



大体积混凝土季节性温控措施有限元分析

季 安, 周韬剑, 陈 云, 王祥祺, 王 波

(中核华泰建设有限公司, 广东 深圳 518055)

摘要:为探究大体积混凝土夏冬季浇筑时保温措施,以某筏板基础大体积混凝土施工项目为依托,通过建立精细化有限元模型,探讨夏季与冬季两种季节下的温控措施(外保温材料、混凝土入模温度)对大体积混凝土温度场的影响。结果表明:1)浇筑时环境温度的变高会使混凝土放热量增加并延长放热时长,其中夏季使用3 cm厚挤塑式聚苯乙烯板保温,混凝土入模温度为25℃时其峰值温度和所需时间为66.8℃、114.7 h;2)两种季节的环境温度下,外保温性能与里表温差都呈线性降低趋势,与核心温度呈线性增加关系;3)不同保温措施会推迟核心温度出现时间,且保温性能越好,温度梯度越小;4)随着入模温度的增加,混凝土核心温度随之增大,且使其出现时间提前。本文成果可为同类型筏板基础大体积混凝土施工提供一点借鉴。

关键词:大体积混凝土; 季节差异; 水化热; 温控措施; 有限元模拟; 筏板基础

中图分类号: TU755

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)11-0034-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.11.146

Finite element analysis of seasonal temperature control measures for mass concrete

Ji An, ZHOU Taojian, CHEN Yun, WANG Xiangqi, WANG Bo

(China Nuclear Industry Huatai Construction Co., Ltd., Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the insulation measures of large-volume concrete during summer and winter pouring, based on a raft foundation large-volume concrete construction project, the influence of temperature control measures (external insulation material and concrete mold temperature) on the temperature field of large-volume concrete in summer and winter is explored by establishing a refined finite element model. The results show that: 1) The increase of the ambient temperature during pouring would increase the heat release of the concrete and prolong the heat release time, in summer, 3 cm thick extruded polystyrene board is used for insulation, and the peak temperature and required time are 66.8℃ and 114.7 h when the concrete mold temperature is 25℃. 2) Under the ambient temperature of the two seasons, the variation between the external thermal insulation performance and the inner surface temperature is decreased linearly, and the relationship with the core temperature is increased linearly. 3) Different insulation measures will delay the occurrence time of core temperature, and the better the insulation performance, the smaller the temperature gradient. 4) With the increase of mold temperature, the core temperature of concrete increases, and the occurrence time is advanced. The results can provide references for the construction of large-volume concrete for the same type of raft foundation.

Key words: mass concrete; seasonal variation; heat of hydration; temperature control measures; finite element simulation; raft foundation

收稿日期: 2024-03-05

作者简介: 季 安(1973—),男,高级工程师,从事企业管理工作。

通信作者: 周韬剑(1997—),男,技术员,从事桥梁结构有限元方面的研究。

随着城市化进程不断加快, 人们对建筑结构的性能要求愈加严格, 这在很大程度上促进了大体积混凝土筏板基础在各建设工程领域中的广泛应用。由于混凝土是热的不良导体^[1], 且水泥水化进程中会释放大量热量, 结构尺寸过大会导致热量集中, 形成温度梯度引发温度应力, 严重时产生裂缝及大变形, 影响结构安全和寿命^[2]。

国内外学者对大体积混凝土水化放热的研究主要为水化放热机理和施工控制措施两个方面^[3-4]。而有限元数值模拟方法对大体积混凝土热力学行为的研究十分有效^[5]。权磊^[6]研究发现, 环境温度、保温方法和降温措施是影响大体积混凝土浇筑和养护过程的重要因素; 王强等^[7]研究表明, 蓄水养护能有效控制混凝土表面温度变化波动范围, 且能降低放热峰值; 耿鸣山等^[8]使用 Midas 数值分析证明了布置冷却水管能使混凝土内部最大温度降低 22%, 且里表温差降低了 43.9%; 朱云升等^[9]使用数值模拟发现 3 种不同外保温措施(裸露、2 cm 厚土工布、3 cm 厚挤塑式聚苯乙烯板)下的大体积混凝土中心峰值温度基本相同, 但外表温差前者显著高于后两者。

