

基于 Midas 的拱座基础大体积混凝土温度影响因素分析

王建军¹,梁军林^{2*},周胜波^{3,4},禡炜安^{3,4}

(1.广西路桥工程集团有限公司,广西 南宁 530007; 2.广西大学 土木建筑工程学院;
3.广西道路材料与结构重点实验室; 4.广西交通科学研究院有限公司)

摘要:温度控制是大体积混凝土施工质量控制的重要环节,施工工艺参数是控制大体积混凝土温度裂缝的主要技术措施之一。该文通过采用 Midas 软件建立有限元模型分析浇筑方式、冷却管间距、浇筑温度和保温开始时间等施工参数对大体积混凝土温度的影响,结合具体工程所处环境情况,提出了控制大体积混凝土温度裂缝的技术措施。优化水泥混凝土材料组成,采用 40% 粉煤灰等量取代水泥,可以降低材料绝热温升 9.08℃ 左右;混凝土浇筑采用分层间歇 5 d 或分层连续间隔 4 h,冷却管水平和竖直间距为 1.5 m;浇筑温度越高,内部温升峰值明显增加,应通过在拌和水中掺加冰屑、石料提前浇水预冷等技术措施尽量降低混凝土浇筑温度;为减小里表温差和温降速率,浇筑 48 h 后用保温篷布进行保温,同时应根据实时监测温度数据及时调整保温措施。

关键词:桥梁工程;影响因素;施工工艺;抗裂;拱座;大体积混凝土

大体积混凝土结构广泛地应用于土木工程领域,由于施工期间大体积混凝土的水化放热量多、内外温差大,若不能及时进行散热和保温,混凝土内部产生的应力将超过混凝土允许拉应力而开裂。为防止大体积混凝土的温度开裂,采用合理的施工工艺参数控制大体积混凝土的散热保温问题一直是研究热点。建立温度预测模型对混凝土施工工艺参数进行优化是大体积混凝土温度裂缝施工控制的主要方法,已有工程实践表明:通过控制混凝土的浇筑温度、浇筑方式、水管强制冷却以及外部保温措施等方式,都能在一定程度上影响大体积混凝土的温度场分布。但鉴于大体积混凝土结构设计以及工程所处环境的差异,该研究通过建立有限元模型计算和大尺度成型试件实测,分析影响大体积混凝土温度的各项因素,优化大体积混凝土施工工艺参数,为大体积混凝土施工中温度裂缝的控制提供技术参考。

1 工程概况

马滩洪水河大桥位于广西来宾,是柳南高速公路

改扩建工程桩号 K1 324+500~K1 343+200 合同段内一座特大桥,采用推力拱结构,主桥为钢管混凝土拱桥,引桥为先简支后连续的预制小箱梁桥,拱座分为左、中、右 3 个,基础为 C30 大体积混凝土,总长 64.80 m、宽 31.014 m,浇筑量为 28 135.7 m³。该工程于 2016 年 9 月—11 月施工,采取一系列技术措施进行施工工艺参数优化,以确保大体积混凝土施工质量。

2 大体积混凝土有限元模型

2.1 混凝土配比及绝热温升

根据设计要求及试验研究,该项目 C30 大体积混凝土确定的基准混凝土配合比为:水泥:砂:碎石:水:减水剂:粉煤灰=225:769:1 106:150:6.750:150,如表 1 所示。

拱座大体积混凝土温度控制技术需从材料和施工工艺优化两方面入手,该工程项目为降低水化热引起的绝对温升,采用 40% 粉煤灰等量取代水泥,采用 SHR-650II 型水泥水化热测定仪(热溶解法)检测凝胶材料不同龄期的水化热(表 1)。

收稿日期:2019-02-15(修改稿)

基金项目:广西科技计划项目技术创新引导专项(编号:桂科 AC16380109);广西科技重点研发计划项目(编号:桂科 AB17292032)

