

加筋土挡墙冻融试验研究

汪恩良^{1,2}, 钟 华¹, 孙景路¹, 高占坤¹, 徐学燕²

(1. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要: 通过模拟野外实测降温过程, 进行加筋土挡墙在开敞条件下的冻融试验研究, 得到结论: ①冻结过程中产生了水平冻胀力, 加筋格栅克服水平冻胀力的作用产生拉应变, 起到削减水平冻胀力的作用; ②加筋挡墙顶面在冻结过程中产生冻胀变形, 当表面温度降至-5℃以下时冻胀停止, 从负温升至-5℃以上时, 冻胀重新开始, 验证了存在冻胀停止温度的观点; ③升温过程中挡墙顶面产生较大融沉变形, 季节冻土区的加筋土挡墙应避免春融期产生不允许的融沉变形。

关键词: 季节冻土区; 加筋土挡墙; 冻融试验; 塑料土工格栅

中图分类号: TU476 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)02-0265-06

作者简介: 汪恩良(1971-), 男, 河北滦南人, 博士, 从事工程冻土及建筑物抗冻技术研究。E-mail: hljskywel@163.com。

Experimental study on reinforced retaining walls suffering freeze-thaw cycling

WANG En-liang^{1, 2}, ZHONG Hua¹, SUN Jing-lu¹, GAO Zhan-kun¹, XU Xue-yan²

(1. Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Through modeling field temperature process, the experimental study on reinforced retaining walls suffering freeze-thaw cycling is performed. Conclusions are drawn as follows: (1) Horizontal frost-heave forces always occur during freezing, and tensile strain appears in the geogrid used in the reinforced retaining walls, which reduces the horizontal frost-heave forces. (2) Frozen deformation occurs at the top of the retaining wall during freezing. When the temperature drops down to -5℃, the frost-heave stops. When the temperature rises and surpasses -5℃, the frost-heave restarts. So it is validated that there exists the frost-heave stop temperature. (3) Melt settlement deformation occurs at the top of the retaining walls during temperature rising. Accordingly, the reinforced retaining walls in seasonally frozen regions should avoid inadmissible melt settlement deformation during spring thawing.

Key words: seasonally frozen region; reinforced retaining wall; freeze-thaw test; plastic geogrid

0 前 言

在广大的季节冻土区, 随着大气温度的下降, 在地-气热交换过程中, 使土体温度达到土中水结晶点时, 此冻结-融化层便产生冻结。随着土中孔隙水和外界水源补给水结晶而形成多晶体、透镜体、冰夹层等形式的冰侵入体, 引起土体体积增大, 导致地表不均匀上升, 这就是通常所说的冻胀现象。到了春季, 冻结后的土体从表层开始融化, 而冻土层的下层尚未融化, 水分无法下渗, 使土体处于饱和及过饱和状态而导致地基承载力降低。一旦土体中冰侵入体消融成水, 而土体又未能完全排水固结, 就会使上部建筑物发生沉陷变形, 这种因土体冻结-融化给工程造成的过大变形或破坏就是工程冻害问题^[1]。

冻土地区的水利工程、铁路、公路和工业民用建筑都普遍存在严重的冻害问题。试验研究发现, 加筋

可以起到削减水平冻胀力, 减少工程冻害的目的^[2-3]。

土体是散粒矿物、水、空气的聚合物, 具有一定的抗压和抗剪强度, 而它们的抗拉强度却很低。在土内掺入或铺设适当的筋材后, 可不同程度地改善土体的强度与变形特征。筋材埋在土体中, 可扩散土体的应力, 增加土体模量, 传递拉应力, 限制土体侧向位移; 还增加土体和其它材料间的摩阻力, 提高土体及有关建筑物的稳定性。由于约束应力对土体冻胀有明显的抑制作用, 因此, 加筋成为减小冻胀的有效措施。

随着土工合成材料在岩土工程领域的广泛应用, 人们越来越认识到这种新材料的优越性, 土工合成材料应用于工程冻害防治的研究将具有重要的社会和经

基金项目: 黑龙江省青年基金项目(QC04C04)

