

文章编号:1007-9629(2024)03-0245-09

SFCC 现场导热系数与温度场实测及 预测方法研究

牛艳伟¹, 匡笑艳¹, 郑军涛², 党王辉¹, 汤颖颖^{3,*}

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 深圳中铁二局工程有限公司,
广东 深圳 518000; 3. 长安大学 未来交通学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为确定钢纤维页岩陶粒混凝土(SFCC)现场实际的导热系数,与桥面板施工同步制作了不同钢纤维体积分数的 SFCC 试件,采用热板法进行测定,校核并扩展了导热系数预测公式,并且对高温沥青摊铺时 SFCC 桥面板的温度场进行了实测和数值模拟.结果表明:环境湿度为 67% 时, SFCC 的实测导热系数为 0.915~1.409 W/(m·K),增加钢纤维体积分数可提高 SFCC 导热系数;考虑湿度和钢纤维影响后的扩展 Maxwell 公式预测值与实测值吻合良好;高温沥青摊铺时桥面板 SFCC 混凝土内的温度梯度可达 20.5 °C,超过规范日温差,采用数值模拟可有效计算桥面板温度场.

关键词:钢纤维;页岩陶粒混凝土;组合桥面;导热系数;高温沥青摊铺温度场

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.03.008

Experimental Study and Prediction of Thermal Conductivity and Temperature Field of Steel Fiber Reinforced Ceramsite Concrete

NIU Yanwei¹, KUANG Xiaoyan¹, ZHENG Juntao², DANG Wanghui¹, TANG Yingying^{3,*}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shenzhen Engineering Company of CREGC,
Shenzhen 518000, China; 3. College of Future Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to determine the in situ actual thermal conductivity of steel fiber ceramsite concrete (SFCC), specimens were made synchronously with the construction of bridge deck and measured by the hot-plate method. The existing thermal conductivity prediction equation was verified and extended. Measurement and numerical simulation of temperature field of bridge deck during high temperature asphalt paving were carried out. The results show that when environment humidity is 67%, the measured thermal conductivity of SFCC is between 0.915–1.409 W/(m·K), and the increase of steel fiber will improve the thermal conductivity. Considering the environmental humidity and effect of steel fiber, the extend Maxwell equation prediction results agree well with test results. The temperature variation of SFCC under high temperature paving can attend 20.5 °C, which is more unfavorable than daily temperature difference in the specification. The numerical simulation method can effectively calculate the temperature gradient of the bridge deck.

Key words: steel fiber; ceramsite concrete; combined bridge deck; thermal conductivity; high temperature paving temperature field

收稿日期:2023-05-05; 修订日期:2023-09-13

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB2601002);国家自然科学基金资助项目(51208056);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102212909);陕西省自然科学基金基础研究计划(2023-JC-YB-292)

第一作者:牛艳伟(1981—),男,山西定襄人,长安大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:niuyanwei@chd.edu.cn

通讯作者:汤颖颖(1984—),女,湖北竹溪人,长安大学讲师,博士.E-mail:tangyy@chd.edu.cn

轻质混凝土从本世纪初开始在中国桥梁工程材料中得到应用.通常将传统混凝土中的骨料置换为页岩陶粒、粉煤灰陶粒和煤矸石等轻质骨料,以制备轻质混凝土.虽然其较低的容重可有效减小结构恒载,但由于韧性差、弹性模量低和强度无显著优势等原因,轻质混凝土的发展仍受到很大制约^[1-3].近年来随着钢结构与钢混凝土组合结构桥梁的增多,高强轻质混凝土再次引起重视,钢纤维等纤维材料的掺入提高了其抗拉强度和韧性,使其在组合桥面中得到了快速发展.

目前有关钢纤维轻质混凝土在抗压、劈裂、抗拉强度和韧性等基本力学性能方面已有很多成果^[4-6],但在导热性能方面的研究较少.肖建庄等^[7]、高志涵等^[8]、张伟平等^[9]和宫经伟等^[10]分别从配合比、孔隙结构、饱和度以及寒区特征等方面对混凝土导热系数进行了深入研究;朱振中等^[11]、Chen等^[12]和Wang等^[13]对玄武岩纤维陶粒混凝土、玻璃纤维页岩陶粒泡沫混凝土以及石蜡页岩陶粒相变混凝土的导热性能进行了试验研究.在宏观温度场方面,陈晓强等^[14]和孙金等^[15]研究了高温沥青摊铺施工中形成的温度梯度,但计算中假定的纤维混凝土导热系数分别为 2.2 、 1.4 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,存在差异.综上,国内外学者在混凝土导热性能研究方面取得了很大进展,但针对现场实际结构中钢纤维页岩陶粒混凝土(SFCC)导热系数的实测研究尚未见报道,缺少取值依据和预测方法.

本文首先在桥面施工时同步制作不同钢纤维体积分数的SFCC试件,测定其导热系数以及钢纤维的影响规律,然后校核并扩展已有的导热系数预测公式;并在桥面加密布置温度传感器,测试得到高温沥青摊铺作用下SFCC桥面板的温度场分布特征;最后对桥面板温度场进行仿真和参数分析.本研究对于完善钢纤维轻质混凝土导热性分析理论和实际应用均具有重要意义.

