

大体积承台混凝土施工温度场及温控技术研究

陈龙

(中铁十一局集团第一工程有限公司,湖北 襄阳 441000)

摘要:桥梁的承台混凝土体积大,施工措施不当易产生温度裂缝,从而影响桥梁结构的耐久性,因此有必要对大体积混凝土施工温度场及温控技术进行研究。该文以南沙港铁路西江特大桥承台施工为背景,对自然冷却时温度场的变化规律进行数值分析,并对冷却水管的布置方式进行对比分析,进而开展承台智能温控系统设计和现场施工实践。结果表明:夏季自然冷却状态下,承台内部大部分区域温度场趋于一致,在靠近外侧面附近温度略有下降,在靠近顶部附近温度梯度较大;冷却管长度对散热影响较小,分区布置管道(冷却水从独立直管进入,从蛇形管流出)降温效率高,所设计并采用的智能温控系统具有较好的温控效果。

关键词:承台;大体积混凝土;温度控制;数值分析

随着中国基础设施建设的飞速发展,中国桥梁工程取得了巨大成就,相继建成了一批深水基础、大跨径、施工难度高的大桥或特大桥,如青岛海湾大桥、杭州湾跨海大桥、东海大桥、世界最长跨海大桥——港珠澳大桥等世界级桥梁。承台作为桥梁的关键下部结构,混凝土施工质量是保证桥梁基础安全和耐久性的关键工序。由于承台体积大,水化热高,导致内部温度、内表温差过大,容易产生温度裂缝,因此,混凝土浇筑过程中需采取温控措施来保证施工质量。

国内外学者利用理论分析、数值计算、现场工程实践等手段对大体积混凝土的温度计算、温度场及应力场分布特征以及现场温控措施进行研究,取得了显著成果。该文依托南沙港铁路西江特大桥项目,对承台大体积混凝土的温控措施进行研究,分析大体积混凝土温度场的分布规律以及冷却水管的布置方式,设计智能温度控制系统,并开展现场温控实践,以检验温控措施的效果。

1 工程概况

新建南沙港铁路西江特大桥主桥全长 1 118.7 m,为(2×57.5+172.5+600+4×57.5) m 钢箱混合双主梁等高塔斜拉桥,156#墩为西江特大桥主墩,承台尺寸为 44.7 m×36.8 m×6 m。承台设计采用 C40 混凝土进行浇筑,混凝土数量为 9 870 m³。

2 大体积混凝土绝热温升的 CFD 分析

大体积混凝土在浇筑之后的温度场主要受到内部水化热和自然环境温度变化的影响,表面和四周的围挡覆盖情况也是重要的影响因素。利用 CFD 数值分析技术对西江特大桥 156#承台所用材料进行水化热分析和绝热温升计算,得到自然冷却时温度场的变化规律,为后续分析提供数据支撑。

跨西江主桥 156#承台一次浇筑成型,每立方米混凝土水泥用量为 300 kg。考虑到承台水平截面为矩形,选取其 1/4 对称部分作为计算模型。

为减少网格数量和计算量,承台底部封底混凝土和四周围堰不再建立实体模型,采用参数输入的形式给定。承台顶部与外界大气环境通过对流换热的形式进行传热。采用佛山地区近 10 年统计的 8 d 最高和最低日平均温度的逐时温度平均值,作为环境温度的最不利工况进行分析,具体温度值见图 1。

初始条件:设定最不利工况,混凝土入模温度为 28℃。承台混凝土物性参数如表 1 所示。

为揭示承台内部温度场的变化规律,设置 2 个监测面,共 4 个监测点,如图 2 所示。其中坐标原点位于承台底部中心位置, xz 与 yz 平面为承台分割面,其对应的两个面为承台外部侧面。

由图 3 可知:边界测点和中心测点的温度变化趋

表 1 承台混凝土物性参数

混凝土 标号	比热/ [kJ · (kg · °C) ⁻¹]	比重	导热系数/ [K · (m · h · °C) ⁻¹]	绝热温 升/°C	热膨胀系数/ (×10 ⁻⁶ /°C)	泊松比
封底 C35	0.9	2 400	9	—	10.0	0.17
承台 C40	1.0	2 448	10	43.2	10.0	0.17