作者简介:王建军,男,博士,教授级高工.E-mail:187298821@qq.com

* 通信作者:梁军林,男,博士,教授级高工,博士生导师.E-mail:ljl_1217@126.com

表 1 C30 混凝土配合比及胶凝材料水化热检测结果

材料	配比/(kg·m ⁻³)						不同龄期(d)的水化热/(kJ·kg ⁻¹)					水化热总量/(kJ·kg ⁻¹)	最高绝热温升/℃
	水泥	砂	碎石	水	减水剂	粉煤灰	3	5	7	14	28		
基准	375	769	1 106	150	6.750	0	229.98	258.01	286.76	321.47	338.15	351.93	56.69
40%粉煤灰	225	769	1 106	150	6.750	150	190.68	225.05	239.17	268.70	282.63	295.54	47.61

由表 1 可知:基准及掺 40%粉煤灰配合比最高绝热温升分别为 56.69、47.61℃,掺加粉煤灰可以降低绝热温升 9.08℃,从而有效降低了施工工艺的控制。根据广西来宾地区 9—11 月份的气温,不利最高温度仍有 35℃左右。因此,在降低胶凝材料水化热基础上,需进一步分析影响大体积混凝土温度的因素,通过优化施工工艺来控制大体积混凝土的有害温度特征参数。

2.2 有限元分析方案

根据初拟施工方案,拱座基础混凝土采用分层浇筑方式,浇筑层厚度控制在 1.5~4 m(如图 1 第 1~6 层为大体积混凝土拱座基础),均布设有公称直径 32 mm 的冷却水管(图 2)控制大体积混凝土温升峰值,并采取保温措施控制最大里表温差。为精确控制大体积混凝土温度,该研究建立与实际浇筑工程实体尺寸一致的计算模型,拱座基础尺寸为 20 m×31 m×15

m,为轴对称结构,因此取一半结构 10 m×31 m×15 m,地基在横向与竖向均取拱座基础以外 8 m。采用 Midas 有限元分析软件对表 2 方案进行了计算分析。

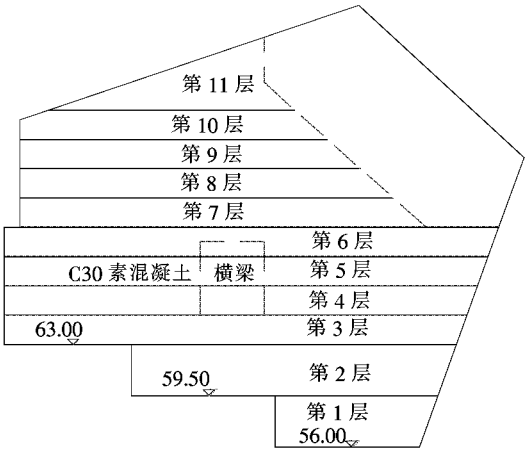


图 1 大体积混凝土拱座基础浇筑分层布置(单位:m)