收稿日期: 2008-09-12

济意义。塑料土工格栅为高强度聚丙烯或高密度聚乙烯的高分子聚合物片网状结构物。该材料是加筋土挡墙和高边坡处理的理想加筋材料,其优越的加筋效果得到了土木工程界的一致好评。本文将研究塑料土工格栅加筋土挡墙冻融循环条件下内部应力与筋材应变随温度的变化规律。

1 试验内容及方法

加筋土挡墙是筋材、土体与墙面板组成复合结构。加筋土挡墙在季节冻土区应用要经历无数次的冻融循环,本次试验研究在冻融循环过程中,加筋土挡墙结构的内部温度分布、应力及变形的变化过程,为加筋土挡墙设计的理论研究提供基础性数据。本次模拟试验加筋土挡墙的结构示意图见图1。

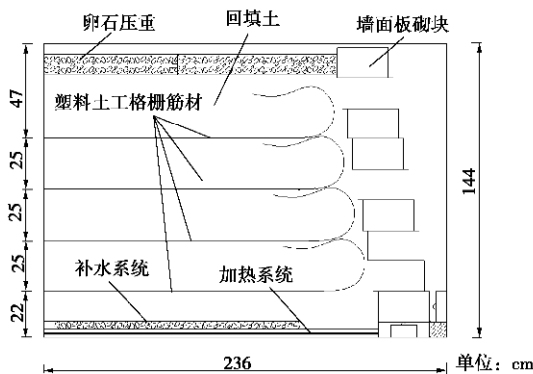


图1 加筋土挡墙结构示意图

Fig. 1 Structural sketch of reinforced retaining wall

1.1 试样的制备

本次试验用黏土取自哈尔滨市郊区薛家土场,黏土土样按《土工试验规程》^[4]的要求进行试验,土粒比重=2.69,内摩擦角=18.1°,液限=32.2%,垂直渗透系数=1.32×10⁻⁶ cm/s,塑限=18.3%,最大干密度=1.68 g/cm³,塑限指数=13.9%,最优含水率=16.1%,液性指数<0,填土重度=17.3 kN/m³,黏聚力=31 kPa,土的分类为低液限黏土 CL,颗粒分析曲线见图2。加筋采用 TGDG35 型单向拉伸塑料土工格栅。

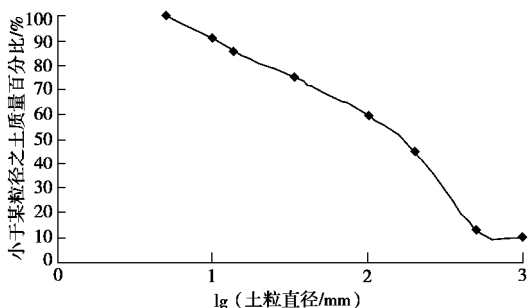


图2 试验土样颗粒分析曲线

Fig. 2 Analytical curve for grain composition of specimen

制作模型所用填土要求在室温条件下自然风干、粉碎、过5 mm筛。测定土的初始含水率,按每天填土数量和试验填土所需含水率计算配水量,将其均匀洒于土中,边洒边拌。拌匀的土样堆于实验室内,覆盖塑料袋密封保湿24 h,使土中水分充分混合均匀备用。填土前再次测定土中含水率,保证每层填土的干密度控制在最大干密度的90%,即1.512 g/cm³。

加筋土挡墙所需加筋塑料土工格栅需按设计位置黏贴应变片,把黏贴好的格栅网片摊平阴干,在干透的应变片外层涂环氧树脂防水,摊平阴干后备用。

1.2 试验仪器及方案

(1) 试验仪器

本次试验装置由模型箱、温度控制系统、温度监测系统、变形监测系统、土压力监测系统、补水系统和制冷系统组成。

(2) 试验方案

a) 试验准备

模型施工之前,所有的仪器应进行校准,位移计使用标准块规校准,土压力盒要在现场利用万能试验机进行校准等。为了减小模型箱侧壁摩擦力对试验的影响,在侧壁上涂一层防冻硅油,砌块与侧壁的连接处铺设聚乙烯板隔离以减小摩擦力。

