

# 大体积承台水化热计算分析研究

王晓佳

(上海市市政公路工程检测有限公司, 上海市 201108)

**摘要:** 为研究大体积承台浇筑过程中水化热对结构抗裂性能的影响,以主跨148 m的某大桥Y墩变截面连续刚构桥为工程依托,从水化热计算分析涉及到的各个力学与物理特性参数出发,建立其有限元模型模拟浇筑过程中的温度场和应力场,利用规范对计算模拟结果进行判断,从而得到指导实际浇筑过程的温控措施,提高施工质量和效率。结果表明:内部最高温度出现在2~3 d时间段,在实际浇筑过程中应着重关注早期的温度骤增情况对结构的不利影响;混凝土结构里表温差最大出现在2~3 d时间段,拉应力最大出现在28 d时间段,说明浇筑后水化热前期对结构应力影响较小,后期由于混凝土收缩徐变导致拉应力增大;混凝土最大主拉应力为2.8 MPa,发生在第28 d时刻,需采取有效的保温保湿措施以确保结构抗裂性能。

**关键词:** 大体积混凝土;水化热;抗裂性能;温控措施

**中图分类号:** U444

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2025)08-0353-04

## Calculation, Analysis and Study on Hydration Heat of Mass Base Slab

WANG Xiaojia

(Shanghai Municipal Highway Engineering Inspection Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

**Abstract:** In order to study the influence of hydration heat on the structural crack resistance during the pouring of mass base slab, taking a Y-pier variable cross-section continuous rigid-frame bridge with the main span of 148 m as the engineering background, starting from various mechanical and physical characteristic parameters involved in the calculation and analysis of hydration heat, its finite element model is established to simulate the temperature field and stress field during the pouring process. The code is used to judge the calculation and simulation results so as to obtain the temperature control measures to guide the actual pouring process and improve the construction quality and efficiency. The results show that the maximum internal temperature occurs in the period of 2~3 d. In the actual pouring process, the attention should be paid to the adverse impact of the early temperature surge on the structure; The maximum inner surface temperature difference of concrete structure occurs in the period of 2~3 d, and the maximum tensile stress occurs in the period of 28 d, indicating that the hydration heat after pouring has little effect on the structural stress in the early stage, and the tensile stress increases due to the shrinkage and creep of concrete in the later stage. The maximum principal tensile stress of concrete is 2.8 MPa, which occurs at the 28 th day. The effective thermal insulation and moisturizing measures shall be taken to ensure the crack resistance of the structure.

**Keywords:** mass concrete; hydration heat; crack resistance; temperature control measures

## 0 引言

随着国内基建的大力发展,技术的不断突破,国内基建体量近十几年发展迅速,且超过1 000 m<sup>3</sup>单次浇筑结构数量非常之多,包括承台、桥墩,甚至是某些变截面连续梁的0号块等<sup>[1]</sup>,但其由于水化热效应引起的内外温差过大导致混凝土结构产生裂缝的原理仍未研究透彻,且工程师对水化热效应产生的危害认识存在较大的误解和不足。混凝土水化热效应

是由于内部骨料相互之间的化学放热反应,浇筑过程中水化产生的热量将会在1~3 d内急剧上升,养护过程中散热条件较差,内外过大的温差将会使混凝土结构产生较大甚至超出材料强度的拉应力,进而导致结构出现不可忽视的温度裂缝。

目前,国内学者已取得不少水化热效应方面成果,李晓东<sup>[2]</sup>等利用实测数据和数值模拟进行研究并提出相应温控措施,以保障承台浇筑质量。耿鸣山、陈斌、姚瑞<sup>[3-5]</sup>等采用MIDAS Civil建立有限元模型,计算分析浇筑过程温度引起的拉应力,对比了有无冷却管冷水化热发展规律,验证了合理的管冷设计可减小承台内外温差和表面拉应力大小。汪建

