

巨型钢管高强混凝土柱水化热温度场分析

王 强¹,刘蕴文^{1,2},陈 宇^{1,3},闫玉翟¹,包书春⁴

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 北方测盟科技有限公司,辽宁 沈阳 110042;
3. 中建铁路投资建设集团有限公司,北京 102600;4. 中建三局集团有限公司,湖北 武汉 430000)

摘 要 目的 研究巨型钢管 C70 高强混凝土柱水化热温度场,为巨型钢管高强度混凝土柱的混凝土配合比设计、热工计算及施工养护措施制定提供依据。方法 通过试验获得巨型钢管高强度混凝土柱的温度场发展规律并考察混凝土浇筑质量,进而采用有限元软件 MIDAS FEA 进行温度场数值模拟,研究不同混凝土热工参数下巨型钢管混凝土柱的温度场变化规律。结果 试件温控指标未达到《大体积混凝土施工标准》(GB50496—2018)要求,但混凝土浇筑质量能够满足施工质量要求;考虑内部钢构件的模型温度场计算结果与试验结果吻合较好,理论公式求得混凝土热工参数后,用于温度场模拟得到的结果与试验结果有较大差异。结论 C70 高强混凝土的温控指标可适当放宽,且应降低水化反应速率以改善巨型钢管高强混凝土柱内混凝土温度场;进行巨型钢管高强混凝土柱水化热温度场分析时,应考虑其内部钢构件。

关键词 巨型钢管柱;高强混凝土;水化热;内部构件;温度场;数值模拟

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Study on Hydration Temperature Field of Super-large High-strength Concrete Filled Steel Tube Column

WANG Qiang¹, LIU Yunwen^{1,2}, CHEN Yu^{1,3}, YAN Yudi¹, BAO Shuchun⁴

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. North CMA Technology Co. Ltd., Shenyang, China, 110042; 3. China State Construction Railway Investment & Engineering Group Co. Ltd., Beijing, China, 102600; 4. China Construction Third Engineering Bureau Group Co. Ltd., Wuhan, China, 430000)

Abstract: The hydration heat temperature field of super-large C70 high-strength concrete filled steel tube (CFT) columns was investigated to provide a basis for the design of concrete proportioning, thermal calculations, and the development of construction and maintenance measures for CFT columns. Firstly, the temperature field development rule of CFT columns is obtained through test, and the concrete casting quality is examined. Secondly, FEM software MIDAS FEA is used to carry out numerical

收稿日期:2022-12-04

基金项目:国家自然科学基金项目(52027811);辽宁省教育厅基金项目(lnsw202005)

作者简介:王强(1971—),男,教授,博士,主要从事结构抗震理论及数值模拟等方面研究。

simulation of the temperature field to study the temperature field change rule of the CFT column under different concrete thermal parameters. The test results show that the specimen temperature control indexes do not meet the requirements of the Standard for construction of mass concrete (GB50496—2018), but the quality of concrete casting can meet the construction quality requirements. The simulation results of the model temperature field considering the internal steel members are in good agreement with the experimental results, and the thermal parameters of the concrete obtained from the theoretical equations are used for the temperature field simulation, and the results obtained are quite different from the experimental results. The temperature control index for C70 high-strength concrete can be appropriately relaxed, and the hydration reaction rate should be reduced to improve the concrete temperature field within the CFT columns. The internal steel components should be taken into account when performing the analysis of the CFT columns.

Key words: super-large CFT column; high-strength concrete; hydration heat; internal components; temperature field; numerical simulation

巨型钢管高强混凝土柱具有节约占地面积、施工方便、承载力大等优点,在超高层建筑中得到了大量应用^[1]。为便于泵送施工,要求混凝土具备较高的流动性及塌落度^[2],所以高强混凝土中胶凝材料及拌合水用量较高,这使得水化反应剧烈,混凝土温升较大,易导致混凝土产生质量问题^[3]。