b) 模型填筑

加筋土挡墙模型制作严格按照现场施工操作顺序进行。回填土全部采用预先准备好的土样,用分层体积和土料湿重来控制干重度,全部按最大干重度的90%控制压实度,采用人工击实法分层装土,每分层的击实厚度为5~10 cm。

c) 模型饱和

模型填筑完毕后进行补水饱和。在模型箱的底板上设置补水层,与箱体外补水箱连接,根据试验需要设定水位,保证土体饱和时的毛细水补给和冻结过程中迁移水分的补给。同时从模型顶面灌水,依靠水的重力作用进行补水。

d) 模型保温

为保证挡土墙在降温过程中能够实现双向冻结,必须对墙体除砌块侧,全部进行保温处理。为模拟季节冻土区下部非冻土,模型箱底板下铺10 cm厚聚苯乙烯泡沫保温板,底板上层埋设加热装置,温度可控,使墙体下层地下水不冻结,并且在升温融化时能够实现双向融化,保证冻结曲线符合野外观测结果。箱体底部周围用20 cm厚聚苯乙烯泡沫保温板密封,防止通过地面进行热传导。箱体侧壁用10 cm厚聚苯乙烯泡沫保温板构建框架,箱体与保温板之间用珍珠岩充填,敞口处用保温板密封,避免形成冷桥影响墙体温度场。加筋土挡墙模型填筑完毕、饱水、保温后见图3。



图 3 模型制作完毕

Fig. 3 Model retaining wall

e) 冻融循环

开启低温实验室, 按设计降温过程控制降温 and 升温, 开始模型冻融循环试验。具体测试内容: ①温度场, 监测模型温度场的分布; ②位移, 墙面的水平位移、顶面竖向位移; ③土压力, 监测墙体内部土压力分布; ④筋材应变, 监测筋材的应变规律。加筋土挡墙模型测点布置情况参见图 4。

