

DOI:10.11918/202408008

环境温度对 TCFST 温度场和长期变形的影响

张学昌^{1,2}, 李艳华^{1,2}, 张素梅^{1,2}, 王玉银³

(1. 哈尔滨工业大学(深圳) 土木与环境工程学院, 广东 深圳 518000; 2. 广东省土木工程智能韧性结构重点实验室, 广东 深圳 518000; 3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 为分析环境温度对钢管约束钢管混凝土柱(TCFST)温度场和长期变形的影响, 利用 ABAQUS 有限元软件建立环境温度作用下的钢管约束钢管混凝土柱温度场分析模型, 以深圳地区为例分析钢管约束钢管混凝土柱在太阳照射作用下的截面温度分布规律。设计并完成了6个钢管约束钢管混凝土短柱试件(内外层钢管总含钢率分别为5.8%、10.5%和15.0%, 内外层钢管含钢率比值均为0.75)在常温和环境温度变化时的轴压持荷试验, 总持荷时间为850 d, 明确了钢管约束钢管混凝土短柱的长期变形发展规律。基于3种常用的素混凝土长期变形预测模型计算了常温下钢管约束钢管混凝土柱的长期变形, 利用实测数据对其中的 EC2 素混凝土长期变形预测模型进行修正, 确立可以考虑温度影响的钢管约束钢管混凝土柱长期变形预测模型。结果表明: 当截面年平均温度高于20℃时, 计算钢管约束钢管混凝土柱长期变形时建议考虑温度的影响; 内外层钢管总含钢率越大、内外层钢管含钢率比值越大、温度越低, 钢管约束钢管混凝土柱的长期变形越小; 外层钢管含钢率和初始加载季节钢管约束钢管混凝土柱的长期变形无显著影响。

关键词: 长期荷载; 钢管约束; 钢管混凝土; 环境温度; 长期变形

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)10-0057-14

Impact of ambient temperature on temperature field and long-term deformation of TCFST

ZHANG Xuechang^{1,2}, LI Yanhua^{1,2}, ZHANG Sumei^{1,2}, WANG Yuyin³

(1. Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518000, Guangdong, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering, Shenzhen 518000, Guangdong, China; 3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to analyze the impact of ambient temperature on the temperature field and long-term deformation of steel-tube-confined concrete-filled steel tube (TCFST), a temperature field analysis model of TCFST were established with ABAQUS finite element software. Taking the Shenzhen region as a case study, the temperature field of exposed TCFST columns under ambient temperature in the Shenzhen area were studied theoretically. Six TCFST short columns (with total steel content of the inner and outer steel tubes at 5.8%, 10.5%, and 15.0%, and a steel ratio of 0.75 between the inner and outer steel tubes) were designed and loaded under sustained axial compression for 850 days at room and changing ambient temperatures. The development law of long-term deformation of TCFST was clarified. Based on three commonly used long-term deformation prediction models for plain concrete, the long-term deformation of TCFST at room temperature was calculated. Real measurement data were used to modify the EC2 model for predicting long-term deformation of plain concrete, establishing a predictive model for long-term deformation of TCFST columns that accounts for temperature effects. The results indicate that when the average annual temperature of the section exceeds 20℃, it is advisable to consider the influence of temperature when calculating the long-term deformation of TCFST. The long-term deformation of TCFST columns decreases with an increasing total steel ratio of the inner and outer steel tubes, a higher ratio of steel content between the inner and outer layers, and lower temperatures. Additionally, the steel content of the outer steel tubes and season initial loading have no discernible impact on the long-term deformation of the TCFST.

Keywords: long-term loading; steel tube confinement; concrete-filled steel tube; ambient temperature; long-term deformation behavior

收稿日期: 2024-08-03; 录用日期: 2024-09-26; 网络首发日期: 2024-11-13

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20241113.1334.004>

基金项目: 深圳市高层次人才项目

作者简介: 张学昌(1999—), 男, 硕士研究生; 张素梅(1963—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 张素梅, smzhang@hit.edu.cn

钢管约束钢管混凝土柱(简称 TCFST)在使用过程中常暴露于露天环境中,由太阳辐射和环境温度导致的温度效应有可能超过恒载和活载效应,成为全寿命周期设计中无法避免的问题。一方面,太阳的不均匀照射会引起钢管与混凝土发生脱粘、内部混凝土开裂问题^[1-2],外界温度不断变化会导致桥梁产生疲劳问题^[3],温度变化还会引起桥梁结构频率的变化^[4]。另一方面,温度是影响混凝土长期变形的重要因素:随着温度升高,混凝土徐变变形呈现出明显增大的现象,混凝土在 50 ℃ 时的徐变变形接近 20 ℃ 时的两倍^[5];考虑温度影响时,预应力混凝土桥梁中跨的跨中下挠度比不考虑温度对徐变影响时增大 11% ~ 62%,加剧了混凝土桥梁预应力损失与混凝土开裂等问题^[6];徐变导致钢管混凝土拱桥的主拱肋拱顶截面在服役期间产生竖向位移,环境温度越高,由徐变导致的竖向位移越大,截面应力重分布现象越明显^[7];当考虑温度对收缩徐变影响时,年循环温度引起钢管混凝土拱桥拱顶截面的竖向变形大约是不考虑温度时的 11 倍,并且拱顶截面下弦杆应力因为应力重分布不断增大,甚至超过所用钢材的屈服强度^[8]。钢管约束钢管混凝土柱(TCFST)(图 1)是在钢管约束钢管混凝土柱外套一层钢管,并灌入夹层材料形成的一种新型组合构件,具有延性好、承载力高、抗火性能优越等优点,TCFST 可以作为主要竖向承重构件应用于高层建筑、大跨度桥梁等重载结构中,具有较广的应用前景^[9-11]。TCFST 柱在长期荷载作用下会产生长期变形(徐变变形和收缩变形之和),目前,对于这种新型构件长期变形的研究较少,已有研究表明,TCFST 柱的长期变形会受混凝土强度、钢管总含钢率和内外钢管含钢率等构件内部因素的影响^[12-13],但尚未有学者针对 TCFST 柱在环境温度下的长期

变形进行研究。本文进行了 TCFST 柱在环境温度下的长期持荷试验,研究了温度对试件的长期变形影响规律,并将试验数据与长期变形理论计算结果进行对比,提出了考虑温度影响的 TCFST 柱长期变形预测模型。

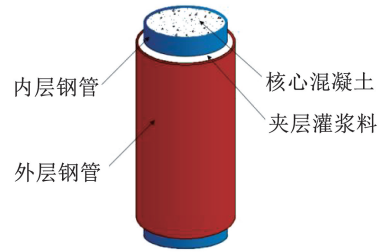


图 1 钢管约束的钢管混凝土柱示意

Fig. 1 Schematic of steel-tube-confined concrete-filled steel tube column

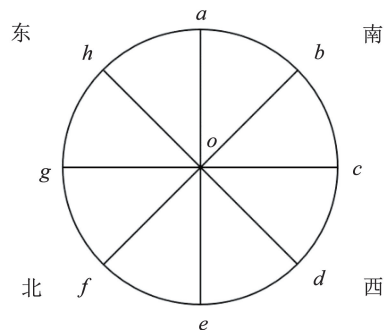
1 TCFST 柱截面温度场有限元分析

1.1 温度场分析模型的建立与验证

钢管约束钢管混凝土柱与钢管混凝土柱在组成材料和传热方式上大致相同,可采用钢管混凝土温度场的实测数据验证温度场有限元分析模型的正确性。文献[14]将外直径为 550 mm、钢管壁厚为 8 mm、高为 1.5 m 的钢管混凝土柱置于自然环境中,测量了竖放钢管混凝土柱中截面部分测点在太阳辐射作用下的温度,如图 2 (a) 所示。将有限元分析模型简化为 $a \sim g$ 、 $a \sim c$ 、 $c \sim e$ 、 $e \sim g$ 4 个太阳照射面,分别按东南西北 4 个垂直方向所受太阳辐射进行简化,即试件表面的太阳辐射作用简化成各朝向垂直面上的太阳辐射,如图 2 (b) 所示,并将端面设置为绝热面,选用 ASHRAE 晴空模型^[15]计算各个朝向的太阳辐射总强度,等效为综合大气温度后利用 ABAQUS 有限元软件计算钢管混凝土在太阳照射作用下的温度场。



(a) 文献[14]的钢管混凝土柱试验示意



(b) 试件各朝向简化图

图 2 日照作用下的钢管混凝土柱

Fig. 2 Concrete-filled steel tube columns under sunlight

气象学按气温对四季进行划分时,将3—5月、6—8月、9—11月、12—次年2月分别定为春、夏、秋、冬,进一步将4、7、10、1月份气温分别确定为4个季节的代表性月份。按正弦变化规律模拟一天中的环境温度变化,采用式(1)~(3)获取日气温变化曲线^[14]。

$$T_a(t) = A \sin \frac{2\pi(t-\xi)}{24} + B \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{2}(T_{a,\max} - T_{a,\min}) \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{2}(T_{a,\max} + T_{a,\min}) \quad (3)$$