近年来,国内外学者采用试验和数值模拟手段对筏板基础、水工隧洞及桥梁承台等结构的材料热工参数及温度场进行了研究,但混凝土强度大多低于 C50^[4-6]。我国《大体积混凝土施工标准》(GB50496—2018)^[7]要求大体积混凝土应进行浇筑体的温度场分析,并针对 C50 及以下的大体积混凝土施工制定温控指标及相应的温控技术措施。目前针对高强混凝土梁柱构件水化热温度场及温控指标的研究较少。王强等^[8]采用试验及数值模拟手段对 C60 钢筋混凝土柱墙施工过程中温度场及混凝土热工参数进行了研究,结果表明即使 C60 混凝土温控指标略超文献^[7]指标要求,在施工养护到位的前提下,混凝土施工质量仍然能够满足要求。艾心荧等^[9]对 C70 巨型钢管混凝土柱温度场分布进行了试验研究,结果表明构件里表温差及降温速率均明显大于文献^[7]限值。

为减轻或避免混凝土水化放热引起的巨型钢管混凝土柱的浇筑质量问题,笔者对巨

型钢管 C70 高强混凝土柱水化热温度场的发展规律及施工质量进行了试验研究,进而开展了水化热温度场数值模拟方法及混凝土热工参数影响研究,为实际工程的混凝土配合比设计、热工计算及施工养护措施制定提供了依据。

1 工程背景

沈阳某超高层建筑采用巨型钢斜撑外框架—钢筋混凝土核心筒—外伸臂钢桁架结构体系。外框结构由 8 根大截面矩形双腔体钢管混凝土柱组成,截面尺寸最大的柱段长×宽×高为 5 200 mm×3 500 mm×2 500 mm,钢管壁厚 70~160 mm,内含水平环肋及纵向加劲肋等内部钢构件,构造较为复杂。巨型钢管柱腔内采用 C70 混凝土,巨型钢管与水平环肋、纵向加劲肋均采用 Q345GJ 级钢材。受施工作业条件限制,混凝土浇筑时难以采用管冷、蓄水养护等温控措施。为避免混凝土浇筑时因水化热效应造成的施工质量问题,需对其温度场进行研究。

2 试验

笔者选取工程中截面尺寸最大的第十柱端(双腔对称布置),设计制作模型试件对混凝土水化热温度场进行试验研究,并考察其施工浇筑质量。

2.1 试件设计

为节省时间及试验成本,选取该柱段1/2截面(单腔),设计试件,试件高度与实际柱段一致(2 500 mm)。柱段外壁钢管、内部水平环肋及纵向加劲肋均参照实际柱段进行布置,厚度均取为 20 mm。钢筋布置参照实际柱段予以适当简化,试件参数及钢构件布置如图 1 所示。

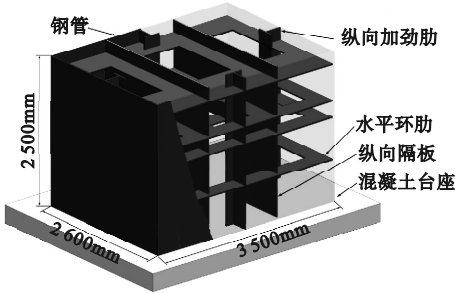


图1 试件钢构件布置图

Fig.1 Layout of specimen steel components

2.2 材料选用

实际工程根据强度及塌落度要求进行了多轮试配,得到了基于 60 d 龄期强度的 C70 混凝土设计配合比(见表 1)。试件混凝土配合比采用实际工程的设计配合比。采用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,钢材等级为 Q235,钢筋等级为 HRB335。

表1 试件 C70 混凝土配合比

Table 1 C70 concrete mix proportion of specimen			
材料	用量/(kg·m ⁻³)	材料	用量/(kg·m ⁻³)
水泥	350	碎石	830
粉煤灰	100	硅灰	35
矿粉	150	砂	790
外加剂	14.6	水	145

2.3 试验测温方案

参照文献[10]要求,试件共布置 6 个测位,每个测位设置 5 个测点,分别位于距试件顶部 0.05 m、0.65 m、1.25 m、1.85 m、2.45 m 处。浇筑完成后,前期混凝土温度变化较大,故每 2 h 测温一次;待温度变化趋势基本稳定后,改为 4 h 测温一次;浇筑完成 8 d 后,改为 12 h 测温一次,直至里表温差小于 20 ℃