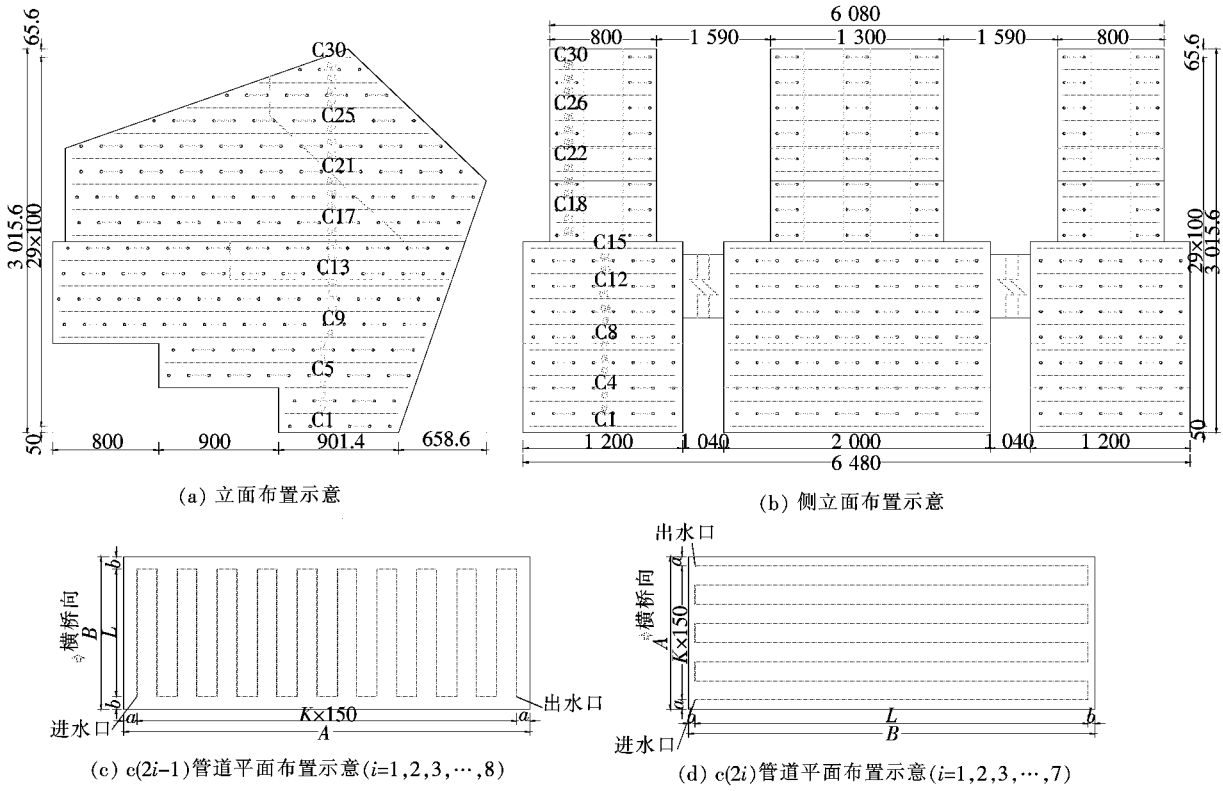


图 2 大体积混凝土拱座基础冷却水管布置(单位:cm)

2.3 有限元分析模型及参数

大体积混凝土内部的热量来源于水化热,而热量散失包括与固体界面上的热传导、与大气的对流以及与冷却水热交换,相应的计算模型见式(1)、(2):

表 2 大体积混凝土 Midas 数值模拟方案

浇筑 方式	间隔 时间	浇筑温 度/℃	保温时 间点/h	冷却管间距/ m×m
分层间歇	5 d	23.9	24	① 1.5×1.0
			36	② 1.5×1.5
			48	③ 1.5×2.0
分层连续	4 h	30.5	72	④ 2.0×2.0
				⑤ 4.0×4.0

导热方程:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \tag{1}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{Q_1}{c\rho} = \frac{Wq}{c\rho}, a = \frac{\lambda}{c\rho} \tag{2}$$

式中:W 为水泥用量(kg/m³);Q₁ 为单位体积单位时间内放出的热量[kJ/(m³·h)];q 为单位质量水泥在单位时间内放出的水化热[kJ/(kg·h)];c 为比热[kJ/(kg·℃)];ρ 为密度(kg/m³);T 为温度(℃);τ 为时间(h);θ 为绝热温升(℃);λ 为导热系数[kJ/(m·h·℃)];a 为导温系数(m²/h)。

热源函数及所处大气环境下的对流放热系数,见式(3)、(4):

热源函数:

$$T(t) = \frac{WQ}{c\rho} (1 - e^{-mt}) \tag{3}$$

对流放热系数:

$$\beta = 3.6(10.788 + 1.874v) \tag{4}$$

式中:T(t)为龄期 t 的绝热温升(℃);Q 为胶凝材料水化热总量(kJ/kg);m 为与水泥品种、浇筑温度等有关的系数(d⁻¹);β 为表面放热系数(对流系数)[kJ/(m²·h·℃)];v 为风速(m/s)。

