

一种新型碳基除冰复合材料及其温度场预测方法

刘汉涛¹, 张洪军¹, 魏海斌^{2*}

¹中庆建设有限责任公司, 吉林 长春

²吉林大学交通学院, 吉林 长春

收稿日期: 2022年6月18日; 录用日期: 2022年6月30日; 发布日期: 2022年7月12日

摘要

本文提出了一种新型碳基除冰复合材料, 该复合材料具有优良的热性能, 可以在短时间内产生大量热量。复合材料在实际工程应用前, 需要准确判断其融雪和升温效果。有限元方法因其具有方便、快捷、结果精确等特点是一种常用的预测方法。因此, 本文构建了一种预测复合材料在桥梁中主动融雪的有限元模拟方法, 通过加热试验结果验证了该模拟预测方法的准确性。并且该模拟预测方法适合多种导电复合材料, 适用性强。

关键词

复合材料, 除冰, 预测方法

A New Type of Carbon-Based Deicing Composite Material and Its Temperature Field Prediction Method

Hantao Liu¹, Hongjun Zhang¹, Haibin Wei^{2*}

¹Zhongqing Construction Co. Ltd., Changchun Jilin

²College of Transportation, Jilin University, Changchun Jilin

Received: Jun. 18th, 2022; accepted: Jun. 30th, 2022; published: Jul. 12th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 刘汉涛, 张洪军, 魏海斌. 一种新型碳基除冰复合材料及其温度场预测方法[J]. 土木工程, 2022, 11(7): 843-848. DOI: 10.12677/hjce.2022.117091

Abstract

In this paper, a new carbon-based deicing composite material is proposed, which has excellent thermal properties and can generate a large amount of heat in a short period of time. Before the composite material is used in practical engineering, it is necessary to accurately judge its snow melting and heating effect. The finite element method is a commonly used prediction method because of its convenience, speed, and accurate results. Therefore, a finite element simulation method for predicting the active snow melting of composite materials in bridges is constructed in this paper, and the accuracy of the simulation prediction method is verified by the heating test results. And the simulation prediction method is suitable for a variety of conductive composite materials, and has strong applicability.

Keywords

Composite Material, Deicing, Method of Prediction

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冰雪灾害问题一直影响我国从南到北广大区域,被动除冰雪方法严重影响桥梁的正常使用寿命,存在严重的安全隐患,同时也造成了巨大的经济损失[1] [2]。因此,适合在桥梁结构中使用的导电复合材料得到了广泛的研究和发展。但是由于实际工程与室内试验测试存在着巨大的差别,并且试验无法确定实际环境中复杂环境对导电复合材料融雪的影响,故采用有限元模拟分析的方式模拟导电复合材料在桥梁中的产热、传热以及融雪过程的温度场分布情况,从而判断导电复合材料在桥梁中主动融雪的可行性以及对桥梁的结构进行优化设计[3] [4] [5]。

但是现阶段对导电复合材料在桥梁中主动融雪的有限元模拟和分析较少。较多是对于管道加热、导电沥青混凝土等主动融冰雪方法的研究,数值模拟方面研究较少[6] [7] [8]。并且上述的主动融冰雪方法与电加热导电复合材料的能量转化以及温度场分布存在较大的差别,并且导电复合材料加入到桥梁结构中需要对结构进行合理的优化设计。在实际的试验和工程应用的过程中无法直观的得到桥梁上各结构层的温度场随时间变化情况,只能通过表面的雪融化情况甚至通过红外相机确定桥梁表面的温度场分布情况,存在较大的困难。同时,对于热量的传递以及融雪过程的确定也存在较大的难度,凭借有限元模拟的方式能够准确的判断导电复合材料在桥梁中的融雪和升温效果[9] [10]。

2. 材料

该导电复合材料是一种新型碳基主动除冰材料,由三层材料组成。如图 1 所示。其中,碳纤维布作为产热层,三元乙丙橡胶作为保护层。碳纤维布为优选的 12k 碳纤维原丝编成,具有优良的力学性能以及电热性能。三元乙丙橡胶具有优良的绝缘性能以及力学性能,可以保护碳纤维布免受荷载碾压破坏。导电复合材料厚度可以根据橡胶硫化时间进行控制。