时结束测温。混凝土测位布置见图 2。

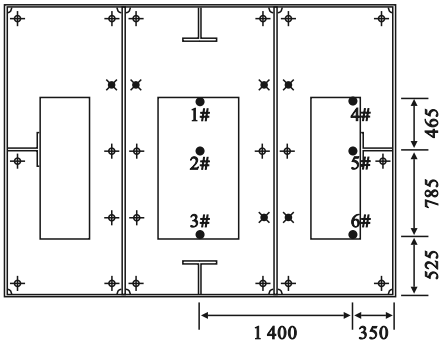


图2 测位水平布置图

Fig.2 Horizontal layout of temperature test seats

2.4 施工及养护

钢构件施工完成后,参照实际施工方案进行混凝土浇筑及后续养护。混凝土拌合物平均入模温度为 31 ℃。浇筑完成后的试件见图 3。



图3 浇筑完成后的试件

Fig.3 Specimen after concreting

2.5 测温结果及分析

试件不同测位处的混凝土各测点实测温度变化曲线见图 4。从图中可以看出,各测位温度变化曲线大致可分为急剧升温、迅速降温、缓慢降温三阶段,但不同测位各阶段持续时间不同。其中试件中心处的 2#测位混凝土浇筑后 43 h 为急剧升温阶段,至 150 h 为迅速降温阶段,随后为缓慢降温阶段。其余测位的急剧升温与迅速降温阶段略小于 2#测位。各测位均在试件高度中心处温升最高,与基础相连处温升最低,在上表面处温度变化剧烈。混凝土的最大峰值温度 83.8℃,位于 2#测位中心测点。各测点升温速率基

本一致,显著大于降温速率;各测点降温速率率越大。差异较大,基本呈现距试件表面越近降温速

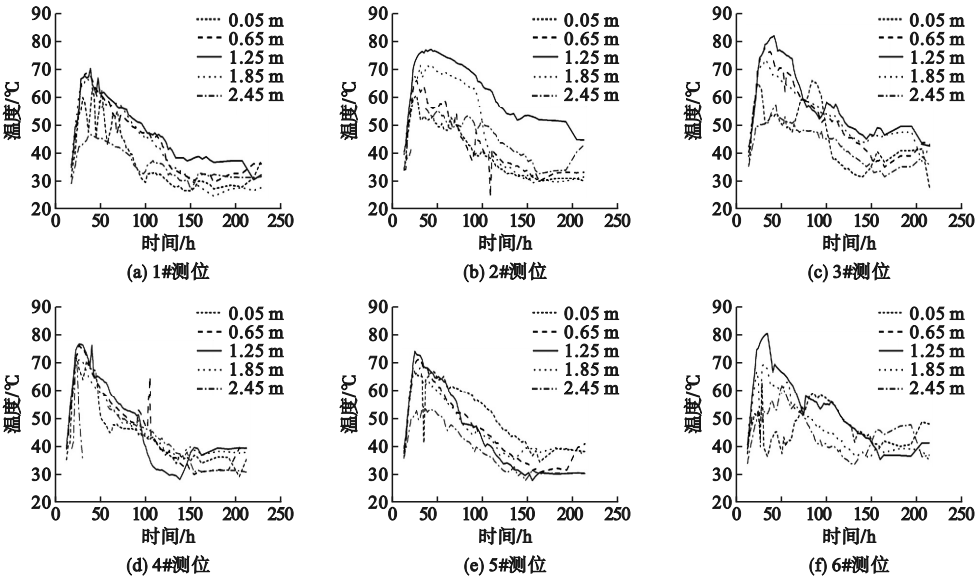


图 4 各测位温度变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curves of test seats

图 5 为 2#测位处的中心测点及上表面测点混凝土温升及里表温差曲线。从图中可以看出,中心测点最大温升为 52.8℃,最大降温速率为 11.0℃/d。上表面测点最大温升为 34.2℃,最大降温速率为 12.7℃/d。里表温差在浇筑完成 31 h 后快速达到了 27.0℃,91 h 后达到峰值 33.0℃,随后缓慢下降,119 h 后降至 25℃以下,迅速降温阶段里表温差较大。测温数据显示,最大温升、里表温差略超文献[7]指标,降温速率显著超

过文献[7]指标。
图 6 为 2#测位处上表面测点及 5#测位处中心测点温升曲线。从图中可以看出,5#测位中心测点最大温升 42.6℃,最大降温速率为 13.7℃/d,均大于 2#测位上表面测点,超过 70 h 后温度变化趋势与 2#测位上表面测点接近。尽管 5#测位中心测点较 2#测位上表面测点更靠近混凝土核心,但其附近的内部钢构件改变了混凝土的散热条件,对混凝土的温度场发展有着较大影响。

