

承台大体积混凝土风冷却温度控制研究

蒋浩博¹, 宋志仕², 朱伟华¹, 颜东煌¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司)

摘要: 对大体积混凝土水化热过程中的温度采用风冷却技术的可行性进行探讨。基于同等条件下对大体积混凝土承台进行有限元模拟, 与实际监测数据进行对比研究。在新型风冷却与传统水冷却两种不同温控手段中, 分别采用 Midas/FEA 建立模型, 两种温控在降温过程中, 温度峰值在规范容许范围内, 温度变化曲线较为平缓, 同时数值模拟计算值与实际监测数据近似, 证实大体积混凝土采用风冷却技术有效可行。

关键词: 水化热; 温度控制; 有限元仿真; 风冷却

水管冷却技术初期多使用于欧美国家的大坝主体结构, 经大量实践检验后水冷却技术在大体积混凝土施工中被广泛运用。但该方法的应用具有一定的局限性, 如: 偏远山区水资源匮乏地区无法非常有效地使用此方法、水冷却管道密闭性要求极高、在竖向结构中供水较为困难且容易发生管体爆裂, 同时水循环冷却较为不便等现象都对实际施工带来不便。采用冷空气替换水作为冷却介质, 操作更加方便简单, 在实际运用中工程费用更低, 中国的风冷却温控技术已在福州市长门特大桥、望东长江大桥等工程中成功应用。针对现有水管冷却技术存在的诸多问题, 该文提出采用更换现有常用冷却介质水的方法, 利用冷空气作为循环介质对大体积混凝土承台进行温度控制, 并研究同等条件下, 水冷却和风冷却降温效果的差别。

1 工程背景及基本理论参数

1.1 工程概况

某在建大型单跨钢桁梁悬索桥, 为了保证承台的高性能工作要求, 对主塔承台的混凝土水化热控制进行了温控模拟计算, 根据计算结果制定了合理的温控措施。承台布设为矩形, 尺寸为 13.3 m×18.7 m, 高度为 6 m。承台均采用 C40 混凝土, 原设计采用混凝土分层浇筑, 受限于工程的实际需要, 同时也为了保证承台的整体性, 拟采用一次性浇筑成型施工, 并同时优化其温控措施以保证结构的整体温度场稳定。

1.2 混凝土原材料配合比设计

承台段混凝土首先需要满足强度指标, 其次由于

基础受力情况与混凝土施工工艺都较为复杂, 混凝土还需要有较好的工作性能以及较高的抗裂性能来保证混凝土的耐久性。经试验室优化后的混凝土配合比如表 1 所示。

表 1 承台 C40 配合比						kg/m ³
水泥	粉煤灰	砂	碎石	水	掺和料	合计
324	140	850	1 040	166	122	2 460

相应的混凝土物理、热性能参数试验值见表 2。

表 2 承台混凝土物理、热性能系数试验值			
参数名称	单位	承台	地基
比热	K/(kg·℃)	0.23	0.20
重度	kN/m ³	25	18
热传导率	K/(m·h·℃)	2.3	2.3
28 d 抗压强度	MPa	40	
强度发展系数(ACI)		$\alpha = 4.5$	
		$b = 0.95$	
28 d 弹性模量	kPa	3.25×10^7	1.0×10^6
热膨胀系数	1/℃	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
泊松比		0.2	0.2
热源函数系数		$K = 50.7$	
		$\alpha = 0.605$	

1.3 温控计算主要技术参数

在计算中主要采用的技术参数如下:

(1) 绝热温升

查阅相关资料,现有的绝热温升值可根据下式进行计算:

$$\Delta T = \frac{m_c Q(\tau) + m_a Q_a}{c\rho} = \frac{324 \times 346 + 122 \times 166}{0.96 \times 2460} =$$

$$56\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

式中: c 为比热; ρ 为密度; m_a 为混合料的用量; $Q(\tau)$ 为水泥水化热; Q_a 为混合料的水化热。

(2) 风冷却理论参数

在冷却管道一期的计算中,通常不考虑冷却管与混凝土之间的空间作用,故混凝土的水化热温升产生的热量 Q_1 基于冷却管吸热产生的热量 Q_2 。

$$Q_1 = C_1 m_1 \Delta T_1 = C_1 \rho_1 V_1 \Delta T_1 \quad (2)$$

$$Q_2 = C_2 m_2 \Delta T_2 = C_2 \sum m_i \Delta T_i = C_2 \rho_2 \sum V_i \cdot$$

$$\Delta T_i = C_2 \rho_2 \sum q_i t_i \Delta T_i \quad (3)$$

式中: C_1 、 C_2 为混凝土比热容[J/(kg·°C)]; ρ_1 、 ρ_2 为冷却介质的密度(kg/m³); V_1 为混凝土浇筑方量(m³); ΔT_1 为混凝土温度差(°C); Q_i 为冷却介质的流量(m³/h); ΔT_i 为对应的冷却管进出口的冷却介质的温度差(°C); $\sum q_i t_i$ 为整个过程中冷却介质质量(m³)。

