

大跨连续箱梁桥 0[#] 块高强混凝土水化热 及温控措施分析

袁军峰¹, 张建东^{1,2}, 刘朵², 阚毓峰²

(1.南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211800; 2.苏交科集团股份有限公司)

摘要: 针对大跨连续梁桥箱梁 0[#] 块施工过程中的水化热问题, 基于有限元模型对冷却管通水循环的降温效果和防裂效果进行了比较分析。基于热交换平衡原理, 考虑环境因素和材料特性的影响, 采用 Midas/FEA 软件, 在箱梁 0[#] 块无冷却管通水循环模型与实测温度场数据相吻合的条件下, 比较了箱梁 0[#] 块无冷却管和冷却管通水循环计算模型的混凝土降温效果、温度应力和最小裂缝系数; 通过对计算结果的分析, 进一步明确了冷却管通水循环对 0[#] 块混凝土水化热裂缝防控的有效性。结果表明: 冷却管通水循环可显著地降低箱梁 0[#] 块混凝土的温度峰值、应力峰值和表面开裂几率, 为大跨连续梁桥箱梁 0[#] 块高强混凝土施工质量控制提供了有效措施。

关键词: 水化热; 箱梁 0[#] 块; 冷却管; 高强混凝土; 温度裂缝

箱梁 0[#] 块作为挂篮悬臂浇筑施工的中心, 是整个结构体系中最复杂的部分。随着连续梁桥的跨径不断增大, 为了保证连续梁具有足够的抗弯承载力和抗倾覆作用, 对 0[#] 块施工质量的要求越来越高。高强混凝土水化热温升大, 单方水泥用量大, 若体积较大, 结构内部热量不断积聚, 温度急剧升高, 使结构内部温度远大于外部温度, 形成较大的温度梯度, 从而产生较大温度应力, 进而可能产生温度裂缝。箱梁 0[#] 块浇筑过程中影响混凝土温度场的因素包括混凝土配合比、水泥种类、环境温度、入模温度(即浇筑温度)、是否分层分段浇筑及养护条件等。优化这些因素均对裂缝控制有利, 但避免箱梁裂缝的工程案例却少之又少。因而施工期间混凝土水化热问题仍有进一步研究的价值。该

文对某连续箱梁 0[#] 块水化热实测温度场进行分析, 并采用有限元分析方法, 在无冷却管通水循环模型与实测温度场吻合情况下, 建立冷却管通水循环模型, 分析冷却管通水循环模型的降温效果和裂缝控制效果。

1 工程概况

某连续箱梁桥, 主桥上部结构采用(100+160+100) mPC 波形钢腹板变截面连续箱梁, 是目前跨度最大波形钢腹板连续组合梁桥, 主梁结构为单箱三室。左右两幅均采用挂篮悬臂浇筑施工, 0[#] 块和 1[#] 梁段采用托架现浇, 2[#]~16[#] 梁段采用异步浇筑施工, 其 0[#] 块长 6 m, 1[#] 梁段长 3.4 m, 1[#]~17[#] 梁段高度变化

- [2] 祝国华, 朱伟庆, 崔越. PC 连续梁桥悬臂浇筑施工线形误差敏感性分析[J]. 中外公路, 2016(6).
- [3] 贾文豪, 李子奇. 改变施工步骤对连续梁桥线形及应力的影响[J]. 铁道建筑, 2016(8).
- [4] 杨耀, 方淑君, 段传武, 等. 不同跨径高铁连续梁桥悬臂施工线形分析研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016(8).
- [5] 王立峰, 张磊, 肖子旺, 等. 大夹角蝶形拱式连续梁 V 撑局

部应力分析[J]. 中外公路, 2012(4).

- [6] 戴东利. 混凝土连续刚构桥预拱度设置研究[J]. 铁道建筑技术, 2012(6).
- [7] 李丹. (48+80+80+48) m 连续梁悬臂施工监控技术研究[D]. 石家庄铁道大学硕士学位论文, 2016.
- [8] 陈明. 大跨径连续梁桥主桥合龙段施工监控技术的应用[J]. 公路与汽运, 2017(5).

