

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.022

钢筋在大体积混凝土承台水化热分析中的作用及简化方法^{*}

刘尧¹, 潘权¹, 杨蕾²

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.长沙理工大学城南学院 交通土建系, 湖南 长沙 410076)

摘要:为使考虑钢筋作用的有限元计算能更合理高效地指导大体积混凝土承台的温控过程,对钢筋在混凝土承台水化热分析中的作用及简化方法进行研究。以一悬索桥索塔承台为例,建立承台素混凝土有限元模型和分离式有限元模型进行计算对比分析,结果表明可根据考虑钢筋作用的分离式模型的计算结果更准确地指导承台水化热温控过程;建立钢筋整体等效和局部等效两种承台整体式有限元模型,将整体式模型计算结果与分离式模型计算结果进行对比分析,结果表明大体积混凝土承台水化热有限元分析中,采用钢筋整体等效的简化方法,其计算结果可安全预测和指导承台水化热温控过程。

关键词:桥梁;承台;水化热;大体积混凝土;温度场;表面拉应力;钢筋简化

中图分类号:U441

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)01-0111-05

大体积混凝土结构水化热过程中,由于结构内外散热能力的差异,很容易使结构出现较大的里表温差,从而在结构表面产生较大的温度拉应力^[1-4]。通常在结构表层设置大量构造钢筋,以抵抗混凝土结构水化热过程中产生的拉应力,制约结构表面裂缝的生成及扩展^[5-6]。现有大体积混凝土承台水化热分析中,大多以素混凝土模型进行模拟计算,其计算过程简便且结果偏安全,但忽略了钢筋在水化热分析中的作用,与实际情况存在差异,会导致计算结果过于保守。考虑钢筋作用进行承台水化热分析更符合实际工程情况,研究钢筋在混凝土承台水化热分析中的作用及简化方法,可更合理高效地指导大体积混凝土承台的温控过程^[7]。本文以一悬索桥索塔承台为例,建立无钢筋素混凝土模型、分离式钢筋混凝土模型、钢筋弥散于承台整体的整体式模型、钢筋弥散于承台表层的整体式模型进行对比分析,研究钢筋在承台水化热分析过程中的作用,探讨承台水化热分析中钢筋的简化方法。

1 工程背景

1.1 工程概况

某高速公路上的钢桁梁悬索桥,其主跨为 650 m,属于特大桥。主塔承台为大体积混凝土构件,单

个承台平面尺寸为 13.6 m×21.1 m,高度为 7.0 m。承台采用 C40 混凝土分两次浇筑完成,浇筑厚度为 3 m+4 m。承台底部设置 30 cm 厚 C30 混凝土调平层。

1.2 温度测点布置

以承台第一次浇筑的 3 m 混凝土为例,将混凝土按每米一层进行划分,共计 3 层,由下至上编号为 A、B、C 断面,每层中间断面处布置温度测点。每个断面布置 6 个温度传感器,其中测点 1、5 测量承台表面温度,测点 2、3、4、6 测量承台内部温度(见图 1)。

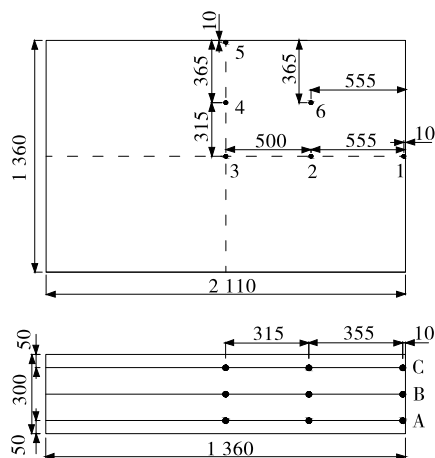


图 1 温度测点布置示意图(单位:cm)

^{*} 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878073)