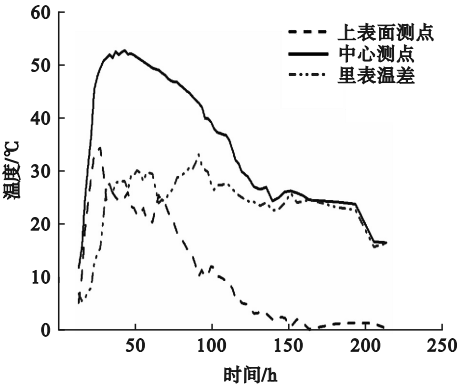


图 5 2#测位中心、上表面测点温升及里表温差曲线
Fig. 5 Rising temperature curve of core, surface test point and difference of core and surface at 2# seat

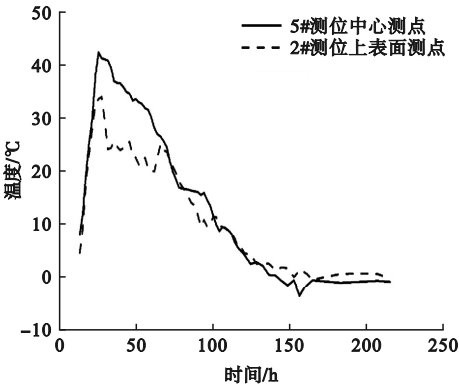


图 6 2#测位上表面及 5#测位中心测点温升曲线
Fig. 6 Rising temperature curve of surface at 2# seat and core at 5# seat

由于场地条件所限,浇筑完成 24 d 后,采用金刚石绳锯切开试件进行混凝土浇筑质量观测,混凝土表面及内部无可见裂缝,仅存在一定量微小气孔。钻取芯样测得试件混凝土 24 d 抗压强度为 62.2 MPa,略低于同条件试块抗压强度 70.3 MPa。这可能由于混凝土振捣不足与试件内混凝土温升较高所致。考虑到混凝土后期强度会继续增长,结合文献[11],计算得到试件内混凝土 60 d 抗压强度可达到 80.29 MPa,符合设计要求。实际工程中,应加强混凝土振捣。

试验结果表明,尽管模型试件内 C70 混凝土施工的温控指标未达到文献[7]要求,特别是降温速率显著大于文献[7]限值,但试件内 C70 混凝土浇筑质量能够满足施工质量要求,这与钢管具有良好的密闭保水作用有关。对于实际工程,在混凝土降温阶段,在钢管外部宜增加保温措施,降低降温速率及里表温差,进而降低混凝土开裂风险。

3 有限元分析模型及计算参数

3.1 有限元模型

以往进行大体积混凝土温度场数值模拟时,为降低建模难度,通常忽略内部钢构件、配筋的影响。笔者采用 MIDAS FEA 分别建立不考虑与考虑内部钢构件的两个有限元模型(简称模型一、模型二),以探究巨型钢管高强混凝土柱内部钢构件对混凝土温度场的影响。鉴于试件内钢筋较少且建模分析工作量较大,分析模型中忽略钢筋。

由于试件截面对称,因此选取 1/2 试件 1/2 进行建模。模型中的钢板、混凝土与台座部件均采用实体单元,各部件单元间采用共节点方式实现不同部件材料间的传热。结合计算精度与计算消耗机时综合考虑,模型网格尺寸取 0.05 m。模型一和模型二的单元数量分别为 16 224 个及 41 521 个。划分网格后的模型一和模型二分别见图 7 和图 8。

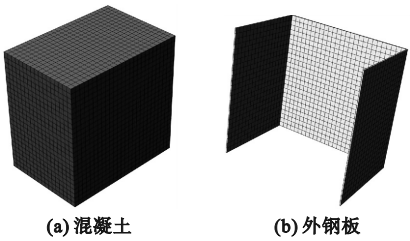


图 7 模型一网格划分
Fig. 7 Meshing of model 1

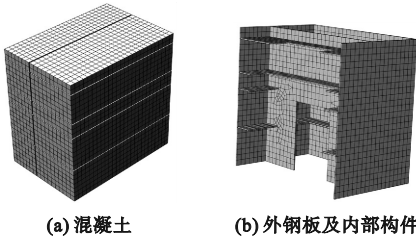


图 8 模型二网格划分
Fig. 8 Meshing of model 2

3.2 计算参数取值

在进行试件数值模拟时,为简化分析,作如下假定:

