

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.149



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 极端温度变化条件下加筋土挡墙内部温度场数值分析

高宇聪<sup>1</sup>, 刘学军<sup>2</sup>, 刘华北<sup>1</sup>, 肖成志<sup>3</sup>

(1. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074; 2. 新疆建筑科学研究院(有限责任公司), 乌鲁木齐 830002; 3. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要:** 为了研究极端温度变化条件下加筋土挡墙内部温度场变化特性及规律, 以乌鲁木齐市某加筋土挡墙工程为背景, 基于 Plaxis 有限元模型, 在考虑太阳辐射边界温度效应的基础上, 开展加筋土挡墙内部温度场变化特性研究。结果表明: 加筋土挡墙内部温度变化与外部环境温度起伏关系密切, 其内部等温线近似于双曲线; 挡墙内部距面板 3.0~4.0 m、墙顶结构 2.0 m 的区域为温度敏感区, 随着填料热物理参数的提高, 墙内温度敏感区水平宽度也随之增加; 加筋土挡墙内部的平均温度梯度变化量主要取决于外部温度的变化速率, 但具有较高热物理参数的填料能有效减小墙内平均温度梯度; 随着填料饱和度的增加, 挡墙内部最大冻深线深度增大, 当填料饱和度由 0 增长至 0.2 时, 挡墙内部最大冻深增加幅度最大。

**关键词:** 加筋土挡墙; 温度场特性; 填料热参数; 极端温度变化; 有限元模拟

**中图分类号:** TU476.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0111-10

## Numerical analysis of inner temperature field of reinforced-soil retaining wall under extreme temperature fluctuation

GAO Yucong<sup>1</sup>, LIU Xuejun<sup>2</sup>, LIU Huabei<sup>1</sup>, XIAO Chengzhi<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China; 2. Xinjiang Institute of Architectural Sciences (Limited Liability Company), Urumqi 830002, P. R. China; 3. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

**Abstract:** To investigate the changing regularity of the temperature field of a geogrid-reinforced soil (GRS) retaining wall under extreme temperature fluctuation, this study focused on a GRS retaining wall in a Urumqi engineering practice. Finite element models were constructed and employed to analyze the inner temperature distribution characteristics of the GRS retaining wall, taking into account the influence of solar radiation. The findings indicate a strong correlation between the inner temperature field of the GRS retaining wall and variations in environmental temperature, with the isotherm closely resembling a hyperbolic shape. Specifically, the field within approximately 3.0~4.0 m behind the facing panels and about 2.0 m below the top surface of the GRS

**收稿日期:** 2023-09-28

**基金项目:** 中建新疆建工集团(有限公司)课题(65000022859700210197)

**作者简介:** 高宇聪(1988-), 男, 博士, 主要从事加筋土结构研究, E-mail: 20152612@neepu.edu.cn.

刘学军(通信作者), 男, 教授级高工, E-mail: 625184594@qq.com.

**Received:** 2023-09-28

**Foundation item:** CSCEC Xinjiang Construction and Engineering Group Co., LTD (No. 65000022859700210197)

**Author brief:** GAO Yucong (1988-), PhD, main research interest: reinforced-soil structure, E-mail: 20152612@neepu.edu.cn.

LIU Xuejun (corresponding author), professor-level senior engineer, E-mail: 625184594@qq.com.

retaining wall can be classified as a temperature-sensitive region. Furthermore, the width of this temperature-sensitive region expands in proportion to the thermophysical parameters. The utilization of filling materials possessing enhanced thermophysical properties can effectively alleviate the average temperature gradient; however, the magnitude of the average temperature gradient predominantly depends on the rate of fluctuation in the external temperature. The maximum depths of frost show an increase with the saturation of filling materials, with the most significant increment observed during the transition from a saturation level of 0 to 0.2.

**Keywords:** GRS retaining wall; temperature field characteristics; filler material thermal properties; extreme temperature fluctuation; finite element simulation

据统计,中国冻土面积约占全国总面积的75%,其中季节性冻土占比达53%。已有试验研究发现,土体加筋能削减其因冻胀而产生的水平冻胀力<sup>[1]</sup>,鉴于该优点,加筋土结构已广泛应用于季冻区的道路边坡与支护工程中。新疆维吾尔自治区属典型极端天气地域,夏季最高温气可达40℃以上,而冬季最低气温可降至-25℃以下,年最大温差高达65℃以上。众多学者研究表明:加筋土结构的稳定性与变形特性受环境温度变化影响极大,但相关行业设计规范却鲜有考虑极端环境温度变化对加筋土结构施工和服役期特性的影响,其中,最典型的筋材拉拔试验及筋-土界面试验等均在(20±2)℃下进行,此类试验结果无法全面考量极端环境温度季冻区加筋土结构的变形特性。因此,有必要针对极端环境温度季冻区加筋土结构内部温度场特性进行研究。

汪恩良等<sup>[2]</sup>通过开展敞开条件下的加筋土挡墙冻融试验,探究了格栅对水平冻胀力的削减程度以及春融期加筋土挡墙的融沉变形特性。付晓丹等<sup>[3]</sup>以银西铁路为背景,通过建立有限元模型,研究了悬臂式支护+加筋土路基结构的温度场和应力场,描述了该结构内部等温线形状,并分析了冻胀力分布。董建华等<sup>[4]</sup>自行编制了水-热-力耦合分析软件,并结合工程实例对多年冻土区L型挡墙中水平冻胀力的计算方法提出修正,得出水平冻胀力沿墙高呈抛物线和梯形的两种分布模式。通过室内模型试验,Xiao等<sup>[5]</sup>、崔飞龙等<sup>[6]</sup>、肖成志等<sup>[7]</sup>研究了冻融循环作用下加筋土挡墙内部温度场的分布规律与变形特性,并分析了面板厚度、墙高与路面结构厚度对挡墙内部温度场的影响,最后采用有限元模拟方法讨论了加筋土挡墙内部温度梯度变化与最大冻深位置。Kasoz等<sup>[8]</sup>基于现场监测数据发现,环境温度变化时,墙体边界附近温度变化幅值较大,并向墙内递减。