式中: t 为计算环境温度的时刻, ξ 为温度滞后系数, $T_{a,\max}$ 为一天中的环境最大温度, $T_{a,\min}$ 为一天中的环境最小温度。

钢材和混凝土的热工参数选用 Lie^[17]提出的表达式,钢材和混凝土的密度分别取为常数 7850 kg/m^3 和 2350 kg/m^3 。夹层材料采用具有微膨胀性的高强无收缩灌浆料,目前缺少对灌浆料热工参数的相关研究,由于水泥砂浆与灌浆料均无使用粗骨料,采用文献[18]提出的水泥砂浆热工参数代替灌浆料的热工参数,水泥砂浆的密度取为 2150 kg/m^3 。

$$\lambda_{\text{cm}} = 2.16 - (4.13 \times 10^{-3})T + (3.09 \times 10^{-6})T^2 \quad (4)$$

$$c_{\text{cm}} = 519.16 + (15281.82 \times 10^{-4})T - (4228.67 \times 10^{-7})T^2 \quad (5)$$

式中: λ_{cm} 为水泥砂浆的热传导系数, T 为材料的工作温度, c_{cm} 为水泥砂浆的比热容。

将钢管混凝土柱分为钢管和混凝土两个部件进行几何建模,采用 C3D8R 单元对混凝土部件和钢管部件进行结构化网格划分,两个部件在圆周上的网格数量保持一致以保证两个部件共用节点,参考文献[19-20]的研究成果取钢材与混凝土的界面热阻 R 为 $0.01 \text{ (m}^2 \cdot \text{°C)/W}$ 。本文取文献[14]中7月26日—7月28日的温度数据与 ABAQUS 有限元计算结果进行对比(图3),结果表明:实测数值与有限元计算值在温度峰值点出现时刻较为接近,且整条曲线变化趋势基本一致,整体来看实测值与理论值吻合较好,二者之间由于温度场分析模型选用较多理论模型以及边界条件的简化而产生一定的误差,但差值基本小于 5 °C ,在实际工程可接受范围内,可以认为选取的各种参数模型以及建立的温度场分析模型是合理可靠的。

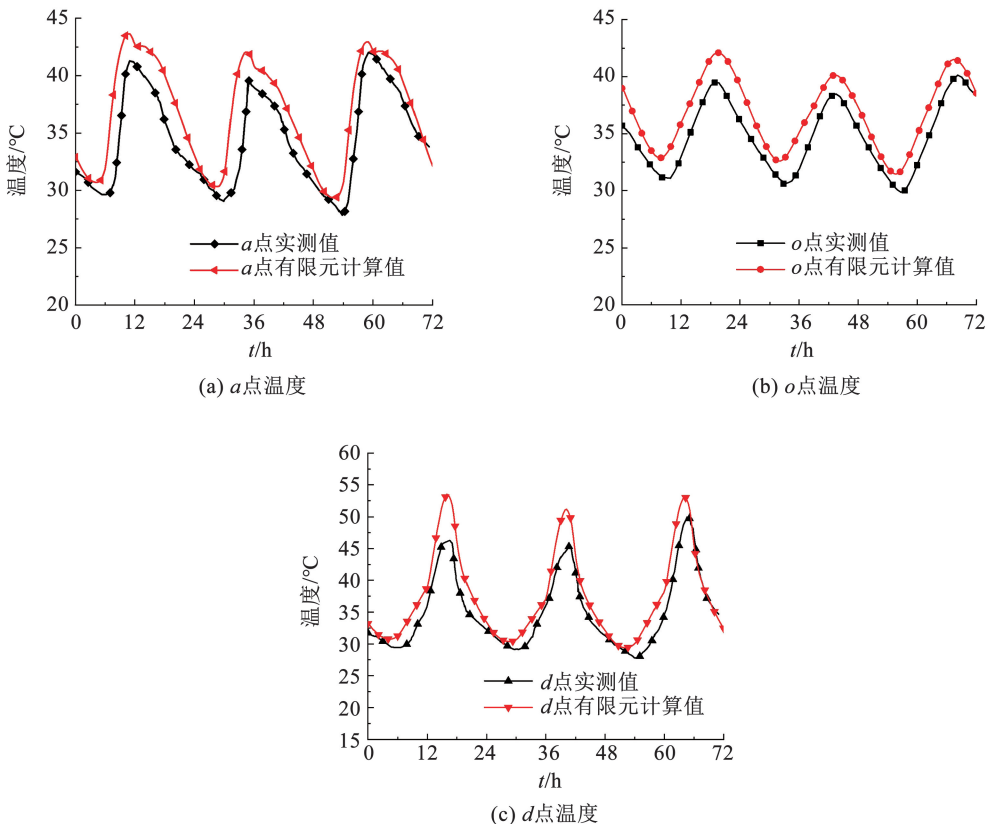


图3 温度实测值与模拟值对比

Fig. 3 Comparison between measured and simulated temperature values

1.2 深圳地区室外温度作用下的 TCFST 柱温度分布

图 4 展示了 TCFST 柱截面温度分布随时间的变化规律,截面的高温区域随着太阳方位由东朝向变化至西朝向,白天在太阳照射下钢管表面温度高

于混凝土区域的温度,夜间无太阳照射时混凝土散热较钢管慢,导致夜间混凝土区域温度高于钢管表面温度,这种现象在大直径 TCFST 柱温度分布中表现较为明显。

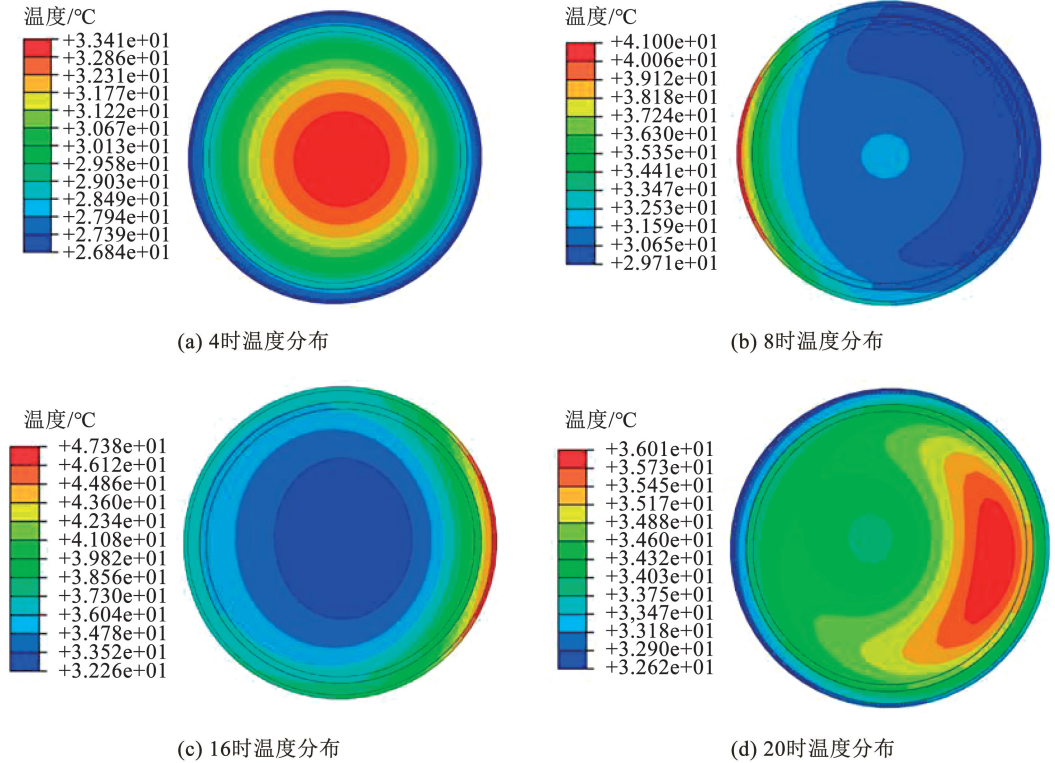


图 4 不同时刻钢管约束钢管混凝土柱截面温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of TCFST at different times

图 5 为 TCFST 柱截面平均温度在一天中的变化规律,截面平均温度在不同季节均表现出近似正弦变化的变化规律,TCFST 柱在太阳照射的作用下不断吸收热量,截面平均温度从清晨 6 时一下午 16 时不断升温,并在下午 16 时附近达到一天中的最高温度,截面平均温度在夜间逐渐降低,并在清晨 6 时左右达到日平均温度最低值。不同季节截面平均温度因季节温度的特点在数值上表现出较大的差异,整体来看截面平均温度从高到低依次为夏季、秋季、春季、冬季,夏季最高平均温度及最低平均温度分别为 37.4 °C 和 28.6 °C,比冬季最高平均温度(28.6 °C)及最低平均温度(14.3 °C)分别高出 8.8 °C 和 14.3 °C,截面年平均温度为 27.6 °C。

200 mm 时,TCFST 柱中心点温度一天之内的变化幅度接近 20 °C,而钢管表面温度的变化幅度约为 30 °C;当直径大于 400 mm 时,外界环境对于 TCFST 柱截面温度分布的影响深度约为 200 mm,即自构件表面向内 200 mm 范围内的温度受外界温度变化影响较大,其余范围内的温度变化幅度小于 5 °C;当直径大于 800 mm 时,可以认为距离构件表面大于 200 mm 的混凝土区域温度在一天中基本不变,夏季有太阳照射时核心混凝土区域的温度保持在 35 °C 左右。

太阳辐射作用下 TCFST 柱截面的最大温度出现在东西朝向,以 TCFST 柱截面中心 O 点为坐标 0 点探究截面温度分布随东西向直径的变化,对夏季一天中不同直径的钢管约束钢管混凝土柱的截面温度分布进行分析(图 6)。TCFST 柱截面一天中的温度变化幅度与直径相关:当直径小于 400 mm 时,TCFST 柱截面各点温度受环境影响较大;当直径为