收稿日期: 2025-02-11

作者简介: 王晓佳(1980—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁检测及评估工作。

群、魏桂亮等<sup>[6-7]</sup>等对混凝土水灰比、混凝土浇筑温度、现场温差、管冷流速及水量、通水端温度以及拆模时间等参数进行分析,采用复掺技术可降低绝热温升,拆模时间应不少于7 d。张清旭<sup>[8]</sup>等以5种管冷布设方案为基础,对比分析有无管冷、调整层距和平距等参数下混凝土结构拉应力分布和里表温差情况,认为合理布置冷却管可大幅降低混凝土结构里表温差。王博<sup>[9]</sup>等对设计文件中承台管冷系统布置模式进行优化,基于振弦式温度计所监测的数据,与有限元模型的计算结果进行比对,一方面验证计算方法可行性,另一方面对大体积混凝土管冷系统各参数以及影响混凝土早期水化热因素对温度应力的影响进行定量分析。占玉林<sup>[10]</sup>等认为采用现场环境水温可获得较好的抑制裂缝效果,抑制效果与冷却水管总的流速、流量、混凝土泵入初始温度等息息相关,可结合有限元模拟手段分析计算出合理的初始参数,并用于指导实际大体积混凝土温控,优化出合理、切实可行的管冷布置方案。刘继<sup>[11]</sup>等分析对流边界条件选取、承台浇筑分层方法、冷却管水流模拟等与实际情况存在差异,并影响计算精度的主要模拟因素,提出应采取良好的保温保湿措施防止温差影响下混凝土开裂。混凝土本身为脆性材料,拉伸变形能力很小,短期加载下极限拉伸应变只有 $(0.6\sim 1.0)\times 10^{-4}$ ,大约相当于温度降低 $6\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 引起的拉应变。

为进一步研究大体积承台水化热计算分析模拟与实际情况的对比,以某大桥大体积混凝土承台为工程依托,对大体积承台进行数值模拟计算,并结合现场实测数据分析承台水化热温度场变化规律,提出针对性的温控时机,为今后的同类工程提供参考。

## 1 工程概况

某大桥为Y墩变截面连续刚构桥,总长310 m,跨径布置为81 m+148 m+81 m,立面布置见图1。主梁采用C55变截面预应力混凝土单箱三室截面,单幅桥面宽22.75 m,中墩V腿跨中梁高6.5 m,中墩V腿处梁高7.5 m,两肢之间的夹角约为 $62.5^{\circ}$ ,边墩支点处及跨中处梁高3.0 m,腹板采用直腹板<sup>[12]</sup>。

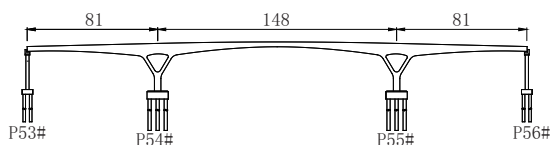


图1 立面布置图(单位:m)

承台采用C40钢筋混凝土,顺桥向长13.2 m,横桥向宽23.44 m,承台高5.0 m<sup>[13]</sup>,共计1 505.8 m<sup>3</sup>。承台顶部圆倒角半径3.5 m,底部圆倒角半径4.0 m,承台顶部倒角缩放高度0.5 m。具体布置见图2。冷却管采用外径48 mm、壁厚3.5 mm的钢管布设,冷却管共布置4层,由上至下编号分别为C1、C2、C3、C4。首层冷却管距承台顶面1 m,管冷层间距1 m。C1及C3层管道平面呈顺桥向几字形布置,几字形长度11 m,宽1.3 m。C2及C4管道平面呈横桥向几字形布置,几字形长度21.35 m,宽1.2 m。每层均设置独立进水口及出水口,管道接长采用螺旋接口。本次采用一次浇筑方案,现场按照设计图中管冷布置进行施工。

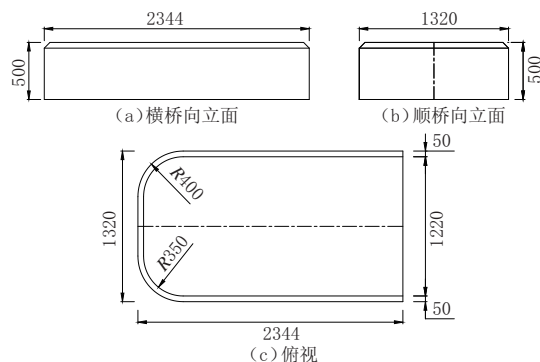


图2 承台布置图(单位:cm)