2 计算模型与参数

2.1 计算模型

建立无钢筋素混凝土模型、分离式钢筋混凝土模型、钢筋弥散于承台整体的整体式模型、钢筋弥散于承台表层的整体式模型,考虑到承台结构的对称性,建立 1/4 对称模型,尺寸为 10.55 m×6.80 m×7.00 m。建模时考虑地基传热效应,地基建模尺寸为 13.55 m×9.80 m×3.00 m。4 种模型中均包含承台、地基、冷却管单元,其中承台混凝土单元共计 143 704 个,地基单元共计 24 024 个,冷却管单元共计 2 919 个。分离式有限元模型还需建立钢筋单元,钢筋单元共计 81 774 个。素混凝土模型和整体式模型单元总计均为 170 647 个,分离式模型单元总计 252 421 个。4 种模型的具体情况如下:

(1) 素混凝土模型[见图 2(a)]。建立不配置钢筋的承台素混凝土有限元模型。

(2) 分离式模型[见图 2(b)]。建立考虑钢筋布置情况的承台分离式有限元模型,在距离承台底部 3 cm 处设置单层 15 cm×15 cm 直径为 13 mm 的钢筋,底部设置 5 层 15 cm×15 cm 直径为 36 mm 的钢筋,承台顶部设置 2 层 15 cm×15 cm 直径为 36 mm 的钢筋,承台侧面设置单层 15 cm×15 cm 直径为 20 mm 的钢筋,承台内部设置 4 层 15 cm×15 cm 直径为 20 mm 的钢筋。此外,还设置多根规格为 ∠70×6 的角钢,承台四周(除底面外)设置 1 层间距为 10 cm×10 cm 的 D6 防裂钢筋网。建模时钢筋按线性单元处理。

(3) 整体等效模型[见图 2(c)]。建立钢筋整体等效的承台整体式有限元模型,承台内部钢筋弥散

于承台整体,钢筋占比为 0.85%。

(4) 局部等效模型[见图 2(d)]。建立钢筋局部等效的承台整体式有限元模型,承台内部钢筋弥散于承台表层。沿长边侧钢筋弥散厚度为 0.21 m,钢筋占比为 2.34%;沿短边侧钢筋弥散厚度为 0.21 m,钢筋占比为 2.79%;承台底部钢筋弥散厚度为 0.89 m,钢筋占比为 7.79%;承台顶部钢筋弥散厚度为 0.36 m,钢筋占比为 7.76%。

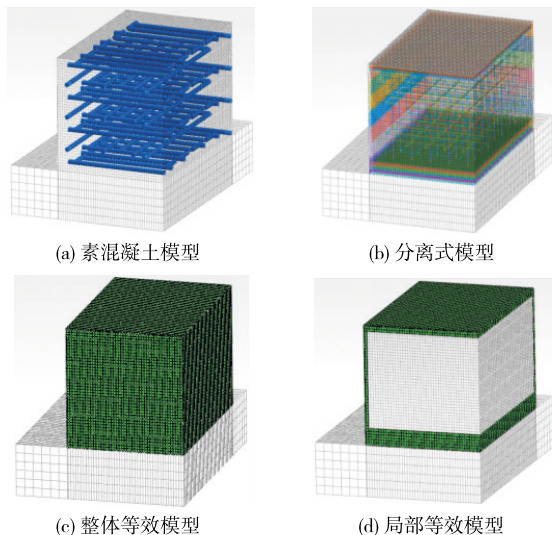


图 2 承台有限元计算模型

2.2 计算参数

2.2.1 环境与材料参数

承台大体积混凝土浇筑时的入模温度取 20 ℃,环境温度取 21 ℃,环境风速取 2.2 m/s。承台四周采用厚度为 5 mm 的钢模,钢模导热系数为 169.29 kJ/(m²·h·℃)。承台、地基、钢筋的材料热力学参数见表 1。

表 1 材料的热力学参数

构件及材料	密度/ (kg·m⁻³)	比热/ [kJ·(kg·℃)⁻¹]	热传导率/ [kJ·(m·h·℃)⁻¹]	热膨胀系数/ (10⁻⁵℃⁻¹)	弹性模量/ GPa	泊松比
承台	2 424.20	0.963	9.628	1.0	30	0.18
地基	2 422.88	0.837	7.116	1.0	1	0.20
钢筋	7 849.78	0.431	171.206	1.2	206	0.30