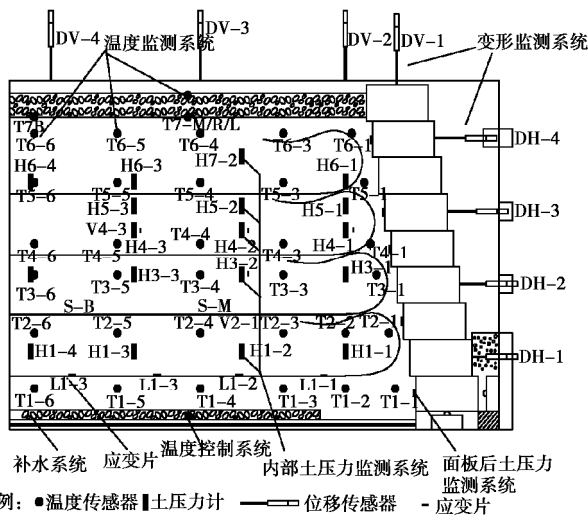


Fig. 4 Distribution of measuring points

2 试验结果分析

2.1 加筋土挡墙降温过程分析

模型试验冻融过程模拟哈尔滨万家野外冻土观测场 2006 年~2007 年实测资料, 气温实测曲线见图 5,

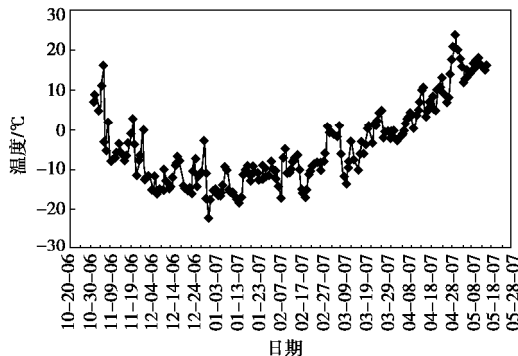


图 5 野外冻土观测场 2006 年~2007 年气温实测曲线

Fig. 5 Temperature curves of field frozen soil observed during 2006~2007

本次试验温度控制过程线见图 6, 野外冻土观测场 2006 年~2007 年实测冻融过程线见图 7, 模型试验冻融过程线见图 8。

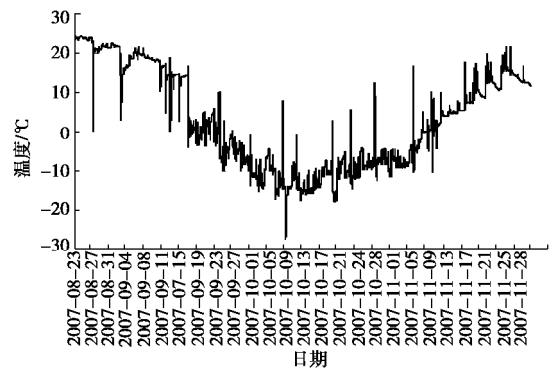


图 6 模型试验降温过程曲线

Fig. 6 Temperature-descending process from model tests

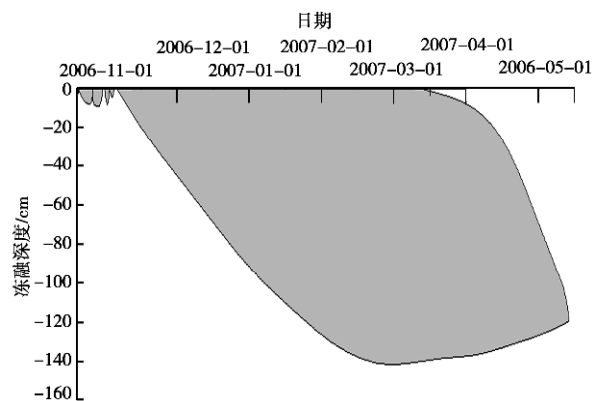


图 7 野外冻土观测场 2006 年~2007 年实测冻融过程线

Fig. 7 Freeze-thaw process curves of field frozen soil observed during 2006~2007

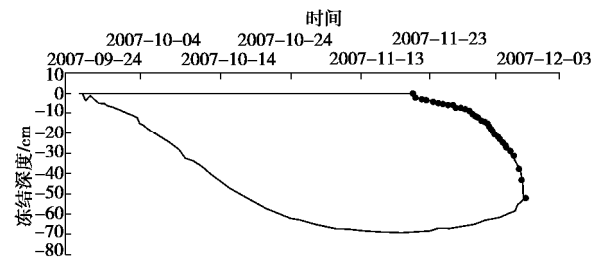


图 8 模型试验冻融过程曲线

Fig. 8 Freeze-thaw process curves from model tests

比较加筋土挡墙试验温度控制过程线和野外冻土观测场 2006 年~2007 年实测气温过程线、加筋土挡墙试验冻融过程线和野外冻土观测场 2006 年~2007 年冻融过程线, 可以看出, 图形趋势基本一致, 说明本次试验降温过程符合野外天然气温的降温规律。

冻深达到最大值时, 根据温度监测系统采集数据绘制成加筋土挡墙内部温度场分布见图 9。

由图 9 可以看出, 加筋土挡墙顶面和墙面板方向温度较低, 同时, 融土层温度较挡墙顶面和墙面板侧温度要高, 符合季节冻土区挡土墙双向冻结温度场分

布规律。

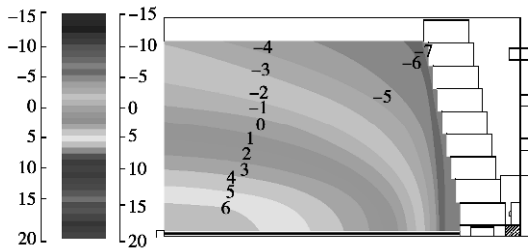


图9 冻深最大时加筋土挡墙内部温度场分布

Fig. 9 Distribution of temperature field in reinforced retaining wall with maximum frozen depth

