

植被混凝土生态基材冻融效应试验研究

周明涛, 杨平, 胡欢, 许文年

(三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:以植被混凝土生态基材为研究对象,探讨了冷端温度、含水率、植生土类型及融化温度 4 个因素对其冻融效应的影响。结果表明:各因素对植被混凝土冻融效应影响的强弱顺序为植生土类型>含水率>冷端温度>融化温度;随冷端温度升高或含水率增大,植被混凝土的冻胀率与融沉系数均显著增大;其它条件都相同时,黏土配置的植被混凝土在冻融效应上比砂土表现的更为敏感;融化温度对植被混凝土融沉系数的影响微弱,且无规律可循;冻胀与融沉过程对植被混凝土耐久性的破坏主要体现在内部的微观结构上,冻融双重作用对植被混凝土的体积变化影响并不显著;以冷端温度和含水率为影响因素所建立的综合预报模型拟合度好,可有效预测植被混凝土冻胀与融沉变形量。

关键词:含水率;冷端温度;融化温度;植生土;植被混凝土

中图分类号:TU443

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)02-0282-06

Experimental Study on Freezing and Thawing Actions of Vegetation-growing Concrete Ecological Base Material

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

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

Abstract: As the experimental research object, the vegetation-growing concrete ecological base material was taken to study its freezing and thawing actions caused by freezing end temperature, water content, soil type and thawing temperature. The results showed that the sequence of influence factors on the vegetation-growing concrete freezing and thawing actions from strong to weak level was soil type, water content, freezing end temperature and thawing temperature. The frost heave ratio and thawing settlement coefficient of the vegetation-growing concrete increased significantly with the rise of freezing end temperature or water content. Under the same conditions, the freezing and thawing actions of the vegetation-growing concrete composed with clay is more sensitive than that composed with sand. The impact of thawing temperature on the vegetation-growing concrete thawing settlement coefficient was very weak, and it was no rules to be observed. There were little changes in volume after a complete process of frost heave and thawing settlement, while the durability of the vegetation-growing concrete was mainly revealed through the internal microstructure. The comprehensive prediction models set up with freezing end temperature and water content had good fitting degree, which may effectively predict distortions when the vegetation-growing concrete was exposed to the condition of frost heave and thawing settlement.

Key words: water content; freezing end temperature; thawing temperature; plant generate; vegetation-growing concrete

高寒高海拔地区能源与交通的大力开发与建设,给原本极端脆弱的区域生态环境带来了毁灭性的破坏,工程扰动毁损了大面积的原有边坡植被,所造成的众多岩石裸露边坡亟待植被修复。当前,修复岩石边坡植被的常用方法是先在坡面营造植物生长的土

壤环境,而后逐步进行生态修复,这种人造土壤即为生态基材。含水物体低温冻结与升温融化是自然界的必然现象,生态基材也难以避免。冻融过程中,由于水的相变影响,生态基材的内部结构不断变化,并引起体积发生胀缩演替,伴随将产生一系列的微裂

缝^[1-2]。生态基材为弹塑性材料,微裂缝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。针对土壤的冻融特性研究,当前探讨领域几乎全部集中在作为建筑基础或材料的天然土与混凝土^[3-7],而对营造植被生境的生态基材,仅有少数试验测试和评价了高寒气候条件下该材料的基本物理性质及养分含量等状况^[8-9],至今尚未发现冻融循环对其冻胀率、体积变化、结构变形的相关报道。

植被混凝土(vegetation-growing concrete,简称 VGC)是典型的人造复合生态基材,其固相部分由四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。该生态基材自发明以来,已在温度条件较高的众多地区得到了广泛应用,且取得了巨大的生态、社会 and 经济效益^[9]。因此,本文以植被混凝土生态基材为研究对象,探讨其不同冷端温度、含水率、植生土类型及融化温度条件下的冻融效应状况,旨在为高寒高海拔地区岩石裸露边坡的生态修复提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验设计