收稿日期: 2018-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51778288); 浙江省交通运输厅科研计划项目(编号: 2016023)

作者简介: 袁军峰, 男, 硕士研究生. E-mail: 18851776203@163.com

(9.5~9.1 m),按 1.7 次抛物线变化。箱梁 0# 块顶板宽度 23.55 m,顶板翼缘板宽度 3.025 m。高度在 7.4~9.5 m 为第二层浇筑;设置 6 个挖空区,每个格室分别设一个过人洞口,纵向设 3 道中横梁,横隔梁宽度分别为(75+150+75) cm,横向设 4 道腹板,宽度为 1 m。该桥总体效果图如图 1 所示。

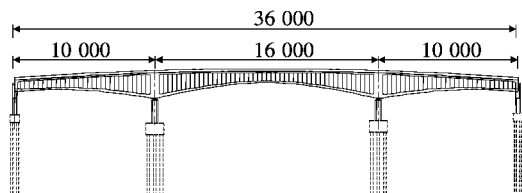
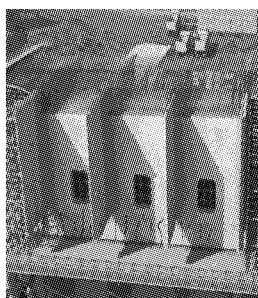


图 1 主桥桥型立面布置图(单位:cm)

施工时箱梁 0# 块拆模期间出现部分混凝土表面开裂,主要产生于底板端面,横隔板、腹板交叉处产生部分裂纹,裂缝情况如图 2 所示。



(a) 裂缝整体分布



(b) 局部裂缝

图 2 0# 块底板端面裂缝示意图

2 水化热温度场实测结果分析

2.1 测试方案

该箱梁 0# 块为单箱三室结构,整个箱梁 0# 块在托架上立模浇筑,施工前分析箱梁 0# 块体积大、C60 混凝土强度高,考虑水化热作用,分为二层浇筑。工况 1:2017 年 6 月 18 日开始浇筑第一层,浇筑高度为 7.4 m,包括底板、腹板和横隔板;工况 2:2017 年 7 月 12 日浇筑第二层顶板,浇筑高度为 2.1 m,分层浇筑情况如图 3 所示。实际浇筑过程中,考虑到底板和顶板的厚度大,易因水化热温度较高,造成内外温差过大产生裂缝,采取顶板覆盖土工布并加强洒水养护,箱梁 0# 块模板控制在 4 d 后拆除,同时对顶底板布设传感器监测水化热温度场(图 4)。

2.2 现场实测

选取顶底板作为水化热温度场研究对象,选取代

表性测点测试温度,绘制成图 5、6 的温度时程曲线。0# 块最高温度及温度峰值见表 1。

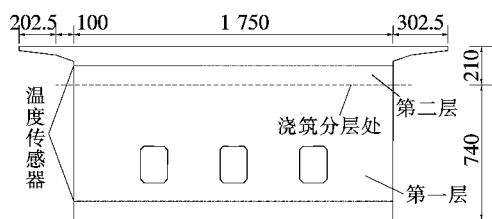


图 3 施工缝位置及截面温度传感器布置(单位:cm)

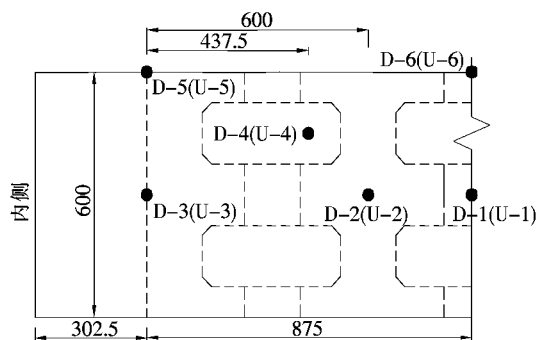


图 4 顶、底板传感器位置及编号
(D 为底板,U 为顶板)(单位:cm)

