

文章编号:1673-9981(2022)02-0222-06

大体积膨胀混凝土水化热实验与数值模拟研究

杨智诚^{1,2,3}, 杨永民^{1,2,3*}, 纪宪坤⁴, 徐可⁴, 王海龙⁴

(1. 仲恺农业工程学院城乡建设学院, 广东 广州 510225; 2. 仲恺农业工程学院广东省岭南乡镇绿色建筑工业化工程技术研究中心, 广东 广州 510225; 3. 仲恺农业工程学院可持续建筑与节能研究所, 广东 广州 510225; 4. 武汉三源特种建材有限责任公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 针对某质子治疗中心项目的大体积膨胀混凝土水化热问题, 以大体积膨胀混凝土为研究对象, 通过模型实验和MIDAS/FEA有限元仿真, 研究了大体积膨胀混凝土的水化热反应过程, 得出混凝土浇筑后温度场和应变场情况。结果表明: 在水化热反应过程中, 混凝土终凝后温度变化分为急剧升温、缓慢升温和降温三个阶段, 当混凝土入模温度为30℃以下时, 混凝土浇筑后的中心温度最高达到65.1℃; 混凝土的应变变化为应变增长、应变降低和趋于稳定三个阶段, 距离中心越远应变越低, 最大应变达到370 μm, 通过在混凝土中掺加SY-G型高性能膨胀抗裂剂补偿混凝土的收缩, 避免了混凝土产生危害性裂缝, 满足了工程抗裂要求; 此外, 有限元的水化热分析结果与实验结果非常吻合, 表明有限元数值分析对大体积混凝土水化热反应的温度场变化有较好的预测效果, 但应变结果与实验存在一定的误差, 绝对误差为18.9%。

关键词: 大体积膨胀混凝土; 水化热; 模型实验; 数值仿真

中图分类号: TB331

文献标志码: A

引文格式: 杨智诚, 杨永民, 纪宪坤, 等. 大体积膨胀混凝土水化热实验与数值模拟研究[J]. 材料研究与应用, 2022, 16(2): 222-227.

YANG Zhicheng, YANG Yongmin, JI Xiankun, et al. Experimental and Numerical Simulation Study on Hydration Heat of Expansive Mass Concrete[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(2): 222-227.

大体积混凝土施工浇筑过程中会发生水化热反应释放热量, 混凝土受到温度应力作用而发生开裂, 进而发展成为有害的结构裂缝^[1-3]。为了减缓水化热对混凝土结构的危害作用, 研究学者提出了不同的处理方法。朱伯芳^[4]提出, 在水泥中掺入适量氧化镁后会产生一定膨胀变形, 这可补偿一部分温度应力, 从而简化大坝温度控制措施, 加快施工速度。陈炜一等^[5]通过改变粉煤灰在胶凝材料中的占比及水化热抑制剂的掺量, 研究了胶凝材料的水化过程及混凝土的绝热温升、力学性能和干燥收缩特性, 结果表明在含有粉煤灰的胶凝材料中水化热抑制剂可显著降低胶凝材料的放热速率峰值和延后放热峰的

出现时间。郭成成等^[6]在管廊混凝土中使用了镁质膨胀剂以补偿混凝土在温降时的收缩, 避免了混凝土管廊开裂风险。因此, 通过抑制水化热反应或补偿温度变形能够有效地控制大体积混凝土中裂缝的形成。

对于不同条件下大体积混凝土的水化热问题, 研究学者及工程技术人员开展了广泛的研究^[7-10]。Yang等^[11]基于热传导方程提出, 采用冷却水管和混凝土水化热的大体积混凝土有限元分析方法, 能够有效地模拟大体积混凝土的温度变化。贺云等^[12]采用线单元解耦算法对索塔承台混凝土不同浇筑方案进行数值模拟, 分析浇筑厚度、冷却水及冷却水温

收稿日期: 2022-03-14

基金项目: 广东省科技计划项目(2020A1414010319)