加筋土挡墙填料多采用就地取材的施工方式,其内部温度场变化特性除与环境温度有密切关系外,填料自身的物理热参数,如导热系数与比热容,

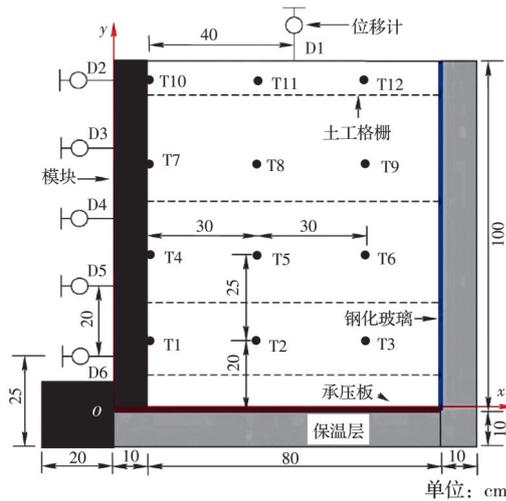
也会对其产生决定性影响。影响填料热参数的因素主要包括土体孔隙比、含水量与石英含量等,致使不同土体间的热参数有较大差别。由于填料结构与成分的多样性,不同填料的加筋土挡墙之间内部温度场分布从根本上存在极大差别。因此,只分析环境温度影响因素无法全面地探究加筋土结构内部温度场特性。针对材料导热系数差异导致喷混凝土边坡产生应力集中而开裂的问题,邓宗伟等<sup>[9]</sup>进行了有限元研究,研究表明,在进行边坡防护设计时必须考虑环境温度剧烈变化等关键影响因素。通过COMSOL有限元分析,考虑温度振幅、介质导热系数与含水量等影响因素,王艳杰<sup>[10]</sup>分析了基坑支护结构冻胀力的影响范围。针对季冻区混合土边坡失稳问题,在考虑粗粒土含量及含水率的影响的基础上,基于冻土水-热耦合理论,崔凯等<sup>[11]</sup>讨论了融化期混合土边坡稳定系数、滑动面发展规律与失稳机理,定量分析了粗颗粒含量与含水率变化对边坡稳定性的影响。针对粗粒土与细粒土两种填料,Cui等<sup>[12]</sup>开展了加筋土挡墙缩尺模型试验,讨论了挡墙模型内部温度场在外部环境温度影响下的分布特性,分析了负温环境下两种不同填料的加筋土挡墙面板水平位移、土压力与筋材应变的发展规律。

目前,针对极端温度变化条件下加筋土挡墙内部温度场变化特性的研究仍处于起步阶段。笔者以乌鲁木齐市某分离式立体交叉加筋土挡墙为背景,结合Plaxis有限元模型,通过与室内加筋土挡墙模型试验结果进行对比,验证了数值模型的有效性。考虑粗粒填料在不同饱和度工况条件下的热物理参数,研究了极端温度变化下加筋土挡墙内部温度场的变化特性及演变规律。

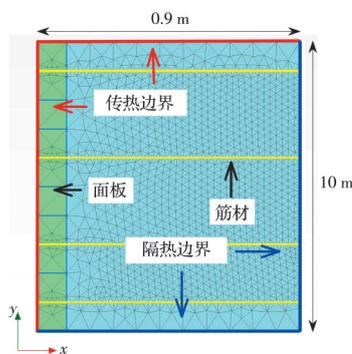
## 1 挡墙数值模型的建立及验证

为了验证有限元模型的准确性,通过有限元软件Plaxis对崔飞龙等<sup>[6]</sup>的小比尺挡墙试验进行数值建模,软件中的“瞬态热流”分析模块能较准确地模拟出挡墙内部温度场随外界温度及时间的变化而

变化的特性,且能全面考虑土体中水或冰相变时土体热物理参数的变化。数值模型采用二维平面应变问题模拟挡墙试验模型,尺寸与试验模型保持一致,如图1所示。图中T1~T12为温度传感器,用以监测试验过程中土体的实时温度变化;D1~D6为位移传感器,但由于未重点研究模型挡墙变形特性,因此,未对模型挡墙变形及墙面位移进行分析。



(a) 加筋土挡墙试验模型<sup>[6]</sup>



(b) 加筋土挡墙有限元模型

图 1 加筋土挡墙试验模型与有限元模型

Fig. 1 GRS retaining wall test model and finite element model

图 1 中挡墙数值模型传热边界温度条件为

$$T = T_{air} \quad (1)$$

挡墙右侧与底部的隔热边界条件为

$$\partial T / \partial x = 0; \partial T / \partial y = 0 \quad (2)$$

模型初始温度与室内模型试验初始温度相同,

即 10 °C,因此,当  $t=0$  h 时

$$T_0 = 10 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

数值模型中填料采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,面板采用线弹性模型,筋材采用 Plaxis 自带的格栅单元模拟,其中各项参数数值均来自文献[6],各材料热物理及力学参数如表 1 所示。由于不关注挡墙在冻融作用下的变形特性,为了提高模型计算速度,数值模型中未设置任何接触面。

图 2 给出了 5 次冻融循环作用下试验内部温度监测值与数值模拟温度计算值的对比结果。如图 2 所示,在 -15~35 °C 的 5 次冻融循环中,数值计算结果与试验监测结果都呈现出周期性变化,但都明显滞后于环境温度的升高与降低,其中,靠近面板与挡墙顶部的监测点温度波动幅度较大。数值模拟计算结果与试验监测结果的变化趋势一致,总体上吻合较好,因此,该数值模型及建模方法适用性较强,可用于模拟分析加筋土挡墙内部温度场变化特性。