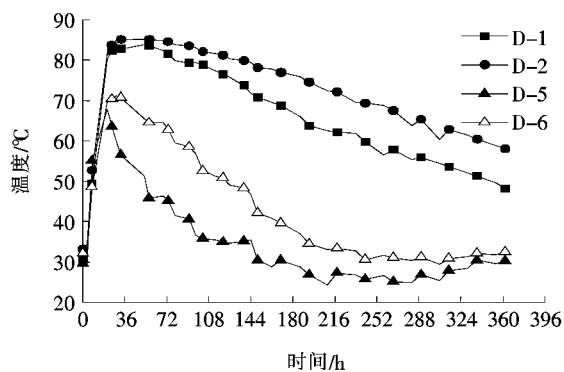


图 5 底板测点温度时程图

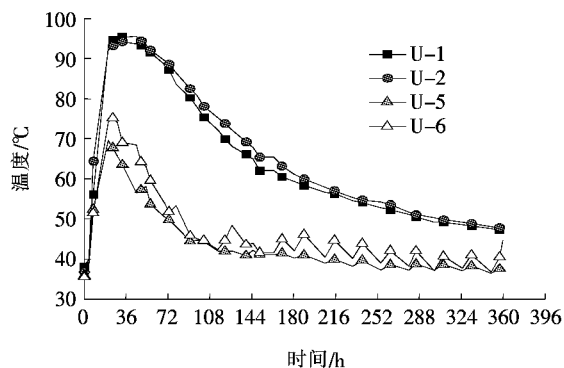


图 6 顶板测点温度时程图

从图 5 可以看出:底板代表性测点在凝结硬化过

表 1 0# 块最高温度和温度峰值

浇筑层数	最高温度/ ℃	最高温度出 现时间/h	温差峰值/ ℃
第一层	85.2	45	48.9
第二层	95.6	45	51.4

程中的温度时程曲线主要经历 3 个阶段:第一阶段温度急剧上升。水泥水化作用剧烈,热量迅速积聚,达到温峰;第二阶段温度缓慢下降。该阶段温降幅度明显小于温升幅度,且曲线斜率逐渐减小;第三阶段温度保持稳定。该阶段温度趋近于环境温度,并随环境温度变化而变化。

由表 1 可知:底板结构中心温度在 45 h 时达到最大值 85.2 ℃,底板里表温差峰值达到 48.9 ℃,里表温差峰值超过 25 ℃的控制要求。检查发现在 0# 块底板端面产生表面裂缝(图 2)。

从图 6 可以看出:顶板测点温度变化大体符合三阶段变化的特征,测点温度达到峰值后的降温幅度明显大于底板,其原因是顶板直接暴露在大气环境中,受太阳辐射、风速等影响。由表 1 可知:顶板测点温度峰值为 95.6 ℃,温度峰值的出现时间和底板基本相同,其温度峰值较底板温度峰值高 10 ℃,原因是 7 月份高温及第一层与第二层混凝土入模温度差异。混凝土内外温差峰值为 51.4 ℃,同样不满足规范要求。此外,从温度场数据的统计结果看,结构里表温差峰值稍滞后于结构中心温度峰值,其原因是结构中心散热慢,结构表面散热快。检查未发现温度裂缝。

通过对箱梁 0# 块顶底板典型测点温度变化分析可知:测点温度变化基本符合三阶段变化特征,施工期间产生较高的水化热温度,内外温差较大,浇筑 1~2 d 期间内部快速升温达到峰值,1~4 d 测点温度经历快速升温 and 缓慢降温阶段,此期间结构易产生温度裂缝。拆除模板后,箱梁 0# 块底板端面和腹板与底板交叉处出现裂纹,现场施工人员立即采取覆盖土工布和洒水养护等温控措施,裂纹扩展得以控制,未形成贯穿性裂纹,对结构安全无较大影响。