根据该项目所采用的混凝土配合比参数,Midas 有限元分析所采用的热源函数为:

$$T(t) = 46.44(1 - e^{-mt})$$

统计资料显示,项目所处来宾马滩红水河位置的平均风速为 2.4 m/s,则表面对流系数为 55.028 kJ/(m²·h·℃)。设置保护层时,混凝土外表面经保温层与空气发生热对流交换,环境温度为实测,保温板等效放热系数 β_s = 7.734 kJ/(m²·h·℃)。

该项目大体积混凝土拱座基础温度场计算边界条件为第三类边界条件(包括混凝土外表面与空气接触,冷却管与水接触)和第四类边界条件(包括混凝土与地基或不同浇筑层混凝土接触面,混凝土与冷却管热传导)。有限元分析的参数取值如表 3 所示。

表 3 有限元分析相关参数取值

位置	比热/ [kJ·(kg ·℃) ⁻¹]	密度/ (kg· m ⁻³)	热传导率/ [kJ·(m· h·℃) ⁻¹]	对流系数 (风速 v=2.4 m/s)/ [kJ·(m²·h·℃) ⁻¹]	大气 温度/ ℃	浇筑 温度/ ℃	热膨胀 系数/ (1/℃)	泊松 比	单位体积水 泥含量/(kg · m ⁻³)	放热函 数系数
基础	0.97	2 400	8.388	55.028	按实测	23.9,27.2, 30.5	1×10 ⁻⁵	0.2	225	K=46.44, a=0.5
地基	0.84	1 800	6.120	55.028	—	—	1×10 ⁻⁵	0.2	—	—

3 浇筑工艺参数对大体积混凝土温度的影响分析

3.1 浇筑方式的影响分析

在大体积混凝土分层浇筑工艺中,对分层间歇和分层连续两种浇筑方式进行了模拟计算,不同浇筑方式温度特征参数如表 4 所示。

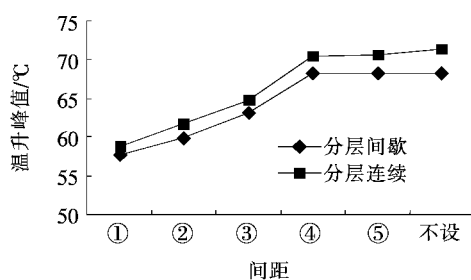
在浇筑温度、保温措施、冷却管布置方式相同的条件下,采用分层连续浇筑比分层间歇浇筑的混凝土内

表 4 不同浇筑方式的温度特征参数对比

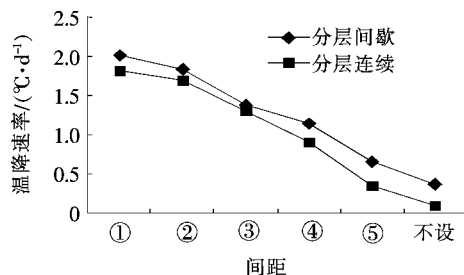
浇筑方式	温升峰 值/℃	最大里表 温差/℃	温降速率/(℃·d ⁻¹)	
			内部	表面
分层间歇 5d	57.59	13.29	2.01	1.48
分层连续 4 h	58.84	18.10	1.83	1.63

部温升峰值高 1.25 ℃、最大里表温差高 4.81 ℃、温降速率小 0.18 ℃/d,但总体相差不大。技术措施相同时,分层间歇浇筑方式更有利于大体积混凝土温度的控制,但从混凝土结构整体性分析,由于分层间歇浇筑

不同层之间间隔时间长,混凝土已硬化,尽管下一层界面上进行清除表面松散层、设置剪力槽与锚固钢筋等措施,但结构的整体性与连续性程度必然下降。而在控制好分层连续浇筑时间间隔条件下,将下一层浇筑时间控制在上一层初凝前完成,将会更有利于混凝土的整体性与连续性。