## 2 不同饱和度条件下填料的热物理参数取值

为了全面分析填料热物理参数对加筋土挡墙内部温度场的影响,从相关文献<sup>[13-26]</sup>中收集了大量适用于填料的粗粒土热物理参数数据,包含融土、冻土的导热系数与比热容,如图 3、图 4 所示。当粗粒填料处于完全干燥状态时(土体饱和度  $S_r=0$ ),土中气相的导热性能偏低,因此,干土以“颗粒接触导热”为主,致使干土导热系数较低;随着土体饱和度的增加,土体由完全干燥逐渐变为非饱和,最后至饱和状态,其导热机理逐步由“颗粒接触导热”转变为“水桥导热”,最后变为液、固相共同导热,填料的导热系数也得到较大幅度的增长,如图 3 所示。整体看来,随着土体饱和度的增长,其导热系数变化规律近似于双曲线形式<sup>[26]</sup>。当非饱和粗粒土处于负温环境时,其内部液相相变为冰,此时的土体为冻土。冰的导热系数大于水,且冻土颗粒与冰的接触方式相比融土颗粒与水有较大区别,因此造成同种土体分别处于冻结状态与融化状态时导热系数在非干燥时存在差异。因此,在进行有限元模拟时,

表 1 验证模型各材料热物理及力学参数

Table 1 Thermal and mechanical parameters of materials in finite element model

材料	密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	弹性模量 $E / \text{MPa}$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	导热系数 $\lambda / (\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$	比热容 $C / (\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C}))$
填料	1.89	25	0.3	12	22	1.82(冻土)	1.72(冻土)
						1.63(融土)	2.14(融土)
模块	2.50	10 000	0.2			0.62	0.92
筋材	0.35					0.50	2.30

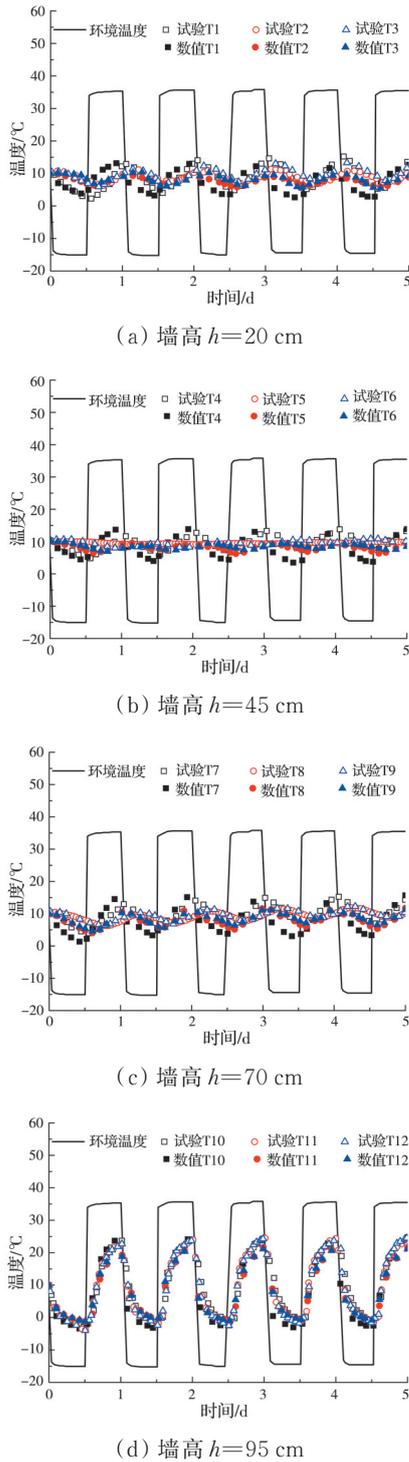


图 2 模型试验结果与数值试验结果对比

Fig. 2 Measured values compared with numerical simulation values

针对填料导热系数的取值,需将冻土与融土分开考虑。为了使分析结果更具代表性,在融土与冻土数据集中选择最外侧与最内侧的若干数据,代表适用于填料的粗粒土在冻结和融化状态下的导热系数随饱和度变化的最大与最小值范围,随后用双曲线对其进行拟合,具体函数形式如图 3 所示。

图 4 为收集的粗粒土比热容数据集。由图 4 可

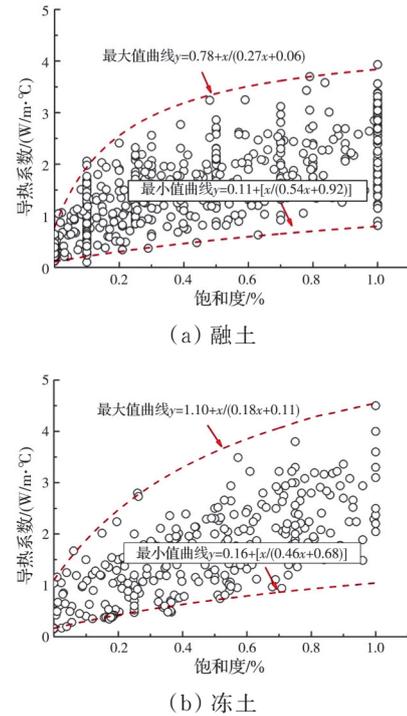


图 3 冻、融状态下粗粒土导热系数与饱和度的关系

Fig. 3 Relationship between thermal conductivity and saturation of coarse-grained soil under frozen and thawed states

见,与土体导热系数相似,随着饱和度的增加,土体的比热容呈线性趋势增加。土体的比热是组成土体各物质成分热量变化的平均值,与颗粒的接触关系、排列方式无关。当土体由融土变为冻土时,土体内的水相变为冰,比热由 4.2 kJ/(kg·°C)减小为 2.1 kJ/(kg·°C)。由此可见,同一土体,其冻结状态下的比热容小于未冻结状态。因此,没有单独统计冻土的比热容,而是以融土比热容为基础,通过体积加权计算得到冻土的比热容;最后,采用与导热系数相似的取值方式,对比热容数据集线性拟合出其随饱和度变化的最大与最小值范围。