2.3 开裂分析

该依托工程中箱梁 0# 块混凝土浇筑后,结构内部热量聚集,急剧升温,外部混凝土受到大气环境影响,散热较快,其混凝土内外形成温度梯度,内部膨胀率大于外部膨胀率,在混凝土表面产生拉应力,且由于混凝土早期弹性模量小,抗拉强度较小,当混凝土表面拉应力大于抗拉强度时,会在混凝土表面产生裂缝。箱梁

0# 块的顶底板尺寸较大,厚度达 2.1 m,混凝土内外温差均达到 50 ℃左右,内外温差均超过 25 ℃限值,故极易在混凝土表面产生裂缝。可以看出,该箱梁 0# 块底板端面的裂缝主要是由于水化热效应引起的。箱梁 0# 块底板混凝土内外温差 48.9 ℃与顶板混凝土内外温差 51.4 ℃比较接近,底板端面产生表面裂缝,而顶板无裂缝出现,这是由于顶板表面传感器测试的温度场受大气环境(日照强度和风速)影响较大,使得顶板内外温差较大,而顶板实际由水化热效应产生的温差会发生一定折减。

3 无冷却管和冷却管通水循环模型比较分析

前文对温度实测变化规律进行了分析,该节在模拟无冷却管计算模型与实测温度场吻合的条件下,拟对冷却管通水循环计算模型进行分析,比较无冷却管通水循环和冷却管通水循环计算模型的温度变化及裂缝产生概率,验证冷却管通水循环温控措施的有效性。

3.1 模型建立及参数确定

根据箱梁 0# 块结构的对称性及考虑施工过程中布设冷却水管的合理性,取 0# 块 1/2 建立模型,实体网格单元采用六面体,如图 7 所示。该箱梁 0# 块 C60 混凝土配合比如表 2 所示,材料特性如表 3 所示。经监测该地平均风速为 2.7 m/s,空气对流系数取为 58.33 kJ/(m²·h·℃),经计算得,各模板的对流系数如表 4 所示。

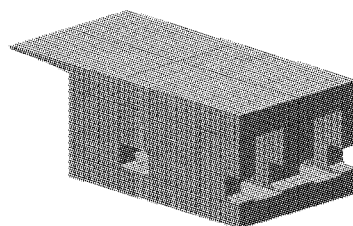


图 7 有限元模型

该文基于实测温度数据对相关参数进行调整,达到无冷却管通水循环的计算结果与实测温度场相吻合。无冷却管通水循环计算模型的入模温度取实测值 30 ℃,采用双掺(粉煤灰、矿渣)的绝热温升计算公式 $T = \frac{Q_0}{c\rho}(W + kF)$, Q_0 取 334 kJ, k 取 0.30,得到热源函数的绝热温升值为 63 ℃,冷却管通水循环计算模型采用在混凝土拌和物中加入碎冰块,降低入模温度,取浇筑温度为 20 ℃。冷却水管水平间距取 1 m,仅在顶、

底板布设冷却水管,设置冷却管的管径、冷却管冷却边界对流系数、进水口水温、通水流量及通水持续时间等

参数,其他参数同无冷却管计算模型。冷却管平面布置图如图 8 所示。

表 2 C60 混凝土配合比

							kg/m ³
水泥	砂	小石	大石	水	粉煤灰	矿渣	减水剂
387	642	57	1 084	150	65	65	9.306

表 3 C60 混凝土材料特性

比热 $c/$ [kJ · (kg · °C) ⁻¹]	密度 $\rho/$ (kg · m ⁻³)	导热系数 $\lambda/$ [kJ · (m · h · °C) ⁻¹]	热膨胀系 数/(1/°C)	弹性模量/ MPa
0.914 5	2 459	9.125	1×10^{-6}	3.55×10^4