2.2.2 表面放热系数

承台表面与模板或空气接触,按第三类边界条件进行处理,承台表面等效放热系数按下式计算:

$$\beta_s = \frac{1}{1/\beta + \sum h_i/\lambda_i} \quad (1)$$

式中: β_s 为等效表面放热系数[kJ/(m²·h·℃)]; β

为表面放热系数[kJ/(m²·h·℃)],对于光滑表面, $\beta=21.06+17.58v^{0.910}$,对于粗糙表面, $\beta=18.46+17.36v^{0.883}$;v 为风速(m/s); h_i 为各层模板的厚度(m); λ_i 为各层模板的导热系数[kJ/(m²·h·℃)]。

按式(1)求得承台表面拆模前等效表面放热系数为 53.203 kJ/(m²·h·℃),拆模后表面放热系

数为 $53.286 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

2.2.3 冷却管对流系数

承台内部布置外径为 48 mm 的冷却管,管壁厚 2.5 mm ,冷却管进水口温度为 15°C ,水流量为 $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$,冷却管对流系数按下式计算:

$$H_p = 4.186(4.75v_w + 43)$$

式中: v_w 为通水流速(cm/s)。

根据已有参数计算,得冷却管的对流系数为 $1130.83 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

3 计算对比分析

3.1 有无钢筋作用对比分析

承台第一次浇筑后的实测最高温度出现在 B 断面,选取 B 断面 6 个温度测点的实测温度与有限元模型相应节点位置处的计算温度进行对比分析。实测温度与素混凝土模型计算温度时程曲线见图 3,实测温度与分离式模型计算温度时程曲线见图 4,表面拉应力时程曲线见图 5。

由图 3、图 4 可知:在 $0 \sim 35 \text{ h}$ 时段,承台处于水化热升温阶段,两种模型下各测点的计算温度均比实测温度高。这是由于计算中所用的混凝土放热函数与实际情况有所偏差。在 $35 \sim 65 \text{ h}$ 时段,各测点温度陆续达到最大值,承台实测最高温度 57.8°C 出现在混凝土浇筑后 65 h 的测点 2,同时素混凝土模型和分离式模型测点 2 处也出现计算温度峰值,分别为 58.3°C 和 57.6°C ,相比而言,分离式模型计算的峰值温度与实测峰值温度更接近。 65 h 后,承台