1 试验

1.1 试验过程

本文研究的背景工程为深圳前海2号桥,其结构形式为梁拱组合体系,其中主梁采用了钢主梁+SFCC桥面板的新型叠合梁结构.主梁及桥面示意图如图1所示,主梁为变截面箱梁,梁高由跨中 2.536 m渐变至支座位置 3.536 m;顶板、腹板、底板均采用Q345qC钢,厚度分别为 16 、 16 、 20 mm.在完成钢梁拼装后,在钢箱梁顶板顶面焊接M13剪力钉,钉长 60 mm,间距纵横向均为 20 cm;并设置 $\phi 12$ 螺纹钢筋网,网格

$10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$,钢筋网每隔 60 cm 与剪力钉焊接固定.为保证钢纤维页岩陶粒桥面铺装过程温度恒定,在夜间进行铺装,环境温度为 $15\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.为保证导热系数试件与现场材料的一致性,在现场桥面施工时,采用同一批次的钢纤维轻质混凝土同步制作导热系数试件,同时制作另外4组不同钢纤维体积分数的轻质混凝土对比试件.SFCC桥面浇筑完成后,与导热系数试件在现场同步覆盖土工布养护 28 d ,养护过程中土工布洒水,保持湿润状态; 28 d 后仍覆盖土工布,但停止洒水,试件含水率随大气湿度变化.

SFCC桥面完成 80 d 时,进行 40 mm 厚高黏度改性沥青玛蹄脂混合料(SMA-13)铺装,出料控制温度为 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$,通过预埋在SFCC桥面板中的温度传感器,对高温摊铺温度场进行实测.

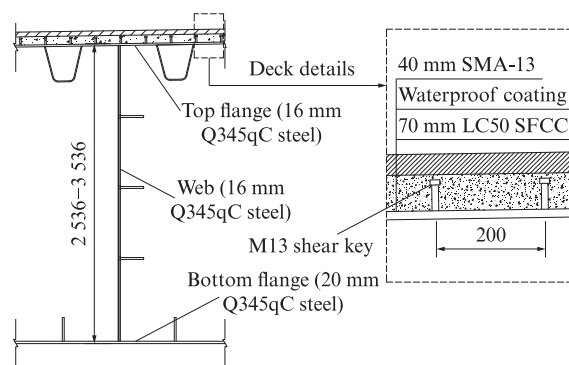


图1 主梁及桥面示意图

Fig. 1 Main girder and deck detail (size: mm)

1.2 试件制作

由于现场桥面与试件同步浇筑,因此试件混凝土的设计强度等级与桥面一致,均为LC50.在原设计配合比基础上,根据钢纤维混凝土设计规程,在 $0\%\sim 2.0\%$ 范围内调整钢纤维体积分数(φ_{SF}),钢纤维采用深圳恒驰远科技有限公司生产的剪切波纹型钢纤维.骨料采用湖北汇腾轻集料环保产品有限公司生产的R900级破碎页岩陶粒,粒径为 $5\sim 16\text{ mm}$,密度为 $1900\text{ kg}/\text{m}^3$.所用原材料产地和规格如表1所示.

制备0#~4#共5组配合比试件,每组至少3个试件.其中0#试件无钢纤维掺入;2#试件采用桥面施工配合比,钢纤维体积分数为 1.0% ;1#、3#、4#试件配合比中钢纤维的体积分数分别为 0.6% 、 1.4% 和 1.8% .具体配合比如表2所示.

导热系数试件初始制备尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 30\text{ mm}$,达到设计强度后对试件进行二次切割,控制试件接触面平整并平行,平面尺寸为 $190\text{ mm}\times 190\text{ mm}$,厚度为 $20\sim 21\text{ mm}$,其精确值由测试仪器对试件加压后自动测量.导热系数试件如图2所示,其中1#-B1、

表1 原材料产地和规格
Table 1 Production place and specification of raw material

Item	Cement	Sand	Ceramiste	Fly ash	Steel fiber	Additive	Water
Production place	Huarun	Guangzhou	Hubei Huiteng	Shajiao Power Plant	Shenzhen Hengchiyuan	Shenzhen Tiandi	Shenzhen
Specification	P·O 42.5R	Medium sand	Grade 900	Grade II	Shear ripple-shaped	High performance retarder	Tap-water

表2 钢纤维页岩陶粒混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of steel fiber reinforced ceramiste concrete

Specimen	Water-cement ratio	Volume fraction/%							Sand ratio (by mass)/%
		Water	Cement	Sand	Ceramiste	Fly ash	Steel fiber	Additive	
0#-1,2,3	0.33	15.0	14.6	28.0	34.2	7.7	0	0.5	51.89
1#-1,2,3,B1,B2	0.33	15.0	14.6	28.0	33.6	7.7	0.6	0.5	50.54
2#-1,2,3,B1	0.33	15.0	14.6	28.0	33.2	7.7	1.0	0.5	49.72
3#-1,2,3	0.33	15.0	14.6	28.0	32.8	7.7	1.4	0.5	48.92
4#-1,2,3	0.33	15.0	14.6	28.0	32.4	7.7	1.8	0.5	48.01