上述研究多为单一工作环境温度下的保温方法和降温措施探究, 故本文选取夏季与冬季两种不同环境温度, 探究不同外保温材料对筏板基础大体积混凝土温度场的影响, 且考虑不同混凝土入模温度, 以期对不同季节下的筏板基础大体积混凝土施工提供有针对性的保温措施。

1 工程概况

贵州省都匀市畔山华庭项目一期总建筑面积为 97 831 m², 共 9 栋主楼, 其中 1[#]楼地上 26 层、地下两层, 建筑总标高为 78 m。建筑桩基持力层为中风化破碎碳质泥岩, 故采用平板式筏板基础形式, 如图 1 所示, 基础尺寸为 65.2 m × 13.6 m × 1.4 m, 属于大体积混凝土。侧面使用木模板支模, 且在浇筑前已做好基础底板养护工作。因项目所在地平均海拔为 997 m, 施工期在夏季 7 月, 气象记录显示施工当月该地最高气温为 39 ℃, 最低气温为 24 ℃, 昼夜温差大。为保障建筑成型质量, 防止温度应力引起的裂缝及收缩裂缝的出现, 需研究本筏板

基础大体积混凝土温度应力场, 以指导现场施工。

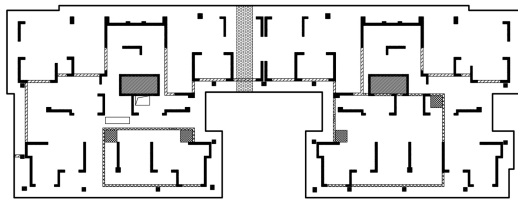


图 1 1[#]楼筏板基础平面

2 有限元模型

2.1 有限元基本原理

2.1.1 水化热表达式

假定混凝土为均匀、各向同性的材料, 并且忽略水泥水化进程中温度的影响, 仅与时间有关。采取复合双指数拟合公式(1)^[10], 并使用 HETVAL 子程序实现水化热源定义。

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-bt^c}) \quad (1)$$

式中: $Q(t)$ 为在浇筑 t 天时的水泥累计水化热, kJ/kg; Q_0 为水化热总量, kJ/kg, 取值依据水泥用量、矿物掺和料品类和用量, 可参考《大体积混凝土施工标准》(GB 50496—2018); b 、 c 为常数, 依据文献 10 取值。

2.1.2 边值条件

定义合适的初始条件和边界条件是使用有限元模拟求解混凝土热传导的温度场微分方程的必要条件。将初始条件定义为混凝土入模温度、垫层及土层初始温度, 其中假设浇筑前垫层和土层已受阳光辐射升温, 初始温度接近环境平均温度。假定接触面连续且不存在热阻。对不同界面情况分为 3 种边界条件: 1) 模型对称面设置为绝热边界条件, 也称为第二类边界条件; 2) 将保温材料的覆盖视为混凝土表面热阻的增加, 将筏板基础上表面及侧面、土层与空气接触面设置为第三类边界条件; 3) 将筏板基础底面与垫层表面接触、垫层与土层的相互接触设置为第四类边界条件。

2.2 模型建立

使用有限元软件 Abaqus 进行模拟。由于 1[#]楼筏板基础属于对称结构, 取半结构进行有限元计算, 并在建模时忽略筋材对混凝土水化放热的影响。建模时, 考虑垫层及筏板基础外围 3.6 m 宽基础持力土层, 土层建模厚度取 3 m。筏板基础共划

分 16 212 个单元, 垫层划分 1 232 个单元, 土层划分 3 936 个单元, 所有单元均采用八结点线性传热六面体单元(DC3D8)。基础与垫层、垫层与土层均采用 TIE 约束。模型和网格划分如图 2 所示。