(1) 试验影响因素及水平。低温和水分是万物产生冻结的必要条件,因此冷端温度与含水率为冻融试验的必选影响因素。植被混凝土中植生土的干质量约占 80%,是植被混凝土生态基材的主要组成成分,其性质是反映植被混凝土冻融效应的重要指标,故植生土类型也是该试验的影响因素之一。此外,融沉过程是一种伴随着冰的融化而发生的融化现象,只有当冻土温度上升到某一临界值,且冰晶吸收足够的热量后,才会实现固相冰向液态水的转化,所以试验还选取融化温度作为影响因素。

对于入选影响因素试验水平的设置,综合考虑了土体冻融的相关研究^[10]、冻融试验装置的性能、试验结果的普遍性和实用性以及我国高寒地区的温度状况等条件,试验水平具体设置为:冷端温度(−5℃, −10℃, −15℃, −20℃)、含水率(自来水质量占植被混凝土干质量的百分比:24%, 27%, 30%, 33%)、植生土类型(黏土、砂土)和融化温度(2℃, 5℃, 10℃, 20℃)。

(2) 主要试验设备及工作原理。本试验的主要供试装置由混凝土冻融试验机改装而成,如图 1 所示。试验中关闭补水系统进出口,调整底板温度为试验选取的冷端温度和融化温度值,并将顶板温度一直控制在 0℃,让植被混凝土试样在无压且封闭的环境中由下而上单向恒温自由冻结与融化。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。当试样高度位移变化量在 2 h 内小于 0.01 mm 时,可认为植被混凝土试样已冻结或融化变形稳定,停止单次试验监测。试验中,相同条件的植被混凝土单组试样各进行 5 次平行试验,结果取其平均值。

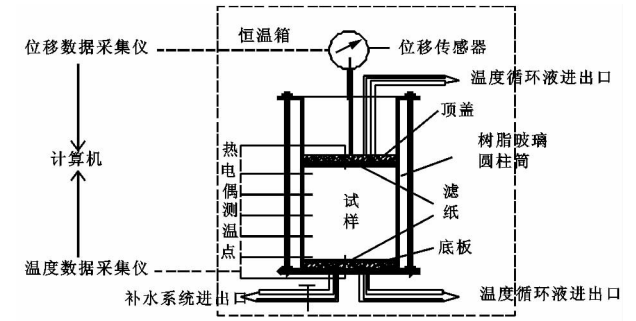


图 1 试验测试装置

(3) 试验评价指标。本试验分为冻胀与融沉两大过程,其评价指标分别用冻胀率与融沉系数来表征,分别见式(1)和式(2)。植被混凝土冻胀率计算公式:

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_f} \times 100\% \tag{1}$$

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

植被混凝土融沉系数计算公式:

$$\alpha_0 = \frac{\Delta h_0}{h_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中:α₀——融沉系数(%);Δh₀——试验期间融化总下沉量(mm);h₀——试样解冻融化前的高度,亦即试样冻结稳定后的高度,包括冻胀量(mm);试验中为植被混凝土试样冻结前的初始高度与冻胀伸长量二者数值之和。

1.2 供试材料及处理

植生土:供试植生土取自宜昌市区某建筑工地,依据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)^[11]将其分为砂土和黏土两类。天然土料取回后,经晾晒、捣碎、筛分后储备备用。

腐殖质:采用木材加工厂生产的实木锯末,在(103±2)℃的烘箱中干燥到其质量不再变化时,再过 2 mm 细筛筛分,以剔除较大体积的木屑。

植被混凝土绿化添加剂:该材料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。水泥是从市场购置的 32.5R 普通硅酸盐水泥。水为采用宜昌市自来水公司的普通自来水。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^[9]及《土工试验方法标准》(GB/T50123—2002)中的内容规定^[12]:将供试原材料按比例(表 1)均匀混合后,加自来水适量,使其呈泥状;将泥状混合物在 20℃ 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;将泥状植被混凝土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(含水率与要求含水率之差不大于±1%);将试样高度修正到 100 mm。

表 1 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:表中数据为质量比。

2 结果与分析

2.1 植被混凝土冻胀试验

植被混凝土冻胀是指当温度下降到其内水的结晶点时,由于热量的传递,将会形成许多冰夹层、冰镜体等形式的冰侵入体,从而引起生态基材颗粒发生相对位移,并伴随产生均匀或不均匀隆起、鼓包、开裂等而导致体积增大的现象。冻结过程中,由于冷生作用的影响,植被混凝土的孔隙特征、颗粒结构形态及联结状态都将发生较大变化,并促使生态基材骨架结构体系趋向疏松,其结果必将严重影响水泥与植生土等胶结反应所产生的化合物的稳定性。冻胀试验以三因素四水平正交的形式进行,具体结果如表 2 所示。