- (1)假定混凝土为均质体,各节点混凝土水化热、导热系数等热工参数相同;
- (2)忽略太阳辐射及风速对表面对流系数的影响;
- (3)忽略由于温度变化产生的大体积混凝土物理及热工性能的变化。

依据文献[7]及文献[11],混凝土材料的热工参数可根据其配合比及组成成分的热工参数计算获得。混凝土绝热温升、比热容及导热系数按下式计算:

$$T(t) = T_{\max}(1 - e^{-mt}) = \frac{WQ}{C\rho}(1 - e^{-mt}). \quad (1)$$

$$C = \frac{\sum W_i C_i}{\sum W_i}. \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\sum W_i \lambda_i}{\sum W_i}. \quad (3)$$

式中: $T(t)$ 混凝土龄期为 t 时的绝热温升,℃; T_{\max} 为最大绝热温升,℃; W 为每立方米混凝土的胶凝材料用量, kg/m^3 ; Q 为胶凝材料水化热总热量, kJ/kg ; C 、 C_i 为混凝土与

其各组成成分的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ 为混凝土的密度, kg/m^3 ; t 为混凝土龄期, d ; m 为水化放热系数, 与水泥品种、用量和入模温度等有关; W_i 为混凝土各组成成分的体积质量, kg/m^3 ; λ 、 λ_i 分别为混凝土与其组成成分的导热系数, $\text{kJ}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

表 2 材料热工参数

Table 2 Thermal parameters of material

材料	比热容/ ($\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数/ ($\text{kJ}\cdot(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$)	最大绝热温升/ $^{\circ}\text{C}$	水化放热系数
混凝土	0.896	2 414.6	8.567	80.38	1.570
钢材	0.48	7 850	209.520	—	—

依据文献[14],在计算模型中,混凝土底座底面与大地直接接触,假定大地温度恒定,采用强制温度边界条件;模型对称面上采用绝热边界条件;柱内混凝土的顶面、钢板外露部分及混凝土底座外露的部分与空气接触,采用对流边界条件;柱内混凝土、钢板及混凝土底座之间采用温度连续边界条件。

依据试件浇筑时的环境温度条件,按式(4)考虑环境温度:

$$F(t) = \Delta T \times \sin\left[\frac{\pi \times (t - t_0)}{12}\right] + T_0. \quad (4)$$

式中: $F(t)$ 为环境温度变化函数, $^{\circ}\text{C}$; ΔT 为温度变化幅度,取 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$; t_0 为迟延时间,取 9 h ; T_0 为平均温度,取 $24.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

依据文献[11], $\text{P}\cdot\text{O}42.5$ 普通硅酸盐水泥水化热取 $330\text{ kJ}/\text{kg}$,依据文献[7]可计算求得混凝土的最大绝热温升 T_{max} 及水化放热系数 m 。计算获得的混凝土热工参数见表 2,钢材热工参数取自文献[12-13]。

依据施工技术措施及沈阳地区的气候特点,参照文献[15],取外部钢管的表面对流系数为 $79\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$,试件薄膜养护的混凝土表面对流系数为 $43.2\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$,试件底部的混凝土台座表面对流系数为 $79\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。混凝土的入模温度为 $31\text{ }^{\circ}\text{C}$,混凝土台座底部温度恒定设置为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4 内部钢构件对温度场的影响

模型一、模型二在浇筑完成后不同时间的温度场云图见图 9。从图中可以看出,两个模型的峰值温度均出现在混凝土核心处,浇筑 50 h 后温度急剧上升,随后缓慢下降,里表温差呈先增大后减小的趋势,与试验现