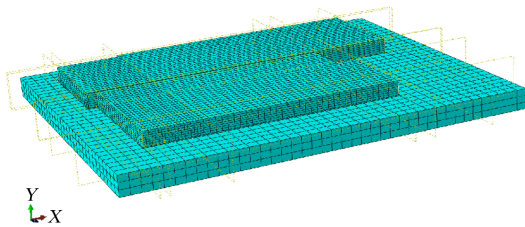


图 2 模型及网格划分

表 1 C30 混凝土配合比

P·O 425 水泥	粉煤灰	砂	石	膨胀剂	减水剂
327	61	868	949	32.6	7.9

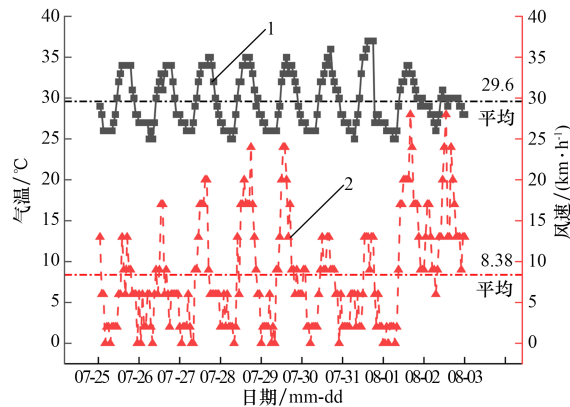
kg/m³

表 2 材料热力学参数

材料	弹性模量/ ($\times 10^4$ MPa)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	比热容/ ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)	热膨胀系数/ ($\times 10^{-5}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$)
C30 混凝土	3.00	2 500	0.20	0.920	1.740	1
C15 混凝土	2.20	2 300	0.20	0.920	1.510	1
土层	1.24	23 00	0.35	0.532	2.547	1

2.3.2 环境温度

工程浇筑时正处于夏季, 依据实测温度与气象数据, 纪录浇筑后 9 d(2019 年 7 月 25 日 0 时~2019 年 8 月 3 日 0 时)内每小时大气温度与风速, 如图 3 所示。由图 3 可知: 平均气温(AVG)为 29.6℃, 平均风速为 8.38 km/h。为对比环境温度, 依据气象数据, 取有代表性的 2019 年 1 月 13 日 0 时~2019 年 1 月 22 日 0 时为冬季浇筑温度, 如图 4 所示。由图 4 可知: 平均气温为 7.86℃, 平均风速为 5.77 km/h。



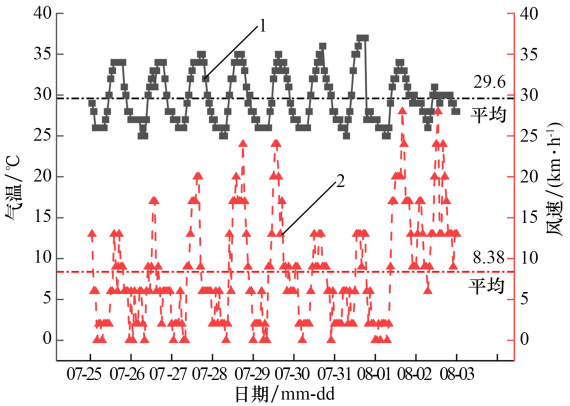
1—气温; 2—风速。

图 3 夏季气温和风速

2.3 模拟参数

2.3.1 材料参数

筏板基础采用 C30 混凝土浇筑, 垫层采用 C15 混凝土, 土体为泥岩。混凝土配合比如表 1 所示, 各材料所用热力学参数如表 2 所示。其中混凝土力学参数依据《混凝土结构设计规范(2015 版)》(GB 50010—2010), 热学参数依据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016), 土层力学参数依据《岩土工程手册》, 热学参数参考文献[12]。