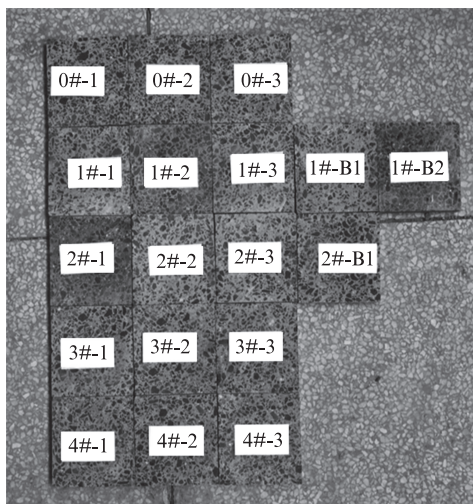


图2 导热系数试件
Fig. 2 Thermal conductivity specimen

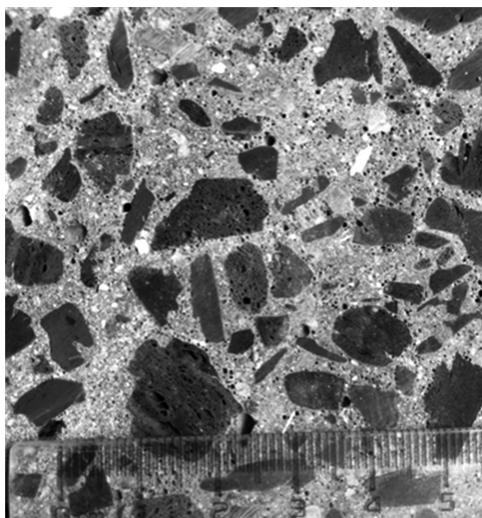


图3 试件3#-3的局部图
Fig. 3 Partial view of specimen 3#-3

1#-B2和2#-B1为备用试件.通过观察试件3#-3的局部图(图3)可知,试件中粗骨料、钢纤维分布均匀,页岩陶粒内部孔隙可见.每个试件测试3次,取平均值作为有效导热系数 λ_e 的代表值.力学(抗压、抗折)性能和抗渗性能试件按照相关规范制备,具体可参考相关文献,这里不再赘述.

1.3 导热系数测试

采用湘仪仪器DPRL-III型导热系数测试仪,按照GB/T 10295—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法》进行试验,平均测试温度 $(22\pm 2)^\circ\text{C}$.测试前观察试件中钢纤维分布,避免钢纤维贯穿或相互连接而形成热短路.导热系数和温差有一定的关系,考虑到仪器温度可控范围以及热铺沥青施工情况,并经过调试,热板和冷板的温度设定为 $68,34^\circ\text{C}$,实际测试的温度略有浮动,偏差控制在 0.2°C 以内.

1.4 高温摊铺温度场实测方法

混凝土温度场实测间距通常在 $5\sim 10\text{ cm}^{[14]}$,为得到桥面板在深度方向上的精密温度分布,利用桥面板平面结构的特点,将传感器沿板厚方向倾斜排列,从而避免传感器之间的碰触及影响.传感器布设如图4所示,在 7 cm 桥面板厚度范围内共布设8个传感器,温度场分辨精度达到 1 cm .传感器横向距离桥面边缘 1.5 m 以上,以避免边缘热损失影响,关注一维单向热流.混凝土振捣会影响传感器的定位,在振动横梁通过后微调传感器位置,再进行桥面抹平处理,见图5(a).热铺沥青层中分别在底面(桥面板顶板)和顶面各布置1个传感器,用以确定热边界条件.底面传感器先用少量沥青混凝土固定,避免压路机在振动压平过程中滑动,待碾压沥青层达到 4 cm 设

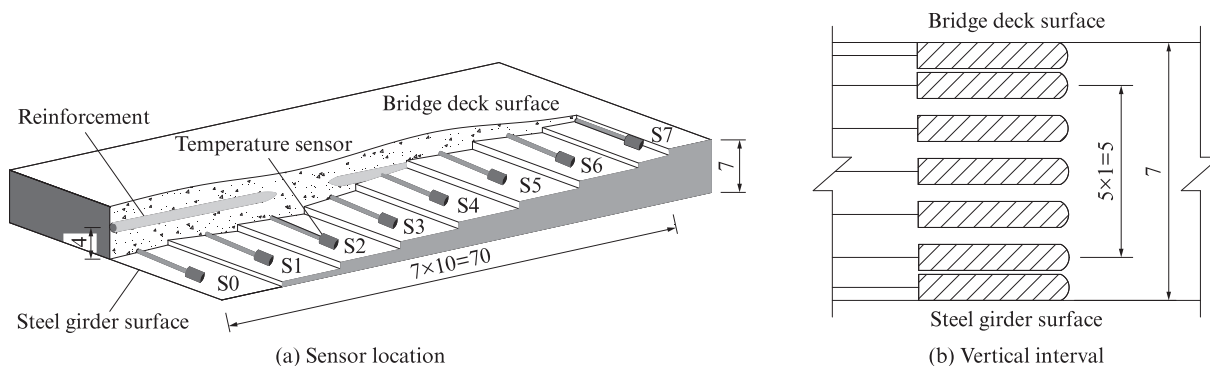


图4 桥面板温度场传感器布设
Fig. 4 Distribution of deck temperature sensors (size: cm)