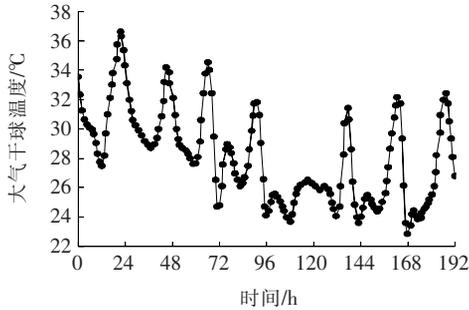


图 1 大气干球温度逐时分布图

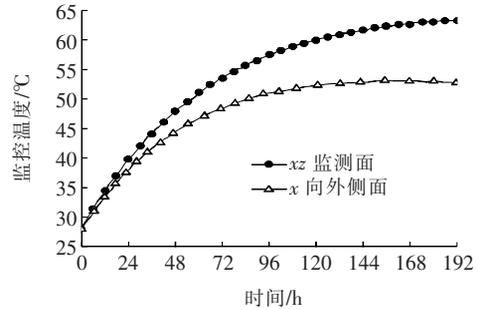


图 4 xz 监测面和 x 方向外侧面平均温度

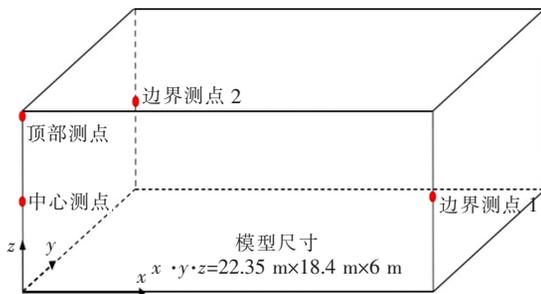


图 2 温度检测分布

计算得出各测点的温度变化曲线如图 3 所示。

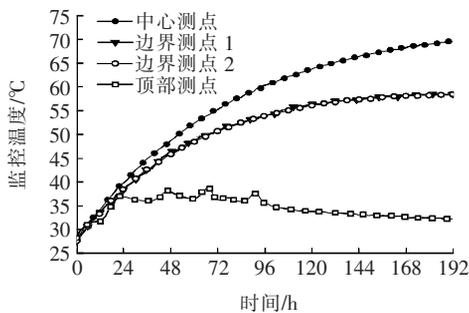


图 3 温度变化曲线

势基本一致,随着时间的增长而增大,增大速率随着水化热的减少而降低。中心测点的温度最高,顶部测点温度最低,最大温差达到 37.4 °C,这是由于承台芯部产生的水化热相对边界测点不易散出所致。顶部测点温度变化趋势相对其他测点比较平缓,由于顶部和大气环境接触,受大气环境温度变化而变化。

计算得到 xz 监测面和 x 方向外侧面的平均温度如图 4 所示。

由图 4 可知:承台的对称面 xz 监测面的平均温

度变化趋势基本一致,对称面温度高于对应外侧面,最大差值为 10.5 °C,可见承台侧面围堰结构对承台起到了一定的“保温”作用,从而避免了承台内部和表面出现较大的温差。

图 5 为不同时刻对称面和顶面的温度场分布云图。

由图 5 可知:顶面由于直接和大气环境接触,表面温度变化不大,而对称面温度逐渐升高,绝大部分区域温度趋于一致,在靠近侧面处温度略有下降,仅在靠近上表面处温度梯度变化较大。说明承台在夏季自然冷却状态下,绝大部分区域温度场趋于一致,在靠近外侧面附近温度略有下降,在靠近顶部附近温度梯度较大,这是由于承台混凝土的导温系数小,不利于热量扩散所致。

3 通水冷却方案研究

(1) 冷却水管长度对散热的影响特性分析

目前大体积混凝土冷却水管大多平行布置,管道长度一般小于 200 m,根据混凝土平面尺寸,相应布置一根管道或分区布置多根管道。平行型管道布置方案如图 6 所示。

由图 6 可知:在点划线分割的相邻管段内,由于管内水处于湍流状态,流速较快,管段两端水温变化较小,两管段内水温相差也较小。结合前文 CFD 计算和大量工程经验可知:当大体积混凝土外表面散热量较小时内部温度场梯度很小,可认为图 6 中虚线包含的六面体区间为孤立的传热系统,即虚线处可近似认为绝热,建立分析模型如图 7 所示。