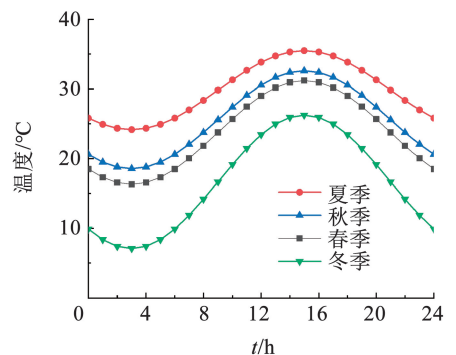


图 5 钢管约束钢管混凝土柱不同季节截面平均温度 Fig. 5 Average temperature of TCFST in different seasons

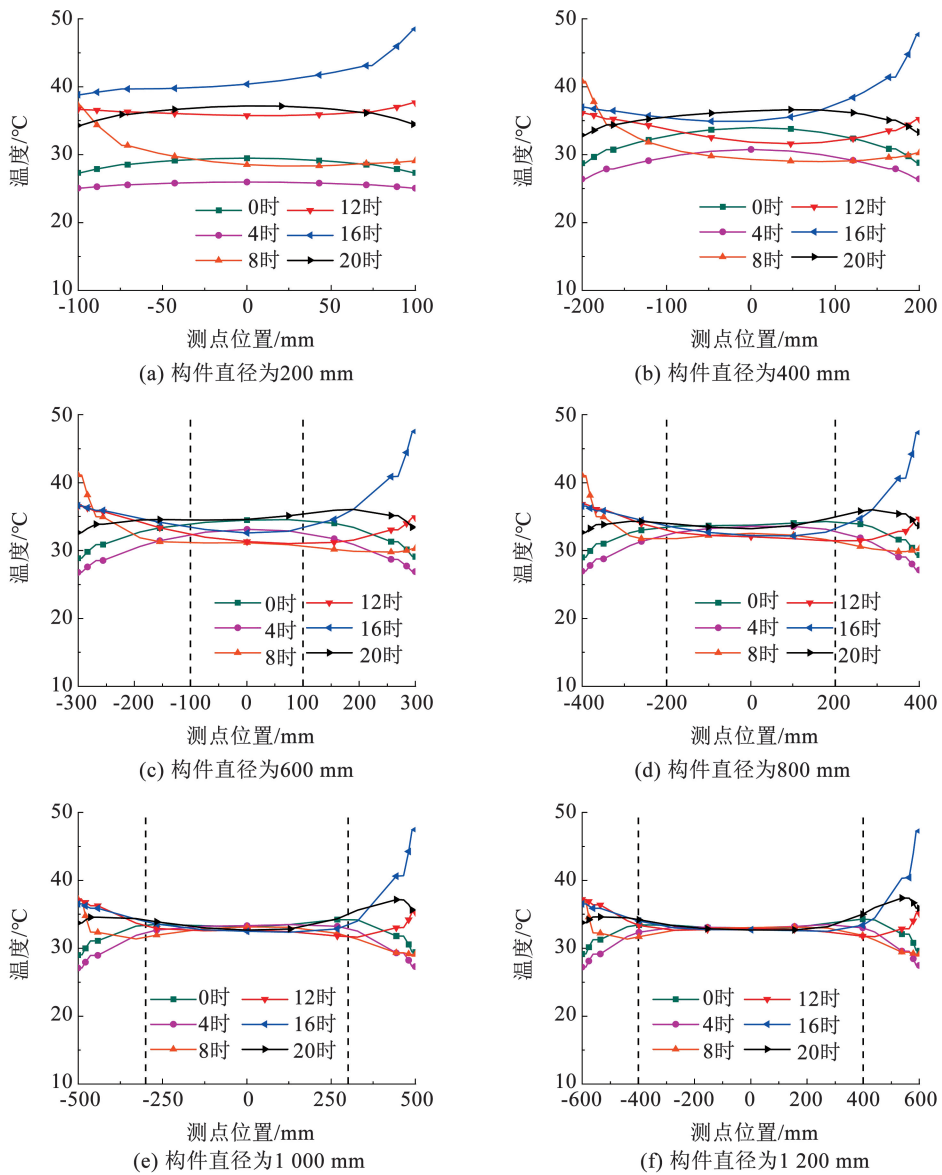


图 6 不同直径钢管约束钢管混凝土截面点温度随位置变化

Fig. 6 Temperature of cross-sectional points on TCFST with different diameters varies with position

在夏季,对于不同尺寸的 TCFST 柱,其截面平均温度和截面最大温差如图 7(a)和 7(b)所示,可以看出:在白天有太阳照射时,TCFST 柱截面平均温度随截面尺寸的增大而减小,在夜间随截面尺寸的增大而增大;当直径大于 800 mm 时,截面尺寸对

TCFST 柱截面的平均温度影响可以忽略不计;钢管表皮与截面中心点会产生截面最大温差,且截面最大温差随截面尺寸的增大而增大;当构件直径大于 800 mm 时,TCFST 柱截面最大温差几乎不受截面尺寸的影响。

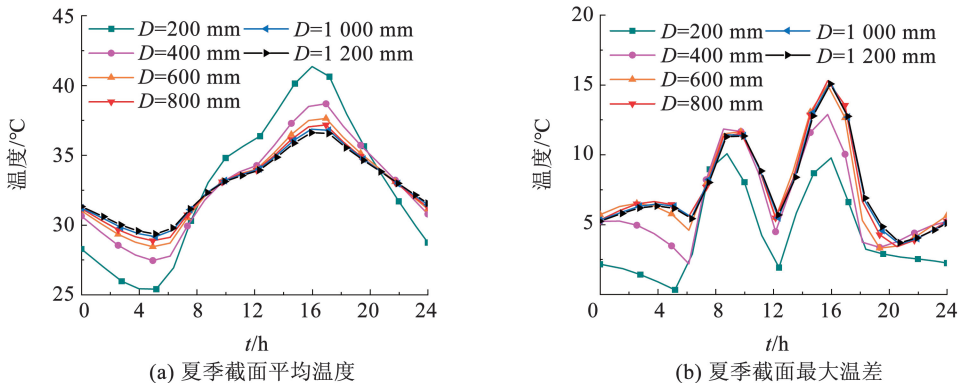


图 7 不同直径钢管约束钢管混凝土柱截面温度特征值变化

Fig. 7 Variation of temperature characteristics at the cross-sections of TCFST with different diameters

2 TCFST 柱长期变形试验研究

2.1 试件设计

设计了 3 组共 6 个 TCFST 短柱试件进行了 850 d 的长期持荷试验,试件的内外层钢管总含钢率分别为 5.8%、10.5% 和 15.0% (内外层钢管含钢率比值均为 0.75),核心混凝土的初始应力比均取为 0.35 以保证试件在持荷过程中发生线性徐变。试件 a 与

试件 b 的唯一区别在于试件 a 在工程常温环境下 (20 ℃) 持荷 850 d,试件 b 在常温环境下持荷 710 d 后进行升温以对比试件持荷时突然升温对其长期变形的影响。试件详细设计参数及实际截面尺寸见表 1, D_1 、 t_1 和 α_1 分别为内层钢管的外直径、壁厚和内层钢管含钢率, D_2 、 t_2 和 α_2 分别为外层钢管的外直径、壁厚和外层钢管含钢率, α 为试件内外层钢管总含钢率, N_L 为长期持荷试验的设计荷载。

表 1 试件详细参数

Tab. 1 Detailed parameters of column

试件编号	$D_1 \times t_1$	$D_2 \times t_2$	$\alpha_1/\%$	$\alpha_2/\%$	$\alpha/\%$	N_L/kN
1a	165.78 mm × 1.07 mm	217.61 mm × 1.00 mm	2.5	3.3	5.8	368
1b	165.80 mm × 1.03 mm	217.53 mm × 1.02 mm	2.5	3.3	5.8	368
2a	162.65 mm × 1.85 mm	215.49 mm × 1.70 mm	4.5	6.0	10.5	403
2b	163.47 mm × 1.86 mm	214.24 mm × 1.71 mm	4.5	6.0	10.5	403
3a	162.23 mm × 2.48 mm	218.11 mm × 2.51 mm	6.3	8.5	14.8	432
3b	165.39 mm × 2.49 mm	218.61 mm × 2.52 mm	6.3	8.5	14.8	432

2.2 材料性能

钢材牌号均为 Q235,内钢管型号为 $\Phi 165 \times 1.0$ 、 $\Phi 165 \times 1.8$ 和 $\Phi 165 \times 2.5$,外钢管型号为 $\Phi 218 \times 1.0$ 、 $\Phi 218 \times 1.8$ 和 $\Phi 218 \times 2.5$,钢材力学性能指标按照 GB/T 228.1—2021《金属材料拉伸试验第一部分:室温试验方法》的规定测量(表 2),钢材屈服强度为 299.6 ~ 340.1 MPa。核心混凝土和灌浆料的设计强度等级均为 C50,按 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》的试验规定测得二者的力学性能,核心混凝土置于密闭环境中养护,测得 28 d 100 mm 立方体抗压强度平均值($f_{cu,100}$)、弹性模量(E_c)和泊松比(μ_c)分别为 57.2 MPa、31.7 GPa 和 0.227;灌浆料置于标准环境中养护,测得 28 d 100 mm 立方体抗压强度平均值($f_{cu,100}$)、弹性模量(E_c)和泊松比(μ_c)分别为 71.0 MPa、28.0 GPa 和 0.340。