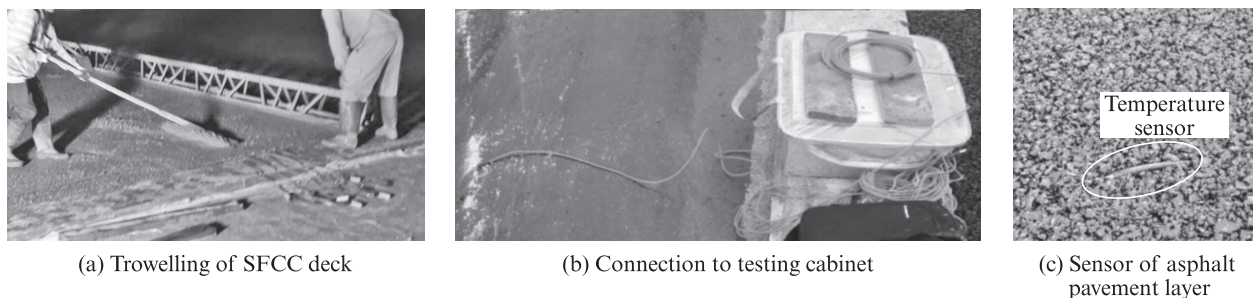


图5 实测温度场传感器布设
Fig. 5 Distribution of sensors of temperature field

计厚度时,置入沥青层顶面传感器,安装方法如图5(b)、(c)所示.传感器接巡检机箱自动采集数据并存储,采样频率1次/10 min.

2 结果与分析

2.1 导热系数

各试件导热系数试验值如图6所示.由图6可见,桥面试件实测的导热系数均具有一定的离散性,0#~4#试件实测的导热系数平均值分别为0.915、1.063、1.301、1.349、1.409 W/(m·K).

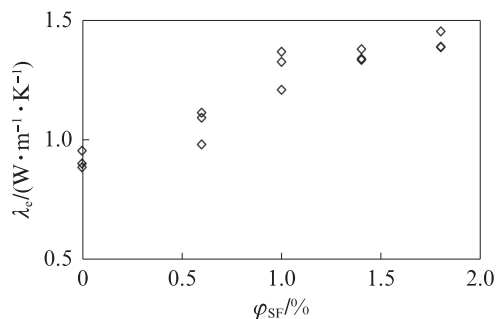


图6 各试件导热系数试验值
Fig. 6 Experimental value of thermal conductivity of each specimen

取SFCC实测导热系数平均值与钢纤维体积分数进行拟合分析,发现二者呈线性相关,相关系数 R^2 为0.940 7,如图7所示.与文献[16]中普通混凝土和

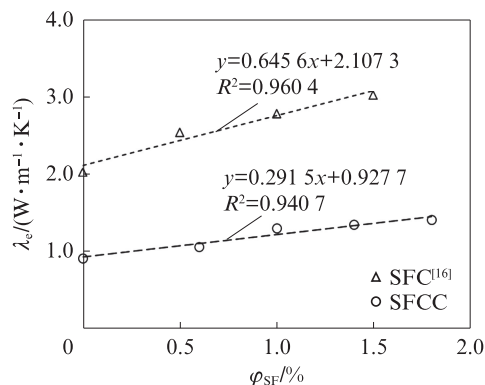


图7 SFCC与普通钢纤维混凝土的导热系数
Fig. 7 Thermal conductivity of SFCC and general steel fiber concrete

普通钢纤维混凝土(SFC)的试验结果(见图7)相比:将粗骨料置换为页岩陶粒后SFCC的导热系数均明显降低,相同钢纤维体积分数下SFCC的导热系数约为SFC的54.2%~57.6%;总体上钢纤维体积分数每提高0.5%,SFCC的导热系数可提高0.146 W/(m·K),低于SFC的导热系数增长幅度0.323 W/(m·K).

与不含钢纤维时相比,SFCC和SFC的导热系数增长率如图8所示.由图8可见:在增长率方面,SFCC与SFC规律相同,且增长幅度几乎相同;当钢纤维体积分数为0.5%时,SFCC和SFC的导热系数增长率分别为13.6%、13.2%;钢纤维体积分数继续提高,导热系数增长率逐渐降低,当钢纤维体积分数

接近上限2.0%时,SFCC和SFC的导热系数增长率分别为9.6%、9.5%。

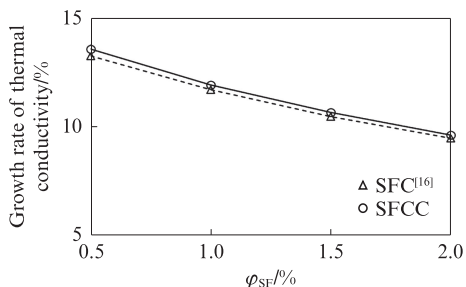


图8 SFCC与SFC的导热系数增长率

Fig. 8 Growth rate of thermal conductivity for SFCC and SFC

2.2 理论分析

2.2.1 基本假定和计算参数

为简化计算,本文模型假设如下:(1)页岩陶粒混凝土按均一材料处理;(2)钢纤维在SFCC中均匀分布.在上述假设下,SFCC为由页岩陶粒混凝土和钢纤维组成的二相材料.本文干燥状态下页岩陶粒混凝土的导热系数为 $0.682 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,约为普通混凝土导热系数的0.4~0.5倍;钢纤维的导热系数较易获得,本文所用剪切波纹型钢纤维的导热系数为 $36.000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

工程中实际使用的混凝土为不完全干燥状态但也未达到饱和含水率,处于非饱和状态,其有效导热系数很难计算;但从试验的角度,饱和状态与干燥状态下的导热系数相对关系是稳定的.文献[7,9]的研究表明饱和状态下的混凝土导热系数较干燥状态下提高了约50%(分别为47.6%和49.6%),且非饱和状态下混凝土导热系数与含水率基本成正比,则推算得到本研究中页岩陶粒混凝土在饱和状态下的导热系数为 $1.023 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.实际工程计算中较难直接得到结构构件的具体湿度(或饱和度),文献[17]的研究表明,混凝土内部湿度与大气相对湿度(或水汽含量)基本相当.在深圳地区施工当月平均相对湿度为67%,可推测混凝土内部湿度与之接近,且表面湿度一般略有降低.文献[18]的研究亦表明,100 d内混凝土内部2 cm处相对湿度约为65%,与文献[17]结果一致.综合上述研究,本文计算中假定混凝土试件的饱和度为65%,则在 $0.682\sim 1.023 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 之间根据线性内插得到其导热系数为 $0.904 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.而钢纤维为致密结构,假定其导热系数不受混凝土含水率影响.