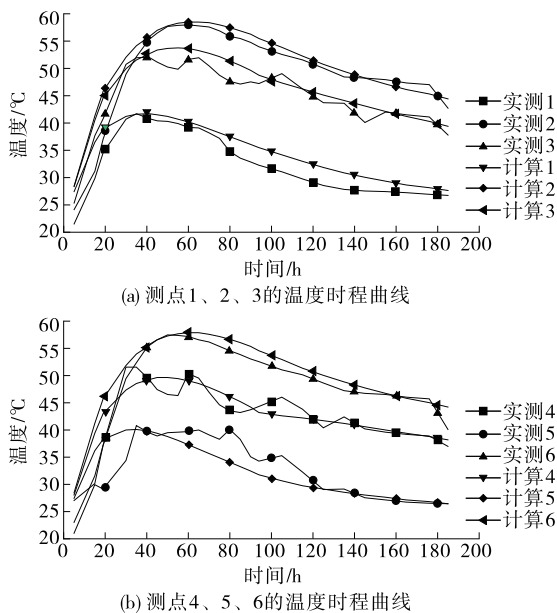


图 3 断面 B 实测温度与素混凝土模型计算温度对比

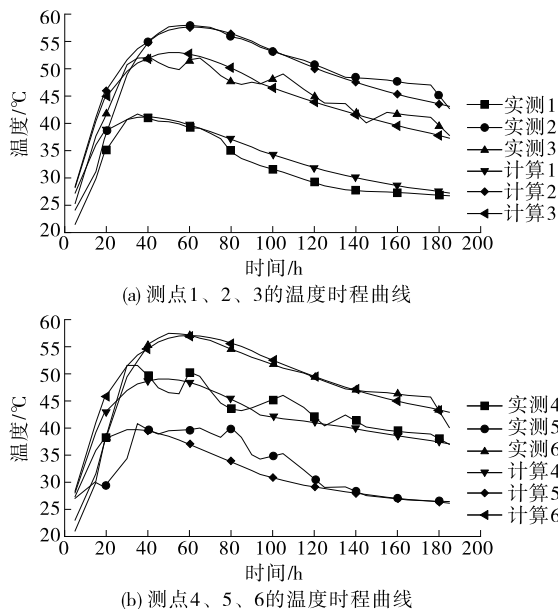


图 4 断面 B 实测温度与分离式模型计算温度对比

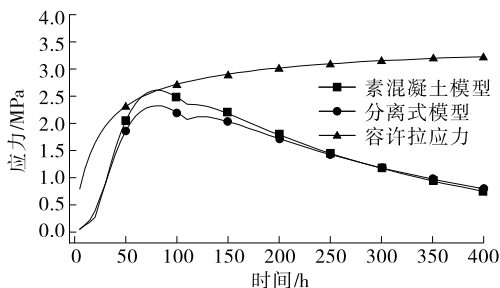


图 5 断面 B 表面拉应力时程曲线对比

处于水化热降温阶段,两种模型对承台表面温度的计算模拟均较差。这是由于实际工程中承台表面没有设置保温措施,表面对流受外界环境温度影响较大,而有限元分析中为简化计算,将环境温度按温度平均值考虑,造成表面温度有限元模拟较差。根据各测点温度时程曲线,分离式模型的计算温度普遍比素混凝土模型的计算温度低,且分离式模型的计算温度时程曲线更贴近实测温度时程曲线。

由图 5 可知: 80 h 时,素混凝土模型计算的表面拉应力达到峰值 2.60 MPa ,已超过混凝土相应龄期的容许拉应力,此时分离式模型计算的表面拉应力达到峰值 2.31 MPa ,小于混凝土相应龄期的容许拉应力。实际监测过程中,表面模板拆除后承台混凝土表面并无明显的温度裂缝出现,表明素混凝土模型的计算结果与实际情况有出入,分离式模型的计算结果更符合实际情况。

对比两种模型的计算结果,相对于素混凝土模型,承台水化热分析中考虑钢筋作用的分离式模型

计算的承台整体温度及表面早期温度应力均有所下降。这是由于钢筋作用下承台整体的导热性能提高,比热容下降,使承台内部热量传递和承台整体散热加快,并且承台温度趋于一致的能力得到提升,从而减小承台的温度梯度,进而减小因承台各区域温度不同所引起的温度拉应力。综上,钢筋对承台水化热作用效果明显,且考虑钢筋作用可提高大体积混凝土承台水化热有限元计算结果的可靠性,可根据分离式模型的计算结果更准确地指导承台水化热温控过程。

3.2 钢筋简化分析

实际工程中,采用分离式模型对承台进行水化热分析会增大建模难度,并大幅增加单元数量,加大水化热分析计算量,应对承台水化热分析中的钢筋进行简化。采用整体式有限元模型对承台内钢筋进行简化,将钢筋的导热系数、比热容、容重、热膨胀系数按钢筋所占体积率等效换算进混凝土单元内。建立承台钢筋整体等效和表面等效两种整体式模型,以承台分离式模型的计算结果为基准进行对比,找出最合适的钢筋等效简化方式。模型计算结果见图6~8。

由图6可知:分离式模型计算的内部最高温度 57.6°C 出现在混凝土浇筑后65 h,整体等效模型和局部等效模型计算的内部最高温度分别为 57.4°C 和 57.2°C ,均出现在混凝土浇筑后60 h。表明忽略钢筋具体布置情况的钢筋等效简化方法并不能完美地模拟分离式模型中钢筋的传热作用。

由图7可知:局部等效模型计算的承台表面温度和降温阶段的内部温度均与分离式模型的计算结果相差明显。这是由于钢筋材料性能等效到承台表层后,承台外层混凝土单元的导热性能大幅提高,造成承台表层散热加快,使内部产生的热量更多地被表层单元所吸收并散发至外界,进而使局部等效模型的表面计算温度下降,造成内部计算温度的后期降温速度提高。对比3种模型计算的里表温度,整体等效模型计算的温度与分离式模型的更接近。