2.2 加筋土挡墙土压力测试结果分析

(1) 加筋土挡墙面板后的压力变化分析

将冻融过程中加筋土挡墙面板后压力变化测试结果绘于图 10 (a)。由图 10 (a) 可以看出, 在初始阶段环境处于正温, 不同埋深处压力的变化完全由墙体自重水平方向的作用力引起。开始冻结后, 墙面板后不同深度压力均不同程度增大, 而且埋深浅的传感器首先反应, 水平冻胀力开始产生。负气温继续增大, 冻结深度加大, 水分迁移增加, 水平冻胀力跳跃式地增长至最大值, 不同高度处水平冻胀力达到最大值的时间不一。随着冻深不断发展, 墙后土体产生冻胀现象, 墙面板后压力随着温度的持续降低逐级增大。埋深越大, 土压力增值越大。例埋深 85 cm 处土压力冻结前为 20 kPa, 冻结后最大增至 29.39 kPa, 最大增值幅度达到 45%。在埋深较浅处变化幅度不大。随着环境温度持续升高, 墙面板后压力逐渐衰减, 应力值逐渐接近降温前的水平。

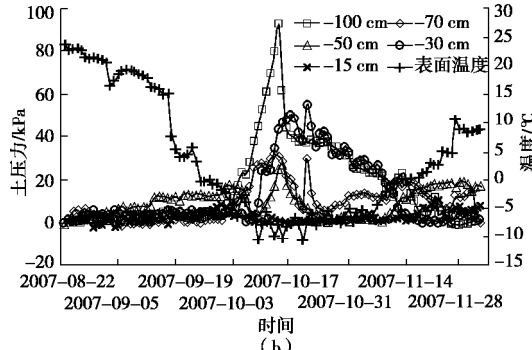
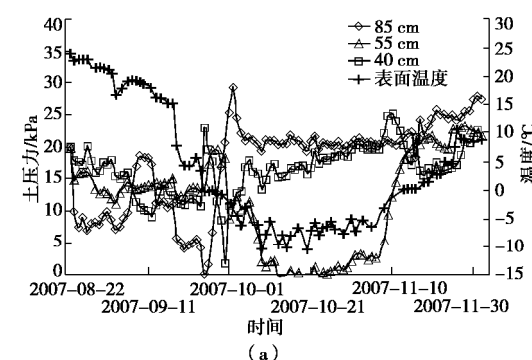


图 10 土压力与温度变化曲线

Fig. 10 Curves of soil pressure and temperature

(2) 加筋土挡墙内部的土压力变化分析

将冻融过程中加筋土挡墙内部土压力变化测试结果绘于图 10 (b)。由图 10 (b) 可以看出, 在初始阶段环境处于正温, 加筋土挡墙内部不同埋深处土压力的变化由加筋土挡墙复合体自重引起。开始冻结后, 挡墙内部不同深度土压力均不同程度增大, 为土体冻结过程中产生的水平冻胀力所致。埋深 100 cm 处土压力在冻结过程中明显增大, 分析原因可能是由于双向冻结造成该局部应力集中引起。由图 10 (a) 可以发现墙面板后埋深 80 cm 处同一时段也发生土压力明显增大的现象, 说明为竖向应力增大所致。埋深 15 cm 处土压力在冻结过程中变化不明显。随着环境温度升高, 土体融化, 土体内部土压力趋于平稳, 应力值逐渐接近降温前的水平。

图 11 中实测值为最大冻深时加筋土挡墙内部土压力沿墙高的分布, 由自重引起的静止土压力强度 ($s_0 = K_0gh$) 见图 11 中计算值。图中可明显看出, 由于冻结过程中产生了水平冻胀力, 实测值明显大于由自重引起的静止土压力强度计算值, 同时由于塑料土工格栅的加筋作用, 分担了部分水平冻胀力, 改变了加筋土挡墙内部土压力沿墙高的分布规律。

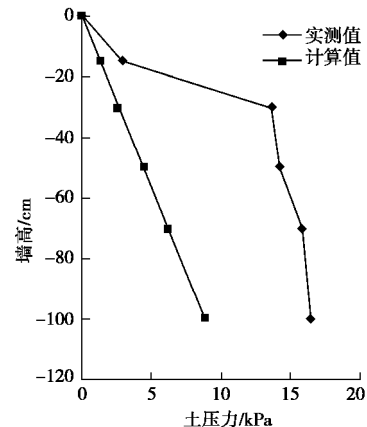


图 11 最大冻深时挡墙内部土压力沿墙高分布图

Fig. 11 Distribution of inner soil pressure along height of retaining wall with maximum frozen depth