表 2 钢材主要力学性能指标

Tab. 2 Main mechanical properties of steel

钢管型号	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/GPa	μ_s
$\Phi 165 \times 1.0$	299.6	390.1	203	0.245
$\Phi 165 \times 1.8$	315.2	399.6	200	0.256
$\Phi 165 \times 2.5$	340.1	401.2	199	0.259
$\Phi 219 \times 1.0$	308.9	400.8	211	0.271
$\Phi 219 \times 1.8$	311.9	420.5	191	0.254
$\Phi 219 \times 2.5$	328.4	403.8	189	0.276

注: f_y 、 f_u 、 E_s 、 μ_s 分别为钢材的屈服强度、抗拉强度、弹性模量和泊松比。

2.3 加载制度和测量方案

采用弹簧式压缩徐变仪(图 8)对试件进行长期持荷试验,每台徐变仪放置两个试件,试件养护 28 d 后进行加载,每个试件均对称布置两个型号为 LVDT-V1-5MM 的位移计以测量试件长期变形(图 9)。对试件施加的荷载在整个试验过程中保持在 $(1 \pm 2\%) N_L$,实验室环境温度和相对湿度分别保持在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 和 $(60 \pm 10)\%$ 。试验过程中采用 XBY-2000 数据采集系统采集数据,试件持荷前 100 d,试件长期变形速率较快,每 10 min 采集一次数据,持荷 100 d 之后,试件长期变形速率逐渐下降,采集频率改为每 30 min 一次。



图 8 加载装置

Fig. 8 Load device

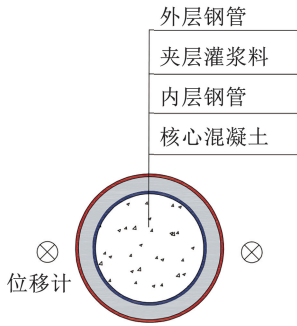


图 9 试件变形测量布置

Fig. 9 Layout diagram of specimen deformation measurement

2.4 长期变形结果分析

试件加载时核心混凝土的龄期为 28 d, 持荷时

间为 850 d, 将同一台徐变仪上两个试件的长期变形与混凝土龄期的关系曲线置于同一张图中进行对比 (图 10), 可以看出: 试件在常温环境下的长期变形呈现出前期发展较快、后期发展趋于平缓的规律, 试件前 200 d 的长期变形可达到 850 d 长期变形的 60% ~ 80%, 200 d 以后长期变形增长缓慢, 700 ~ 850 d 发生的长期变形未达到 850 d 时长期变形的 10%; 当持荷试件所处环境温度升高时, 试件产生瞬时温度伸长变形, 在曲线上表现为突然减小, 随后试件的长期变形增长速率与增长量明显增大, 试件升温期间发生的长期变形增量约为常温试件长期变形增量的 8 ~ 12 倍。

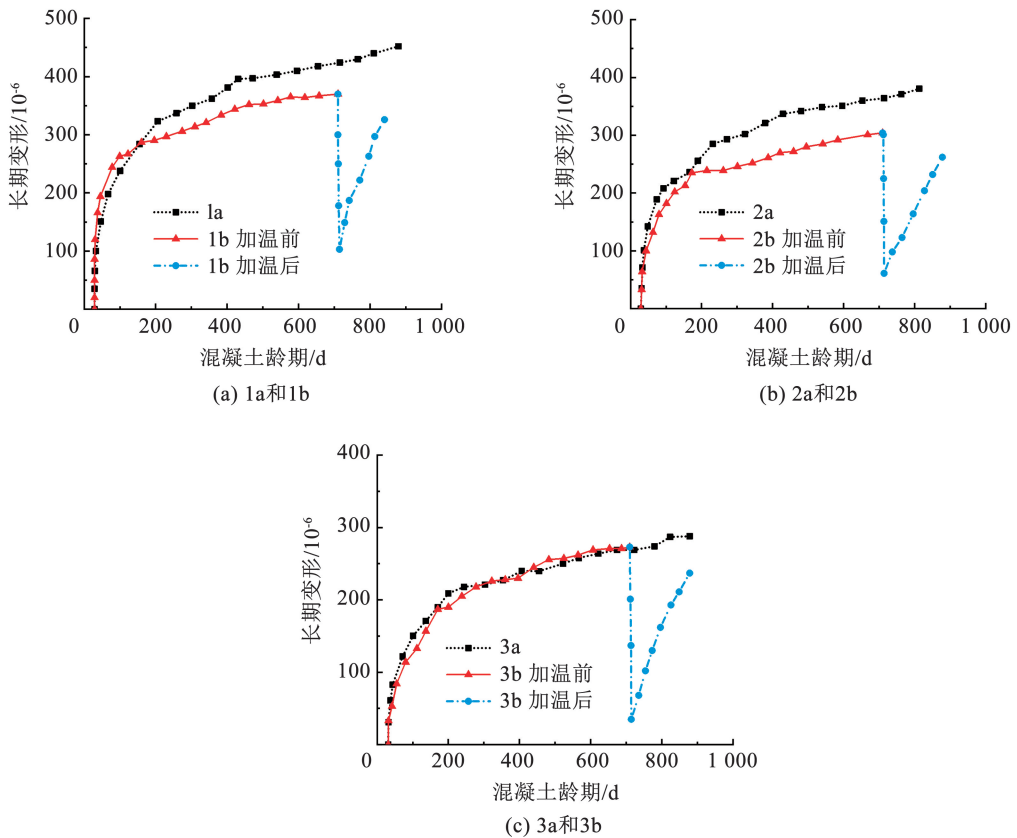


图 10 试件长期变形随混凝土龄期的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of long-term deformation of specimens as a function of concrete age

在内外层钢管含钢率比值相同的情况下, 内外层钢管总含钢率通过影响持荷过程中的应力重分布从而对试件长期变形产生影响: 试件的长期变形随内外层钢管总含钢率的增加而减小; 当内外层钢管总含钢率从 5.8% 增加到 10.5% 和 15.0% 时, 试件在持荷 850 d 的长期变形分别降低了约 14% 和 37% (图 11); 当内外层钢管总含钢率变大时, 温度对试件长期变形增量的敏感度变低, 实际工程中可以适当增大构件内外层钢管总含钢率以减小温度对构件长期变形的影响 (图 12)。

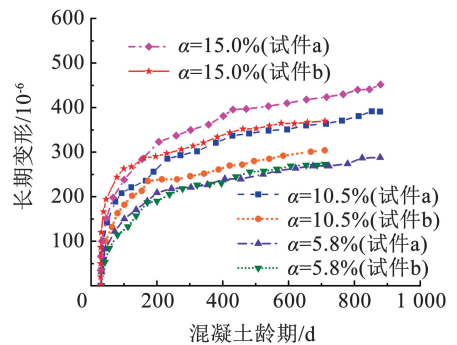


图 11 内外层钢管总含钢率对试件长期变形的影响

Fig. 11 Influence of total steel content of inner and outer steel pipes on long-term deformation of specimens

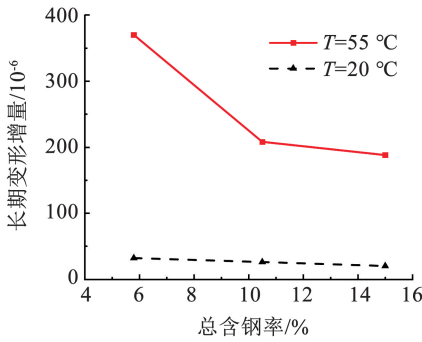


图 12 内外层钢管总含钢率对试件长期变形增量的影响

Fig. 12 Influence of inner and outer steel pipes on the long-term deformation increment of specimens

3 长期变形有限元分析

3.1 基本假定

当 TCFST 柱承受竖向荷载时,由于外层钢管与夹层材料高度低于核心钢管混凝土,二者不直接承担纵向力,只对核心钢管混凝土提供横向约束力。基于钢管约束钢管混凝土的特点,对其长期变形计算理论模型作以下假设:1)混凝土在初始应力比小于 0.4 时发生线性徐变,遵循叠加原理,并且混凝土三维线性徐变满足广义胡克定律^[23];2)忽略灌浆料的长期变形,认为内、外层钢管不发生长期变形;3)核心混凝土处于内钢管的封闭空间中,忽略核心混凝土的干燥收缩,只计算核心混凝土的自生收缩,计算时相对湿度取 100%;4)核心混凝土为各向同性材料,在外钢管与夹层材料约束下与内层钢管不发生滑移。

3.2 变温作用下素混凝土长期变形理论计算方法

目前,大多数混凝土徐变预测模型只能计算恒定环境温度作用下的徐变系数,大部分学者也只针对恒定环境温度作用下混凝土的徐变进行研究,而钢管约束钢管混凝土柱在自然环境中必然经历温度变化历程。汪剑等^[24]基于叠加原理提出变化环境温度作用下混凝土的徐变计算理论:

$$\varphi_T(t_n, t_0) = \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i = \sum_{i=1}^n [\varphi(t_i, t_0, T_i) - \varphi(t_{i-1}, t_0, T_i)] \quad (6)$$