1—气温; 2—风速。

图 4 冬季气温和风速

2.3.3 外保温措施及对流系数

根据工程经验, 选取具有代表性的 3 种外保温措施: 无保温措施、1 层塑料布外盖两层麻袋、3 cm 厚挤塑式聚苯乙烯板(XPS)。侧面使用 15 mm 厚木模板支撑并保温。依据《大体积混凝土施工标准》(GB 50496—2018)计算得出对应传热系数, 如表 3 所示。

2.4 模型编号

主要研究夏季和冬季两种不同环境温度下, 不同外保温措施和入模温度对筏板基础大体积混凝土

表 3 外保温措施及对流系数 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

保温措施	夏季		冬季	
	混凝土	土层	混凝土	土层
无保温措施	53.904 7	—	42.529 9	—
1 层塑料布外盖两层麻袋	17.006 0	—	15.785 8	—
XPS	0.917 4	—	0.913 3	—
木模板	11.937 6	—	11.270 1	—
空气	—	57.793 9	—	45.770 9

温度场的影响,并简要探讨保温时长对温度场的影响。共设计 13 组有限元模型,如表 4 所示。

表 4 有限元模型总表

模型编号	季节	保温措施	入模温度/ $^\circ C$
S-G-10	夏	1 层塑料布外盖 2 层麻袋	10
S-G-15			15
S-G-20			20
S-G-25			25
S-X-10		XPS	10
S-X-25			25
S-N-10		无	10
S-N-25			25
W-G-10	冬	1 层塑料布外盖 2 层麻袋	10
W-G-15			15
W-G-20			20
W-G-25			25
W-X-10		XPS	10
W-X-25			25
W-N-10		无	10
W-N-25			25

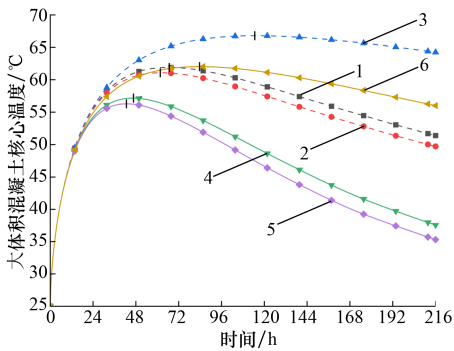
注: S、W 分别为夏季和冬季; G、X、N 为外保温措施为 1 层塑料布外盖两层麻袋、XPS 和无。

3 温度场影响因素分析

3.1 外保温措施的影响

图 5 为夏季和冬季环境温度下入模温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时不同外保温措施的模拟核心温度与时间关系。由图 5 可知: 整体而言, 夏季浇筑时, 核心温度达到峰值时间比冬季更晚、核心温度更高, 且降温速率明显低于冬季。无论是夏季或是冬季, 当采取较差性能外保温材料(无保温措施、1 层塑料布外盖两层麻袋)时, 大体积混凝土的峰值温

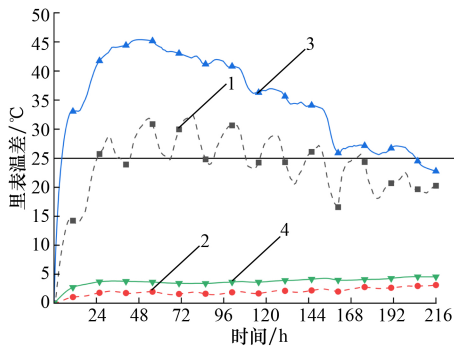
度、达到时间和降温速率均较为接近。这代表外界环境温度和风速共同影响导致的对流换热极大地影响了混凝土的温度场。但值得注意的是, S-X-25 峰值温度和达到时间为 $66.8\text{ }^\circ\text{C}$ 、 114.7 h , 较 S-N-25 升高了 9.3% 、 130.8% ; W-X-25 峰值温度和达到时间为 $62\text{ }^\circ\text{C}$ 、 83.7 h , 较 W-N-25 升高了 10.1% 、 96% 。S-X-25、S-N-25、W-X-25 和 W-N-25 的降温速率分别为 0.6 、 1.77 、 1.09 、 $2.91\text{ }^\circ\text{C/d}$, 其中 W-N-25 已超过规范限值($2\text{ }^\circ\text{C/d}$)。