由表 2 中数据可见,植被混凝土冻胀效应最明显的状况为采用黏土配制,冷端温度在-10℃、含水率为 33%时,该条件下植被混凝土冻胀率达到 9.52;而冻胀效应表现最为微弱的最优组合出现在冷端温度为-20℃、含水率为 24%时,且采用砂土配制的植被混凝土,其相应的冻胀率仅为 1.05,约为试验中冻胀率最大值的 1/10。以上结果表明,试验所选取的因素及水平对植被混凝土冻胀特性的影响较大。

K_i 值的分布状况(表 2)显示,随着冷端温度的升高与含水率的增大,植被混凝土的冻胀率均显著增大($P<0.05$);当其它条件相同时,砂土配置的植被混凝土比黏土配置的植被混凝土的冻胀率要小的多($P<0.01$),同等条件下后者更容易发生冻胀破坏。从 K_i 值的分布状况可预测,对冻胀表现最不敏感的最优组合是在冷端温度为-20℃、含水率为 24%时,砂土所配制的植被混凝土,此组合与相应的可见最优组合一致。

表 2 冻胀试验数据汇总表

| 试样编号 | 因素/水平 | | | 冻胀率/% |
|-------|--------|-------|------|-------|
| | 冷端温度/℃ | 含水率/% | 植生土 | |
| DZ—1 | —5 | 24 | 黏土 | 5.05 |
| DZ—2 | —5 | 27 | 砂土 | 2.56 |
| DZ—3 | —5 | 30 | 黏土 | 8.19 |
| DZ—4 | —5 | 33 | 砂土 | 2.95 |
| DZ—5 | —10 | 24 | 砂土 | 1.37 |
| DZ—6 | —10 | 27 | 黏土 | 5.25 |
| DZ—7 | —10 | 30 | 砂土 | 1.75 |
| DZ—8 | —10 | 33 | 黏土 | 9.52 |
| DZ—9 | —15 | 24 | 黏土 | 3.99 |
| DZ—10 | —15 | 27 | 砂土 | 1.76 |
| DZ—11 | —15 | 30 | 黏土 | 5.07 |
| DZ—12 | —15 | 33 | 砂土 | 2.04 |
| DZ—13 | —20 | 24 | 砂土 | 1.05 |
| DZ—14 | —20 | 27 | 黏土 | 2.89 |
| DZ—15 | —20 | 30 | 砂土 | 1.63 |
| DZ—16 | —20 | 33 | 黏土 | 5.09 |
| K_1 | 4.69 | 2.87 | 5.63 | |
| K_2 | 4.47 | 3.12 | 1.89 | |
| K_3 | 3.22 | 4.16 | | |
| K_4 | 2.67 | 4.90 | | |
| R | 2.02 | 2.04 | 3.74 | |

冷端温度升高,植被混凝土冻胀率增大的原因在于:当冷端温度较低时,植被混凝土内孔隙水的成冰方式以原位冻结为主,相应地其分凝冰层分布均匀且很细小,此时孔隙总体积变化不大,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;随着温度的逐渐升高,试样中水由原来胶结成冰作用占主导地位逐渐向分凝成冰作用占主导地位过渡,植被混凝土中形成一系列相间隔的分凝冰层并逐渐变厚,且主要分布在试样下端,结果导致试样中出现一些细微的裂缝,其体积增大量大大超过了冻结前植被混凝土中的孔隙,因此试样冻胀率相应较大^[13]。含水率增大,植被混凝土冻胀率增大的原因在于:含水率的大小与冻结过程中产生的分凝冰数量之间存在较大关系,当含水率较小时,冻结没有大量的分凝冰,植被混凝土体积增大不明显,因而冻胀率较小;随着含水率的增大,冻结过程中产生的分凝冰数量亦会增大,试样冻胀率相应较大^[14]。