式中: $\varphi_T(t_n, t_0)$ 为混凝土 $t_0 \sim t_n$ 时间段在变温环境下的徐变系数, $\varphi(t_i, t_0, T_i)$ 为 t_0 时刻加载 t_i 时刻混凝土在 T_i 作用下的徐变系数, T_i 为 t_i 时刻混凝土所处环境的温度。

在长期轴压荷载作用下的构件核心混凝土需要考虑应力重分布的影响以反应钢管约束钢管混凝土轴压短柱真实的徐变变形^[25]。当混凝土处于低应

力水平时产生线性徐变,徐变变形与应力呈线性关系且符合波尔兹曼(L. Boltzman)叠加原理。利用文献[26]提出的逐步积分法求得混凝土各个方向在任意增量步内($\tau_{i-1} - \tau_i$)的徐变增量:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{cp1,i} = & (\sigma_{c1,0} - \mu_{cp,u}\sigma_{c2,0} - \mu_{cp,u}\sigma_{c3,0}) \cdot \\ & \frac{\varphi_T(\tau_i, \tau_0) - \varphi_T(\tau_{i-1}, \tau_0)}{E_{c,0}} - \\ & \sum_{j=1}^{i-2} (\Delta\sigma_{c1,j} - \mu_{cp,u}\Delta\sigma_{c2,j} - \mu_{cp,u}\Delta\sigma_{c3,j}) \cdot \\ & \frac{\varphi_T(\tau_i, \tau_j) - \varphi_T(\tau_{i-1}, \tau_j)}{E_{c,j}} - \\ & (\Delta\sigma_{c1,i-1} - \mu_{cp,u}\Delta\sigma_{c2,i-1} - \mu_{cp,u}\Delta\sigma_{c3,i-1}) \cdot \\ & \frac{\varphi_T(\tau_i, \tau_{i-1})}{E_{c,i-1}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\Delta\varepsilon_{cp1,i}$ 为混凝土在 $\tau_{i-1} - \tau_i$ 时间段内在 i 方向上的徐变变形增量, $\sigma_{ci,0}$ 为加载时刻混凝土在 3 个方向上($i=1,2,3$)的初始应力, $E_{c,j}$ 为 τ_j 时刻混凝土的弹性模量, $\Delta\sigma_{ci,j}$ 为 $\tau_{j-1} - \tau_j$ 增量步混凝土在 3 个方向($i=1,2,3$)的应力增量, $\varphi_T(\tau_i, \tau_j)$ 为 t_j 时刻加载 t_i 时刻混凝土考虑变温作用的徐变系数。

因此,混凝土在温度、收缩、徐变共同作用下任意增量步内($\tau_{i-1} - \tau_i$)的总变形增量为

$$\Delta\varepsilon_i = \Delta\varepsilon_{cp,i} + \Delta\varepsilon_{sh,i} + \Delta\varepsilon_{T,i} \quad (8)$$

式中: $\Delta\varepsilon_i$ 为混凝土在 $\tau_{i-1} - \tau_i$ 时间段内的总应变增量, $\Delta\varepsilon_{cp,i}$ 为混凝土在 $\tau_{i-1} - \tau_i$ 时间段内考虑温度影响的徐变应变增量, $\Delta\varepsilon_{sh,i}$ 为混凝土在 $\tau_{i-1} - \tau_i$ 时间段内考虑温度影响的收缩应变增量, $\Delta\varepsilon_{T,i}$ 为混凝土在 $\tau_{i-1} - \tau_i$ 时间段内的温度应变增量。

3.3 有限元分析模型计算流程

建立与实际试件等尺寸的 TCFST 轴压短柱力学模型,在混凝土的材料属性中选择自定义场变量(user defined field)、状态变量(depvar)和自定义膨胀(expansion)选项,并在提交作业分析时选择相应的子程序文件供 ABAQUS 调用,以实现构件在温度作用下的长期变形分析,计算流程如图 13 所示。

3.4 试验结果与理论值对比分析

将 TCFST 试件在常温下的长期变形试验结果与采用 CEB-FIP 2010、ACI 209-92、EC2 3 种混凝土长期变形预测模型计算的长期变形理论结果进行对比,以验证模型正确性(图 14)。对于加载龄期 28 d 的试件,采用 CEB-FIP 2010、EC2 和 ACI 209-92 3 种模型计算的长期变形发展趋势与实测长期变形表现一致,前期发展速率较快,后期发展速率较慢,前 150 d 3 种模型计算的理论结果均与试验结果吻合较好,150 d 以后采用 CEB-FIP 2010 模型和 ACI 209-92 模型计算的长期变形较实测长期变形偏低。综合来看,EC2 模型与试验结果吻合最好,建议使用 EC2 模型计算常温下 TCFST 柱的长期变形。

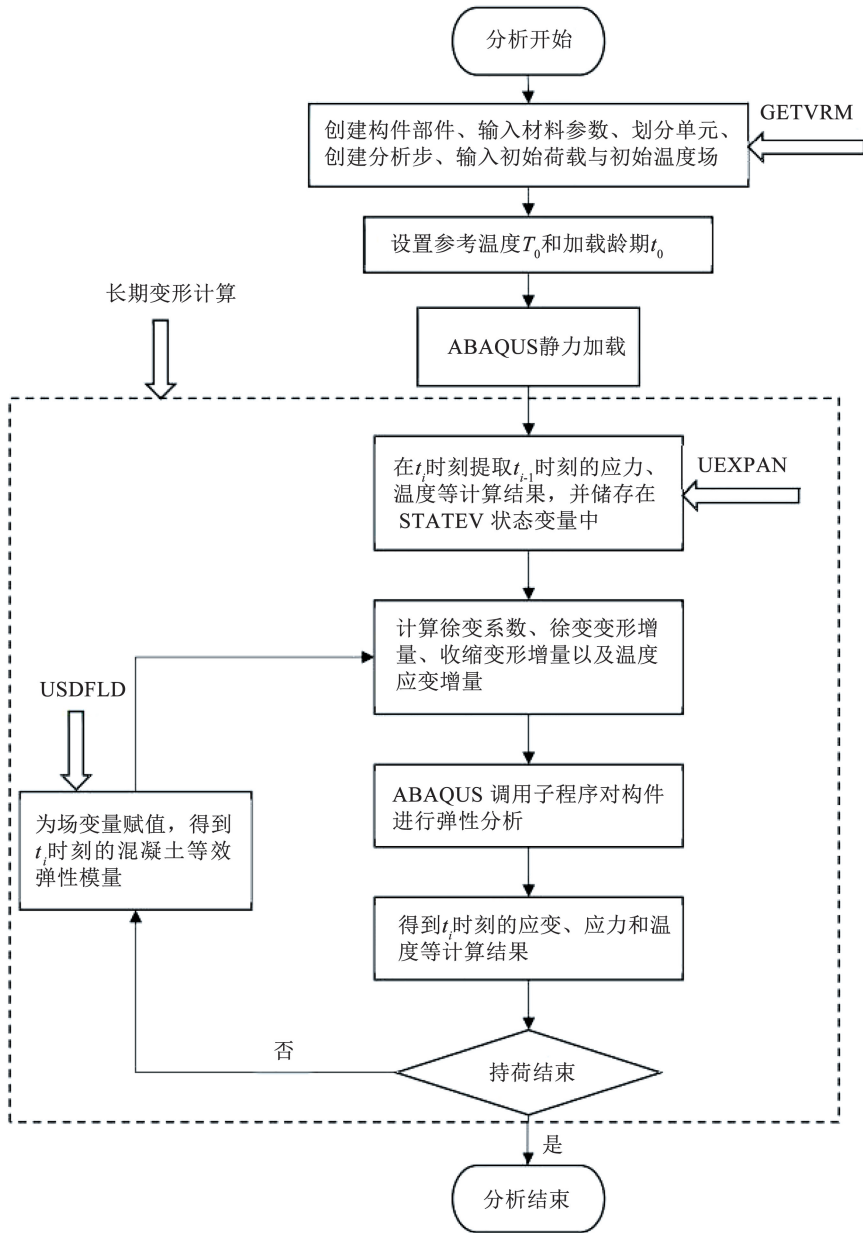


图 13 ABAQUS 计算构件长期变形流程

Fig. 13 ABAQUS calculation flowchart

试验结果表明, EC2 模型能较为理想地预测常温下 TCFST 轴压短柱长期变形, 因此, 在 EC2 模型的基础上进行适当修正, 使其能更好地预测 TCFST 柱在非常温下的长期变形。EC2 模型只将温度的影响等效为对混凝土加载龄期的影响, 而 CEB-FIP 模型同时考虑了加载前养护温度和持荷过程中恒定温度对混凝土长期变形的影响, 因此, 采用 CEB-FIP 模型考虑温度效应的方法, 一方面将非常温下混凝土龄期 t_1 根据式(9)等效为常温下的混凝土龄期, 同时对加载龄期进行修正; 另一方面对名义徐变系

数引入温度修正系数, 对非常温下的名义徐变系数按式(10)的形式进行适当修正。将试件的长期变形试验结果与理论结果进行对比, 结果表明, 修正后的 EC2 模型能够较好地对钢管约束钢管混凝土柱在温度影响下的长期变形进行预测(图 15)。