作者简介: 杨智诚(1992-), 广东湛江人, 博士, 副教授, 研究方向为复合材料结构, E-mail: zhicheng.yang@zhku.edu.cn。

通信作者: 杨永民(1981-), 内蒙古赤峰人, 博士, 教授, 研究方向为水工建筑材料, E-mail: yangyongmin@zhku.edu.cn。

度对混凝土温度、应力的影响,以确定合适的混凝土浇筑及温控方案。耿鸣山等^[13]采用MIDAS/FEA软件建立有限元模型,通过水化热分析得出大体积混凝土承台浇筑后的温度应力场,同时对比了无管冷与有管冷的承台混凝土水化热的发展规律。李泽江等^[14]采用温度监测与有限元分析软件ANSYS相结合的方式,分析承台混凝土内部温度及应力场的分布与变化规律。王琼等^[15]采用CFD方法对承台混凝土浇筑后的温度场进行了数值仿真,并与工程实测进行了对比分析。陈伟等^[16]采用氧化镁膨胀剂配置补偿收缩混凝土,并结合原材料优选、施工及养护相关的裂缝控制措施,可整体性提高大体积混凝土筏形基础抗裂及防水性能。纪宪坤等^[17]通过温度-应力试验研究了钙质和镁质膨胀剂(Type-CaO和Type-MgO)对混凝土早期抗开裂性能的影响,结果表明镁质膨胀剂相比钙质膨胀剂可以明显提高混凝土的早期抗开裂性能。丘新溪等^[18]对沉管大体积混凝土水化热进行了有限元分析,结果表明沉管大体积混凝土温度与热交换系数呈负相关,与混凝土的入模温度和环境温度呈正相关。王祥国等^[19]采用有限元软件MIDAS/FEA,分析了冷管布置、入水流量、入水温度与通水时间等因素对拱桥拱座内部水化热冷却效果的影响。

针对某质子肿瘤治疗中心项目的大体积膨胀混凝土水化热问题,以大体积膨胀混凝土为研究对象,采用模型实验和MIDAS/FEA有限元仿真,研究大体积膨胀混凝土浇筑后的水化热反应过程,分析混凝土在水化热反应后的温度场和应变场特点,得出混凝土在浇筑后的温度场分布规律,为工程项目施工提供技术指导。

1 工程概况及实验设计

1.1 工程概况

依托某质子肿瘤治疗中心建设项目开展研究,该项目总建筑面积35 062 m²,其中地面上层的面积有20 531 m²,地下3层的面积为14 531 m²。地下三层为质子治疗中心、人防、设备机房等,其中质子治疗中心划分为南侧质子区(混凝土量23 645.67 m³)和北侧非质子区(混凝土量11 200 m³),质子区厚墙和厚板较多,均为大体积混凝土,且多为超高支模。本工程对质子区结构施工精度要求高,最大要求为平整度施工误差小于2 mm·m⁻¹,对混凝土抗裂性要求高,质子区混凝土结构不出现细微裂缝。

1.2 实验设计与测点布置

根据质子区大体积混凝土的特点和要求,选取质子区的最厚尺寸墙体作为模拟对象,设计大体积膨胀混凝土模型为4.68 m×4.68 m×4.68 m立方体,下设5.18 m×5.18 m×0.2 m混凝土底板,选用C35P10混凝土、SY-G型高性能膨胀抗裂剂和SY-KS多功能抗侵蚀防腐剂等材料进行混凝土制备。其中,SY-G型高性能膨胀抗裂剂是一种新型高性能混凝土膨胀抗裂剂,对混凝土早期、中期和后期收缩均有良好的补偿作用,可以维持混凝土自始至终的体积稳定,避免混凝土的开裂。设计的混凝土配合比列于表1,其中SY-G为内掺8.4%,SY-KS为外掺8.4%,测试混凝土坍落度为180±20 mm。使用HRB400钢筋对混凝土模型双向配筋,其中外层双向C25@150共2层,内层双向C12@150共11层,并预埋机电管线。

表1 混凝土配合比
Table 1 Proportion of concrete / (kg·m⁻³)