1—S-G-25(66.7,61.9);2—S-N-25(61.7,61.1);
3—S-X-25(114.7,66.8);4—W-G-25(46.7,57.2);
5—W-N-25(42.7,56.3);6—W-X-25(83.7,62.0)。

图 5 不同外保温措施核心温度与时间关系

图 6 为夏季和冬季环境温度下入模温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时不同外保温措施的模拟核心里表温差。由图 6 可知: W-N-25 在水化过程中的里表温差多数时间远远超过规范限定里表温差($25\text{ }^\circ\text{C}$), S-N-25 在夏季夜晚降温时的里表温差易超限, 而使用 XPS 板进行外保温, 不管在冬季和夏季, 其表温差都在 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 以下。

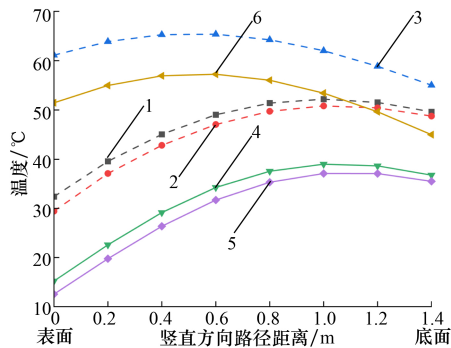


1—S-N-25;2—S-X-25;3—W-N-25;4—W-X-25。

图 6 不同外保温措施里表温差

图 7 为 216 h (9 d) 时不同外保温措施的竖向路径温度。由图 7 可知: 使用 XPS 板保温时, 不

同环境温度下的筏板基础底部温度均低于表面温度,其他两种保温措施则为相反趋势,且有显著温度梯度,易造成温度裂缝。



1—S—G—25; 2—S—N—25; 3—S—X—25;
4—W—G—25; 5—W—N—25; 6—W—X—25。

图 7 不同外保温措施竖向路径温度

上述分析表明,在夏季浇筑时应注意昼夜温差,避免基础产生较大里表温差;冬期则需做好保温措施。在不同环境温度下,采取不同外保温措施并不会改变混凝土升温趋势,但保温性能好,有利于降温速率的控制,也使核心温度增加,推迟峰值温度出现时间,整体降温时间延长。但这可能会导致混凝土出现干缩开裂,应注意洒水保湿工作。

3.2 入模温度的影响

图 8 为夏冬季节不同入模温度下的核心温度随时间变化的曲线。由图 8 可知:入模温度的增加会使混凝土核心温度增幅较大,前期水化速率也会随之增大,同时会导致峰值温度出现时间前移。但相同入模温度时,在不同环境温度下,混

凝土核心温度增加不明显,这是因为水化放热量仅与混凝土材料自身有关。随着外保温性能的增强,入模温度的增加会使热量更难以散发。因此应控制入模温度,在养护到适当龄期时及时散热。