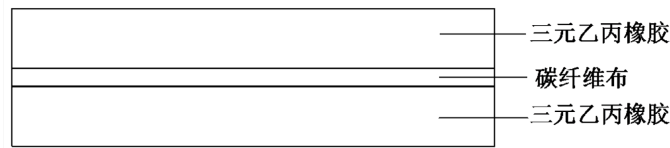


Figure 1. Composite structure diagram
图 1. 复合材料结构图

3. 预测方法

导电复合材料桥面铺装结构温度场预测方法流程图如图 2 所示。第一步，构建桥梁中常用的建筑材料以及导电复合材料温度场分析的材料本构模型。首先，确定桥梁结构中水泥混凝土、沥青下面层、沥青上面层，雪层以及导电复合材料等桥梁结构中各种材料的热物性参数(导热系数、比热容)。其次，确定桥梁中各种常用材料以及导电复合材料的弹性模量以及泊松比。最后，根据试验得到的各种材料参数，在有限元 Ansys 软件中对桥梁中常用的建筑材料以及导电复合材料构建相对应的材料本构模型。

第二步，构建导电复合材料在桥梁结构中的物理几何模型。首先，确定桥面铺装结构的组成、各结构层的位置以及厚度。其次，根据设计确定导电复合材料的埋设位置、形状及尺寸。最后，构建包括桥面铺装水泥混凝土、沥青面层、导电复合材料的物理几何模型。

第三步，针对不同的导电复合材料确定对应的能源提供量以及电 - 热能转化效率。首先，通过加热试验确定不同的输入功率下，导电复合材料对电能的转化率分析。最后，将该复合材料的能量转化率以及能量密度施加在导电复合材料上，确定导电复合材料上的边界条件。

第四步，进行网格划分并且对物理模型施加实际的边界条件，分析导电复合材料在桥梁中的传热过程以及温度场随时间的分布情况。首先，在有限元 Ansys 中建立导电复合材料在桥梁中的物理几何模型，并将材料本构模型与之对应的几何模型匹配。其次，将几何模型进行网格划分，在导电复合材料部分采用细网格，其余结构处可采用较粗网格。并且在 Ansys 中设置环境温度等边界条件，确定相应位置的加载方式及数据。最后，在 Ansys 中后处理设置相应的分析步，采用瞬态分析计算各结构以及雪层在导电复合材料通电之后的温度场变化情况。