表 4 各模板对流系数

模板	对流系数/ [kJ · (m ² · h · °C) ⁻¹]	厚度/ mm
钢模板	57.89	6
竹胶板	28.04	15
土工布	11.25	5

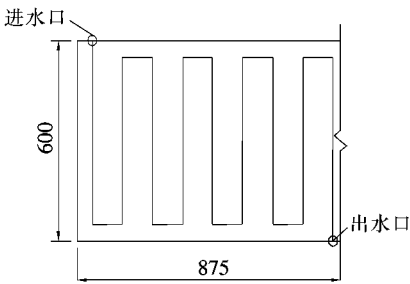


图 8 1/2 顶底板冷却水管平面布置图(单位:cm)

3.2 降温效果分析

考虑冷却管通水循环对箱梁 0# 块水化热的降温作用,比较分析无冷却管通水循环和冷却管通水循环两种计算模型,绘制典型测点的温度时程曲线,如图 9、10 所示。有无冷却管的降温效果比较如表 5 所示。

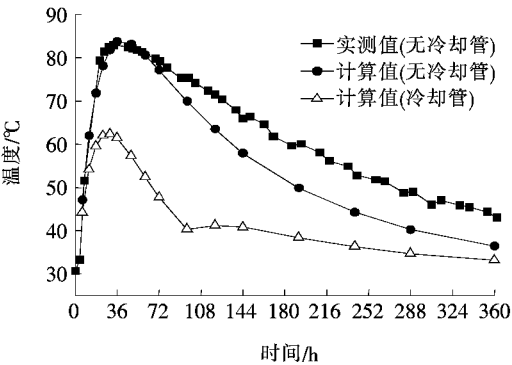


图 9 D-4 测点的温度时程图

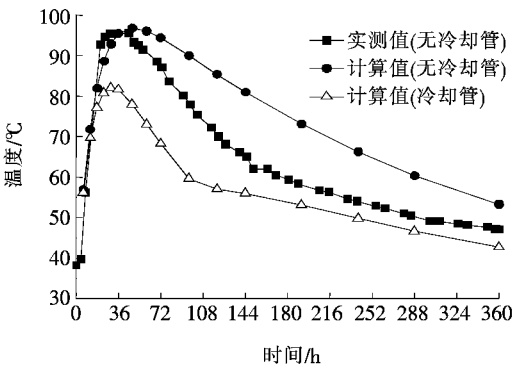


图 10 U-1 测点的温度时程图

表 5 有无冷却管的降温效果比较

冷却方式	一层温度 峰值/°C	一层温峰出 现时间/h	二层温度 峰值/°C	二层温峰出 现时间/h
冷却管	82	36	87	36
无冷却管	88	48	96	48

从图 9、10 可以看出:布设冷却管后,测点 D-4 和 U-1 的温度峰值出现大幅下降,且温度峰值出现的时间相应提前。

由表 5 可以看出:各测点温度峰值的降温幅度保持在 6~9 °C 之间,温度峰值提前 12 h。因此,在箱梁 0# 块中采用冷却管通水循环的温控措施具有削峰作用,能够显著降低结构中心温度峰值,验证了冷却管通水循环的温控措施对于箱梁 0# 块具有显著降温作用。