考虑到在施工和后期服役过程中加筋挡墙内部填料不可能含有较多的水,因此,将饱和度最大值取为 0.6,分析填料饱和度  $S_r$  分别为 0、0.2、

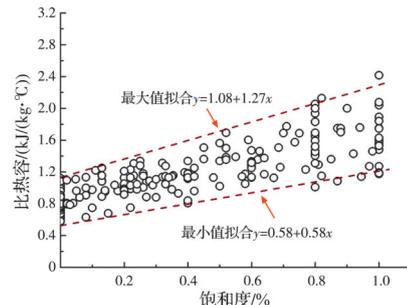


图 4 正温状态下粗粒土比热容与饱和度的关系

Fig. 4 Relationship between specific heat and saturation of coarse-grained under thawed state

0.4、0.6条件下加筋土挡墙内部温度场的分布及变化规律。填料热物理参数分别取自以上饱和度时的最大、最小值,具体取值如表2所示。

表 2 加筋土挡墙数值计算填料热参数取值范围

Table 2 Numerical simulation thermal parameter value ranges of filling materials for GRS retaining walls

饱和度 $S_r$	导热系数 $\lambda/(W/(m \cdot ^\circ C))$		比热容 $C/(kJ/(kg \cdot ^\circ C))$					
	最大值	最小值	最大值	最小值				
	冻土	融土	冻土	融土				
0.0	0.81	0.81	0.11	0.11	1.15	1.15	0.55	0.55
0.2	2.47	2.40	0.43	0.30	1.29	1.36	0.59	0.66
0.4	3.30	3.18	0.62	0.47	1.46	1.60	0.66	0.80
0.6	3.86	3.51	0.80	0.60	1.62	1.83	0.73	0.94

### 3 加筋土挡墙温度场分析数值模型

#### 3.1 工程实例及有限元模型

乌鲁木齐市某高架桥匝道路基两侧设置了分离式立体交叉加筋土挡墙,用于收缩坡脚。加筋土挡墙于2004年10月完工,该段挡墙高3~8 m不等。挡墙地面以下部分水泥混凝土采用抗硫酸盐水泥,并刷沥青防腐。每块面板厚度与高度分别为0.2、0.5 m,墙顶路面结构厚  $h=0.5$  m,筋材选用30 mm×2.0 mm钢塑土工加筋带,极限抗拉强度不小于150 MPa,加筋间距为0.5 m,如图5所示。

以该工程为背景建立的加筋土挡墙有限元模型如图6所示,其中墙高7.5 m(含墙顶路面结构0.5 m),采用二维平面应变问题模拟挡墙模型。填料与地基土体通过Mohr-Coulomb弹塑性模型模拟,面板、挡墙基础与沥青混凝土路面均采用线弹性模型,筋材为Plaxis中自带的格栅单元。为了减小模型的边界效应,加筋土挡墙数值模型的墙顶长度、面板旁混凝土路面长度与地基土深度分别为

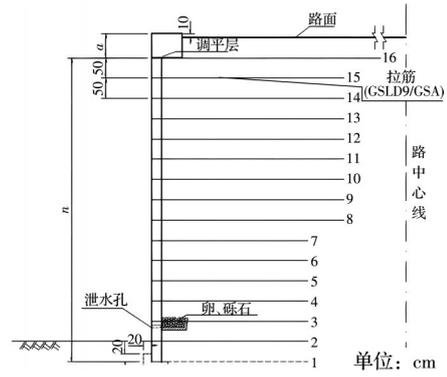


图 5 乌鲁木齐市某加筋土挡墙断面图

Fig. 5 Cross-section of a GRS retaining wall in Urumqi

4.3、2.1、2.1倍墙高;模型两侧与底部设置隔热边界,地表的混凝土路面与挡墙表面设置了传热边界,模型单元数量为4 098个,节点数量为33 281个。

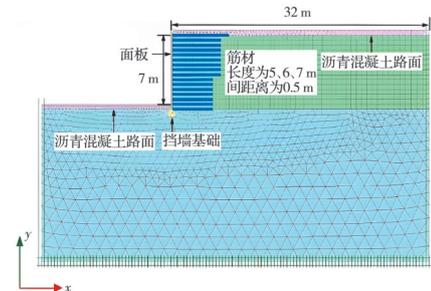


图 6 数值计算模型

Fig. 6 Numerical simulation model

填料与筋材的力学参数,地基土体、面板、挡墙基础与沥青混凝土路面的力学及热物理参数均参考文献[5]。受温度效应影响,筋材、填料与地基土的弹性模量应随着温度的变化而改变,但由于重点讨论温度场的变化特性,因此,在模拟过程中,不考虑材料弹性模量随温度变化而变化的特性。以上材料的力学与热物理参数如表3所示。

表 3 数值模型中材料的热参数及力学参数

Fig. 3 Thermal and mechanical parameters of materials in the numerical simulation model

材料	密度 $\rho/(g/cm^3)$	弹性模量 $E/MPa$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	导热系数 $\lambda/(W/(m \cdot ^\circ C))$	比热容 $C/(kJ/(kg \cdot ^\circ C))$
填料	1.89	35	0.30	1	22	见表 2	见表 2
地基土	1.92	45	0.27	15	22	1.91(冻土)	1.93(冻土)
						1.72(融土)	2.45(融土)
路面	2.20	1 200	0.22			1.21	0.92
面板	2.40	10 000	0.20			1.50	0.87
筋材	0.35		0.25			0.50	2.30

#### 3.2 考虑太阳辐射和对流作用的边界温度

实际工程中,加筋土挡墙的面板、墙顶与底部的沥青混凝土路面均长期暴露于环境温度中,在考虑环境温度变化的同时,还需考虑太阳辐射和对流作用对挡墙面板和路面结构表层的边界温度效