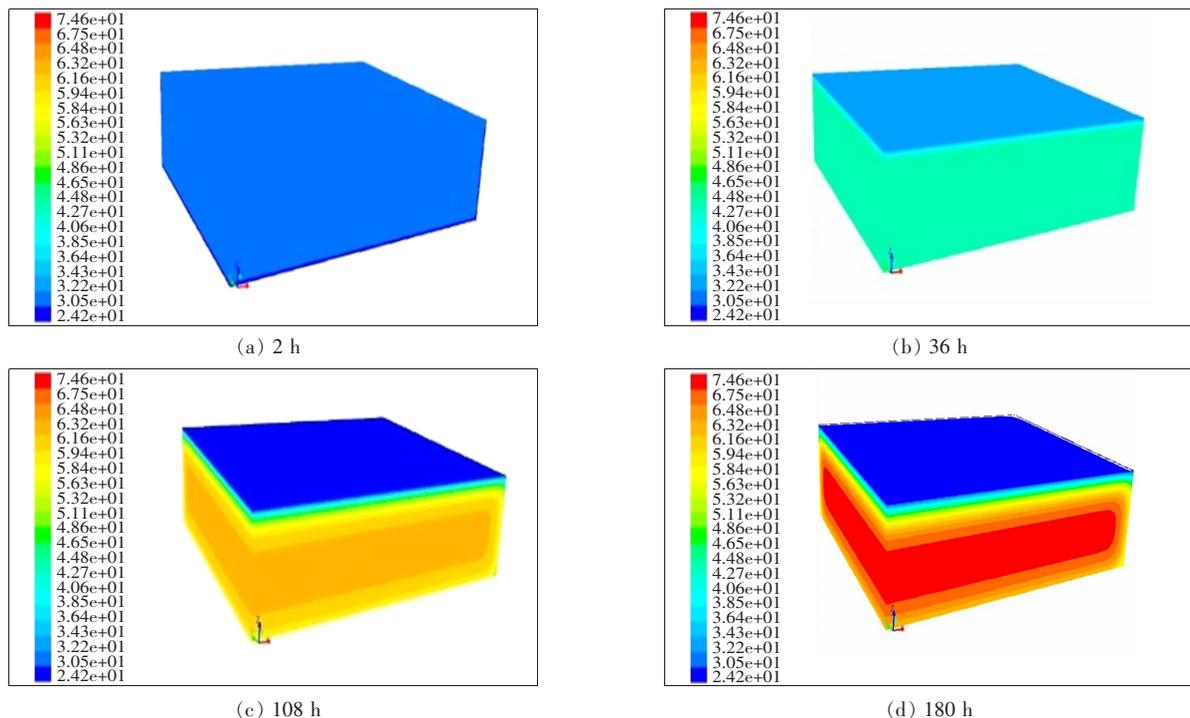


图5 不同时刻对称面和顶面的温度场分布云图(单位:℃)

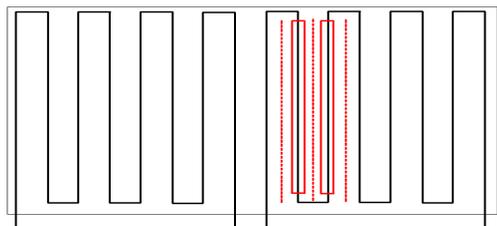


图6 平行型管道布置方案图

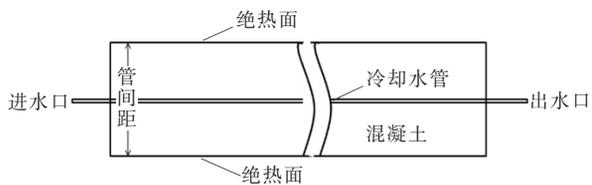


图7 绝热分析模型

模型结构和边界条件:冷却水管水平间距和垂直层距均相等,即模型中混凝土截面为正方形,混凝土块长为100~200 m,冷却水管直径为25~80 mm,水的流速为0.5~2.0 m/s,冷却水进口及混凝土入模温度均为25℃。为保证计算准确性,设定水管进出口端分别长5 m。混凝土块外表面为绝热边界条件,计算时考虑钢管壁厚和粗糙度等实际情况。该模型可认为是冷却水管在最不利散热(侧面由较厚围堰等围挡,顶部加水养护等)条件下的工况。