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} \right] \quad (9)$$

$$\varphi_{0,T} = \varphi_0 \exp [0.015(T - 20)] \quad (10)$$

式中: $\varphi_{0,T}$ 为考虑温度影响的混凝土名义徐变系数, φ_0 为常温下的混凝土名义徐变系数。

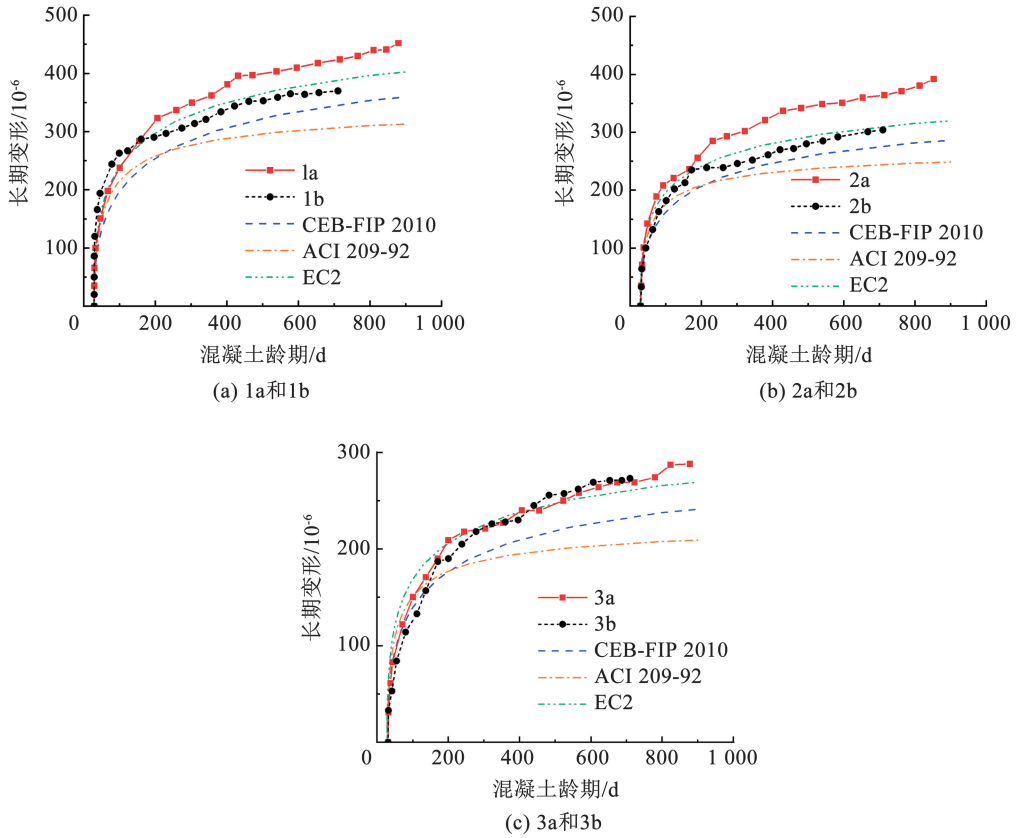


图 14 常温下试件长期变形试验结果与理论结果对比

Fig. 14 Comparison between long-term deformation test results and theoretical results of specimens at room temperature

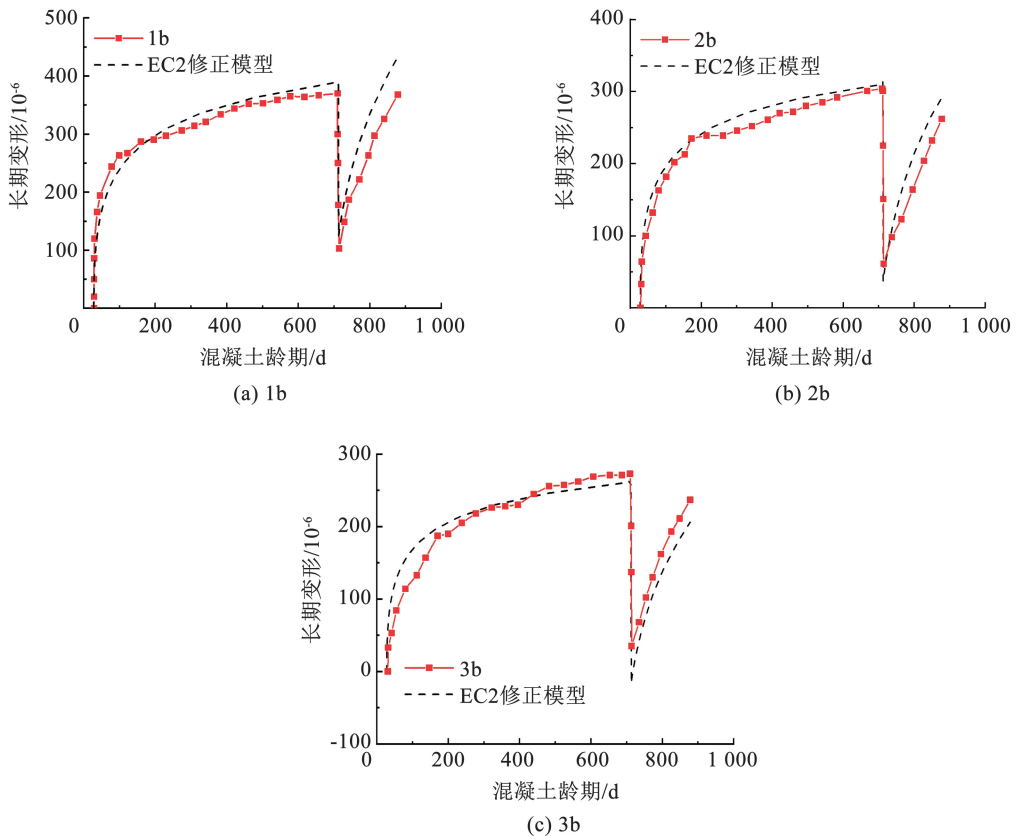


图 15 非常温下试件长期变形试验结果与理论结果对比

Fig. 15 Comparison between long-term deformation test results and theoretical results of specimens at non-normal temperatures

4 参数分析

实际工程中, 构件在整个生命周期中都会产生长期变形, 考虑到中国房屋设计使用年限多为 50 a, 将 50 a 的长期变形作为徐变终值。利用 EC2 修正模型计算 TCFST 柱在持荷 50 a 后的长期变形, 进一步分析温度、内层钢管含钢率、外层钢管含钢率和加载季节对构件长期变形的影响。模型基本参数为: 核心混凝土初始应力比 0.35、核心混凝土强度 C50、混凝土弹性模量 34.5 GPa、混凝土泊松比 0.2、钢材牌号 Q355、钢材弹性模量 206 GPa、钢材泊松比 0.3、内层钢管直径 165 mm、内层钢管壁厚 2.5 mm、外层钢管直径 219 mm、外层钢管壁厚 2 mm、加载龄期 28 d、混凝土养护温度 20 °C。试件在 20 °C 环境下加载后再升温, 定义长期变形系数 $\eta = \Delta\varepsilon/\varepsilon_e$, 以描述构件在温度作用下的长期变形, 其中, $\Delta\varepsilon$ 为试件去除温度变形后的长期变形, ε_e 为构件加载时刻的弹性应变。

4.1 温度

为研究钢管约束钢管混凝土柱在恒定温度下的长期变形变化规律, 以 20、30、40、50、60 °C 为变化参数分析构件长期变形在温度影响下的变化。构件在 20 °C 条件下养护 28 d 后, 在相应恒定温度环境下进行持荷。构件的长期变形随着温度的增大而增大, 60 °C 作用下的构件长期变形系数终值是 20 °C 时的 1.50 倍。对不同温度下构件的长期变形系数进行比较发现: 温度越大, 构件长期变形前期发展速率越快, 发展速率越早趋于稳定, 具体表现在环境温度为 20 °C 的构件分别在持荷 130、460、2 400 d 达到长期变形终值的 50%、70%、90%, 而环境温度为 60 °C 的构件分别在持荷 53、115、530 d 达到长期变形终值的 50%、70%、90%。这是因为温度升高加速了核心混凝土中液体分子的运动, 从而加快构件长期变形速率(图 16)。

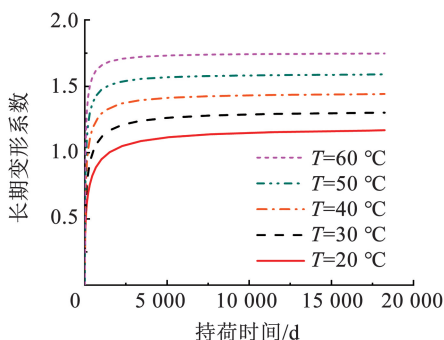


图 16 构件长期变形系数随温度变化规律

Fig. 16 Variation of long-term deformation coefficient of components with temperature changes

4.2 内层钢管含钢率

在长期持荷过程中的 TCFST 柱的内层钢管与核心混凝土之间会发生应力重分布, 进而影响构件的长期变形。为研究在恒定温度下构件长期变形受内层钢管含钢率影响的规律, 保证外层钢管含钢率不变, 计算内层钢管含钢率 α_1 分别为 4%、7%、10%、13% 和 16% 的构件持荷 50 a 的长期变形系数。