2.2.2 计算模型

混凝土导热系数的理论计算模型包括串联模型、并联模型和Maxwell模型.其中Maxwell模型应

用最为广泛,在其基础上扩展的模型有Bruggeman模型和Hasselman模型等.前3个模型将混凝土按二相均匀混合材料处理,扩展的2个模型考虑了界面热阻的影响.根据二相材料假定,本文首先采用Maxwell模型对SFCC的有效导热系数 λ_e 进行拟合,计算式如下:

$$\lambda_e = \lambda_1 \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 - 2(\lambda_1 - \lambda_2)\varphi_{\text{SF}}}{2\lambda_1 + \lambda_2 + (\lambda_1 - \lambda_2)\varphi_{\text{SF}}} \quad (1)$$

式中: λ_1 为页岩陶粒混凝土的导热系数; λ_2 为钢纤维的导热系数.

按照式(1)计算的SFCC导热系数如图9所示.由图9可见:干燥状态和饱和状态下SFCC的导热系数分别为计算值的上、下限;对于无钢纤维掺入的试件(钢纤维体积分数为0%),计算值与试验值吻合较好,误差为1.2%;但随着钢纤维体积分数的增加,试验值逐渐偏离计算值且超出计算值上、下限的包络,表明原模型对于钢纤维的影响考虑偏低.因此对Maxwell公式进行扩展,在式(1)的基础上引入钢纤维影响系数 α_s ,扩展公式如下:

$$\lambda_e = \lambda_1 \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 - 2(\lambda_1 - \lambda_2)\varphi_{\text{SF}}\alpha_s}{2\lambda_1 + \lambda_2 + (\lambda_1 - \lambda_2)\varphi_{\text{SF}}\alpha_s} \quad (2)$$

式中:钢纤维影响系数 α_s 经试算取8.9.

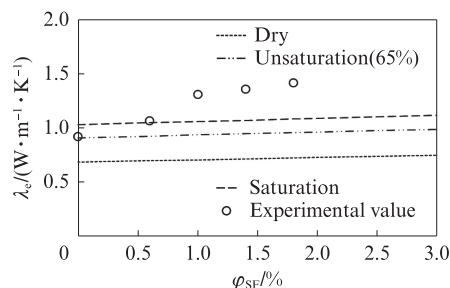


图9 Maxwell公式计算值与试验值对比

Fig. 9 Comparison of thermal conductivity from Maxwell equation and experimental value

采用式(2)计算的结果如图10所示.由图10可见,计算值与试验值的平均误差为5.0%。

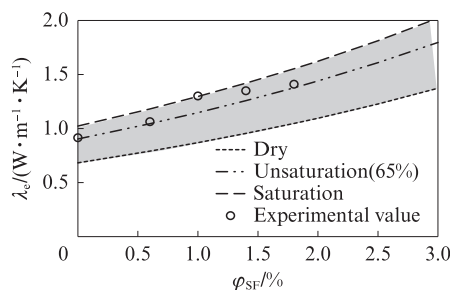


图10 扩展公式计算值与试验值对比

Fig. 10 Comparison of thermal conductivity from extended equation and experimental value

综上,本文建议SFCC导热系数预测的简化计算步骤为:(1)页岩陶粒混凝土的导热系数(干燥状态)在不具备条件时,可通过相近配合比普通混凝土(页岩陶粒置换为普通骨料)乘以0.4~0.5的折减系数得到;(2)饱和状态下SFCC导热系数可由其干燥状态下的导热系数乘以1.5得到;(3)实际状态下SFCC的含水率可根据王卫伦等^[17]的模型估算,再根据含水率求得其导热系数;(4)采用扩展的Maxwell模型计算SFCC有效导热系数。

为了验证扩展公式的适用性,选取文献[16]试验值进行分析.该研究共涉及15种配合比,其中普通混凝土9种,钢纤维混凝土3种(钢纤维体积分数分别为0.5%、1.0%和1.5%);普通混凝土的导热系数在2.012~2.182 W/(m·K)之间,其中第9种和钢纤维混凝土的配合比最为接近,以其导热系数2.130 W/(m·K)作为计算参数,钢纤维的导热系数取36.000 W/(m·K).计算结果如图11所示.由图11可见:直接采用Maxwell模型的计算值仍偏低,且随着钢纤维体积分数的增加,计算值与试验值^[16]的平均误差增大;采用本文的扩展模型时,计算值精确性提高显著,平均误差为4.6%.另外,选取文献[19]试验值进行验证.文献[19]中钢纤维体积分数为1.02%(钢纤维掺量80 kg/m³)时,自然养护条件下混凝土导热系数为2.640 W/(m·K),采用Maxwell模型的计算值偏小17.1%,采用本文预测模型的误差为0.8%。