## 2 水化热计算参数

水化热计算涉及到的关键参数为入模温度、混凝土弹模、混凝土比热容、生热率、空气物理特性、对流传热系数、管冷等效作用和底板边界条件约束。

入模温度按照现场实测取 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

混凝土龄期与弹性模量呈正相关,随着龄期增长,弹性模量增大也趋于缓慢。弹性模量按照《大体积混凝土施工标准》附录B.3.1条中的公式进行计算<sup>[14]</sup>,计算公式为: $E(t) = \beta E_0(1 - e^{-\varphi t})$ 。其中掺合料修正系数 $\beta$ 取0.996, $\varphi$ 取0.09,标准养护28 d弹性模量 $E_0$ 取 $3.25\times 10^4\text{ MPa}$ 。

比热容取 $960\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ,导热系数取 $1.92\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。生热率公式按照 $H(t) = rQ_0e^{-rt}/86.4$ 计算,其中, $r$ 取0.9,胶凝材料水化热 $Q_0$ 经计算得 $101\,742\text{ kJ}/\text{m}^3$ 。

空气对流系数取 $10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ,底面对流系数暂定 $2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ,侧面暂定采用木模板,对流系数暂定 $2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ,顶面覆盖保温,对流系数暂定 $5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。侧面在第2 d拆除模板,考虑 $2\text{ m/s}$ 平均风速,顶面及侧面对流系数均暂定 $8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

水冷流速按照 0.8 m/s 考虑,水冷对流换热系数按照如下计算公式进行计算<sup>[15]</sup>,水温取 7℃,在 28 d 内均考虑水冷作用。计算公式为: $h_{\text{water}} = (552.4v + 50.0) = 492 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

底部为素混凝土时水平约束刚度范围为 0.6~1 N/mm<sup>3</sup>,本例中暂取 0.8 N/mm<sup>3</sup>。

3 有限元计算模型

计算分析中的承台结构属于双向对称的,水化热作用下的温度场和应力场也基本对称,故从计算效率角度可取原结构的 1/4 建模(见图 3),施加相应的边界条件和温度荷载。采用热-力分离法建立承台的热力学计算模型,通过等效温度荷载法模拟结构的应力发展情况。温度场中的实体单元采用热单元 Solid70。应力场中边界条件设定为:底部为竖向弹性约束,通过软件中的弹簧单元进行模拟。对称面为对称约束,通过软件中的一般约束模拟。应力场中的实体单元采用 Solid45,底部水平弹簧约束采用 Combin14 模拟。共计 23 306 个单元,26 087 个节点。先进行温度场计算,然后将计算结果施加给力单元,对力单元进行应力场分析。

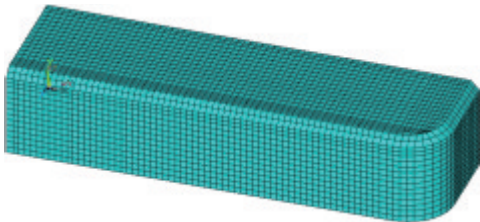


图3 承台有限元模型

在第 2 d 时拆除侧面模板和顶面保温措施,模型中同步改变相应的对流系数。应力场计算时基于有限元软件中的蠕变模型考虑收缩徐变效应,模拟出在水化热作用下混凝土收缩徐变对混凝土结构抗裂性能影响,收缩徐变模型可参考常用的经验公式,如下式所示<sup>[16]</sup>:

$$C(t, \tau) = C_1(1 + 9.20\tau^{-0.45})(1 - e^{-0.30(t - \tau)}) + C_2(1 + 1.70\tau^{-0.45})(1 - e^{-0.005(t - \tau)})$$

其中, $C_1 = 0.23/E_2$ , $C_2 = 0.52/E_2$ , $E_2$ 为最终弹模。

应力松弛系数为:

$$K(t, \tau) = 1 - (0.25 + 0.25\tau^{-0.4})[1 - e^{-0.2(t - \tau)}] - (0.15 + 0.3\tau^{0.4})[1 - e^{-0.006(t - \tau)}]$$