由 $Q_1 = Q_2$,可得:

$$C_1 \rho_1 V_1 \Delta T_1 = C_2 \rho_2 \sum q_i t_i \Delta T_i \quad (4)$$

$$\Delta T_1 = \frac{1}{C_1 \rho_1 V_1} C_2 \rho_2 \sum q_i t_i \Delta T_i \quad (5)$$

由上式可知:实际施工中控制混凝土温升变化的关键因素在于冷却介质选取,冷却介质的比热容、密度和总量的不同是影响混凝土温升的重要指标。该文数值模拟选取的冷却介质为干燥冷空气,其比热容为 1×10^3 J/(kg·°C),密度为 1.29 kg/m³。通过将冷却介质替换为冷空气,虽然空气的热交换性能与水相比略有不足,但当空气流动总量足够大且流速满足条件时,即上式中的空气流通总量 $\sum q_i t_i$ 足够大时,依靠冷空气与混凝土的热交换作用同样可达到传统水冷却的降温效果,以此保证大体积混凝土结构的稳定。

选取冷空气作为冷却介质进行计算时,可以采用等效对流热传导系数作为参数,在内置冷却管道中,冷却空气与固体表面的对流换热系数值与风速关系密切,冷空气的对流系数可按下式计算:

$$\beta = 21.06 + 17.058 V_a^{0.910} \quad (6)$$

式中: V_a 为冷却介质的流速(m/s)。

研究选用送风装置为流速为 $V_a = 11$ m/s的鼓风

机进行循环通风,入风口温度与环境温度相同,管道内与空气的等效对流系数 $\beta = 176.9$ kJ/(m·h·°C),等效冷却风温 $T_{\text{风}} = 32.5$ °C。

2 模型建立及工程应用

2.1 模型建立

数值模拟计算模型采用实体单元,通过有限元分析软件Midas/FEA建立模型。同时设置对称边界依照对称性取1/4结构进行分析。考虑到大体积承台的受力和施工等因素,水化热分析过程模拟了承台与空气接触部分设置对流边界以模拟空气降温,在垫层设置固定温度边界模拟地基与承台的热交换过程,并依据前文绝热温升对实体单元附加热源。在模型中将承台模拟为简单的实体单元进行水化热分析,采用普通硅酸盐水泥,如图1所示。

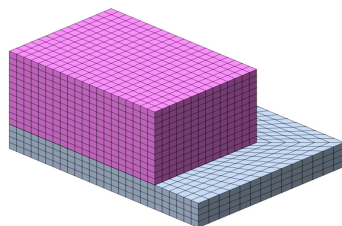


图1 承台水化热计算模型

在现场一次性浇筑时采用传统的水冷却方式对承台进行降温处理,冷却管道内置在混凝土承台内,采用6层管道布置,在水平方向上冷却管道横向距离为 0.5 m,竖直方向上每隔 1 m布设一层管道,底层及顶层距离承台表面 0.5 m,管道每层均为U形布置,各层之间的冷却管相互垂直,即上下层冷却管为十字形交叉,冷却管的管径为 40 mm,承台开始浇筑至冷却管道位置时即开始进行冷却,冷却时间为承台升温较为剧烈的前 250 h,在水化反应趋于稳定后,停止冷却系统,具体布置方案见图2。

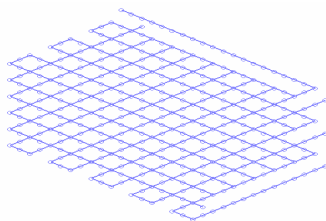


图2 承台管道布置详图

2.2 测点布置

由于承台结构实心对称的特点,根据其结构对称

性,取整个承台的 1/4 布置测点,在承台上共布置由下至上 A、B、C 3 层,每层单独布置 10 个点,每层的布点均一致,共计 30 个(图 3)。

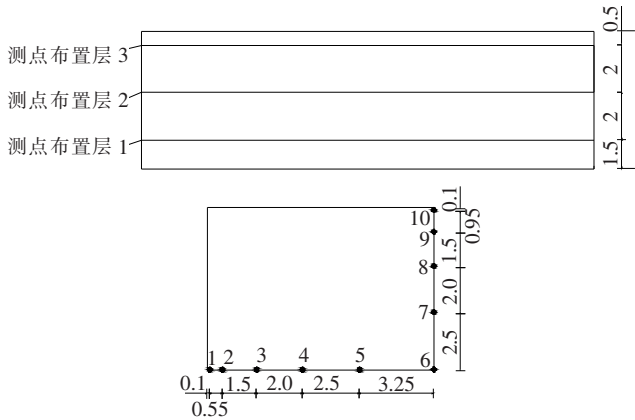


图 3 承台测点布置示意(单位:m)