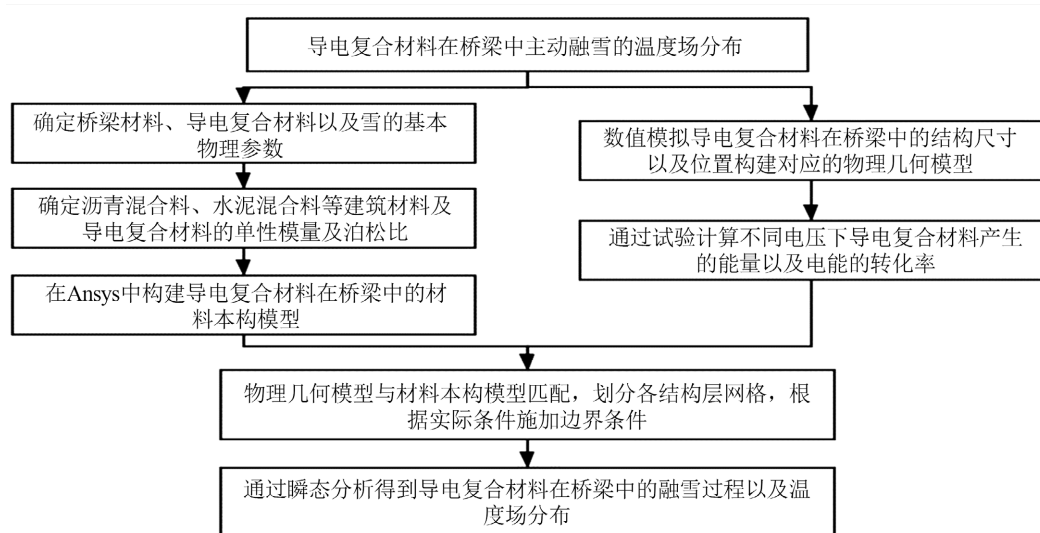


Figure 2. Prediction method flow chart
图 2. 预测方法流程图

4. 有限元建模

应用 ANSYS 有限元软件对导电复合材料桥面铺装结构温度场进行预测, 选择一般混凝土桥梁铺装结构进行研究, 导电复合材料铺装层在沥青混凝土下方, 具体铺装参数如表 1 所示。其中, 沥青混凝土厚度为 10 cm, 复合材料厚度为 6 mm, 水泥混凝土厚度为 8 cm。选择 solid70 热单元作为网格划分单元, 采用映射网格的方式划分网格, 总共包含 17,100 个单元和 19,220 个节点。网格划分模型如图 3 所示。边界条件为四周和底面设置为绝热, 不进行热交换。模型表面对流交换系数为 $17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。热流密度输入为 $1500 \text{ W}/\text{m}^2$ 。其中, 环境温度为 -5.5°C , 风速为 3 m/s 。采用瞬态分析进行求解, 载荷步设置为 120 s, 加热时间为 3600 s。

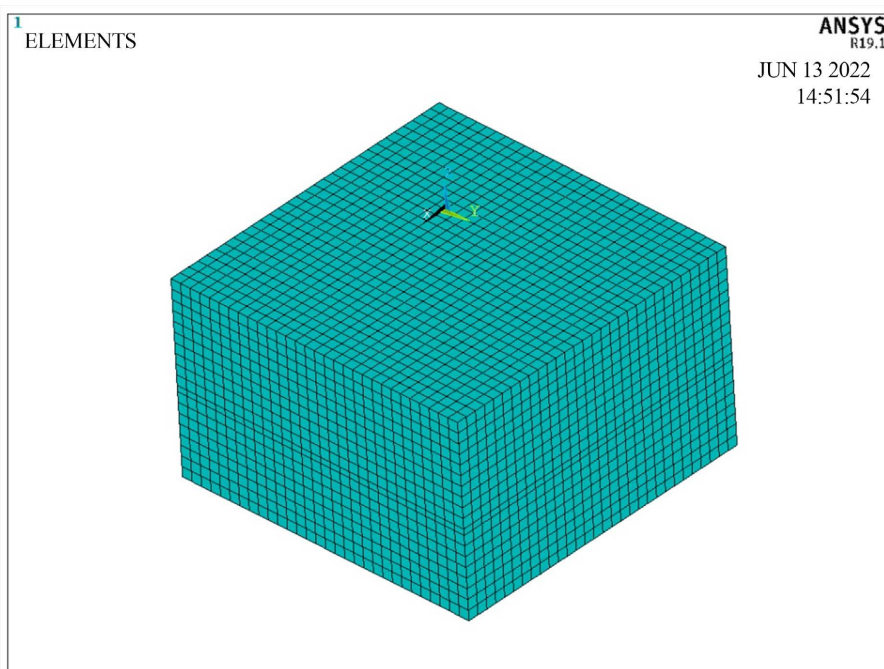


Figure 3. Model meshing diagram
图 3. 模型网格划分图

Table 1. Paving material parameters
表 1. 铺装材料参数

材料	导热系数($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	弹性模量(Mpa)	厚度(cm)	泊松比
沥青混凝土	1.78	1600	10	0.25
导电复合材料	0.75	100	0.6	0.25
水泥混凝土	1.3	30000	8	0.167

5. 预测结果

应用该有限元模拟方法对该碳基导电复合材料桥面铺装结构温度场进行预测。加热 1 h 后, 桥面铺装沥青表面温度模拟结果如图 4 所示。从图中可以看出, 模拟结果与加热结果曲线走向一致, 随着时间增加, 温度都逐渐升高。从加热试验升温曲线可以得知, 沥青路表温度升温可以分为 2 个阶段, 第一阶段为加热时间 1500 s 之前, 沥青表面升温速率为 $0.000167^\circ\text{C}/\text{s}$, 温度增长缓慢。主要原因为沥青混凝土