计算过程中同时考虑弹性模量的折减,将折减系数与应力松弛系数相乘得到总的松弛系数再与温差相乘得到等效温度荷载。

4 数值模拟结果

混凝土内部温度随龄期变化的规律见图 4,从中可知:(1)内部出现最高温度时刻为浇筑后第 2 d,最高温度为 55.1℃;(2)混凝土在第 7 d 时的内部最高温度为 35.0℃;(3)混凝土在第 28 d 时的内部最高温度为 14.6℃。

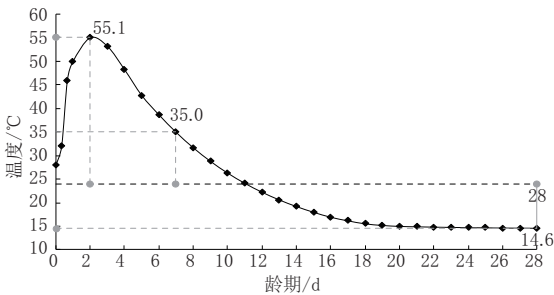


图4 混凝土内部随龄期最高温度变化曲线

混凝土内部降温速率变化规律见图 5,从中可知:混凝土的降温速率最大为 5.47℃/d,超出了规范限定值 2℃/d。除第 3 d 至第 12 d 期间,其余时段降温速率均符合《大体积混凝土施工标准》第 3.0.4 条规定<sup>[17-18]</sup>。

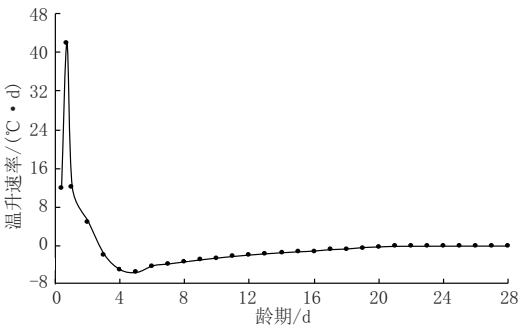


图5 混凝土内部升温速率曲线

混凝土里表温差变化规律见图 6,从中可知:最大里表温差为 33.8℃,不满足《大体积混凝土施工标准》第 3.0.4 条规定,即混凝土浇筑体里表温差不宜大于 25℃,发生在浇筑后第 3 d 至第 5 d。

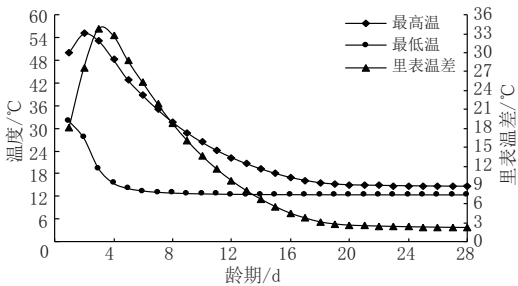


图6 混凝土随龄期里表温差变化曲线

混凝土拉应力及抗拉强度发展规律见图 7,从中可知:(1)混凝土浇筑后的第 1 d 至第 3 d,混凝土拉应力超出允许拉应力;(2)混凝土法向应力和主拉应

力在混凝土强度发展后期存在因收缩徐变影响,应力增大并超过允许拉应力的情况。

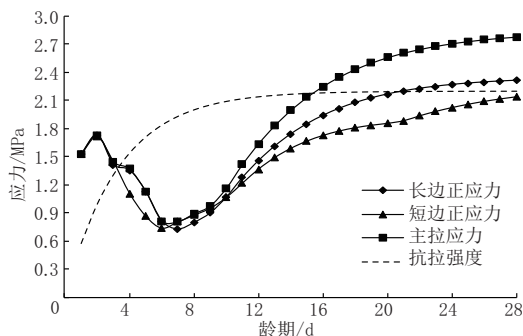


图7 正拉应力、主拉应力及抗拉强度发展曲线

## 5 结 语

本文以某大桥承台一次性浇筑为工程研究背景,结合有限元数值模拟手段,以实体有限元和水化热计算理论为基础对大体积混凝土承台温度场和应力场进行了模拟分析,得出如下主要结论:

(1)内部出现最高温度时刻为浇筑第2 d,最高温度为55.1℃,最大里表温差为33.8℃,发生在混凝土浇筑第2 d;

(2)混凝土最大降温速率为5.47℃/d,发生在混凝土浇筑第5 d,需采取合理保温的控制措施;

(3)混凝土最大主拉应力为2.8 MPa,发生在第28 d时刻,需采取有效的保温保湿措施以确保结构抗裂性能。

### 参考文献:

[1] 黎生南.桥墩承台大体积混凝土抗裂计算与温度控制[J].武汉理

工大学学报,2010,32(24):63-65.