3 数值模拟结果分析

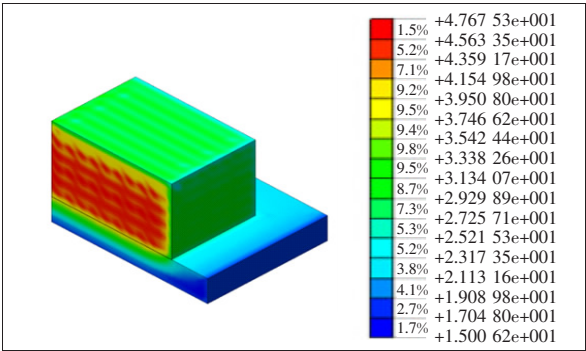
3.1 数值计算结果对比

如前文所述,由于风冷却的热交换能力低于传统水冷却,为了达到与水冷却同等的降温效果,在不改变承台本构参数、外部对流环境及边界条件的情况下,将风冷却承台工况中的冷却管管径增大为 80 mm,水冷却工况的冷却管道管径与现场实际一致(表 3)。分别对风冷却与传统水冷却两种不同温控手段进行水化热分析,模拟其温度场和应力场的分布情况。结果如图 4~6 所示。

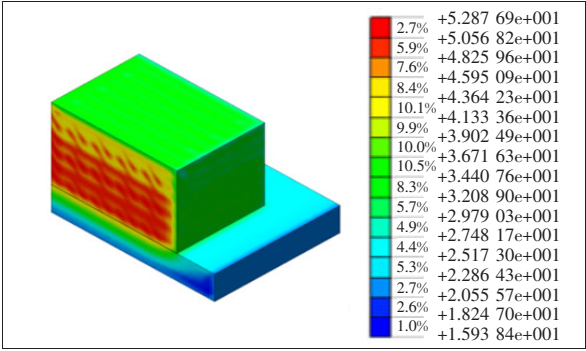
表 3 风冷却与水冷却数值模拟主要参数对比

冷却方式	流速	冷却管径/mm	通水/通风时间/h	介质进口温度/℃
水冷却	2 m ³ /h	40	5	20
风冷却	11 m/s	80	5	20

由图 4 可知:水冷却情况下 70 h 时,内部水化热反应达到峰值,最高温度约为 47.7℃;风冷却情况下 70 h 时,最高温度为 52.9℃;从温度分布云图(图 4)、温度时程对比图(图 5)可以看出:在风冷却和水冷却两种不同的措施下,两者均出现在约 70 h 的时刻,且混凝土内部的最高温度均小于规范值 75℃,两种冷却措施的布置合理可行说明风冷却和水冷却对该承台的温控效果相当,在一定风速、风温及合理的管道布置情况下,风冷却系统对承台大体积混凝土的降温效果与水冷却相当,具有一定的可替代性。



(a) 水冷却



(b) 风冷却

图 4 承台最高温度分布云图(单位:℃)

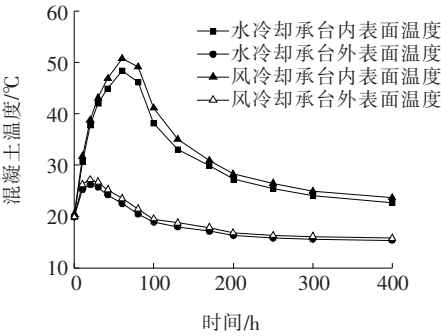


图 5 风冷却与水冷却措施的温度变化时程对比图

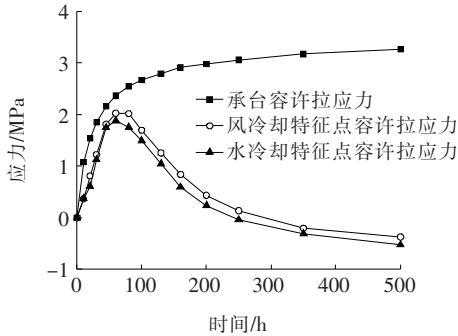


图 6 承台内特征点应力情况对比图

由图 6 可知:混凝土拉应力达到峰值时,水冷却承台的拉应力为 1.88 MPa,风冷却承台的拉应力略微高

于水冷却承台,为 2.02 MPa,两种冷却措施的最大拉应力皆小于容许抗拉应力,因水化热引起的混凝土表面拉应力较小,冷却管道的布置适宜,结构不易产生开裂的风险,承台整体处于安全。