应<sup>[5, 27]</sup>。边界温度  $T_R$  与环境温度  $T_{air}$  之间的关系为

$$T_R = 1.6T_{air} - 0.25L_{at} + 9, T_{air} \geq 12^\circ C \quad (4)$$

$$T_R = 1.3T_{air} + 2.8, T_{air} < 12^\circ C \quad (5)$$

式中:  $T_R$  为考虑太阳辐射和对流作用的边界温度,  $^\circ C$ ;  $T_{air}$  为环境温度,  $^\circ C$ ;  $L_{at}$  为参考地区地理纬度,

乌鲁木齐市地理纬度为  $43^{\circ}79'N$ 。

图 7 中的红色线为 2022-01-01—2022-12-31 乌鲁木齐市年气温变化线,年最大温差达  $54^{\circ}C$ ,属于典型的极端温度环境;黑色线为考虑太阳辐射和对流作用的边界温度年变化线,最高为  $47.2^{\circ}C$ ,最低为  $-24.0^{\circ}C$ 。将边界温度变化值代入模型传热边界,作为分析过程中的温度变化条件。所选工程竣工时间为 2004 年 10 月,以乌鲁木齐市 10 月份平均温度  $20^{\circ}C$  为初始挡墙内部温度,为了使计算模型内部温度分布更接近实际情况,首先进行 5 次/a 的温度变化模拟,参考温度使用图 7 中的边界温度,以第 6 次模拟作为正式分析过程。

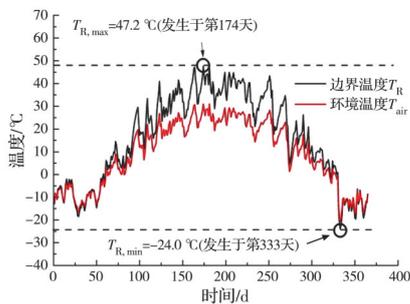


图 7 2022 年乌鲁木齐市年气温变化图

Fig. 7 Annual temperature fluctuation of Urumqi in 2022

## 4 加筋土挡墙内部温度场分析

### 4.1 极端温度变化对加筋土挡墙内部温度场的影响

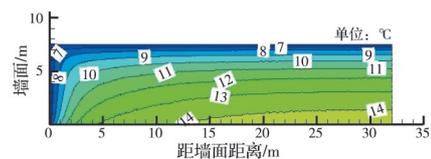
图 8 为不同时刻加筋土挡墙内部温度场分布云图。分析时间段取第 324~333 天,该时段内边界温度从  $5.9^{\circ}C$  下降至  $-24.0^{\circ}C$ ,温度跨度近  $30^{\circ}C$ ,填料从融土逐渐变为冻土,符合极端温度变化条件,具有代表性。以饱和度  $S_r=0.4$  时填料热参数取相应最大值为例,由图 8 可见,加筋土挡墙内部温度随边界温度变化而变化,当边界温度骤然下降时,引起挡墙内部温度的剧烈变化,尤其是靠近挡墙边界的区域,受边界温度影响最明显,该结论与汪恩良等<sup>[2]</sup>、肖成志等<sup>[7]</sup>的模型试验结果趋势一致。受边界温度影响,挡墙内部温度场主要变化特征为:

1) 在第 324~333 天的降温过程中,受面板与墙顶边界双向降温的影响,挡墙内部填料呈现出从墙内向墙面与墙顶温度逐渐降低的变化趋势。挡墙内部等温线如双曲线,越靠近挡墙边界,拐点越明显。填料的最低温度出现在靠近面板与墙顶附近的区域。

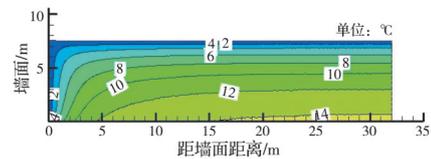
2) 如图 8 所示,3 个时间段内挡墙内部等温线分布及形状基本相似,其规律为:距面板背部 3.5 m 左右、墙顶结构 2.0 m 范围内,等温线分布较为密集,温度梯度变化明显,该区域为温度敏感区;随着向

挡墙内部延伸,等温线分布变得稀疏,温度梯度变化不明显,表明该区域温度受环境温度影响相对减弱,填料最高温出现在该区域墙底靠近基础附近,该结论与 Murray 等<sup>[28]</sup>、Segrestin 等<sup>[29]</sup>、Bathurst<sup>[30]</sup>的结论一致。

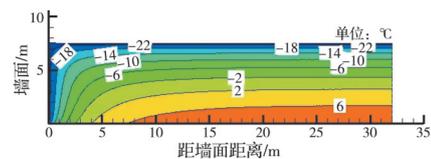
3) 将墙底最高温与墙顶最低温的温度差与墙高的比值定义为平均温度梯度  $\nabla T_V$ 。第 324 天时,填料墙底最高温与墙顶最低温分别为  $13.78^{\circ}C$ 、 $6.28^{\circ}C$ ,平均温度梯度  $\nabla T_V=1.07^{\circ}C/m$ ;第 329 天时,挡墙边界温度下降至  $0^{\circ}C$ ,与第 324 天相比,挡墙内部温度敏感区温度下降趋势明显,最低温度为  $0.48^{\circ}C$ ,但温度非敏感区整体温度变化较小,最高温度为  $12.68^{\circ}C$ ,平均温度梯度  $\nabla T_V=1.74^{\circ}C/m$ ;第 333 天时,边界温度骤然下降至  $-24^{\circ}C$ ,相比第 329 天,填料温度场发生剧烈变化,墙内温度迅速下降,其最高与最低温度分别为  $5.78^{\circ}C$ 、 $-23.12^{\circ}C$ ,平均温度梯度  $\nabla T_V=4.13^{\circ}C/m$ 。