由计算结果可知, 构件长期变形随内层钢管含钢率增大而减小, 常温下内层含钢率为 7%、10%、13%、16% 的构件长期变形系数终值相比内层含钢率为 4% 的构件减小了 15%、29%、37%、44%, 温度为 60 °C 时, 当内层含钢率从 4% 增至 10%、16% 时, 构件长期变形系数分别减小了 36%、52%。温度对构件长期变形的影响随着内层含钢率变小而变得更明显, 当环境温度从 20 °C 增至 60 °C 时, 内层钢管含钢率为 4%、7%、10%、13% 和 16% 的构件长期变形系数终值分别增大 61%、50%、45%、40% 和 37%, 内层钢管含钢率越大, 温度对构件长期变形影响越不明显。这是因为内层钢管含钢率越大, 温度升高造成截面应力重分布使内钢管承担的纵向力越大, 核心混凝土承担的纵向力越小, 导致温度增大时构件长期变形变化更小(图 17)。

4.3 外层钢管含钢率

在内层钢管含钢率相同的情况下, 仅变化外层钢管含钢率 α_2 , 分别取为 4%、7%、10%、13% 以探究构件的长期变形受外层钢管含钢率的影响规律。由图 18 可知: 构件的长期变形几乎不受外层钢管含钢率的影响, 常温下外层钢管含钢率为 4%、7%、10%、13% 的构件长期变形系数终值分别为 1.20、1.17、1.13、1.10, 当构件外层钢管含钢率从 4% 增至 7%、10%、13% 时, 构件长期变形系数终值分别减小了 3%、6% 和 8%; 非常温下构件长期变形受外层钢管含钢率的影响也不显著, 当构件外层钢管含钢率从 4% 增至 13% 时, 30、40、50、60 °C 下的构件长期变形系数均减少了 8% 左右(图 18)。可见增大外层钢管含钢率相较于增大内钢管含钢率对构件长期变形的抑制效果不明显, 所以, 实际工程中外层钢管可以考虑选取较薄钢管。

4.4 初始加载季节

为研究深圳地区室外构件在不同加载季节的长期变形变化, 将一年平均分为 4 个季度, 计算构件在

太阳辐射与环境温度影响下的温度场并导入长期变形有限元模型中,得到不同季度加载构件在非恒定环境温度下持荷 1 a 的长期变形系数(图 19)。春、夏、秋、冬 4 个季节加载的构件持荷 1 a 后的长期变形系数分别为 0.94、0.97、0.95、0.91,不同季节加载的构件长期变形系数相差不大,夏季加载的构件长期变形系数比冬季加载的构件长期变形系数增大大约 6%。

采用 20 ℃ 计算构件持荷 1 a 后的长期变形系

数为 0.84,夏季和冬季加载的构件长期变形系数分别降低了约 17% 和 10%,采用截面年平均温度(27.6 ℃)计算的构件 1 a 后的长期变形系数为 0.98,与 4 个季节加载的构件长期变形系数相差不大。实际工程中建议考虑环境温度对构件长期变形的影响,为了简化计算过程,可以采用构件截面年平均温度计算的长期变形对室外构件的长期变形进行预测。

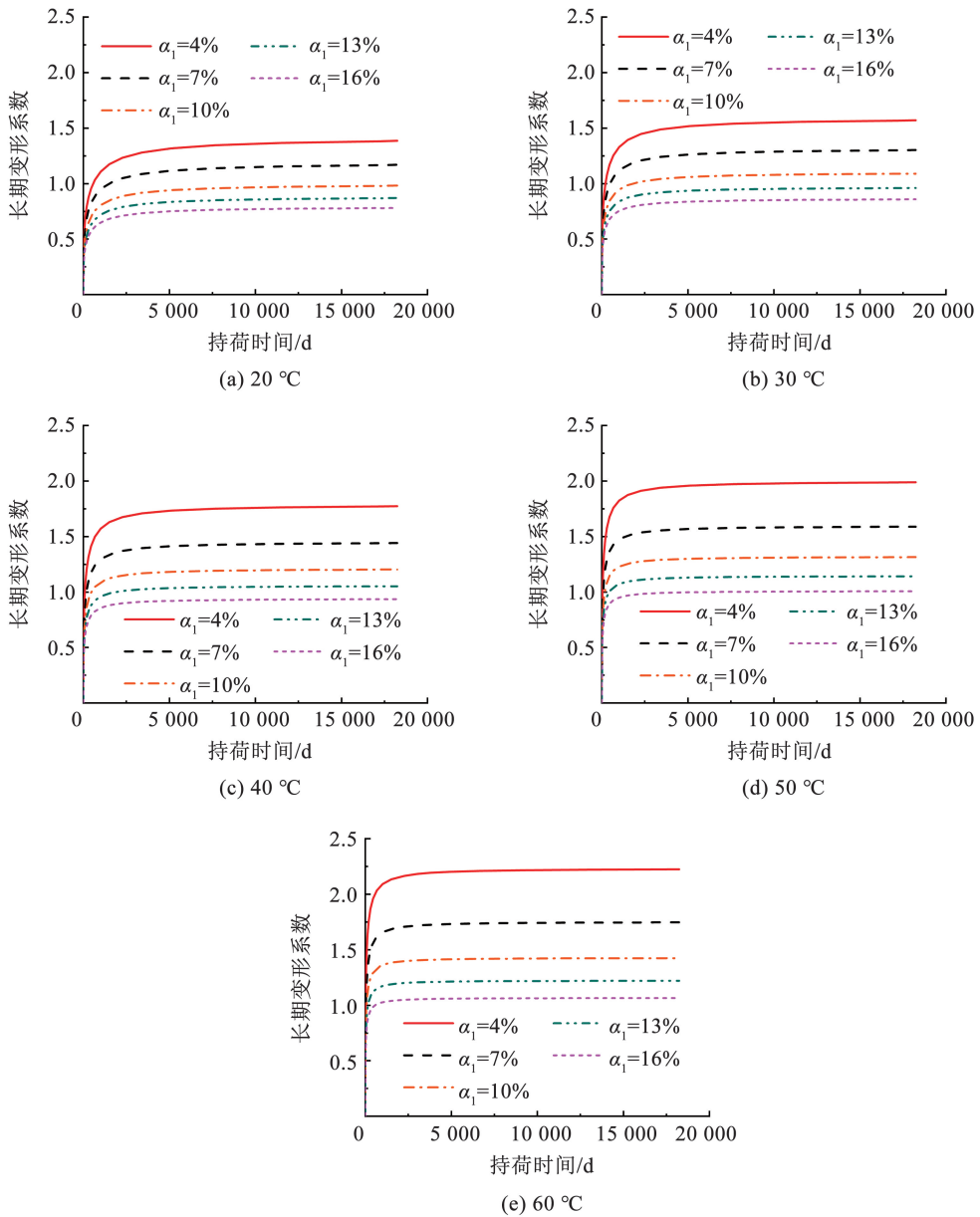


图 17 恒定温度作用下构件长期变形系数随内层钢管含钢率变化

Fig. 17 Variation of long-term deformation coefficient of components with inner steel tube steel ratio under constant temperature conditions