砂土配置的植被混凝土冻胀率比黏土小的原因在于:黏土颗粒细小,表面积大,矿物成分亲水性强,能结合较多的结合水,结合水膜厚,冻结过程中水分迁移量大,因此其冻胀效应明显;相对黏土而言,砂土矿物颗粒较大,表面积小且粒间黏聚力较小,很难形

成薄膜或毛细结构,因而单向冻结温度场中水分迁移机制减弱,所以其冻胀率一般较小^[2,15-16]。

极差 R 分析结果(表 2)显示,对植被混凝土冻胀效应影响最为强烈的因素为植生土的类型,其次为含水率,而冷端温度对植被混凝土冻胀效应的影响仅稍逊于含水率,二者之间区别不大。植生土类型为关键影响因素的原因在于:植被混凝土中植生土占有超过 80% 的份额,是复合材料中最主要的组成成分,虽然有水泥、有机质等其它材料的掺入,但这些材料由于其所占比例相对较小,对植被混凝土冻胀特性的影响力相对较弱,故而从原材料组成分析可知,植被混凝土的冻胀特性在很大程度上是植生土的自身特性起主导作用。

2.2 植被混凝土融沉试验

植被混凝土融沉是指当温度上升到某一界定值时,伴随着其内冻结面与冰侵入体的消融,冰晶转化为水,体积减小,同时基材颗粒在自重的作用下沉陷压实,体积收缩,二者共同作用最终导致体积减缩破坏。从冻土学的基本理论可知,大多数冻土体的融沉量一般由融化沉降与压缩沉降两部分组成^[11],但冻结的植被混凝土在融沉时却存在较大差别。由于植被混凝土的主要功能是营造边坡植物生长环境,实际应用中所承受的外部荷载作用力很小,由此所引起的压缩沉降几乎为零,因而其融沉量仅由融化沉降单独构成。融沉过程中,当植被混凝土内固态冰全部融化为液态水时,冻结产生的冻胀力便消失殆尽,基材颗粒将以不同的下沉组合方式重新组合。融沉试验以四因素四水平正交的形式进行,具体结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出,植被混凝土融沉效应最明显的状况为采用黏土配制,冷端温度在 -10°C 、含水率为 33%、融化温度为 10°C 时,其与冻胀效应最明显时的条件一致,该条件下植被混凝土融沉系数达到 9.25,而对融沉效应表现最为微弱的可见最优组合出现在冷端温度为 -20°C 、含水率为 27%、融化温度为 10°C 时,且采用砂土所配制的植被混凝土中,其相应的融沉系数仅为 0.98,远小于试验中融沉系数的最大值。以上结果表明,试验所选取的因素及水平对植被混凝土融沉特性的影响较大。

K_i 值的分布状况(表 3)显示:冷端温度、含水率及植生土类型对植被混凝土融沉系数的影响同其对冻胀率的影响规律一致;融化温度对植被混凝土融沉系数的影响微弱($P=0.433>0.1$),且波动不定。从 K_i 值的分布状况可预测,对融沉表现最不敏感的最优组合是在冷端温度为 -20°C 、含水率为 24%、融化温度为 20°C 时,砂土所配制的植被混凝土。