(a) 第 324 天



(b) 第 329 天



(c) 第 333 天

图 8 加筋土挡墙内部温度场云图

Fig. 8 Temperature field contour plots inside the GRS retaining wall

### 4.2 极端温度变化对平均温度梯度的影响

图 9 给出了第 324~333 天不同饱和度工况下填料平均温度梯度  $\nabla T_V$  与填料饱和度的关系。由图 9 可见:1) 随着饱和度的增加,平均温度梯度  $\nabla T_V$  呈线性趋势减小,其原因在于,随着填料饱和度的增加,填料热物理参数(导热系数与比热容)明显提高,进而增强了填料传递热量的能力,致使加筋土挡墙内部平均温度梯度降低;2) 填料的热物理参数取极小值工况下的平均温度梯度  $\nabla T_V$ ,普遍大于极大值工况;3) 相比其他时间,第 333 天两组工况的平均温度

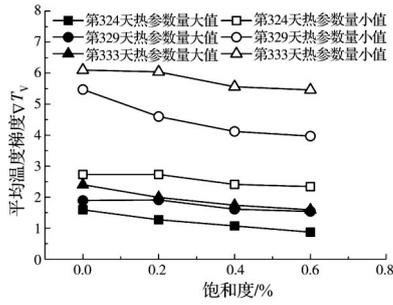


图 9 平均温度梯度与饱和度的关系

Fig. 9 Relationship between average temperature gradient and saturation

梯度 $\nabla T_v$ 也明显高于同等条件下的其他工况。从第324~329天的6 d内,边界温度从 $5.9\text{ }^\circ\text{C}$ 下降至 $0.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,温度下降率为 $0.98\text{ }^\circ\text{C/d}$ ;而从第329~333天的5 d内,边界温度从 $0.0\text{ }^\circ\text{C}$ 骤然下降至 $-24.0\text{ }^\circ\text{C}$ ,

温度下降率达 $4.8\text{ }^\circ\text{C/d}$ 。表明边界温度的急剧下降引起了加筋土挡墙内部温度场的剧烈变化,但热量在填料内的传递速率远小于边界温度的下降速率,因此造成了墙内较大的平均温度梯度 $\nabla T_v$ 。综上所述,加筋土挡墙内部温度变化与外部环境温度起伏关系密切,具有较高热参数的填料能有效减小加筋土挡墙内部的平均温度梯度 $\nabla T_v$ ,但其变化量首先取决于外部温度的变化速率。

### 4.3 温度分布曲线的变化规律

以乌鲁木齐2022年中最高与最低气温的两个时间点(第174天、第333天)为例,比较 $D_v=7、5、3、1\text{ m}$ 时4个横截面的温度分布曲线变化规律( $D_v$ 为距挡墙底部的垂直距离),如图10所示。在不同填料热物理参数工况条件下,随着饱和度的变化,温度分布曲线变化规律基本相同:随着 $D_v$ 的减小,饱

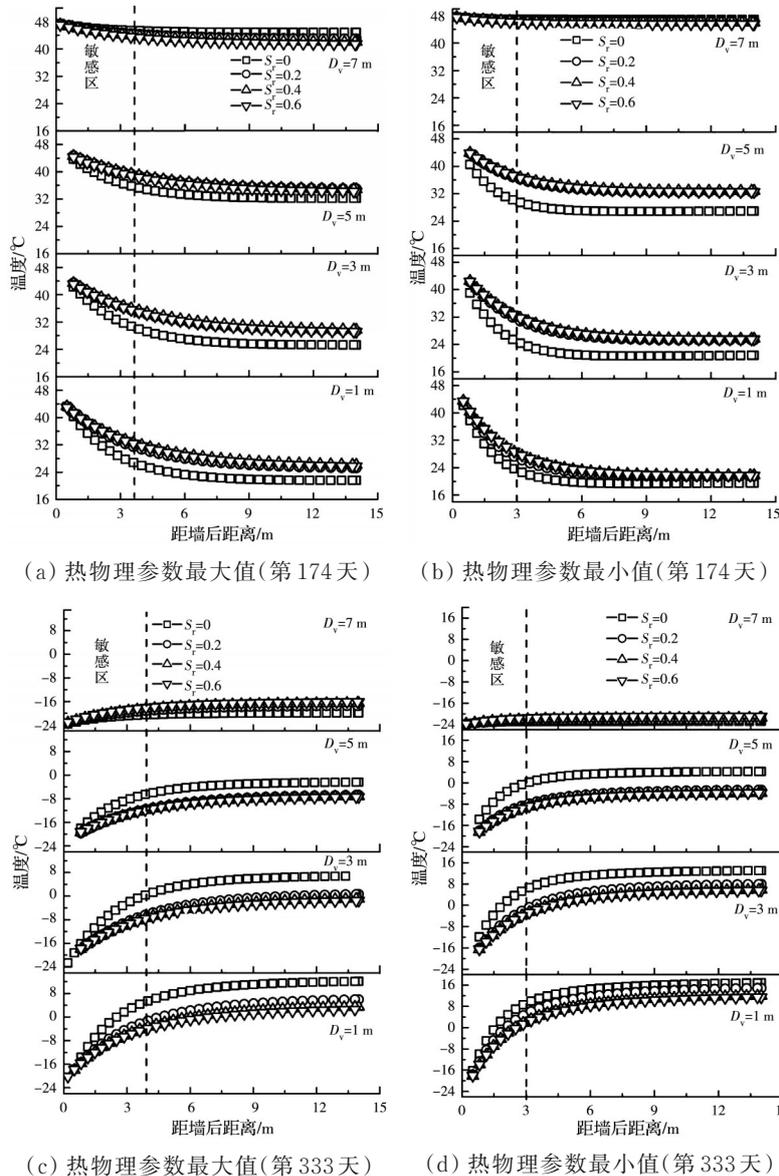


图 10 加筋土挡墙内不同横截面温度分布曲线

Fig. 10 Temperature distribution curves at different cross-sections inside the GRS retaining wall