[2] 李晓东.大体积混凝土承台水化热分析及温控措施研究[J].广东水利电力职业技术学院学报,2021,19(4):5-9.

[3] 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.

[4] 陈斌.桥梁承台大体积混凝土水化热数值模拟及应用[J].市政技术,2020,38(6):67-69;77.

[5] 姚瑞.桥梁结构承台大体积混凝土水化热温度效应研究[D].西安:长安大学,2020.

[6] 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.

[7] 魏桂亮.跨海大桥承台大体积混凝土温度控制研究[D].长沙:湖南科技大学,2020.

[8] 张清旭,宁晓骏,陈旭,等.大体积混凝土承台水化热分析[J].交通科学与工程,2019,35(2):33-37.

[9] 王博.大体积混凝土承台水化热效应及温控措施研究[D].西安:长安大学,2019.

[10] 占玉林,段增强,张强,等.承台大体积混凝土水化热及温度控制措施研究[J].世界桥梁,2018,46(3):45-49.

[11] 刘继,周勇军,杨勃,等.连续刚构桥承台水化热有限元分析与控制[J].中外公路,2017,37(4):121-125.

[12] 刘永刚.Y墩连续刚构桥悬臂施工监控关键技术研究[J].上海公路,2022(2):49-52;133.

[13] 李谏.双壁钢围堰在特大桥主墩承台施工中的应用[J].江西建材,2023(7):257-259.

[14] 丁祥文.隧道底板混凝土浇筑水化热计算分析研究[J].上海公路,2023(3):103-106;219.

[15] 满超群,苏力,陆维军,等.一种大体积混凝土温控抗裂方法[P].湖南省:CN202310918121.3,2023-10-31.

[16] 高杰.福州琅岐闽江大桥承台大体积混凝土水化热分析与温控研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.

[17] GB 50496—2018,大体积混凝土施工标准[S].

[18] 郭巧志.索塔承台大体积混凝土夏季施工的温控防裂数值分析[D].天津:天津大学,2014.

(上接第346页)

## 4 结 语

本文主要确定了盾构渣土资源化利用的控制指标以及工艺技术标准,主要包括注浆材料、路基填料以及免烧砖3种资源化利用方式及优化流程。由于一些不可控因素影响,某些地方还需作进一步探讨。后期将针对不同土层提出多应用场景及盾构渣土资源化利用处理工艺设备进行研究。

### 参考文献:

[1] 彭亮.不同形态盾构渣土资源化利用工艺与应用[J].现代城市轨道交通,2022(增刊2):100-105.

[2] 张小连,谢色新,张晓平.盾构工程泥浆处置及资源化利用[J].中

国煤炭地质,2023,35(5):71-74;80.

[3] 谢亦朋,张聪,阳军生,等.盾构隧道渣土资源化再利用技术研究及展望[J].隧道建设(中英文),2022,42(2):188-207.

[4] 钟仁华,邱紫迪,余承晔,等.盾构渣土处置和资源化应用及建议[J].广东化工,2021,48(19):104-105.

[5] 杨雯雯,郭涛,杜涛,等.盾构渣土环保处理系统流体技术研究及应用[J].隧道建设(中英文),2021,41(增刊2):605-611.

[6] 郭卫社,王百泉,李沿宗,等.盾构渣土无害化处理、资源化利用现状与展望[J].隧道建设(中英文),2020,40(8):1101-1112.

[7] 陶祥令,马田飞,吴超,等.盾构渣土物理力学性质及绿色利用技术进展[J].江苏建筑职业技术学院学报,2019,19(3):23-27.

[8] 刘恒,孙晓辉,牟松,等.盾构渣土资源化处理工艺及成套系统装备研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(2):320-327.

[9] 蒲聪聪,花开慧,高品海,等.盾构渣土资源化处置研究进展[J].现代技术陶瓷,2022,43(4):270-281.