表 3 融沉试验数据汇总

| 试样 编号 | 因素/水平 | | | | 融沉系 数/% |
|----------|------------------------------|------------------------------|-----------|------|------------|
| | 冷端温 度/ $^{\circ}\text{C}$ | 融化温 度/ $^{\circ}\text{C}$ | 含水率/ % | 植生土 | |
| RC—1 | —5 | 2 | 24 | 黏土 | 6.27 |
| RC—2 | —5 | 5 | 27 | 砂土 | 2.51 |
| RC—3 | —5 | 10 | 30 | 黏土 | 8.03 |
| RC—4 | —5 | 20 | 33 | 砂土 | 2.38 |
| RC—5 | —10 | 2 | 27 | 黏土 | 5.20 |
| RC—6 | —10 | 5 | 24 | 砂土 | 1.11 |
| RC—7 | —10 | 10 | 33 | 黏土 | 9.25 |
| RC—8 | —10 | 20 | 30 | 砂土 | 1.65 |
| RC—9 | —15 | 2 | 30 | 砂土 | 1.55 |
| RC—10 | —15 | 5 | 33 | 黏土 | 8.41 |
| RC—11 | —15 | 10 | 24 | 砂土 | 1.00 |
| RC—12 | —15 | 20 | 27 | 黏土 | 4.28 |
| RC—13 | —20 | 2 | 33 | 砂土 | 1.55 |
| RC—14 | —20 | 5 | 30 | 黏土 | 5.37 |
| RC—15 | —20 | 10 | 27 | 砂土 | 0.98 |
| RC—16 | —20 | 20 | 24 | 黏土 | 2.75 |
| K_1 | 4.80 | 3.64 | 2.78 | 6.20 | |
| K_2 | 4.30 | 4.35 | 3.24 | 1.59 | |
| K_3 | 3.81 | 4.82 | 4.15 | | |
| K_4 | 2.66 | 2.77 | 5.40 | | |
| R | 2.14 | 2.05 | 2.62 | 4.60 | |

冷端温度升高,植被混凝土融沉系数增大的原因在于:冻结状态的植被混凝土在融化过程中,基材颗粒自身及其与冰镜透体间的联结力将迅速减小,且最终会消失,相对于冻结过程而言,此时水分发生逆向迁移运动,融沉系数的变化规律与相同初始条件下冻胀率的变化规律一致,即冷端温度越高,植被混凝土冻胀率越大,相应地其融沉系数也越大,融沉现象越明显。

含水率增大,植被混凝土融沉系数增大的原因在于:随含水率的增加,植被混凝土冻结过程中成冰量增多,冰晶体积在植被混凝土中所占比例也增大,一旦热源代替冷源促使冻结试样发生融化时,这些冰晶吸收热量迅速转化为体积较小的水,冻结造成的冰晶越多,融化时体积减小也越大,可知试样含水率越大,融沉系数随之越大,二者成正比。

黏土配置的植被混凝土的融沉系数比砂土大,其原因在于:黏土颗粒细小而均匀,矿物表面能较高,吸附能力较强,结构性也较强,容易形成细小而均匀的孔隙,有利于自重密实,因此在融化重组过程中,植被混凝土颗粒间胶结力更大,更有利于形成稳定的密实结构,融沉更容易发生,相应地其融沉系数比较大;而对于砂土来说,因其较大的颗粒骨架间的相互支撑作用大大削弱了融化过程中大孔隙(解冻前被冰所充填

的大孔隙)在自重作用下的闭合能力,结果导致其融沉性较弱,融沉系数也相对较小^[2,16]。

融化温度对植被混凝土的融沉系数影响微弱的原因在于:融化温度的大小只是改变了植被混凝土冻结试样的融沉历时,而并不能影响融化过程中的水分迁移及基材颗粒的结构状况^[11],因此其它条件相同的植被混凝土,在融化温度不同时,其融沉稳定后的体积变形几乎一致。

极差 R 分析结果(表 3)显示,试验中对植被混凝土融沉效应影响的强弱顺序为:植生土类型>含水率>冷端温度>融化温度,且植生土类型的极差远大于其它影响因素的极差,表明植生土类型是影响植被混

凝土融沉特性的关键因素,原因同上。

2.3 植被混凝土冻融前后体积变化

为了综合反映植被混凝土冻融前后总体积的变化,可将融沉后试样的高度转化为冻融试验前的相对原始高度,并比较换算后的融沉系数与同等条件下的冻胀率数值,如冻胀率大于换算后的融沉系数,则表明经历冻融作用后,植被混凝土体积增大,反之体积减小。换算公式见式 3,换算结果见图 2。