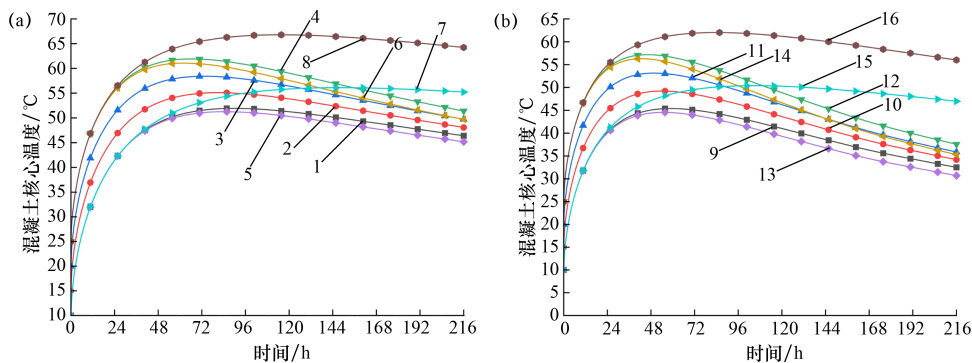
4 施工建议

结合上述研究可以发现,引起里表温差超过规范限制的主要原因是表面温度过低,但使用保温隔热性能良好的材料会引起混凝土核心温度过高。因此,在施工过程中,可通过使用低水化热混凝土,同时采取分层浇筑,降低混凝土水化放热量。在夏季可采用 1 层塑料布外盖两层麻袋进行保温,并注重洒水养护,以抵抗混凝土内部水分蒸发带来的干燥收缩。在冬季当采用较差性能外保温材料时,应严格注意外界昼夜温差过大带来的表面脱水龟裂。

5 结 论

本文结合实际工程,使用有限元软件 Abaqus 建立模型,研究了在夏季与冬季两种环境温度,3 种外保温措施(无保温措施、1 层塑料布外盖两层麻袋、3 cm 厚 XPS 板)下的不同入模温度对筏板基础大体积混凝土温度场的影响,得出结论如下。

(1) 浇筑时,外界气温变高会使混凝土放热量增加并延长放热时长,S—X—25 峰值温度和达到时间为 66.8 °C、114.7 h,较 S—N—25 升高了 9.3%、130.8%。



(a) 夏季; (b) 冬季

1—S—G—10 中心; 2—S—G—15 中心; 3—S—G—20 中心; 4—S—G—25 中心; 5—S—N—10 中心; 6—S—N—15 中心;
7—S—X—20 中心; 8—S—X—25 中心; 9—W—G—10 中心; 10—W—G—15 中心; 11—W—G—20 中心;
12—W—G—25 中心; 13—W—N—10 中心; 14—W—N—25 中心; 15—W—X—10 中心; 16—W—X—25 中心。

图 8 夏冬季时不同入模温度下的核心温度随时间变化曲线

(2) 外保温性能的增强虽能降低里表温差, 但会提升混凝土峰值温度, 引起干缩开裂, 建议使用 XPS 板保温时加强混凝土的保湿工作。

(3) 入模温度与混凝土核心温度呈正比例关系, 同时入模温度的升高会延长放热时间, 这可能是由于水化速率增加导致的。需适当降低入模温度, 且养护到适当龄期时及时散热, 以避免产生热量囤积。

参考文献:

- [1] 郑东. 大体积混凝土实时温度应力控制研究[D]. 北京:清华大学,2015.
- [2] 彭博,张斌,丁兆东,等. 大体积混凝土水化热研究综述[C]//2022 年工业建筑学术交流会. 北京:工业建筑杂志社,2022.
- [3] GAJDA J,VANGEEM M. Controlling temperatures in mass concrete[J]. Concrete international,2002,24(1): 58-62.
- [4] XIE Y,DU W,XU Y,et al. Temperature field evolution of mass concrete:From hydration dynamics,finite element models to real concrete structure[J]. Journal of Building Engineering,2023,65:105699.
- [5] LI X,YU Z,CHEN K,et al. Investigation of temperature development and cracking control strategies of mass concrete:A field monitoring case study[J]. Case Studies in Construction Materials,2023,8:2144.
- [6] 权磊. 不同养生方式对水泥混凝土板早期温度场和强度发展的影响分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [7] 王强,霍延威,夏菲,等. 基于 ABAQUS 的大体积混凝土水化热温度场的数值分析[J]. 混凝土,2015(7): 35-39.
- [8] 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.
- [9] 朱云升,黄祎宁,刘朝忠,等. 承台大体积混凝土水化热控制技术研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(4):687-693.
- [10] 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.