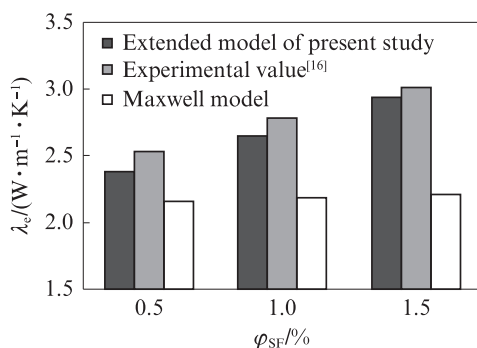


图11 模型适用性分析

Fig. 11 Model feasibility analysis

2.3 桥面温度场

桥面板温度场主要通过沿深度方向的一维温度梯度表征.约定SFCC桥面板顶面位置坐标为0 cm,坐标沿深度方向递增,桥面板厚7 cm,则SFCC桥面板底面坐标为7 cm.规范图示和已有研究均表明,钢梁导热性极佳,温度可近似为均匀分布,其数值与接触的混凝土温度相同,因此下列图表中仅示出混凝土层的温度分布。

桥梁SFCC桥面板上部的高温沥青摊铺在上午10:00完成,其实测温度场时变分布如图12所示.由图12可见:摊铺前桥面板的温度分布均匀,由顶部25.2℃递减至底部22.5℃;拌和沥青的摊铺前温度为130℃,在铺装完成后30 min(10:30),桥面板顶面温度急剧增加,出现最大温差,此时顶面温度达到61.8℃,底层升温存在滞后,为38.6℃;此后,桥面板顶层温度逐渐降低、底层温度逐渐升高,温度分布区域均匀;铺装完成2 h后(12:00)桥面板温度分布基本均匀,约为46.0℃;之后由于散热作用,桥面板整体温度继续逐步降低.图12一并给出了正常状态下13:00时最大日照温差实测值,桥面板顶、底面温度分别为32.3℃和29.1℃,温差为3.2℃,最高温度出现在混凝土顶面,最低温度(27.2℃)出现在距底面2 cm处,而底面由于直接与钢箱梁接触,温度略高,整体温度呈W形分布。

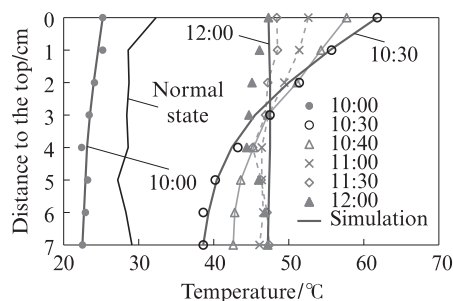


图12 实测温度场时变分布

Fig. 12 Distribution of temperature field varying with time

将高温摊铺30 min时的温度场扣除摊铺前的温度(初始温度),即得到高温摊铺产生的温度梯度,如图13所示.由图13可见,SFCC高温摊铺的顶底温差达到20.5℃,远高于日照最大温差.文献[14]测试了普通钢纤维混凝土SFC桥面在高温(140℃)沥青摊铺温度场下的温度分布,其温度梯度也在图13中示出.由图13可见,总体上高温摊铺产生的温度梯度均高于中国现行规范JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》和美国规范ASSHTO—2004 AASHTO FRFD Bridge Design Specifications(SI Units, Third Edition)的日照温度梯度,因此在设计桥面时应考虑高温摊铺温度梯度的影响.SFCC和SFC在高温摊铺时,顶面(接触面)产生的相对升温基本相同(约36℃),但向下传递时SFCC温度衰减更快,产生的温度梯度也更大,SFCC和SFC桥面顶底温差分别为20.5、14.8℃。