和度越大,温度分布曲线变化幅度越小;相反,饱和度越小,温度分布曲线变化幅度越大,如 $S_r=0$ 。由图 10(a)、(b)可知:第 174 天时,边界温度达到最高值,在高温作用下,挡墙温度整体升高,外界热量流入挡墙内部。相比其他水平截面,靠近墙顶路面的横截面( $D_v=7$ )温度整体较高,温度分布曲线近似于直线。随着 $D_v$ 的减小,除靠近墙面位置外,温度整体呈下降趋势,温度分布曲线拐点越发突出,距墙面水平距离超过拐点位置时,温度分布曲线逐渐回归为一条直线。这再次说明墙内温度变化敏感区集中在靠近墙顶与面板附近,通过曲线的拐点可以判别出墙内温度敏感区的水平距离。由于第 333 天时为年边界最低温度,此时挡墙内部热量逐渐向外界区域传递,如图 10(c)、(d)所示,随着 $D_v$ 的减小,温度整体呈上升趋势,曲线拐点同样越来越明显,其变化规律与第 174 天相同。相比填料的热物理参数取最大值时的工况,取最小值时温度分布曲线拐点距墙面距离较小,这表明随着填料热物理参数的提高,墙内温度敏感区水平距离也随之增加。

#### 4.4 不同饱和度条件对最大冻深位置的影响

图 11 给出了不同饱和度条件下挡墙内最大冻深线位置。由图 11 可知,在挡墙顶部与墙面双向冻结影响下,墙内最大冻深线以双曲线形式分布。总体来看,随着填料饱和度的增加,挡墙内部最大冻深线深度增大,以饱和度 $S_r$ 为 0~0.2 范围内的增加

幅度最大。填料热物理参数取不同饱和度下最大值时,墙内最大冻深线明显大于填料热物理参数取最小值时。当饱和度 $S_r=0.6$ 时,填料热物理参数取最大值工况下的最大冻深范围涵盖了加筋区所有的筋材,而热参数最小值工况下的最大冻深范围只涵盖了约 2/3 的加筋区体积。常见的土工合成材料,如土工格栅、土工织物与土工格室等,由于材料本身的性质导致其在低温环境下会由塑性转变为脆性,增加了断裂的几率。因此,对于年温差较大、环境温度变化极端的地区,在加筋土挡墙的实际设计施工中,应充分考虑筋材在负温下的脆性变形,特殊地区应加强挡墙顶部与墙面的防冻措施,并考虑使用热参数较小的粗粒土作为填料。

## 5 结论

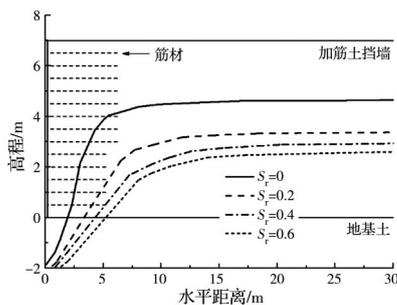
通过 Plaxis 有限元模型,在考虑太阳辐射和对流作用对加筋土挡墙面板和路面结构表面边界温度效应的基础上,研究了乌鲁木齐市某加筋土挡墙内部温度场变化特性、墙内平均温度梯度 $\nabla T_v$ 、各截面温度分布曲线以及最大冻深线位置,为后续季冻区加筋土挡墙长期稳定性分析提供理论依据,得出以下主要结论:

1) 挡墙内部等温线如双曲线分布。距面板背部 3~4 m、墙顶结构 2.0 m 的区域为温度敏感区;随着向挡墙内部延伸,等温线分布变得稀疏,该区域温度受环境温度影响相对较弱,为温度不敏感区。

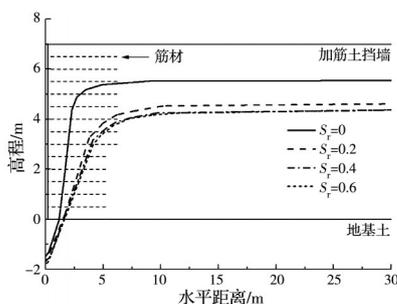
2) 加筋土挡墙内部温度变化与外部环境温度起伏关系密切,具有较高热参数的填料能有效减小加筋土挡墙内部的平均温度梯度 $\nabla T_v$ ,但其变化量首先取决于外部温度的变化速率。

3) 相比填料的热物理参数取最大值工况时,最小值工况条件下的温度分布曲线拐点距墙面距离较小,说明随着填料热物理参数的提高,墙内温度敏感区水平距离也随之增加。

4) 随着填料饱和度的增加,挡墙内部最大冻深线深度增大,以饱和度 $S_r$ 为 0~0.2 范围内的增加幅度最大。填料热物理参数取不同饱和度下最大值时的墙内最大冻深线明显大于取最小值时。在加筋土挡墙的实际设计施工中,应充分考虑筋材在负温下的脆性变形,特殊地区应加强挡墙顶部与墙面的防冻措施,并考虑使用热参数较小的粗粒土作为填料。



(a) 热物理参数最大值



(b) 热物理参数最小值

图 11 加筋土挡墙数值模型最大冻深线

Fig. 11 Maximum frost depth lines of the GRS retaining wall in the finite element model