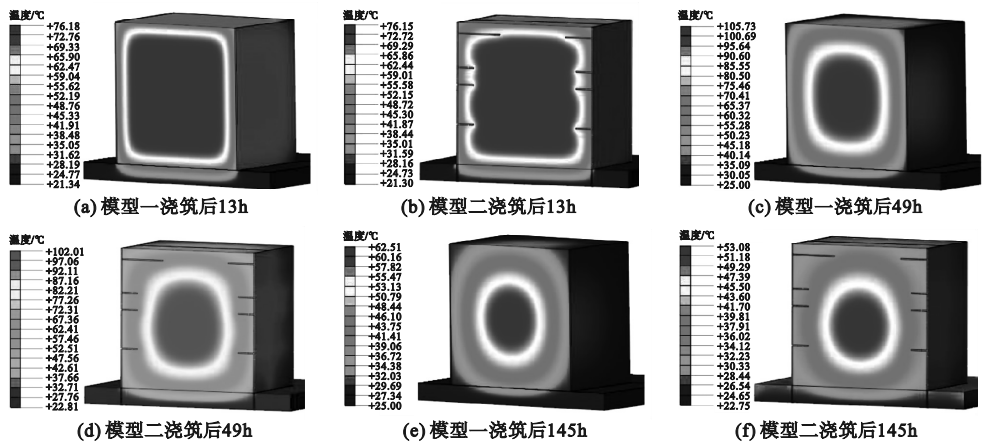


图 9 不同模型温度场云图

Fig. 9 Temperature field cloud of different models

象基本一致。但模型一在整个硬化过程中各个方向温度变化梯度较为一致;而模型二在硬化初期各个方向温度变化梯度不同,靠近内部钢构件处温度梯度变化较大,硬化后期各方向温度梯度较为一致。相同时间点处,模型二比模型一混凝土温度场分布更为均匀,且同位置混凝土温度更低,高温区域体积比更小。这是由于钢材热导率高,能够在混凝土水化放热过程中带走大量的热量,起到与水冷管类似的作用。

模型一和模型二的2#测位上表面测点温度模拟结果与实测结果对比见图10。从图中可以看出,两者的混凝土表面温度变化趋势均与实测结果较为吻合。表明选取的环境参数及表面对流系数与实际情况较为接近,可用于后续分析计算。

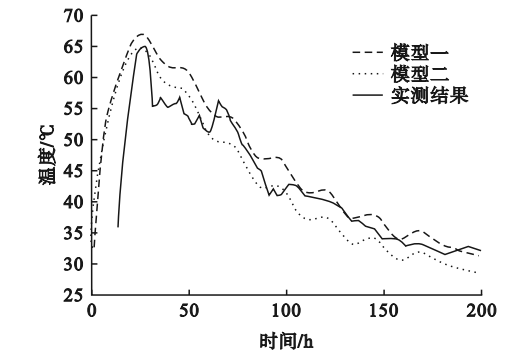


图10 不同模型2#测位上表面测点温度变化曲线

Fig. 10 Temperature curves of surface at 2# seat in different models

模型一和模型二的2#测位及5#测位中心测点温度变化曲线与实测结果对比见图11。从图中可以看出,模型一和模型二的温度变化趋势相近,但与实测结果相比,其峰值温度出现略晚,升温速率较为接近,但降温速率稍快。模型一2#测位中心测点的峰值温度为105.43℃,5#测位核心测点的峰值温度为98.51℃;模型二2#测位中心测点的峰值温度为102.49℃,5#测位核心测点的峰值温度为88.30℃。两个模型的计算结果均高于实测结果,但模型二与试验结果更为接近。因此对含钢量较大、内部构件较多的钢管混

凝土进行温度场分析时,应对内部钢构件进行建模以考虑其传热作用,否则可能会高估混凝土内部温度。

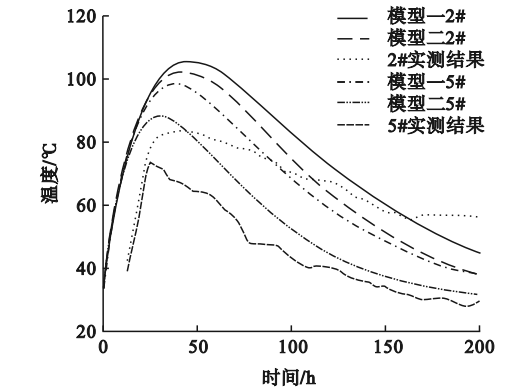


图11 不同模型2#及5#测位中心测点温度变化曲线

Fig. 11 Temperature curves of core at 2# and 5# seat in different models

5 混凝土热工参数对温度场的影响

5.1 水化放热系数

文献[14]规定,P·O42.5普通硅酸盐水泥的水化放热系数宜取为0.384,远低于理论计算值1.570。在其他参数不变的情况下,将混凝土水化放热系数在0.384~1.570内取5个参数水平,对水化热温度场进行模拟分析。计算获得的2#测位中心测点温度变化曲线见图12,不同水化放热系数下的温度指标见表3。