(3) 加筋对水平冻胀力的抑制作用

根据试验结果, 分别将冻结过程中加筋土挡墙内部不同埋深处实测最大土压力值和挡墙面板后不同埋深处实测最大土压力值统计汇总于表 1。

用加筋土挡墙内部实测土压力值和面板后实测土压力值减去由自重引起的土压力值即为实测冻胀力值。将冻结过程中加筋土挡墙内部及挡墙面板后最大水平冻胀力值沿墙高的分布绘于图 12。由图 12 可知, 加筋土挡墙内部最大水平冻胀力沿墙高分布呈现双峰型, 符合文献[1]中水平冻胀力沿墙高的分布规律。加筋土挡墙内部最大水平冻胀力值达 83.52 kPa, 挡墙面

板后相应埋深处水平冻胀力最大值仅为 22 kPa, 可见加筋能够抑制水平冻胀力的增长, 加筋土挡墙可以起到减小工程冻害的作用。但是, 挡墙面板在冻结期要承受水平冻胀力的作用, 需进行抗冻胀设计。

表 1 冻结过程中挡墙内部及面板后最大水平冻胀力计算表
Table 1 The maximum horizontal frost-heave forces in retaining wall and behind wall panel

埋深 /m	挡墙内部			挡墙面板后			
	实测土压力值 /kPa	自重引起土压力 /kPa	水平冻胀力 /kPa	埋深 /m	实测土压力值 /kPa	自重引起土压力 /kPa	水平冻胀力 /kPa
0	0	0	0.00	0	0	0	0.00
-15	8.59	1.44	7.15	-10	3.00	0.96	2.04
-30	55.55	2.87	52.68	-40	19.55	3.83	15.72
-50	27.72	4.79	22.93	-55	26.35	5.27	21.08
-70	32.25	6.70	25.55	-85	29.39	8.14	21.25
-100	93.09	9.57	83.52	-115	37.00	11.01	25.99

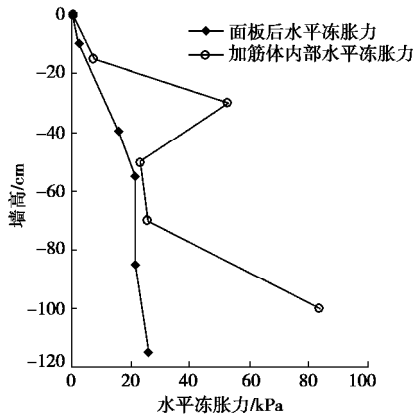


图 12 挡墙内部及面板后最大水平冻胀力沿墙高分布

Fig. 12 Distribution of horizontal frost-heave forces along height of retaining wall

2.3 墙面板水平位移与墙顶面竖直位移测试结果分析

(1) 墙面板水平位移测试结果分析

墙面板水平位移测试点分别位于墙高 30, 60, 90 和 120 cm 处, 参见图 4。将冻融过程中墙面板水平位移监测结果绘于图 13。

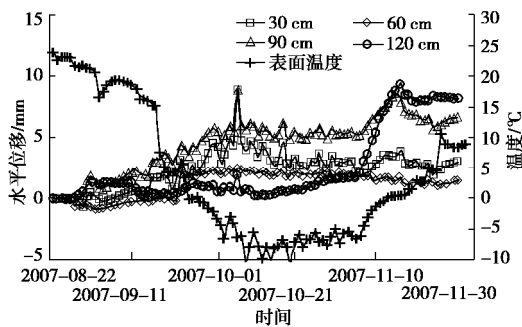


图 13 加筋挡墙墙面板水平位移测试变化过程线

Fig. 13 Horizontal deformation curves of reinforced retaining wall panel

由图 13 可以看出, 在环境处于正温时, 此时墙面板出现不同程度的水平位移, 分析原因是在饱水过程中增加了水压力, 应力重新分布产生水平方向的位移。开始冻结后, 墙面板水平方向没有明显位移, 主要原因是饱水过程中墙面板与模型平台侧壁间进水, 降温后水冻结成冰, 墙面板与模型平台侧壁在冰的冻结力作用下限制了墙面板的水平位移。随着环境温度升高, 墙高 90~120 cm 处墙面板在墙后水平冻胀力的作用下发生前倾变位, 与野外现场调研情况相吻合。