由图8可知:80 h时,局部等效模型计算的表面峰值拉应力为 2.20 MPa ,比分离式模型的计算结果小 0.11 MPa ;整体等效模型计算的表面峰值拉应力为 2.46 MPa ,比分离式模型的计算结果大 0.15 MPa 。对比3种模型计算的表面拉应力,局部等效模型计算的表面拉应力整体小于分离式模型的计算结果,表明在实际承台施工中,以局部等效模型计算

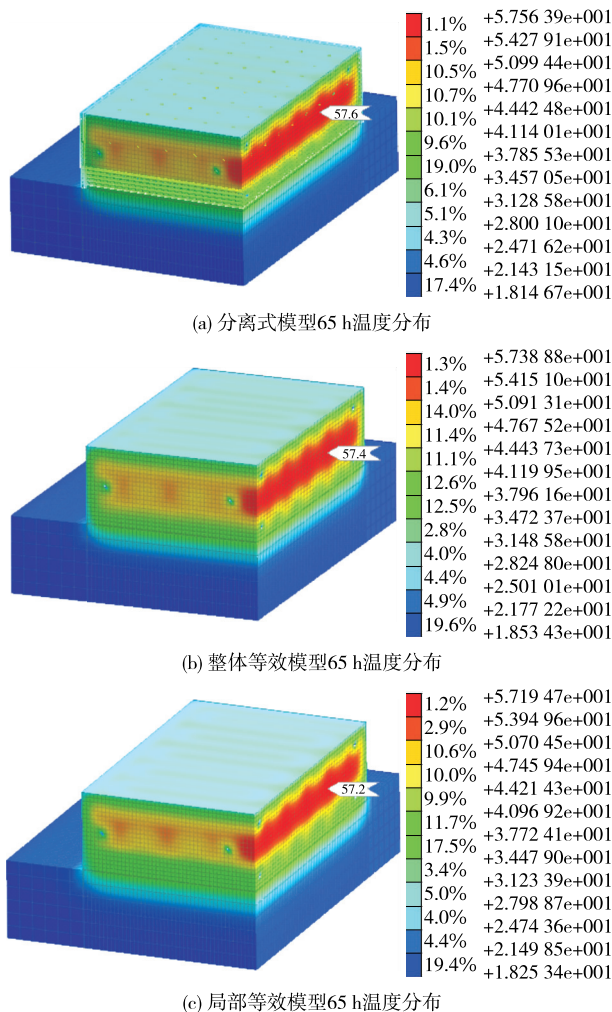


图6 钢筋简化后有限元模型计算温度分布云图(单位: $^{\circ}\text{C}$)

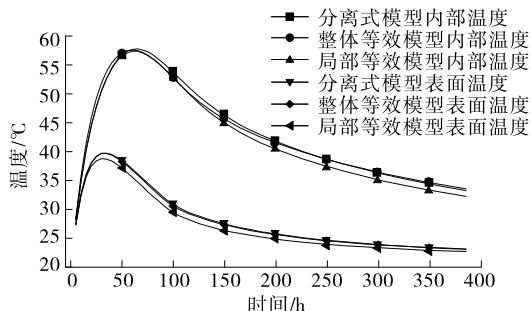


图7 钢筋简化后有限元计算里表温度时程曲线对比

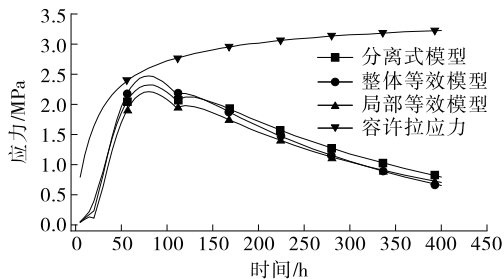


图8 钢筋简化后表面拉应力时程曲线对比

结果来指导承台温控过程可能造成承台表面开裂;整体等效模型计算的表面峰值拉应力相对偏大,以其计算结果指导承台温控过程能降低承台表面开裂的风险。综上,采用整体等效的方式进行有限元计算来预测承台水化热情况,可偏安全地指导大体积混凝土承台水化热温控过程。