强度/抗渗等级	水	水泥	粉煤灰	SY-G	SY-KS	石子(5~25 mm)	河砂(含水率2.0%)	减水剂
C35P10	147	190	148	31	31	1042	780	5.90

设定混凝土模型在对称位置具有相同的性能变化,故混凝土中的测点仅在1/4模型中布置。混凝土模型中共设11个温度测点和6个应变测点,并在钢筋绑扎过程中将温度传感器和VWS-15振弦式混凝土应变计固定在不同的测点位置,且温度传感器和应变计在相同位置处的编号相同,如图1所示。距模型底面以上50 mm处平面内布置温度传感器

测点3个,分别标记为3#,10#和11#;沿模型高度方向且1/2高度处平面内,分别布置温度传感器测点5个和应变计测点5个,标记为1#,4#,5#,6#和7#;距模型顶面以下50 mm处平面内布置温度传感器测点3个,分别标记为2#,8#和9#及应变计测点1个为2#。

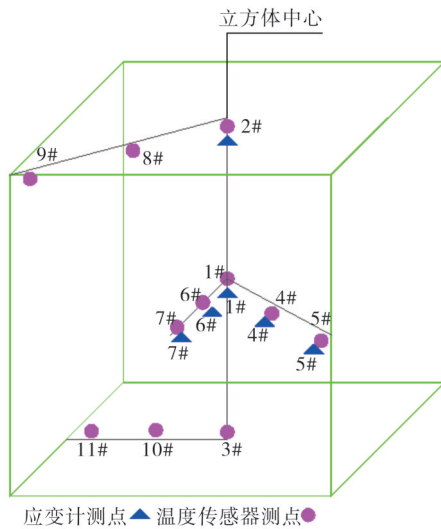


图1 测点布置

Fig. 1 Layout scheme of measuring points

1.2 混凝土浇注与测试

由于实验时天气较为炎热,混凝土浇注时的人模温度控制在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,并记录实际入模温度。混凝土浇注采用天泵浇筑,混凝土总量约 103 m^3 ,一次浇筑完成。浇筑时,直接使用天泵下料管浇筑,一次下料厚度控制在 $300\sim 400\text{ mm}$ 。沿高度分3层进行间歇浇筑,高度分别为 1.5 、 1.5 和 1.68 m ,间歇时间约 2 h ,在下层混凝土初凝前浇筑上层混凝土,确保浇筑密实、增加散热机会且防止爆模。振捣时,插入到下层尚未初凝的混凝土中约 $50\sim 100\text{ mm}$,同时检查模板是否空鼓,若出现空鼓使用振捣棒在外侧模板振捣,浇注完成的大体积混凝土模型如图2所示。

温度测点在混凝土浇筑表面抹面完成后立即开始测温,应变计自混凝土浇筑至相应测点后开始,1~4天的测温时间间隔为 2 h ,5~8天的测温时间间隔为 4 h ,其后为 8 h 。当内部温度高于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,测温时间间隔为 1 h ,直至温度不再升高时采用原测温频率。

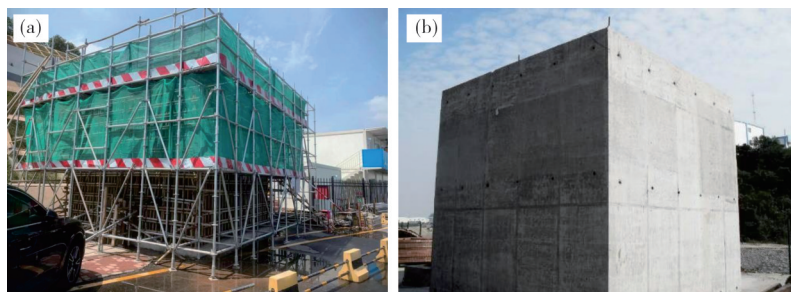
(a) 浇筑中;(b) 浇筑完成。
(a) pouring; (b) after pouring.