2.4 有限元仿真

采用通用软件Abaqus对试验构件建立有限元模型.采用二维Shell单元建模,桥面板的弹性模量为

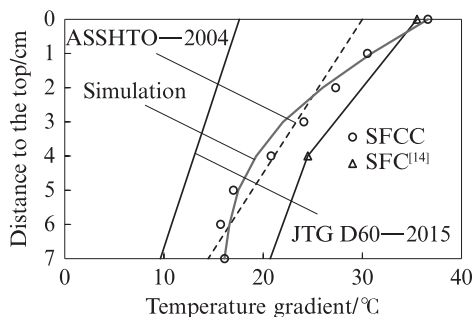


图13 温度梯度对比

Fig. 13 Comparison of temperature gradient

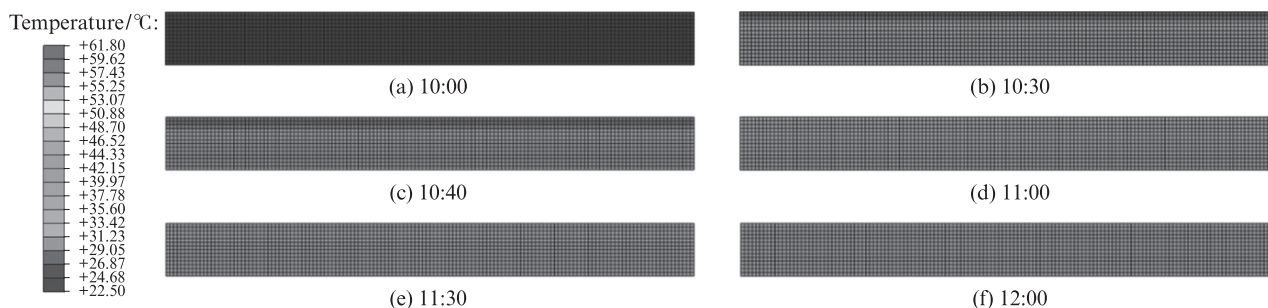


图14 Abaqus模拟时变温度分布

Fig. 14 Abaqus simulation of temperature distribution varying with time

对有限元模型温度场(见图14)进行分析,对比各时刻温度场和模型计算所得SFCC高温摊铺相对温度梯度与实测温度梯度(见图12、13)可知:Abaqus计算桥梁SFCC桥面板上部温度从模拟10:00实测温度开始,在30 min后达到最大温差;用Abaqus软件计算的SFCC高温摊铺温差最大值与实测值相差较小,相对误差为4.2%;此后,与实测数据趋势相同,桥面板顶层温度逐渐降低、底层温度逐渐升高,在铺设完成2 h后(12:00),桥面板内模拟温度约为47.4 °C(图12中平均温度为46.0 °C,基本一致);之后整体温度逐渐下降.总体上,在铺装完成40 min内,实测值与模拟值基本吻合;铺装完成1 h后,模拟值与实测值趋势大致相同,相差最大的地方位于距离顶面3 cm处,差值为1.8 °C,相对误差为3.8%;铺装完成2 h后,模拟值与实测值相差最大的地方位于距离顶面4 cm处,差值为3.1 °C,相对误差为6.9%.

导致计算值与实测值产生误差的主要原因是:

(1)SFCC为页岩陶粒混凝土和钢纤维组成的二相材料,材料比热容大小对温度有一定影响,比热容大时桥面板内温度下降较快;比热容小时则温度下降较慢.而混凝土的比热容会随着温度的升高而增大.目前对该桥面板的比热容变化规律尚不明确,本文按恒定比热容考虑.(2)大气温度采用天气预报数据,与桥位的实际温度会有一定差异,将会影响对流换热参数.(3)温度传感器测量桥面板温度时亦存在一定

系统误差.
2.15×10⁴ MPa,泊松比为0.2,导热系数为1.301 W/(m·K),线膨胀系数为1×10⁻⁵.对桥面板进行瞬态热传递分析,单元类型选用Heat Transfer单元,对模型进行网格划分后共计2 115个节点,1 960个单元.该模型需要先对上表面施加25.2 °C的边界条件,模拟桥梁SFCC桥面板10:00时的温度,此时温度分布均匀,由顶部25.2 °C递减至底部22.5 °C,符合桥面板温度实测的情况.将该桥面板温度作为沥青铺装前桥面板的初始温度,将顶面处温度传感器测得的温度作为温度边界条件加载到表面,得到温度变化如图14所示.

系统误差.

基于有限元仿真,对不同钢纤维体积分数SFCC桥面板高温摊铺30 min时的温度场进行参数化分析,假定掺入钢纤维后SFCC比热容恒定,导热系数取实测值,结果如图15所示.由图15可见,当导热系数提高时,内层混凝土受桥面板顶部高温摊铺沥青的影响,桥面板内温度变化趋缓.这说明提高钢纤维体积分数可以减小高温沥青摊铺时桥面板内的温度梯度.

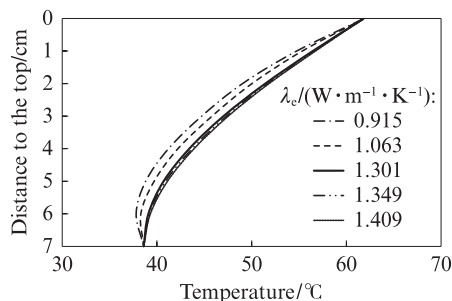


图15 导热系数对温度场影响的参数分析

Fig. 15 Parameter analysis of effect of thermal conductivity on temperature field

3 结论

(1)与普通钢纤维混凝土(SFC)相比,钢纤维页岩陶粒混凝土(SFCC)的导热系数显著降低,为0.915~1.409 W/(m·K),约为SFC的54.2%~

57.6%;钢纤维的掺入会提高SFCC的导热系数,其体积分数每提高0.5%,SFCC导热系数可提高0.146 W/(m·K),但其涨幅低于SFC;随着钢纤维体积分数的提高,SFCC导热系数增长率降低,当钢纤维体积分数的接近上限2.0%时,SFCC导热系数的增长率下降。

(2)考虑钢纤维影响系数提出了Maxwell扩展模型,该模型可有效提高SFCC和SFC导热系数预测值的准确性,模型中钢纤维影响系数建议值为8.9。

(3)SFCC桥面板在高温沥青摊铺作用下的顶底温差达到20.5℃,高于SFC,亦高于现行规范,在结构设计时应予考虑.SFCC和SFC在高温沥青摊铺时,在顶面产生的温度梯度基本相同,但向下传递时SFCC中温度衰减更快,产生的温度梯度更大。

(4)使用Abaqus有限元模型可有效模拟SFCC桥面板温度变化.模拟得到的桥面板温度梯度与实测温度梯度吻合良好,实际工程中可通过桥面表层温度的测试值来推测桥面板内温度场分布;提高SFCC导热系数可减小高温沥青摊铺时桥面板内温度梯度.此外目前有关饱和度对钢纤维导热系数影响的研究和试验数据相对较少,后续可进一步研究。

