面推进速度较快,结果导致植被混凝土内暖端部分的自由水分尚未迁移便已冻结,冻结速率相对较快,因而试样冻胀发生时间较短;随着冻结温度的逐渐升高(-10,-5℃),植被混凝土试样中的温度梯度逐渐变小,冻结锋面推进速度减慢,生态基材中自由水分迁移量增大,冻结速率随之逐渐下降,导致试样发生冻胀的时间增大。

2.2 植被混凝土冻胀率与冻结温度的关系

图 3 为植被混凝土冻胀率与冻结温度之间的线性关系。从图 3 可以看出,在本试验设定的负温环境下,随着冻结温度的降低,植被混凝土的冻胀率呈显著线性减小趋势($p < 0.01$)。原因在于当冻结温度较低时,试样内孔隙水以原位冻结的方式成冰,其分凝

冰层细小且分布均匀,孔隙总体积不会产生较大变化,同时未冻水的存在也将其体积的扩大限制在 9% 的范围之内,因而冻胀率较小;随着冻结温度的升高,原位冻结的胶结成冰逐渐被分凝成冰的方式所代替,试样中即形成一系列的分凝冰层且逐渐变厚,伴随之也将出现众多细微裂缝,因此试样冻胀率相应较大。

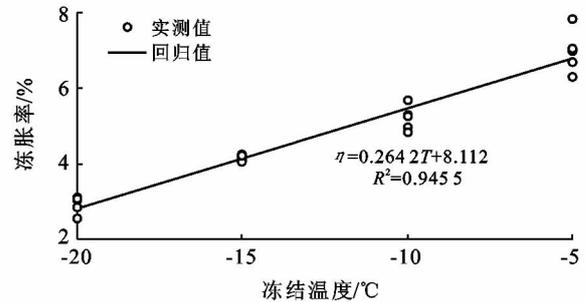


图 3 植被混凝土冻胀率与冻结温度关系

2.3 植被混凝土冻胀时温度场分布状况

图 4 为冻结温度在 -5,-10,-15,-20℃ 条件下,植被混凝土生态基材冻胀(冻结稳定)时温度场分布曲线。由图 4 可以看出,试样冻胀稳定所需时间与冻结温度大小有较大关系,冻结温度低,所需时间短,冻结温度高,所需时间长,冻结温度从 -5℃ 降低到 -20℃,两者冻胀所需时间的差异接近 2.5 倍,这与前面冻胀时程曲线描述的结果一致;同一冻结温度条件下,植被混凝土中的温度主要受控于其与冷源之间的距离,冷源近端处,温度下降幅度相对较大,随着植被混凝土与冷源距离的增大,其温度虽然也逐渐降低,但下降幅度明显减小;冻结温度较低时,试样上端的温度反而高于冻结温度较高时试样上端的温度,这主要与冻胀稳定所需时间的长短有关系,即冻结温度较高时,试样受冷源影响持续时间长,从而导致植被混凝土在不同高度之间的温度差异也相对较小;当冻胀变形基本稳定后,大部分植被混凝土处于低于 -1℃ 的温度环境,试样温度变化缓慢,能量处于动态平衡状态,此时植被混凝土中形成近似稳定的温度场。