图2 大体积混凝土

Fig. 2 Mass concrete

2 实验结果

2.1 温度场结果

图3为大体积膨胀混凝土水化热过程中温度测定点和环境(HJ)温度的变化情况。从图3可以看出,混凝土的入模温度基本控制在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,混凝土终凝后模型温度变化可分为3个阶段,分别为急剧升温阶段、缓慢升温阶段和降温阶段。实验过程中1#测点、2#测点、4#测点、5#测点及7#测点测得的最高温度分别为 65.1 、 56.3 、 63.5 、 51.0 和 $53.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中1#测点及4#测点距离表面的距离分别为 2.34 和 1.17 m ,由于内部水化热不易散发,其温度变化基本不受外界环境变化的影响,降温小于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{天}$ 。此外,1#测点及2#测点到达温度峰值分别历时 118 和 38.6 h ,表明距离中心越远,到达温度峰值所需时间越短且温度峰值越低。

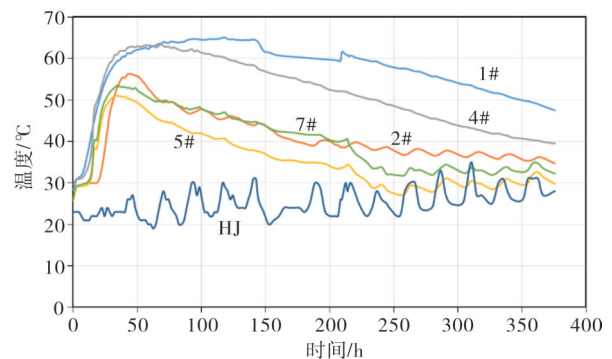


图3 水化热温度变化

Fig. 3 Temperature variation of hydration heat

图4为混凝土模型内外温度变化的情况。从图4可以看出:1#测点与2#测点的温度差始终低于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,这是由于模型顶面采取了薄膜覆盖、彩胶布遮挡和蓄水养护等保温措施;在 $233.2\sim 258.7\text{ h}$ 期间,1#测点与7#测点温差大于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,这是由于现场

仅采取洒水养护无保温措施,模型内部存在较大温度梯度,具有一定开裂风险。

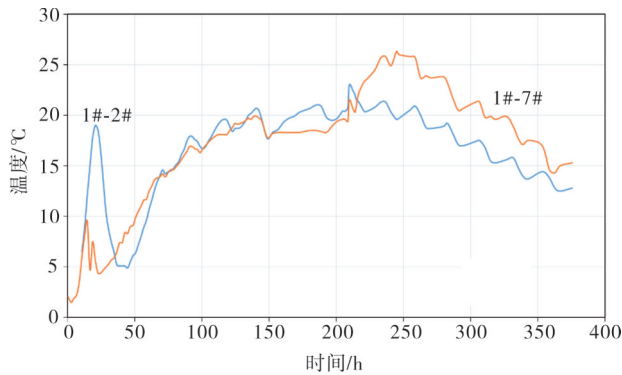


图4 混凝土内外温度差

Fig. 4 Temperature difference between inside and outside of concrete

图5为混凝土模型表面温度与环境温度的温差变化。从图5可以看出,2#测点及7#测点分别在156.6和160.6h后与环境温度差别小于20℃并逐渐降低趋于稳定,而混凝土拆模时间在209.1h左右,拆模后混凝土表面温度与环境温度相近,混凝土表面开裂风险低。