$$\alpha=\alpha_0\times(1+\eta)\tag{3}$$

式中: α_0 ——融沉系数(%); η ——植被混凝土相应试样的冻胀率(%); α ——植被混凝土换算后的融沉系数,即相对试验前试样的融沉系数(%)。

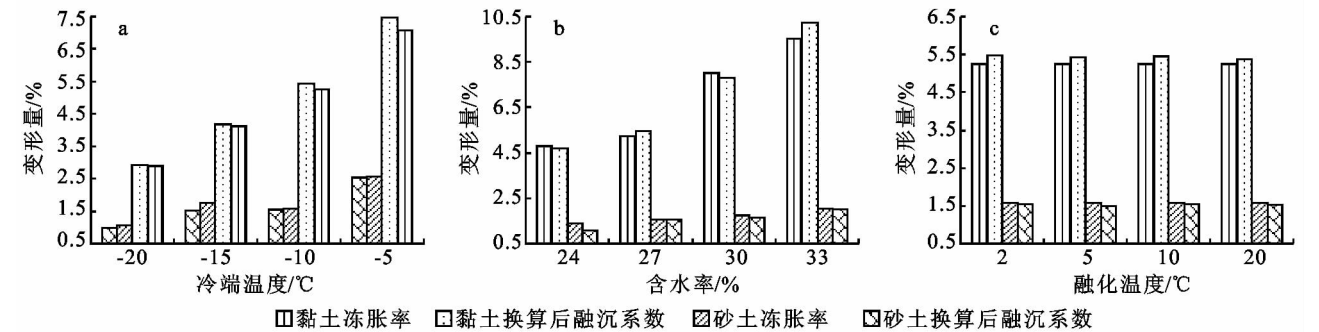


图 2 植被混凝土冻融前后体积变化

从图 2a 可以看出,其它条件相同,冷端温度不同时,经历冻胀与融沉过程后,黏土配制的植被混凝土体积减小,而砂土配制的植被混凝土体积有所增大;从图 2b 可以看出,其它条件相同,含水率不同时,经历冻胀与融沉过程后,黏土配制的植被混凝土体积变化波动不定,而砂土配制的植被混凝土体积有所增大;从图 2c 可以看出,其它条件相同,融化温度不同时,经历冻胀与融沉过程后,黏土配制的植被混凝土体积减小,而砂土配制的植被混凝土体积有小幅增大。

以上现象表明:随着试验影响因素及其水平取值的变动,植被混凝土在经历冻胀与融沉双重作用过程后,其体积会出现不同程度的增缩变化,且变化方向与具体的因素及水平取值有关;但整体来讲,冻胀与融沉的双重效应对植被混凝土总体积的变化影响并不显著,即在经历一个完整的冻胀与融沉过程之后,植被混凝土总体积基本上可回归到冻胀前的初始状

态,冻融作用仅对植被混凝土内部的微观结构产生了较大影响,大多数试样总的体积有小幅增大,原因在于植被混凝土内含水泥成分,其促使基材颗粒结合力变大,导致解冻时沉降反而受到一定程度的抑制。

2.4 植被混凝土冻胀与融沉综合预报模型

为考察某具体条件下,植被混凝土冻胀或融沉稳定时的体积变形,可对试验数据进行回归,并以此建立综合预报模型。上述分析表明,黏土配置的植被混凝土对冻融效应的响应比砂土表现的更为敏感,又由于融化温度对植被混凝土融沉系数影响小,为减小综合预报模型的复杂性,本文仅以冷端温度和含水率为影响因素,建立黏土配置的植被混凝土的冻胀与融沉模型(表 4)。

从表 4 可以看出,综合预报模型拟合度好,回归方程检验均远小于极显著性水平 0.01,运用上式可有效预测植被混凝土冻胀与融沉变形稳定时的体积变形量,两模型预报情况见图 3。

表 4 冻胀与融沉综合预报模型

| 名称 | 综合预报模型 | | 显著性检验 | |
|----|---|----------|---------|-------|
| | 回归方程 | 相关系数 R | F | P |
| 冻胀 | $\eta=-0.0056T^2+0.0412\omega^2+0.0294T\omega-0.6723T-1.5193\omega+18.2438$ | 0.9816 | 31.730 | 0.003 |
| 融沉 | $\alpha_0=0.0002\omega^3+0.2181T+3.2532$ | 0.9751 | 204.774 | 0.004 |