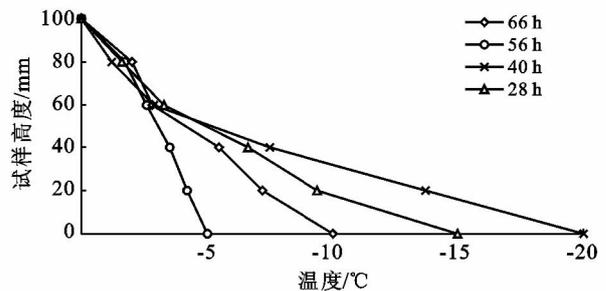


图 4 植被混凝土冻胀时温度场分布曲线

2.4 植被混凝土冻胀时水分迁移特征

从图 5 可以看出,冻结前植被混凝土初始试样内的含水率是均匀分布的,但在经历冻结过程后,含水率在垂直方向上的分布已发生了明显变化。试样上部约 35 mm 范围内的含水率减小,出现“失水”现象,且这种现象随着植被混凝土与冷源距离的增大愈加明显;试样下部约 55 mm 范围内的含水率增加,且在距离冷源 35~45 mm 范围增量达到最大值(如在 -5℃条件下,冻胀试样在 45 mm 处的含水率达到 30.08%),但各试样冻胀后在冷源处的含水率仅有少许增加;冻结温度大小对水分迁移量有一定影响,即冻结温度越低越不利于试样中水分的自由迁移。其原因在于在植被混凝土冻胀试验中,在试样两端(底端 -5, -10, -15, -20℃,顶端 0℃)突然施加恒定不变的温度条件,由于热能的转换与传输,促使试样从底端开始冻结,冻结锋面自下而上逐步推进,植被混凝土试样下端由冻结前的生态基材—水共处体系转换为冻结中的生态基材—水—冰体系,而试样顶端大多数时间保持在未冻状态;由于冻结区的未冻水势能要远小于未冻区的水势能,因此,水分从上部未冻区向冻结界面和下端已冻区域不断迁移,并形成新的冻结缘和分凝冰层^[14],结果导致试样中水分重新分布,并出现下端含水率大于上端含水率的现象;冻结温度低,植被混凝土试样中冰结锋面发展速率快,冻胀历时短,试样中自由水分迁移量自然就小一些。

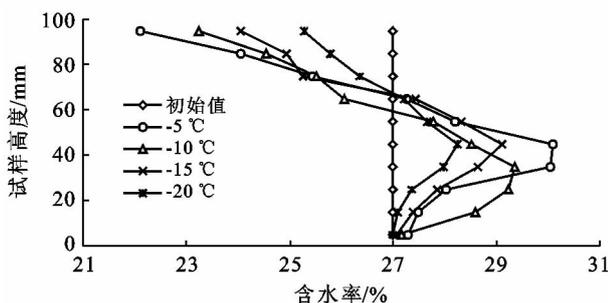


图 5 植被混凝土冻胀前后含水率剖面

3 结论

(1) 当冻结温度低于冻结起始温度时,植被混凝土将产生冻胀现象,其冻胀历时随着冻结温度的升高逐渐增大,且在冻结温度较高的环境中,冻结初期试样存在一段明显的“冻缩”演变历程,而后逐渐膨胀。

(2) 植被混凝土的冻胀率与试验选取的冻结温度密切相关正相关,随着冻结温度的降低,冻胀率呈极为

显著的线性减小趋势($p < 0.01$)。

(3) 同一冻结温度条件且冻胀变形稳定时,植被混凝土中将形成近似稳定的温度场,试样中的温度降低幅度随着植被混凝土与冷源距离的增大明显减弱。

(4) 冻结温度场将明显改变水分在植被混凝土内的分布状况,冻结温度越低越不利于试样中水分的自由迁移。

[参考文献]

- [1] 徐华,李天斌,周雄华,等. 高寒地区 JYC 生态基材护坡现场试验及测试研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 799-804.
- [2] 徐华. 高寒高海拔地区生态护坡基材及其在岩质边坡中的应用研究[D]. 四川成都:成都理工大学, 2006.
- [3] 江勇顺,李天斌,周雄华,等. 国道 317 线鹫峰山隧道工程引道生态护坡方案设计[J]. 水文地质工程地质, 2006, 4(8): 107-110.
- [4] 黄晓乐,周正军,许文年. 植被混凝土基材 2 种草本植物根—土复合体抗剪强度与根系分形特征研究[J]. 三峡大学学报:自然科学版, 2012, 34(2): 59-62.
- [5] 崔托维奇 H A. 普通冻土学[M]. 张长庆,朱元林,译. 北京:科学出版社, 1985.
- [6] 穆彦虎,马巍,李国玉,等. 冻融作用对压实黄土结构影响的微观定量研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1919-1925.
- [7] Wang Dayan, Ma Wei, Niu Yonghong, et al. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1): 34-43.
- [8] 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.
- [9] Everett D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. Transaction of the Faraday Society, 1961, 57(2): 1541-1551.
- [10] Dieter E. Pore-water pressures in freezing and thawing fine-grained soils[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1996, 10(2): 77-92.
- [11] 中华人民共和国国家标准. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
- [12] 苏谦,唐第甲,刘深. 青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 2990-2994.
- [13] 许健,牛富俊,牛永红,等. 重塑黏质黄土冻胀敏感性试验分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1): 24-30.
- [14] Bing Hui, He Ping. Frost heave and dry density changes during cyclic freeze-thaw of a silty clay[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2009, 20(1): 65-70.