4 结论

(1) 以承台温控的实测温度数据和现场情况为依据,对比承台素混凝土模型和分离式模型的计算结果,表明考虑钢筋作用的分离式模型的计算结果更接近承台温控实际情况,考虑钢筋作用可提高大体积混凝土承台水化热有限元计算结果的可靠性,可根据分离式模型的计算结果更准确地指导承台水化热温控过程。

(2) 通过承台素混凝土模型和分离式模型的计算结果对比分析,在承台水化热过程中考虑钢筋作用,相当于提高了承台的导热性能,降低了承台的比热容,使承台内部热量传递和承台整体散热加快,且提升了承台温度趋于一致的能力,从而减小承台的温度梯度,进而减小因承台各区域温度不同所引起的温度拉应力。

(3) 承台整体等效模型相比于局部等效模型,其计算温度更接近于分离式模型的计算结果,且计算的表面峰值应力相对偏大。采用钢筋整体等效的

简化方法进行大体积混凝土承台水化热有限元分析,其计算结果相对偏安全,且建模分析更方便,还能大幅缩减有限元计算时间。通过钢筋整体等效的方法模拟大体积混凝土承台钢筋,模拟计算结果可用于预测和指导实际工程中承台水化热温控过程。

参考文献:

- [1] 强晟,周水兵,倪言波,等.钢筋对闸墩混凝土早龄期应力影响的数值分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2015,37(5):1-4.
- [2] 朱伯芳.水工钢筋混凝土结构的温度应力及其控制[J].水利水电技术,2008,39(9):31-35.
- [3] 章征,王凯,李毓龙,等.混凝土桥墩施工期水化热及表面抗裂影响因素研究[J].桥梁建设,2015,45(2):65-70.
- [4] 汪建群,魏桂亮,刘杰,等.跨海大桥大体积混凝土承台水化热实测与分析[J].桥梁建设,2020,50(3):25-31.
- [5] 王建军,梁军林,周胜波,等.基于 Midas 的拱座基础大体积混凝土温度影响因素分析[J].中外公路,2019,39(2):89-93.
- [6] 万华,谭振华.南洞庭特大桥主桥承台大体积混凝土防裂施工技术[J].中外公路,2017,37(3):141-144.
- [7] 孙增智,田俊壮,石强,等.承台大体积混凝土里表温差梯度与温差应力有限元模拟[J].交通运输工程学报,2016,16(2):18-26+36.

收稿日期:2022-09-21

(上接第 110 页)

锚固调节装置。提升抗风绳和吊杆至猫道扶手绳高度,先拆除吊杆,然后横移抗风绳进入猫道以内,下放至猫道面网后,完成抗风系统拆除。

5 结语

哈罗格兰德大桥猫道主跨跨度大,宽度窄,横向刚度很小,易在风荷载作用下产生较大横向变形导致猫道破坏,也增加了作业人员的安全风险,需设置专门的抗风系统。主塔塔顶及承台的锚固系统均设置球形垫板和关节轴承,以满足抗风系统运作期间抗风绳三维空间的位移要求。猫道有限元计算和猫道节段风洞试验结果显示其抗风性能满足要求。抗风系统架设时采用整体同步下放的方法,极大简化了施工工序。该猫道抗风系统经历了最大瞬时风速 35.5 m/s 的考验,整个结构运作良好。

参考文献:

- [1] 欧洲标准化委员会“欧洲建筑工程规范”技术委员会.欧洲规范:结构设计基础:EN 1990:2002[S].欧洲标准化委员会,2002.
- [2] 欧洲标准化委员会“欧洲建筑工程规范”技术委员会.欧洲规范 3:钢结构设计 第 1-1 部分:一般规定和建筑规定:EN 1993-1-1-2005[S].欧洲标准化委员会,2005.
- [3] 欧洲标准化委员会“欧洲建筑工程规范”技术委员会.欧洲规范 3:钢结构设计 第 1-11 部分:受拉构件的结构设计:EN 1993-1-11-2006[S].欧洲标准化委员会,2006.
- [4] 挪威公共道路管理局.挪威通用规范 2:桥梁和码头标准规范:HB-026[S].挪威公共道路管理局,2007.

收稿日期:2022-02-28