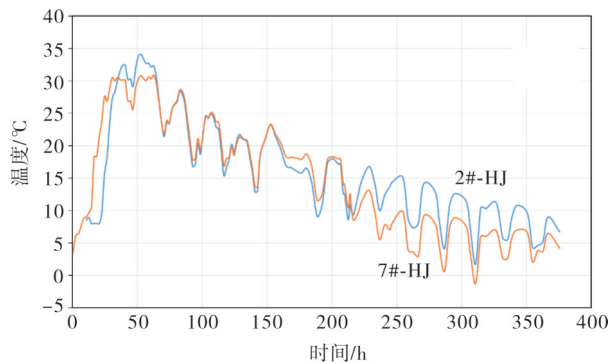


图5 混凝土表面温度与环境温度差

Fig. 5 Temperature difference between surface of concrete and environment

2.2 应变场结果

图6为混凝土内各测点的应变变化情况。从图6可以看出,掺加SY-G型高性能膨胀抗裂剂,混凝土的应变变化为应变增长、应变降低并趋于稳定,应变最大值范围为173.93~370.7 μm ,其中侧面和顶面中心测点应变增长阶段为明显的快速增长和缓慢增长。混凝土中各点因约束程度、温湿度情况不同,各时间段应变存在一定差别,距离中心越远应变越低。随着混凝土水化热反应趋于稳定,混凝土内各测点的应变基本保持稳定,并且无开裂现象发生。

这是由于SY-G型高性能膨胀抗裂剂的主要成分为硫铝酸钙(CAS)和铝酸钙(CA),其中CA活性高、水化速度快,它与 CaSO_4 水化生成的钙矾石作为早期膨胀源可以补偿混凝土硬化初期的自生收缩、水化热温升引起的冷缩和部分的干缩,避免混凝土因收缩发生开裂。

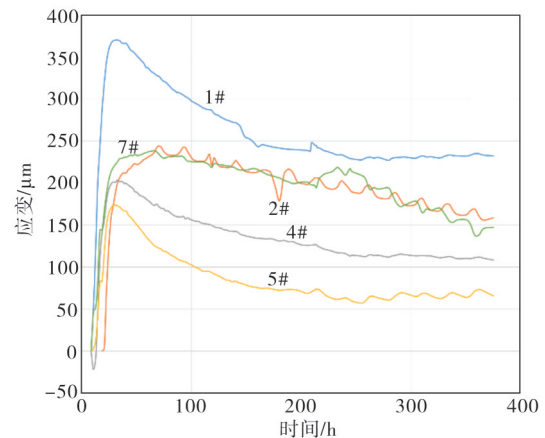


图6 混凝土应变变化

Fig. 6 Strain variations of concrete

3 数值仿真分析

采用MIDAS/FEA有限元软件建立大体积膨胀混凝土的1/4对称模型,设置模型边界条件分别为底板固定约束、模型对称约束、混凝土与空气对流边界和底板与基础绝热边界,大体积混凝土有限元模型如图7所示。混凝土的相关材料参数列于表2。

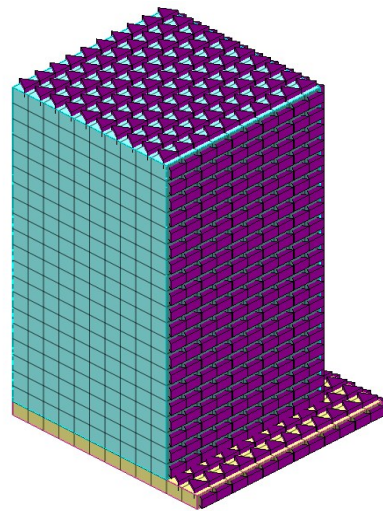


图7 大体积混凝土有限元模型

Fig. 7 Finite element model of bulk concrete

表2 材料参数
Table 2 Material parameters

弹性模量/MPa	泊松比	重量密度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	热传导率 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热膨胀系数	对流系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热 ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
3.10×10^4	0.2	23.7	2	1×10^{-5}	13	0.98

依据实验测量结果进行水化热分析,设置初始温度为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$,混凝土一次浇注完成,测点选取与实验一致。图8为混凝土浇注后100 h的温度云图。从图8可见,中心部分温度较高,表面温度较低。经分析可知,中心最大温度为 $63\text{ }^{\circ}\text{C}$,表面最低温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图9为1#测点温度及应变的有限元结果与实验结果的对比。从图9可以看出:有限元水化热分析给出的混凝土中心温度变化结果与实验结果吻合非常好(图9(a));但对于应变结果而言存在一定的误差(图9(b)),有限元得出的最大应变为 $300\text{ }\mu\text{m}$,而实验结果为 $370\text{ }\mu\text{m}$,绝对误差为 18.9% ,这是因为有限元分析中未能完全考虑膨胀剂的收缩补偿。