(2) 挡墙顶面竖向位移测试结果分析

挡墙顶面的竖向位移测试点 DV-1 布置在墙面板上, DV-2 布置在墙面板相邻的土层上, DV-3 布置在挡墙顶面中部, DV-4 布置在挡墙顶面后部, 参见图 4。将冻融过程中挡墙顶面竖向位移监测结果绘于图 14。

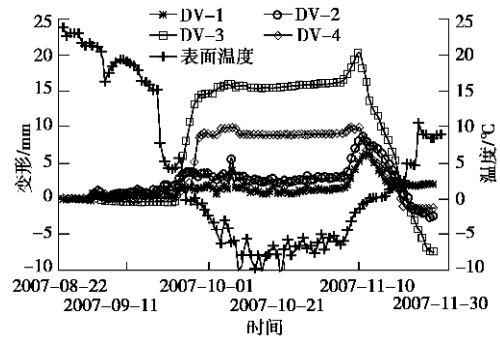


图 14 挡墙顶面竖向位移测试变化过程线

Fig. 14 Vertical deformation curves of retaining wall top-surface

由图 14 可以看出, 初始阶段在饱水过程中挡墙顶面出现垂直方向的变形。开始冻结后, 墙顶面中心断面 DV-3 和后侧断面 DV-4 很快出现冻胀量, 当墙体表面温度达到 -5°C 时, 冻胀停止, 升温至 -5°C 以上时, 再次出现冻胀现象, 验证了前人提出的存在冻胀停止温度的观点。

由于挡墙面板与临近土体冻结在一起, 限制了土体冻胀, 挡墙面板的变形由相邻土体的冻胀引起, 因此 DV-2 的冻胀量低于 DV-3 和 DV-4。

随着环境温度升高, 挡墙顶面土体出现融沉现象, 全部融透后, 墙顶面低于冻前高程, 原因是表面土体含水率很高, 在上部压重作用下产生压缩变形。

2.4 加筋格栅应变测试结果分析

加筋格栅应变测试点的位置每层按从前到后的顺序排列, 如顶层从前到后依次为 LA-1、LA-2、LA-3 和 LA-4, 其余层类推。分别取冻融过程中加筋土挡墙顶层加筋、中间层加筋和底层加筋应变测试结果绘于图 15~17。

由图 15 可以看出, 在冻融过程中, 挡墙顶层加筋格栅的应变值随着墙体表面温度的降低呈现明显增大

的规律,最大值为 0.11%, 位置在挡墙面板后 130cm 处。从应变极值看,最大值 0.11%, 最小值为 0.08%, 整个筋条变形较均匀。温度升高后加筋格栅的应变值呈现明显的减小趋势,但是应变反应的时间明显滞后于温度变化的时间,越靠近墙体后部滞后现象越明显。