## 参考文献

[1] 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.
- WANG E L. Experimental study on reinforcement and reinforcement-soil composite of hydraulic reinforced retaining wall in seasonal frozen soil area [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)
- [2] 汪恩良, 钟华, 孙景路, 等. 加筋土挡墙冻融试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 265-270.
- WANG E L, ZHONG H, SUN J L, et al. Experimental study on freezing and thawing of reinforced earth retaining wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 265-270. (in Chinese)
- [3] 付晓丹, 夏琼, 郭春香. 季冻区悬臂式支挡路基温度场和应力场数值分析[J]. 路基工程, 2019(1): 7-11.
- FU X D, XIA Q, GUO C X. Numerical analysis of temperature and stress fields in subgrade with cantilever retaining wall in seasonally frozen regions [J]. Subgrade Engineering, 2019(1): 7-11. (in Chinese)
- [4] 董建华, 吴晓磊, 师利君, 等. 多年冻土区L型挡墙水平冻胀效应计算方法与分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 879-890, 900.
- DONG J H, WU X L, SHI L J, et al. Calculation method and analysis of horizontal frost heave effect of L-shaped retaining wall in permafrost regions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 879-890, 900. (in Chinese)
- [5] XIAO C Z, CUI F L, DING L Q, et al. Temperature distributions in geogrid-reinforced soil retaining walls subjected to seasonal freeze-thaw cycles [J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(12): 04022234.
- [6] 崔飞龙, 肖成志, 王子寒, 等. 冻融循环作用下加筋土挡墙温度场与变形特性研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(8): 105-117.
- CUI F L, XIAO C Z, WANG Z H, et al. Temperature field and deformation behaviors of geogrid-reinforced soil retaining wall under freeze-thaw cycles [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(8): 105-117. (in Chinese)
- [7] 肖成志, 张亚涛, 于洪兴, 等. 季冻区环境温度变化对加筋土挡墙内部温度场的影响研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 2104-2114.
- XIAO C Z, ZHANG Y T, YU H X, et al. Study on the effect of ambient temperature changing in seasonally frozen zone on the temperature field inner reinforced-soil retaining wall [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 31(6): 2104-2114. (in Chinese)
- [8] KASOZI A M, SIDDHARTHAN R V, MAHAMUD R. Temperature distribution in mechanically stabilized earth wall soil backfills for design under elevated temperature conditions [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2015, 7(2): 021004.
- [9] 邓宗伟, 冷伍明, 李志勇, 等. 喷混凝土边坡温度场与应力场耦合的有限元时效分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1153-1158.
- DENG Z W, LENG W M, LI Z Y, et al. Finite element time-effect analysis of coupling temperature field and stress field of shotcrete slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 1153-1158. (in Chinese)
- [10] 王艳杰. 季节性冻土区越冬基坑水平冻胀力研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- WANG Y J. Study on horizontal frost heaving force of overwintering pit in seasonal frozen soil regions [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [11] 崔凯, 吴博涵, 李琼林, 等. 融化期川西地区季节冻土边坡稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2023, 36(6): 36-48.
- CUI K, WU B H, LI Q L, et al. Stability analysis of soil slopes in seasonally frozen regions of West Sichuan during thawing period [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(6): 36-48. (in Chinese)
- [12] CUI F L, XIAO C Z, WANG F, et al. Physical modeling of temperature influence on performance of geogrid-reinforced retaining walls considering backfill type effect [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2022, 36(3): 04022005.
- [13] BAUER S, URQUHART A. Thermal and physical properties of reconsolidated crushed rock salt as a function of porosity and temperature [J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(4): 913-924.
- [14] BARRY-MACAULAY D, BOUAZZA A, WANG B, et al. Evaluation of soil thermal conductivity models [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(11): 1892-1900.
- [15] BI J, ZHANG M Y, CHEN W W, et al. A new model to determine the thermal conductivity of fine-grained soils [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 123: 407-417.
- [16] CAMPBELL G S, JUNGBAUER J D, BIDLAKE W R, et al. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity [J]. Soil Science, 1994, 158(5): 307-313.
- [17] CARSON J K, LOVATT S J, TANNER D J, et al. Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(11): 2150-2158.
- [18] CHEN S Y, MAO J F, HAN X. Heat transfer analysis of a vertical ground heat exchanger using numerical simulation and multiple regression model [J]. Energy and Buildings, 2016, 129: 81-91.
- [19] CHEN Y Y, YANG K, TANG W J, et al. Parameterizing soil organic carbon's impacts on soil porosity and thermal parameters for Eastern Tibet grasslands [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(6): 1001-1011.
- [20] CHEN S X. Thermal conductivity of sands [J]. Heat and Mass Transfer, 2008, 44(10): 1241-1246.
- [21] DONG Y, MCCARTNEY J S, LU N. Critical review

- of thermal conductivity models for unsaturated soils [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2015, 33(2): 207-221.
- [22] ORAKOGLU FIRAT M E. Experimental study and modelling of the thermal conductivity of frozen sandy soil at different water contents [J]. *Measurement*, 2021, 181: 109586.
- [23] HE H L, ZHAO Y, DYCK M F, et al. A modified normalized model for predicting effective soil thermal conductivity [J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(6): 1281-1300.
- [24] 刘为民, 何平, 张钊. 土体导热系数的评价与计算[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(6): 770-773.  
LIU W M, HE P, ZHANG Z. Evaluation and calculation of thermal conductivity of soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 770-773. (in Chinese)
- [25] MCCOMBIE M L, TARNAWSKI V R, BOVESECCI G, et al. Thermal conductivity of pyroclastic soil (pozzolana) from the environs of Rome [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2016, 38(2): 21.
- [26] CÔTÉ J, KONRAD J M. Thermal conductivity of base-course materials [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(1): 61-78.
- [27] 谢得璞. 北方寒冷地区高速公路钢桥桥面铺装层稳定性评价[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.  
XIE D P. Stability evaluation of bridge deck pavement of highway steel bridge in cold region of North China [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018. (in Chinese)
- [28] MURRAY R T, FARRARD M. Temperature distributions in reinforced soil retaining walls [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1988, 7(1/2): 33-50.
- [29] SEGRESTIN P, JAILLOUX J M. Temperature in soils and its effect on the ageing of synthetic materials [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1988, 7(1/2): 51-69.
- [30] Bathurst R. Case study of a monitored propped panel wall [C]//*Proceedings of the International Symposium on Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls*, Denver, Colorado, United States, 1992: 159-166.

(编辑 胡英奎)