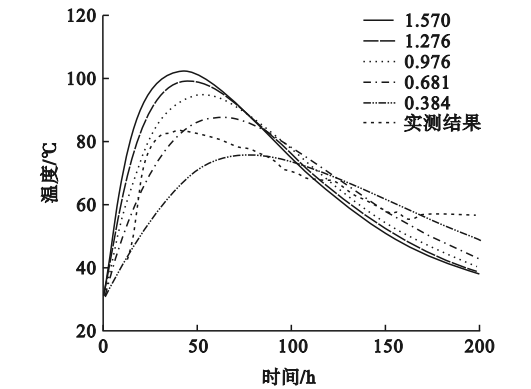


图12 不同水化放热系数下2#测位中心测点温度变化曲线

Fig. 12 Temperature curves of core at 2# seat under different hydration reaction rate

表3 不同水化放热系数下的温度指标

Table 3 Temperature index under different hydration reaction rate

水化放热系数	最大温升/℃	最大降温速率/(℃·d ⁻¹)
1.570	71.48	14.32
1.276	68.35	13.29
0.976	63.83	11.69
0.681	56.88	9.06
0.384	44.69	6.42

计算结果表明,随着水化放热系数的降低,试件内混凝土核心处峰值温度、升温速率、降温速率均呈明显降低趋势。今后可考虑采用矿渣硅酸盐水泥或增加粉煤灰、矿渣粉掺量减缓混凝土水化反应,从而改善水化热温度场。

当水化放热系数取 1.276 时,模拟所得的最大温升、最大升温速率及最大降温速率与试验结果较为接近。因此当前混凝土设计配合比下的水化放热系数可取为 1.276,以用于实际工程温度场分析。

5.2 最大绝热温升

按文献[7]计算得到的混凝土最大绝热温升为 80.38℃,但混凝土温度场分析所得峰值温度较实测结果偏高。笔者选取不同最大绝热温升进行数值模拟,以探究对混凝土水化热温度场的影响。模拟得到的 2#测位中心测点温度变化曲线见图 13。

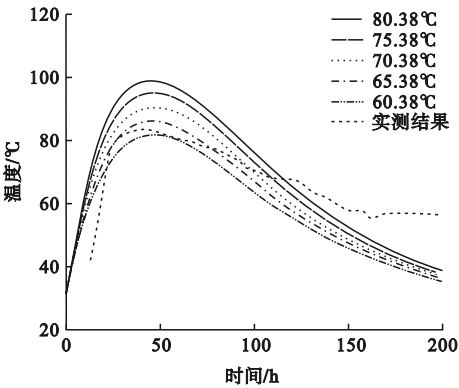


图13 不同最大绝热温升下 2#测位中心测点温度变化曲线

Fig. 13 Temperature curves of core at 2# seat under different adiabatic temperature rise

从图 13 可以看出,随着最大绝热温升的降低,混凝土核心处温度曲线趋于平缓,最大温升、升温速率及降温速率均有降低。相较于水化放热系数,最大绝热温升对于混凝土浇筑温度场的影响略小,今后可研究采用低热水泥配制 C70 高强度混凝土,以降低绝热温升,从而进一步改善构件水化热温度场。

当取 65.38℃作为最大绝热温升时,混凝土核心处温度场模拟结果与实测结果较为吻合。此时 2#测位上表面测点及 5#测位中心测点模拟与实测温度曲线如图 14 所示,从图中可以看出,5#测位中心测点温度与实测结果也较为接近,2#测位上表面测点温度略低于实测结果,这与模拟分析中未考虑日照辐射对试件表面温度的影响有关。因此当前混凝土设计配合比下,混凝土的最大绝热温升可取为 65.38℃。

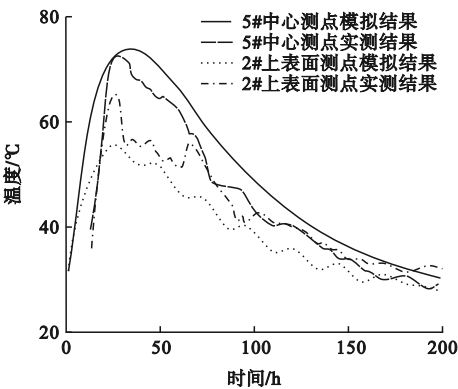


图14 2#测位上表面测点及 5#测位中心测点模拟与实测温度结果对比

Fig. 14 Comparison of simulation and test values of surface at 2# seat and core at 5# seat