具有一定的厚度, 传热需要一定的时间, 这阶段主要是复合材料表面快速升温。第二阶段为 1500 s~3600 s, 沥青表面升温速率为 $0.00083\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 与第一阶段对比升温速率显著增加。主要因为这阶段复合材料表面温度足够高, 热量全部向沥青混凝土转移, 因此沥青混凝土温度开始显著增加。1 h 结束后, 试验结果沥青表面温度为 $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 模拟结果为 $-3.23\text{ }^{\circ}\text{C}$, 误差为 7.7%。预测的结果比试验结果温度略高这主要原因为试验各结构层间接触不是十分紧密以及模型四周存在对流交换。因此, 我们可以得出结论该有限元模拟预测方法具有一定的准确性。

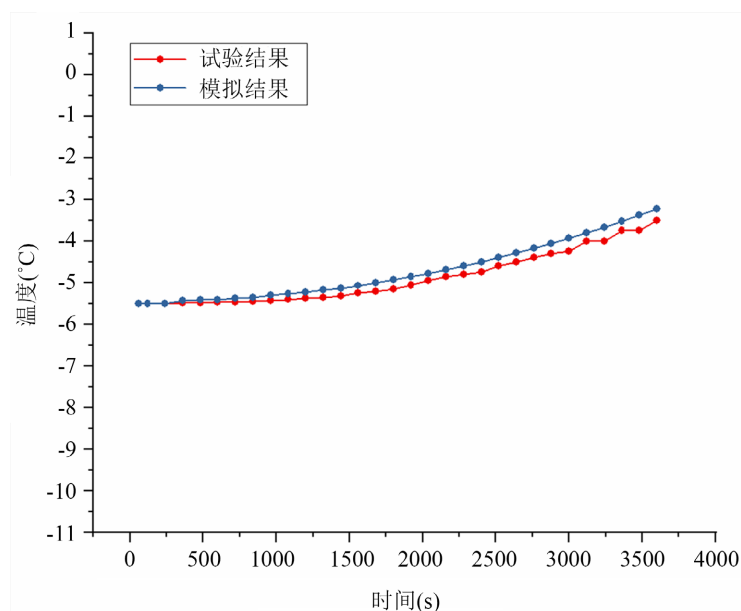


Figure 4. Heating curve diagram
图 4. 升温曲线图

6. 结论

本文提出了一种新型碳基除冰复合材料, 由三层功能材料组成, 具有良好的电热性能, 在主动电加热路面除冰领域有着广阔的应用前景。为了准确判断导电复合材料在桥梁中的融雪和升温效果, 提出了一种预测在桥梁中主动融雪的有限元模拟方法。并且通过加热试验结果验证了该有限元模拟方法预测温度场的准确性。该有限元模拟方法适用性强, 适合多种导电复合材料铺装结构温度场模拟预测。

基金项目

本研究得到了吉林省科技发展计划项目(20210203041SF)的支持。

参考文献

- [1] 马莉娅, 熊联友, 刘立强, 杨娇萍, 杨岩峰. 用于碳纤维复合材料的电热除冰技术实验研究[J]. 航空学报, 2012, 33(1): 54-61.
- [2] 喻文兵, 李双洋, 冯文杰, 易鑫. 道路融雪除冰技术现状与发展趋势分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4): 933-940.
- [3] 解亚东, 王少松. 高寒地区高速公路隧道路面发热电缆系统优化设计[J]. 施工技术, 2020, 49(13): 23-27.
- [4] 谭忆秋, 张驰, 徐慧宁, 田东. 主动除冰雪路面融雪化冰特性及路用性能研究综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 1-17.
- [5] 李侠. 水热型融雪路面金属导热管合理埋设间距研究[J]. 冰川冻土, 2015, 37(4): 1023-1027.

- [6] 解亚东, 王少松. 高寒地区高速公路隧道路面发热电缆系统优化设计[J]. 施工技术, 2020, 49(13): 23-27.
- [7] 黄彩萍, 余浩, 谭燕, 游文峰. 机场道路碳纤维电热法融雪化冰试验与数值模拟[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(2): 119-125+144.
- [8] 袁玉卿, 张业, 郭斌, 张铠显. 预埋碳纤维发热线桥面升温性能影响因素分析[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 100-107.
- [9] 汤振农, 陶珏强, 林文岩, 周土瑶, 何敏芳. 加热型沥青路面路表温度预估分析模型研究[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(3): 22-24+134.
- [10] 李赏, 韩文博, 姚亚军, 韩念琛. 基于电阻网法的路面融雪化冰系统数值模拟[J]. 公路交通科技, 2016, 33(1): 49-56.