参考文献:

- [1] 曹诚,杨玉强.高强轻集料混凝土在桥梁工程中的效益和性能特点分析[J].混凝土,2000(12):27-29.
CAO Cheng, YANG Yuqiang. The properties and benefit analysis about using high-strength light aggregate concrete on bridge[J]. Concrete, 2000(12):27-29. (in Chinese)
- [2] 冯江,童代伟,郝增恒,等.轻集料混凝土在桥梁工程中的应用及效益分析[J].公路交通技术,2006(3):74-77.
FENG Jiang, TONG Daiwei, HAO Zengheng, et al. Application of light aggregate concrete in bridge project and benefit analysis [J]. Highway Traffic Technology, 2006(3):74-77. (in Chinese)
- [3] 刘瀚卿,白国良,朱可凡,等.煤矸石混凝土抗折强度试验研究[J].建筑材料学报,2023,26(4):346-352,377.
LIU Hanqing, BAI Guoliang, ZHU Kefan, et al. Experimental study on flexural strength of coal gangue concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023,26(4):346-352,377. (in Chinese)
- [4] 权长青,焦楚杰,苏永亮,等.钢纤维及陶粒掺量对轻质混凝土基本力学性能的影响[J].复合材料学报,2018,35(5):1306-1314.
QUAN Changqing, JIAO Chuji, SU Yongliang, et al. Influence of steel fibre and haycite adding content on the basic mechanical properties of lightweight concrete [J]. Journal of Composite Materials, 2018,35(5):1306-1314. (in Chinese)
- [5] 杨健辉,王彩峰,蔺新艳,等.纤维对全轻混凝土的断裂性能影响[J].混凝土,2019(2):72-75,84.
YANG Jianhui, WANG Caifeng, LIN Xinyan, et al. Effects of fibre on fracture properties of all lightweight concrete [J]. Concrete, 2019(2):72-75,84. (in Chinese)
- [6] 周凯,谷倩,余东燕,等.预制页岩陶粒混凝土预留孔灌浆钢筋黏结性能试验研究[J].工业建筑,2019,49(1):95-99.
ZHOU Kai, GU Qian, YU Dongyan, et al. Experimental study on bond behavior of steel bars in grouted hole of precast shale ceramsite concrete[J]. Industrial Buildings, 2019,49(1):95-99. (in Chinese)
- [7] 肖建庄,宋志文,张枫.混凝土导热系数试验与分析[J].建筑材料学报,2010,13(1):17-21.
XIAO Jianzhuang, SONG Zhiwen, ZHANG Feng. An experimental study on thermal conductivity of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1):17-21. (in Chinese)
- [8] 高志涵,陈波,陈家林,等.基于X-CT的泡沫混凝土孔隙结构与导热性能[J].建筑材料学报,2023,26(7):723-730.
GAO Zhihan, CHEN Bo, CHEN Jialin, et al. Pore structure and thermal conductivity of foam concrete based on X-CT[J]. Journal of Building Materials, 2023,26(7):723-730. (in Chinese)
- [9] 张伟平,童菲,邢益善,等.混凝土导热系数的试验研究与预测模型[J].建筑材料学报,2015,18(2):183-189.
ZHANG Weiping, TONG Fei, XING Yishan, et al. Experimental study and prediction model of thermal conductivity of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2):183-189. (in Chinese)
- [10] 宫经纬,陈鹏,曹国举,等.考虑孔溶液相变的寒区混凝土导热系数计算模型[J].建筑材料学报,2023,26(5):465-474.
GONG Jingwei, CHEN Peng, CAO Guojun, et al. Calculation model of thermal conductivity of concrete in cold regions considering pore-solution phase transformation [J]. Journal of Building Materials, 2023,26(5):465-474. (in Chinese)
- [11] 朱振中,刘元珍,王文婧,等.玄武岩纤维陶粒混凝土抗裂性能与热工性能试验研究[J].硅酸盐通报,2023,42(3):908-916.
ZHU Zhenzhong, LIU Yuanzhen, WANG Wenjing, et al. Experimental study on crack resistance and thermal performance of basalt fiber concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(3):908-916. (in Chinese)
- [12] CHEN G X, WANG K. Mechanical and thermal properties of glass fibre-reinforced ceramsite-foamed concrete[J]. Indoor and Built Environment, 2018, 27(7):890-897.
- [13] WANG Q, ZHANG C B, DING Z Y, et al. Study on the thermal properties of paraffin/ceramsite phase change concrete[J]. Advanced Materials Research, 2014, 838-841(1):91-95.
- [14] 陈晓强,刘其伟.钢-混凝土组合箱梁桥沥青摊铺温度场的试验与理论对比分析[J].铁道科学与工程学报,2009,6(5):5-10.
CHEN Xiaoliang, LIU Qiwei. Temperature experiment and analysis of steel-concrete composite girder bridge caused by asphalt paving[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2009, 6(5):5-10. (in Chinese)
- [15] 孙金,冯小青,唐焱,等.高温沥青摊铺时钢-混凝土梁桥温度场有限元分析[J].中外公路,2018,38(3):216-221.
SUN Jin, FENG Xiaoqing, TANG Yan, et al. Finite element analysis on temperature field of steel-concrete composite girder bridge under high temperature asphalt paving [J]. Journal of China-Foreign Highway, 2018, 38(3):216-221. (in Chinese)