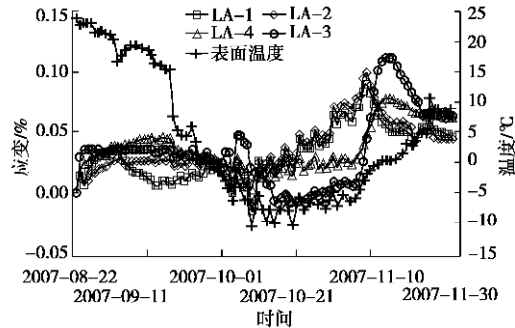


图 15 冻融过程中顶层加筋格栅应变过程线

Fig. 15 Strain curves of geogrid in top soil layer during freeze-thaw process

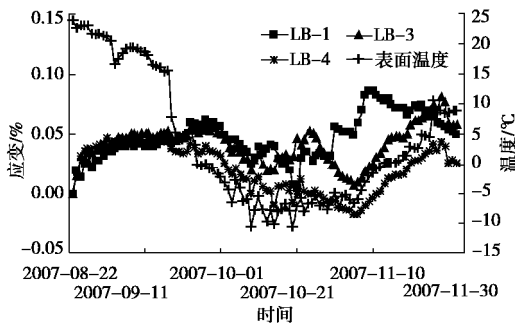


图 16 冻融过程中中间层加筋格栅应变过程线

Fig. 16 Strain curves of geogrid in middle soil layer during freeze-thaw process

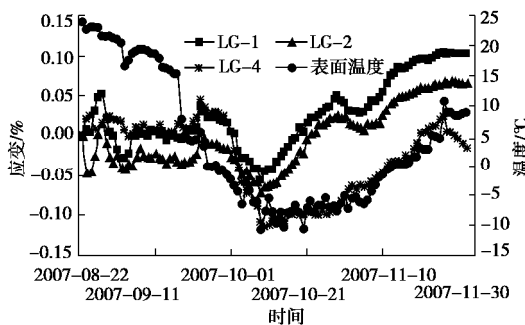


图 17 冻融过程中底层加筋格栅应变过程线

Fig. 17 Strain curves of geogrid in bottom soil layer during freeze-thaw process

图 16 与图 15 具有相同的变化规律,在冻融过程中,挡墙中间层加筋格栅的应变值随着墙体表面温度的降低呈现明显增大的规律,最大值为 0.204%, 位置在挡墙面板后 80 cm 处。从应变极值看,最大值 0.204%, 最小值为 0.044%, 变形在整个筋条上不均匀分布。该现象与加筋土挡墙内部土压力沿墙高分布呈现的墙高中部土压力值较大的规律能够很好吻合。

由图 17 可以看出,由于挡墙底层加筋位于融土层中,应变的反应没有冻土层中剧烈,但墙面侧受双向冻结影响,靠近墙面板位置加筋格栅 LC-1、LC-2 的应变值明显大于墙体后部加筋格栅 LC-3、LC-4 的应变值。

综上分析,从图 15~17 可反映出,土体冻结后,在冻结力的作用下加筋格栅与土协同工作。随着冻深发展,产生水平冻胀力,加筋格栅拉伸应变增大,可以起到分担水平冻胀力、约束冻胀变形的作用。

3 结 论

(1) 冻结过程中,挡墙面板后侧压力在不同深度处随温度降低均不同程度增大,说明在冻结过程中产生了水平冻胀力。加筋格栅克服水平冻胀力的作用产生拉应变,融化过程中拉应变逐渐减小。最大冻深时加筋土挡墙内部土压力沿墙高呈双峰形的分布图说明加筋格栅起到削减水平冻胀力的作用。

(2) 加筋挡墙顶面在冻结过程中产生冻胀变形,当挡墙表面温度降至 -5°C 以下时冻胀停止,从负温升至 -5°C 以上时,冻胀重新开始,验证了前人提出的存在冻胀停止温度的观点。

(3) 升温过程中挡墙顶面产生融沉现象,全部融化时墙顶面土体含水率很高,土体模量下降,在自重作用下产生较大融沉变形。在季节冻土区的加筋土挡墙应避免春融期产生不允许的融沉变形。

参考文献:

- [1] 童长江,管枫年. 土的冻胀与建筑物冻害防治[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1985. (TONG Chang-jiang, GUAN Feng-nian. Harm and prevention and cure of frost heaving of soil to construction[M]. Beijing: China Water Power Press, 1985. (in Chinese))
- [2] 汪恩良. 季节冻土区水工加筋挡墙筋材与筋土复合体试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 49 - 56. (WANG En-liang. Experimental study on plastic geogrid and complex structure of hydraulic reinforced earth wall in seasonally frozen area[D]. Harbin: Dissertation of Harbin Institute of Technology, 2008: 49 - 56. (in Chinese))
- [3] 陈 轮. 用土工合成材料防治建筑物冻害的研究[D]. 北京: 清华大学, 1994: 1 - 19. (CHEN Lun. Research on structure frost damage prevention with geosynthetics[D]. Beijing: Tsinghua University, 1994: 1 - 19. (in Chinese))
- [4] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Geotechnical testing code[S]. 1999. (in Chinese))