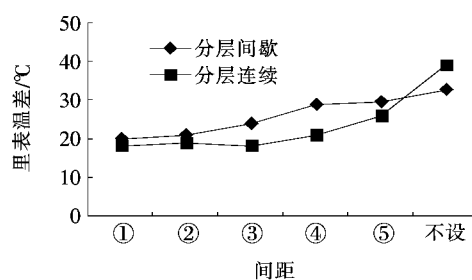
(a) 温升峰值与间距关系



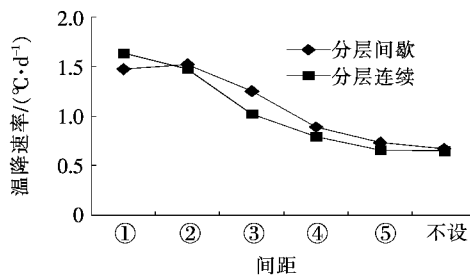
(c) 温降速率与间距关系

3.2 冷却管间距的影响分析

布置冷却水管是降低大体积混凝土温升峰值、改善温度分布的有效措施,该研究分别针对分层间歇和分层连续两种浇筑方式不同冷却管间距的混凝土温度分布进行了计算分析,相应的温度特征参数与冷却管间距的关系见图 3。



(b) 最大里表温差与间距关系



(d) 表面温降速率与间距关系

图 3 冷却管间距对温度的影响

由图 3 可知:冷却管间距越小,混凝土内部温升峰值越小,如分层间歇浇筑冷却管水平间距为 1.5 m,竖直间距为 1.0 m,其内部温升峰值仅有 55.82 °C;当水平和竖直间距增大到 2.0 m 时,内部温升峰值 68.21 °C。但过密的间距容易造成温降速率过大,该方案内部温降速率为 2.01 °C/d,同时也影响混凝土整体结构的完整性和均匀性,不利于结构受力。最大里表温差与冷却管间距的关系总体上呈现出间距越大,最大里表温差越大,如分层连续浇筑冷却管水平间距为 1.5 m,竖直间距为 1.0 m,最大里表温差为 18.10 °C,当水平和竖直间距增大到 4.0 m 时,最大里表温差值达到 25.79 °C,超出了规范要求控制范围。而冷却管间距越小,内部与表面温降速率均越大。冷却管水平间距为 1.5 m,竖直间距为 1.0 m 时,内部温降速率超过了 2.0 °C/d。因此,在实际施工过程中,冷却管布置间距较小时,需密切关注混凝土温降速率的变化,一旦发现降温速率过快,应暂时停止进行强制冷却措施。

3.3 浇筑温度的影响分析

该研究采用拌和水加冰率控制浇筑温度,当加冰

率为 40% 时,浇筑温度为 23.9 °C;当加冰率为 20% 时,浇筑温度为 27.2 °C;不加冰时浇筑温度为 30.5 °C。温度特征参数见表 5,浇筑温度 27.2 °C 条件下混凝土温度分布情况见图 4。

表 5 不同浇筑温度的里表温差及温降速率对比

浇筑方式	浇筑温度/°C	温升峰值/°C	最大里表温差/°C	温降速率/(°C·d ⁻¹)	
				内部	表面
分层间歇	23.9	59.91	21.02	1.84	1.52
	27.2	62.41	18.98	1.88	1.54
	30.5	64.54	17.76	1.92	1.64
分层连续	23.9	61.60	18.88	1.70	1.48
	27.2	64.12	17.96	1.50	1.69
	30.5	67.19	16.65	1.47	1.75

由表 5、图 4 可见:浇筑温度主要影响混凝土内部温升峰值,对最大里表温差和温降速率的影响程度相对较小。浇筑温度越高,内部温升峰值越高,最大里表温差反而呈现下降的趋势。因此建议通过在拌和水中掺加冰屑、石料提前浇水预冷等技术措施降低混凝土