3.2 实测数据分析

施工现场冷却管道内采用工地生活用水作为冷却用水,在现场实时监控的同时根据现场施工情况对冷却水流量进行调整。取承台内部特征测点 $A_1^\#$ 、 $A_6^\#$ 、 $B_1^\#$ 、 $B_6^\#$ 、 $C_1^\#$ 、 $C_6^\#$ 观测其时程变化,其中 $A_1^\#$ 、 $B_1^\#$ 、 $C_1^\#$ 测点为承台外表面温度值, $A_6^\#$ 、 $B_6^\#$ 、 $C_6^\#$ 测点为承台内部的温度变化值。承台外部测点与内部测点温度时程曲线如图 7 所示。

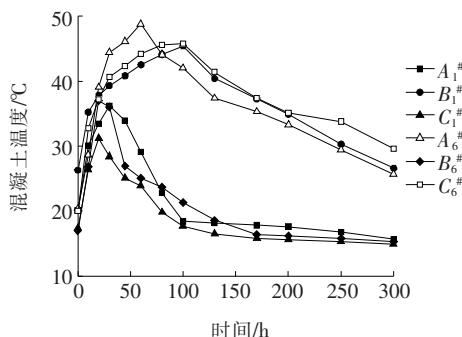


图 7 承台实测温度时程图

比较图 5、图 7 可知:水冷管道承台的实测温度与数值模拟温度曲线基本吻合,实测的混凝土最高温度峰值出现在 60 h 左右,承台内部的最高温度为 49.5 °C,高于理论值 1.8 °C,且实测峰值出现时间比理论值早 10 h 左右。分析原因为:实际施工中混凝土浇筑,冷却管道通水的时间一般是在浇筑开始之后一段时间才进行,其中水化反应已经开始一段时间也会积累一定的热量,导致冷却措施的效果降低。同时,实测水冷却承台的温度比有限元模拟风冷却工况下的温度略低 3.3 °C,一方面是因为冷空气的热交换能力弱于水,在冷却管道内部沿程降温的能力就会降低;另一方面,由于冷却空气密度较低,管道的周围对于空气流场的阻力效应会大于水流场,冷却空气的风速在过长的管道中有衰减,空气冷却效果会随管道长度的增大而快速减弱,从而影响风冷却的效果。在实际操作中可以通过加大管道口径、增大入风口流速的方式弥补风冷却的缺点,达到与水冷却相同的作用。

两种不同的温控措施在水化热降温 100 h 后那个阶段,水化反应都趋于平稳,整体的降温速率为 0.1~

0.2 °C/h,在浇筑全部完成后,后期降温速率曲线平稳,保证了温度的均匀变化,证实了两种不同的温控措施可以较大程度地避免温度裂缝的产生。水冷却实测数据与风冷、水冷却数值模拟的温升基本相同,表明 Midas/FEA 模拟等效风温代入参数确实可行,此方法可以用于水化热结果的分析。同时,新型的风冷却技术降温的效果与传统水冷却技术降温的效果差异不大,在一定程度上证实风冷却技术可用于大体积混凝土水化热控制。

4 结论

以某悬索桥承台大体积混凝土分层浇筑为工程背景,将传统水冷却与新型风冷却效果对比,得出如下结论:

(1) 温度计算值与实际施工情况较为符合,表明理论计算分析的结果具有可靠性。同时,有限元分析证实在承台大体积混凝土结构施工中风冷却技术有效可行,通过选取合适的管道布置、通风总量与风速,优化后的风冷却方案是合理的,可以指导类似工程的施工,同类工程可以借鉴。

(2) 由于风冷却导热系数与对流参数的差异性,风冷却在大体积混凝土温度监控中应用导致理论值与实际施工存在差别,还需进一步研究优化。

参考文献:

- [1] GB 50496—2018 大体积混凝土施工标准[S].
- [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] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 2009.
- [4] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2009.
- [5] 张超, 花俊杰, 吴超, 等. 大体积混凝土施工期采用通风冷却可行性探讨[J]. 水电与新能源, 2017(10).
- [6] 王毅, 周伟, 张超, 等. 基于热流管单元的混凝土通风冷却效果[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017(1).
- [7] 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).
- [8] 林荣光. 长门特大桥大体积混凝土施工温度控制关键技术[J]. 福建交通科技, 2018(3).
- [9] 张丹丹, 杨泽华. 空间立体冷却网对桥梁基础大体积混凝土温控效果研究[J]. 公路工程, 2017(3).