6 结 论

(1)巨型钢管高强混凝土柱试件在最大温升及表里温差略超、降温速率远超《大体积混凝土施工标准》(GB50496—2018)要求的情况下,混凝土浇筑质量仍可满足施工质量要求。在实际工程中,C70 混凝土的温控指标尤其是降温速率可适当放宽。

(2)应降低水化反应速率以改善巨型钢管 C70 高强混凝土柱内温度场。

(3)对巨型钢管高强混凝土柱进行温度场分析时,应考虑内部钢构件对水化热温度场的影响。

(4)基于《大体积混凝土施工标准》(GB50496—2018)求得混凝土热工参数后,用于温度场模拟得到的结果与试验结果有较大差异。建议对 C70 高强混凝土热工参数计算方法进入深入研究。

参考文献

- [1] 汪大绥,包联进.我国超高层建筑结构发展与展望[J].建筑结构,2019,49(19):11-24.
(WANG Dasui, BAO Lianjin. Development and prosperity of structural design of super tall buildings in China [J]. Building structure, 2019, 49(19): 11-24.)
- [2] 黄荣辉.预拌混凝土实用技术简明手册[M].北京:机械工业出版社,2014.
(HUANG Ronghui. Ready mixed concrete practical technology concise manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.)
- [3] 林松涛.大体积混凝土施工标准解析与应用指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
(LIN Songtao. Analytical and application guides of standard for construction of mass concrete [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)
- [4] 耿鸣山,林尔姬,吕建兵,等.大体积混凝土承台的水化热分析及温控研究[J].混凝土,2021(9):50-55.
(GENG Mingshan, LIN Erji, Lü Jianbing, et al. Hydration heat analysis and temperature control of mass concrete pile cap [J]. Concrete, 2021(9): 50-55.)
- [5] 于洋,张峰,张磊,等.单箱三室混凝土箱梁水化热试验及分析[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(6):1043-1051.
(YU Yang, ZHANG Feng, ZHANG Lei, et al. Test and analysis on hydration of concrete three-cell box girder [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2022, 52(6): 1043-1051.)
- [6] 周大为,邓年春,石拓.钢管混凝土拱桥大型水化温度场试验及数值模拟分析[J].广西大学学报(自然科学版),2021,46(1):51-59.
(ZHOU Dawei, DENG Nianchun, SHI Tuo. Concrete hydration temperature field test and numerical simulation analysis of concrete-filled steel tube arch bridge [J]. Journal of Guangxi university (natural science edition), 2021, 46(1): 51-59.)
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.大体积混凝土施工标准:GB50496—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for construction of mass concrete: GB50496—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.)
- [8] 王强,夏菲,刘太乾,等.大体积高强混凝土施工过程中温度场分析[J].沈阳工业大学学报,2014,36(4):453-458.
(WANG Qiang, XIA Fei, LIU Taiqian, et al. Temperature field analysis on high-strength mass concrete in construction process [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2014, 36(4): 453-458.)
- [9] 艾心炎,侯玉杰,余地华,等.天津高银 117 大厦多腔体异形钢管混凝土巨型柱 C70 大体积自密实混凝土温度场试验研究[J].混凝土,2015(10):151-157.
(AI Xinying, HOU Yujie, YU Dihua, et al. Experimental research on the temperature field of C70 mass self-compacting concrete of special-shaped multi-cavity concrete-filled steel-tubular mega column of Tianjin Goldin finance 117 building [J]. Concrete, 2015(10): 151-157.)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.大体积混凝土温度测控技术规范:GB/T51028—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for temperature measurement and control of mass concrete: GB/T51028—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [11] 王新刚.大体积混凝土温度应力实用计算方法及控裂工程实例[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
(WANG Xingang. Practical calculation method for mass concrete temperature stress and crack control engineering examples [M]. Beijing: China Communications Press Co. Ltd., 2017.)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑热工设计规范:GB50176—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Thermal design code for civil building: GB50176—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB50010—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [14] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.
(ZHU Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.)
- [15] 俞亚南,张巍,申永刚.大体积承台混凝土早期表面开裂控制措施[J].浙江大学学报(工学版),2010,44(8):1621-1628.
(YU Ya'nan, ZHANG Wei, SHEN Yonggang. Control measures for preventing crack on the surface of mass concrete abutment in early stage [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2010, 44(8): 1621-1628.)
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)