浇筑温度,以更好地控制大体积混凝土温度裂缝。

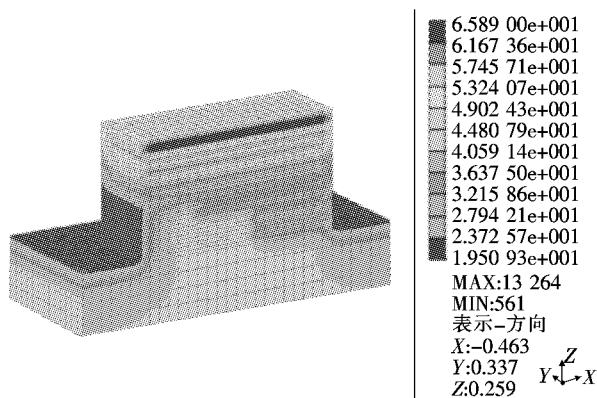


图 4 浇筑温度 27.2 °C 时温度分布图

3.4 保温开始时间的影响分析

研究了不同时间点采取保温措施对混凝土的温度影响,不同方案的温度特征参数如表 6 所示。

表 6 不同保温时间点的温度对比

浇筑 方式	保温开始 时间/h	温升峰 值/°C	最大里表 温差/°C	温降速率/(°C · d ⁻¹)	
				内部	表面
分层间歇	0	59.91	21.02	1.84	1.52
	24	59.85	23.77	1.86	1.57
	36	59.62	23.77	1.86	1.41
	48	59.61	23.77	1.83	1.58
	72	59.34	24.67	1.85	1.59

在设置 1.5 m×1.5 m 的冷却管条件下,保温时间点对混凝土内部温升峰值、降温速率影响不大,但保温时间在 72 h 时,最大里表温差增加到 24.67 °C,已接近临界值,同时会有较大的温度突变。因此实际施工中应根据监测温度进行保温装拆。为减小表面温度的突变,结合拆模时间,建议 48 h 后开始采取保温措施,并根据实时监测温度调整保温措施。

4 结论

- (1) 通过混凝土材料优化,采用 40% 粉煤灰等量取代水泥,可以降低材料绝热温升 9.08 °C 左右,从而降低大体积混凝土施工温度控制难度。
- (2) 混凝土施工工艺可采用分层间歇浇筑或分层连续浇筑,冷却管间距适当增大,冷却管水平和竖间

距均设为 1.5 m 时,各项温度指标均能较好地控制。

(3) 浇筑温度主要影响混凝土内部温升峰值,浇筑温度越高,内部温升峰值越高,施工过程中应通过在拌和水中掺加冰屑、石料提前浇水预冷等技术措施尽量降低混凝土浇筑温度。

(4) 混凝土表面采取保温措施,减小里表温差和温降速率,结合拆模时间,推荐 48 h 后开始采用保温篷布进行保温,同时应根据实时监测温度数据及时调整保温措施。

参考文献:

[1] 蒋孝煌.有限元基础[M].北京:清华大学出版社,1992.

[2] 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.

[3] 王铁梦,黄善衡.大体积混凝土的瞬态温度场和温度收缩应力的计算机仿真[J].工业建筑,1990(1).

[4] 陈应波,李秀才,张雄.大体积混凝土浇筑温度场的仿真分析[J].华中科技大学学报:城市科学版,2004(6).

[5] 卢汝生,严志刚.广州新光大桥大体积高性能混凝土温度场仿真分析[J].桥梁建设,2005(4).

[6] GB 50496—2009 大体积混凝土施工规范[M].

[7] 苏有文,古松.大体积混凝土施工过程温度应力场监测及有限元分析[J].浙江工业大学学报,2010(4).

[8] 侯景鹏,熊杰,袁勇.大体积混凝土温度控制与现场监测[J].混凝土,2004(5).

[9] 马少雄,刘超群,符敏.大体积混凝土施工温度控制研究[J].铁道建筑,2011(4).

[10] M.Larson.Thermal Crack Estimation in Early Age Concrete—Models and Methods for Practical Application [D].Doctoral Thesis.Lulea University of Technology,Lulea,Sweden,2003.

[11] Manolis Papadrakakis., Vissarion Papadopoulos., Nikos D. Lagaros., et al.Vulnerability Analysis of Large Concrete Dams Using the Continuumstrong Discontinuity Approach and Neural Networks[J].Structural Safety, 2008(30):217—235.

[12] 王晗.筏板基础大体积混凝土施工裂缝控制研究[D].大连理工大学硕士学位论文,2013.

[13] 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(3).

[14] 江俊波,肖向荣.斜拉桥索塔下横梁大体积混凝土降温效应研究[J].中外公路,2016(3).