3.3 裂缝控制效果分析

为了进一步验证冷却管通水循环的温控措施能够抑制箱梁 0# 块的裂缝出现,对箱梁 0# 块的典型测点应力和最小裂缝系数进行比较分析,结果如图 11~13 所示。

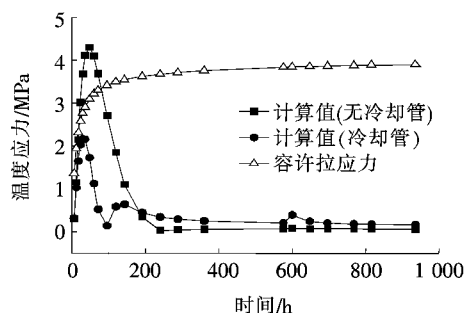


图11 测点D-6主拉应力与容许拉应力时程图

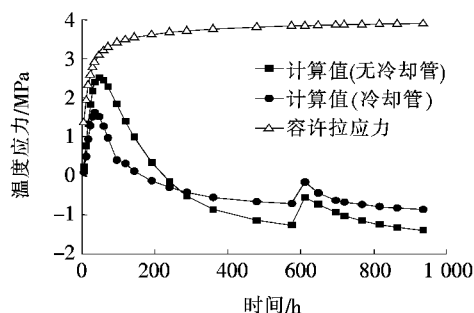


图12 测点D-5主拉应力与容许拉应力时程图

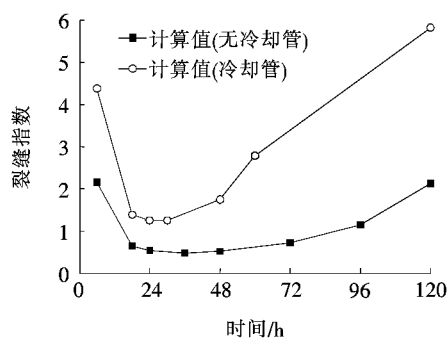


图13 测点D-5裂缝系数时程图

从图11、12可以看出:冷却管通水循环计算模型中测点D-6主拉应力和测点D-5主拉应力均显著降低,且低于测点的容许拉应力,满足混凝土不开裂的必要条件。从图13可以看出:无冷却管通水循环计算模型测点D-5的最小裂缝系数为0.48,而冷却管通水循环计算模型的最小裂缝系数为1.25。从裂缝系数与裂缝发生概率的曲线关系可知,裂缝系数处于0~1.0之间时,混凝土发生开裂的概率高于50%。故在冷却管通水循环计算模型中测点D-5产生裂缝的概率较小,不会使混凝土表面开裂。

4 结论

以某连续梁桥箱梁0#块施工为依托,分析了箱梁0#块高强混凝土水化热顶板和底板实测温度结果,利用Midas/FEA软件对箱梁0#块无冷却管和冷却管通水循环计算模型进行降温效果和裂缝防治效果比较分析,得出以下结论:

(1) 顶、底板实测温度时程曲线大致分为剧烈上升、缓慢下降和稳定平衡3个阶段,底板温度峰值达85.2℃,顶板温度峰值达95.6℃,内外温差均较大,其原因在于顶底板厚度相同,但入模温度不同,顶板相比底板高10℃,且在曲线缓慢下降阶段底板有腹板和横隔板位于其上,温度降低缓慢,受到大气温度影响小,而顶板直接暴露于外界,温度受大气环境影响较大。

(2) 通过无冷却管模型和冷却管模型比较分析,冷却管模型的降温和裂缝防控效果较好。其降温幅度在6~9℃之间,温度应力不超过3MPa,整个浇筑期间均低于混凝土的容许拉应力,产生表面裂缝部位测点的裂缝系数明显下降,基本不小于1.0,满足混凝土不发生开裂的必要条件。

(3) 冷却管通水循环虽具有降温和防裂效果,但箱梁0#块受力复杂、钢筋布置密集和混凝土振捣等因素对冷却管的布置方式、管径、流量及管材等参数选择提出了更高的要求,需做进一步最优化研究。

参考文献:

- [1] 缪长青,孙传智,李爱群.混凝土箱梁桥零号块水化热过程分析研究[J].防灾减灾工程学报,2010(4).
- [2] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:水利水电出版社,2012.
- [3] 卢文良,季文玉,张付宾,等.箱梁混凝土水化热温度及温度应变的试验研究[J].东北公路,2002(4).
- [4] 任更锋,常仕东,张锦凯.连续刚构桥零号块高强混凝土水化热温度效应分析[J].广西大学学报(自然科学版),2017(1).
- [5] 王金海.预应力混凝土箱梁水化热裂缝控制与预防[J].公路工程,2012(2).
- [6] 杨爱民.大跨径PC连续箱梁桥零号块水化热温度效应及裂缝控制研究[D].长安大学硕士学位论文,2015.
- [7] 北京迈达斯技术有限公司.Midas/FEA用户指南[Z],2005.