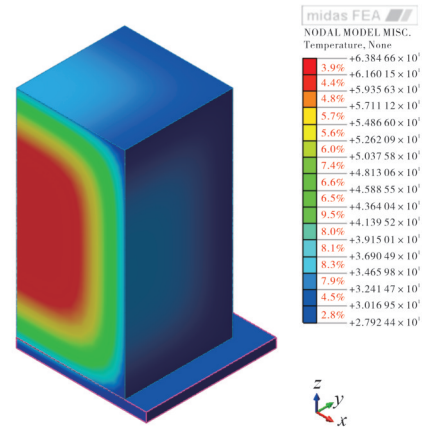
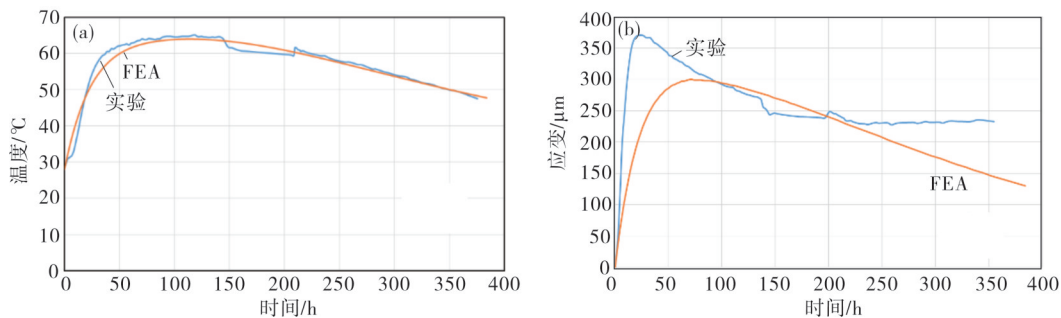


图8 第100 h的温度云图

Fig. 8 Temperature field at 100 h



(a)温度;(b)应变。

(a) temperature; (b) strain.

图9 有限元与实验结果的对比

Fig. 9 Comparison of FE and test results

4 结论

依托某质子肿瘤治疗中心建设项目,通过实验和数值仿真分析研究了大体积膨胀混凝土的水化热效应。实验结果表明:大体积混凝土的水化热反应经历了急剧升温、缓慢升温和降温三个阶段,混凝土中心的最高温度达到 $65.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;在水化热反应过程中,混凝土的应变变化从增长到下降最后达到稳定,且最大应变达到 $370\text{ }\mu\text{m}$ 。在混凝土中掺加SY-G型高性能膨胀抗裂剂补偿混凝土的收缩,未见混凝土产生危害性裂缝,满足工程抗裂要求。通过有限元分析得出的混凝土温度结果与实验结果吻合良好,

表明有限元分析能够较好地预测大体积混凝土水化热反应的温度场变化。然而,有限元分析得出的混凝土应变结果与实验存在一定误差,绝对误差为 18.9% ,这是由于有限元分析中未能完全考虑膨胀剂的收缩补偿作用造成的。

参考文献:

- [1] 刘斌,庄锦勇.超厚板转换层大体积混凝土水化热过程分析[J].工程技术研究,2021,23(6):11-13.
- [2] 高伟杰.大体积混凝土(筏板基础)温度场仿真分析与温控监测[J].云南民族大学学报(自然科学版),2021,30(4):408-413.
- [3] 杨慧,刘军来.某斜拉桥承台大体积混凝土水化热温度场研究与关键施工技术应用[J].公路工程,2018,