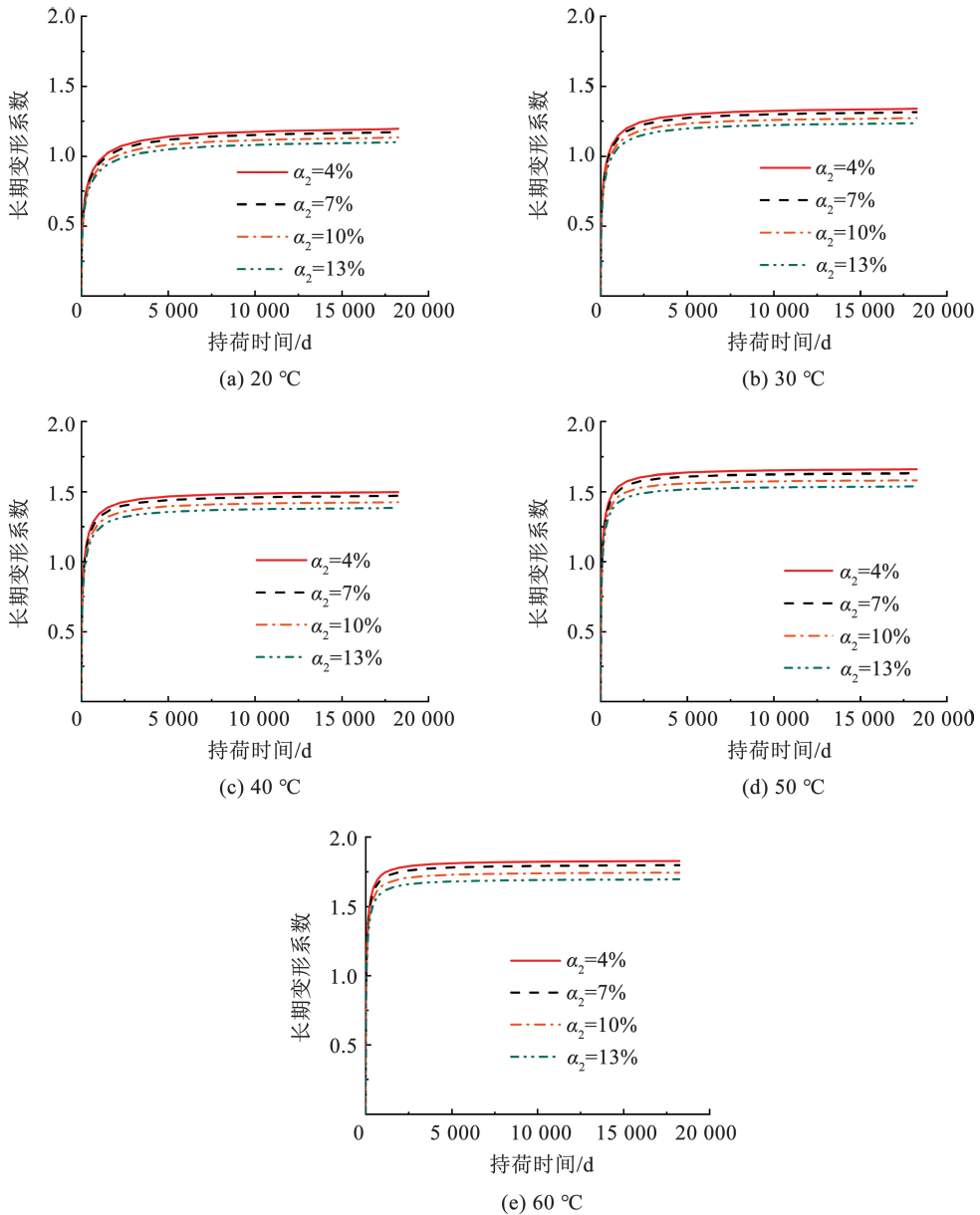


图 18 恒定温度作用下构件长期变形系数随外层钢管含钢率变化

Fig. 18 Variation of long-term deformation coefficient of components with outer steel tube steel ratio under constant temperature conditions

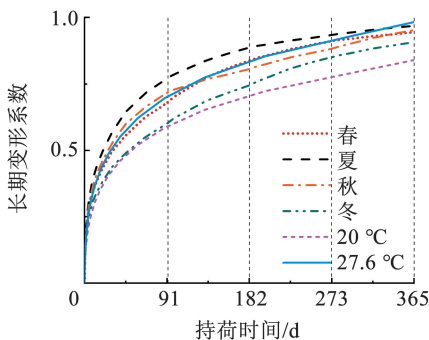


图 19 加载季节对构件长期变形系数的影响

Fig. 19 Influence of loading season on the long-term deformation coefficient of components

5 结 论

1) TCFST 柱在常温 (20 °C) 环境下的长期变形

表现为前期增长速率较快,后期逐渐平缓,试件持荷 200 d 的长期变形可达到 850 d 时的 60% ~ 80%, 700 ~ 850 d 发生的长期变形未达到 850 d 时长期变形的 10%。

2) 在太阳照射作用下,TCFST 柱内部混凝土温度的变化滞后于表面钢管温度的变化,且越靠近构件中心滞后越明显;当构件直径小于 400 mm 时,整个构件截面温度均随着环境温度变化产生较大波动;当构件直径大于 400 mm 时,自构件表面向内 200 mm 范围的各点温度受环境温度变化的影响较大,其余各点单日温度变化幅值小于 5 °C;构件表面单日温度变化幅值约为 20 °C,构件截面年平均温度高于 20 °C。

3) 基于 EC2 模型的 TCFST 柱长期变形的计算

方法在常温下的理论计算值与试验数值吻合最好,而基于 CEB-FIP 2010 模型和 ACI 209-92 模型的计算结果对构件后期的长期变形预测偏低;提出了可以考虑温度影响的 TCFST 柱长期变形预测方法,温度越高对 TCFST 柱的长期变形影响越显著。

参考文献

- [1] JIANG L A, YI A, CZ A. Temperature action and effect of concrete-filled steel tubular bridges: a review [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2020, 7(2): 174
- [2] 严仁章, 刘佳奇, 刘时龙, 等. 太阳辐射作用下钢管混凝土拱不均匀温度场及其引起的脱空分析与试验研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(1): 79
YAN Renzhang, LIU Jiaqi, LIU Shilong, et al. Analysis and experimental study of uneven temperature fields in concrete-filled steel tubular arches under solar radiation and its void effect [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(1): 79. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.01.008
- [3] SONG Y S, DING Y L. Fatigue monitoring and analysis of orthotropic steel deck considering traffic volume and ambient temperature [J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2013, 56(7): 1758. DOI:10.1007/s11431-013-5235-0
- [4] XIA Y, CHEN B, WENG S, et al. Temperature effect on vibration properties of civil structures: a literature review and case studies [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2012, 2(1): 29. DOI:10.1007/s13349-011-0015-7
- [5] LADAOUI W, VIDAL T, SELLIER A. Effect of a temperature change from 20 to 50 °C on the basic creep of HPC and HPCFRC [J]. *Materials & Structures*, 2011, 44(9): 1629. DOI:10.1617/s11527-011-9723-z
- [6] 鲁薇薇, 杨永清, 李晓斌. 随机变温作用下徐变对预应力混凝土梁桥结构行为的影响 [J]. *公路交通科技*, 2017, 34(12): 82
LU Weiwei, YANG Yongqing, LI Xiaobin. Effect of creep on PC girder bridge structural behaviors under randomly changed temperature [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 34(12): 82
- [7] 占玉林, 杨伟, 向天宇, 等. 温度变化对大跨度钢管混凝土拱桥徐变效应的影响 [J]. *铁道建筑*, 2021, 61(10): 40
ZHAN Yulin, YANG Wei, XIANG Tianyu, et al. Influence of temperature change on creep effect of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge [J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(10): 40. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2021.10.08
- [8] 王永宝, 廖平, 贾毅, 等. 循环温度对大跨混凝土拱桥长期变形行为的影响 [J]. *桥梁建设*, 2019, 49(3): 57
WANG Yongbao, LIAO Ping, JIA Yi, et al. Effects of cyclic temperature on time-dependent deformation behavior of long-span concrete arch bridge [J]. *Bridge Construction*, 2019, 49(3): 57
- [9] 张素梅, 李孝忠, 卢炜. 钢管约束的钢管混凝土短柱轴压性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(6): 21
ZHANG Sumei, LI Xiaozhong, LU Wei. Experimental study on behavior of steel-tube-confined CFST short columns under axial compression [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(6): 21. DOI: 10.14006/j.jzjxb.2020.0657
- [10] ZHANG Sumei, LI Xiaozhong, CHEN Xiongtu. Behavior of circular-steel-tube-confined square CFST short columns under axial compression [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 51: 104372. DOI: 10.1016/j.job.2022.104372
- [11] LI Xiaozhong, ZHANG Sumei, LU Wei, et al. Axial compressive behavior of steel-tube-confined concrete-filled-steel-tubes [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 181: 110138. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110138
- [12] 李艳华, 张素梅, 王焰. 长期荷载作用对钢管约束的组合短柱变形及承载力的影响 [J]. *工业建筑*, 2023, 53(1): 151
LI Yanhua, ZHANG Sumei, WANG Yan. Effect of long-term loading on deformation and bearing capacity of steel tube-constrained composite columns [J]. *Industrial Construction*, 2023, 53(1): 151. DOI:10.13204/j.gyjzg21120112
- [13] 李艳华, 张素梅, 王焰. 钢管约束的钢管混凝土轴压短柱长期变形性能 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2023, 55(9): 101
LI Yanhua, ZHANG Sumei, WANG Yan. Deformation behavior of steel tube-confined concrete-filled steel tube columns under sustained axial compression [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2023, 55(9): 101. DOI:10.11918/202112027
- [14] 刘振宇. 钢管混凝土拱肋截面温度场研究 [D]. 福州: 福州大学, 2006
LIU Zhenyu. Research on temperature field of concrete filled steel tubular arch rib [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006
- [15] 麦奎斯顿, 帕克, 斯皮特勒. 供暖、通风及空气调节 [M]. 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2005
- [16] 刘森林. 基于监测数据的长大跨桥梁温度应力分析与安全评价 [D]. 南京: 东南大学, 2017
LIU Senlin. Temperature stress analysis and safety evaluation of long span bridge based on monitoring data [D]. Nanjing: Southeast University, 2017
- [17] LIE T T. Fire Resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120(5): 1489. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:5(1489)
- [18] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践 [M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016
HAN Linhai. Theory and practice of steel tube concrete structures [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016
- [19] LV Xuetao, YANG Hua, ZHANG Sumei. Effect of contact thermal resistance on temperature distributions of concrete-filled steel tubes in fire [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 18(1): 81
- [20] DING J, WANG Y C. Realistic modelling of thermal and structural behaviour of unprotected concrete filled tubular columns in fire [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64: 1086. DOI: 10.1016/j.jcsr.2007.09.014
- [21] 钢铁研究总院. 金属材料拉伸试验第一部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021 [S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2021
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
- [23] ADAM M N, WALTER H D, JEFFERY J B. Creep of plain and structural concrete [M]. London: Construction Press, 1983
- [24] 汪剑, 方志. 大跨预应力混凝土箱梁桥收缩徐变效应测试与分析 [J]. *土木工程学报*, 2008(1): 70
WANG Jian, FANG Zhi. Analysis and field measurement of concrete box girder bridges for shrinkage and creep effects [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008(1): 70. DOI:10.3321/j.issn:1000-131X.2008.01.011
- [25] 张学昌. 环境温度对钢管约束的 CFST 轴压短柱长期性能影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022
ZHANG Xuechang. Long-term behavior of axially loaded steel-tube-confined concrete-filled steel tube stubs considering ambient temperature effect [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022
- [26] RAYMOND I G, GIANLUCA R. Time-dependent behaviour of concrete structures [M]. London: Spon Press, 2011: 99