注: T ——冷端温度(°C); ω ——含水率(%);其他各符号意义同前。

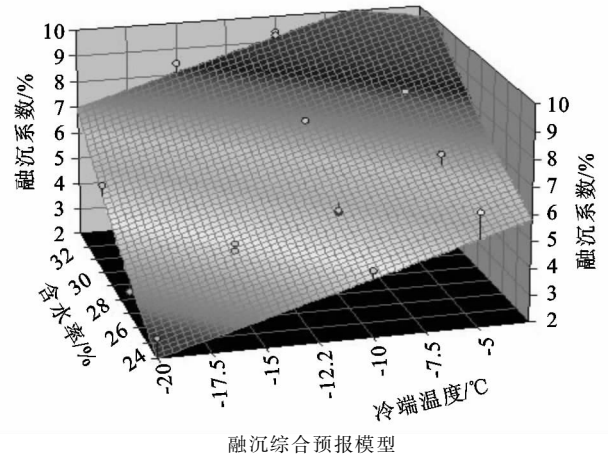
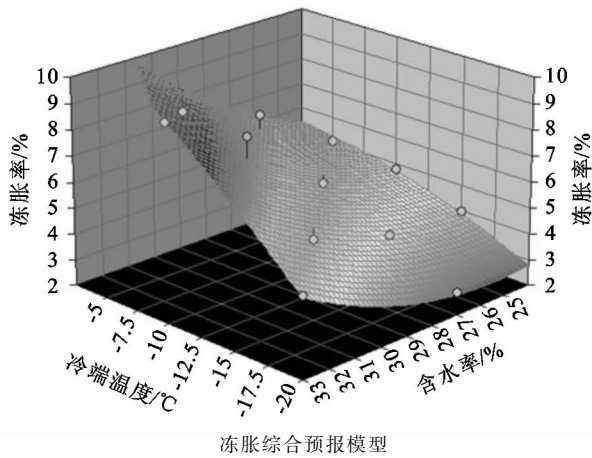


图3 植被混凝土冻胀与融沉预报模型

3 结论

(1) 试验选取因素及水平的变动在不同程度上可对植被混凝土的冻融效应造成影响,且其影响强弱顺序为植生土类型($P<0.01$)>含水率($P<0.05$)>冷端温度($P<0.05$)>融化温度($P>0.1$)。

(2) 冷端温度升高或含水率增大,植被混凝土的冻胀率与融沉系数均显著增大;其它条件都相同时,黏土配置的植被混凝土的冻胀率与融沉系数比砂土均要大得多;融化温度对植被混凝土融沉系数的影响微弱,且无规律可循。

(3) 冻胀与融沉过程对植被混凝土耐久性的破坏主要体现在内部的微观结构上,其冻融双重作用对植被混凝土的总体积变化影响并不显著。

(4) 以冷端温度和含水率为影响因素所建立的综合预报模型拟合度好,可有效预报植被混凝土冻胀与融沉变形量。

参考文献:

- [1] Everett D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. Trans. Faraday Soc., 1961, 57: 1541-1551.
- [2] 齐吉琳, 张建明, 朱元林. 冻融作用对土结构性影响的土力学意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2690-2694.
- [3] 谭丽华. 水泥改良土冻胀融沉特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [4] 张以晨, 李欣, 张喜发, 等. 季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性及其分类研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1522-1526.
- [5] 苏群, 杨扬. PAMCATS 固化土强度及抗冻性能研究[J]. 黑龙江工程学院学报: 自然科学版, 2008, 22(4): 1-3.
- [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] 王效宾, 杨平, 王海波, 等. 冻融作用对黏土力学性能影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1768-1772.
- [8] 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]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- [9] 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, 2012.
- [10] 张婷. 人工冻土冻胀、融沉特性试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2004.
- [11] 中华人民共和国国家标准. 建筑地基基础设计规范(GB50007-2011)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [12] 中华人民共和国国家标准. 土工试验方法标准(GB/T50123-1999)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [13] 王家澄, 徐学祖, 张立新, 等. 温度和压力条件对正冻土中成冰过程和冷生组构的影响[J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 250-257.
- [14] 李洪升, 张斌, 刘增利, 等. 一维冻结土体冻胀量的水热力耦合计算[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5): 621-624.
- [15] Eigenbrod D. Pore-water pressures in freezing and thawing fine-grained soils[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 1996, 10(2): 77-92.
- [16] Webster R. Statistics to support soil research and their presentation[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52(2): 331-340.