- 43(5): 152-156.
- [4] 朱伯芳. 微膨胀混凝土自生体积变形的增量型计算模型[J]. 水力发电, 2003(2): 20-23.
- [5] 陈炜一, 周予启, 李嵩, 等. 水化热抑制剂对水泥-粉煤灰胶凝材料水化和混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1609-1618.
- [6] 郭成成, 彭海龙. 管廊混凝土中镁质膨胀剂的水化与膨胀特性研究[J]. 南京理工大学学报, 2021, 45(5): 629-634.
- [7] 毛振龙, 吴源华, 张际斌, 等. 体育场大体积混凝土温度场分析及监控[J]. 低温建筑技术, 2022, 44(1): 70-76.
- [8] 董福歧, 黄国松. 基于MIDAS/FEA的承台大体积混凝土水化热仿真分析及温控研究[J]. 石油工程建设, 2021, 43(6): 131-133.
- [9] 董兴平. 高原高寒地区大体积混凝土防开裂措施试验研究[J]. 结构工程师, 2021, 37(5): 150-158.
- [10] 韩磊. 桥梁承台大体积混凝土水化热分析及温控研究[J]. 工程建设与设计, 2020(20): 73-74.
- [11] YANG J, HU Y, ZUO Z, et al. Thermal analysis of mass concrete embedded with double-layer staggered heterogeneous cooling water pipes [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 35: 145-156.
- [12] 贺云, 贺金龙, 余棚, 等. 索塔承台大体积混凝土温度控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(2): 372-378.
- [13] 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.
- [14] 李泽江, 贺金龙, 余棚, 等. 索塔承台大体积混凝土温度及应力场监测与有限元分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(11): 2892-2900.
- [15] 王琼, 陈昌哲, 胡志坚, 等. 梁式承台大体积混凝土水化热温度场工程实测与数值仿真[J]. 混凝土, 2020(9): 139-143.
- [16] 陈伟, 宫喆, 杨进波. 氧化镁膨胀剂在大体积混凝土裂缝控制中的应用研究[J]. 建筑技术, 2019(1): 98-101.
- [17] 纪宪坤, 刘猛, 向飞, 等. 基于温度-应力试验的掺膨胀剂混凝土抗裂性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(2): 14-18.
- [18] 丘新溪, 丰收, 吕建兵, 等. 大体积混凝土沉管隧道温度场的数值仿真分析[J]. 路基工程, 2020(1): 125-130.
- [19] 王祥国, 彭一凡, 杨孟刚. 高铁简支钢管拱桥拱座大体积混凝土水化热及温控措施研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 017(3): 549-555.

Experimental and Numerical Simulation Study on Hydration Heat of Expansive Mass Concrete

YANG Zhicheng^{1,2,3}, YANG Yongmin^{1,2,3*}, JI Xiankun⁴, XU Ke⁴, WANG Hailong⁴

(1. College of Urban and Rural Construction, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Guangdong Lingnan Township Green Building Industrialization Engineering Technology Research Center, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 3. Institute of Sustainable Building and Energy Conservation, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 4. Wuhan Sanyuan Special Building Materials Co., Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: This paper is positioned on the hydration heat problem of expansive mass concrete used in the construction of a proton oncology hospital. Taking expansive mass concrete as the research object, experimental and numerical simulation study on hydration heat reaction of expansive mass concrete were performed. The temperature distribution and strain of the expansive mass concrete were obtained from the model test and MIDAS finite element simulation. Results showed that there are three stages in the heat hydration process of the concrete, which are rapid heating, slow heating and cooling. The highest central temperature of the concrete after pouring is 65.1 °C when the concrete molding temperature is lower than 30 °C. The strain variation of concrete includes increasing stage, decreasing stage and stabilization stage, and the highest strain of the concrete is 370 μm. By using SY-G expansion agent, the shrinkage of concrete can be compensated and hence the cracks due to the shrinkage of concrete are avoided. In addition, FE results of the temperature of hydration heat have good agreement with the test results, indicating that FE has a good prediction on the temperature variation of concrete caused by hydration heat. But there is a certain absolute error between the strain results and the experiment, and the absolute error is 18.9%.

Key words: expansive mass concrete; hydration heat; experiment; numerical simulation

(学术编辑: 褚欣)