为掌握管道长度对散热的影响特性,设定模型参数为:管长分别为100、150和200 m,管间距为1 m,

管径为50 mm,洁净冷却水流速为1.5 m/s。共计算171 h管长对出水温度的影响(如图8所示)。

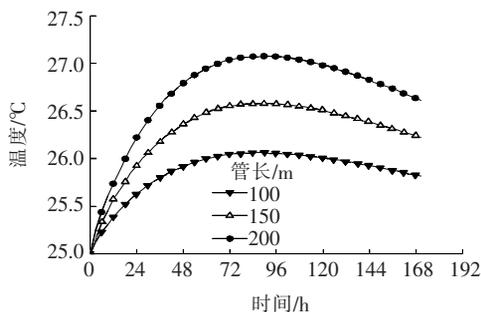


图8 管长对出水温度的影响

由图8可知:不同管长时出水温度均随时间的变化呈驼峰形曲线。管道越长,冷却水滞留时间越长,混凝土散热量越大,冷却水温升越大。管长每增大50 m,温升增大0.5℃。

另外,管长增加将导致水流过的路程增加,则会增大阻力损失。计算结果表明:3种管长下的阻力损失分别为43.41、65.12和86.83 kPa,单位长度阻力均为0.43 kPa。显然,阻力随管长线性变化,管道长度增加会加大所需的循环水泵扬程,从而增大水泵功率。在实际管道布置过程中,管道长度增加还会增加弯头数量,进一步增加局部阻力损失,对水泵的扬程和流量需求更大,所以管长应尽可能减少。计算所选择的长度范围下,冷却管道出口水温升温最大为2℃左右,符合前文模型假设。

(2) 冷却水管布置方案研究

根据前文分析可知:管网的布置和水的流速均影响单位质量循环水载热能力和水泵的功耗大小。冷却水管网按照冷却水由热中心区流向边缘区的原则分区布置,进水管口设在靠近混凝土中心处,出水口设在混凝土边缘处,每层水管网的进、出水口相互错开。

考虑到承台水平断面面积较大,贯穿整个断面的管道布局将影响冷却效果,所以采取对断面分区布置管道的方案,如图 9、10 所示。

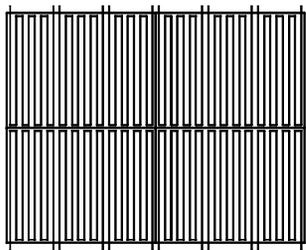


图 9 平行型 a 方案冷却水管整体布置图

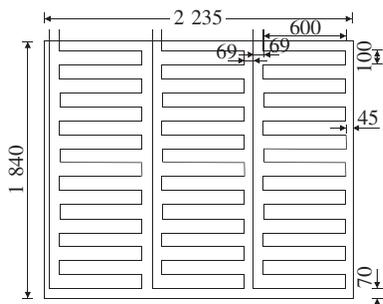


图 10 平行型 b 方案冷却水管整体布置图(单位:cm)

管道为 DN25 的钢管,水平布局均为平行型,间距分别为 93、91 cm,层距为 100 cm,每根管长为 150 m 左右,冷却水流速控制在 1.0 m/s,进口温度控制在 25℃以下。

经水力计算,a 方案的阻力构成为 150 m 沿程阻力+15 个弯头局部阻力;b 方案的阻力构成为 150 m 沿程阻力+40 个弯头局部阻力,a 方案阻力略小 15%。但是 b 方案弯头增加,将增大水的扰动,从而增大传热系数,且冷却水直接进入混凝土芯部,增大芯部传热温差,有利于散热。整体上 b 方案冷却效果优于 a 方案,且对水泵扬程没有太大的影响。

按照前文冷却水管道布置方案的分析,对 156# 承台设计结果如下:

管道布置采用平行型 b 方案,管道采用 $\phi 48$ mm $\times 3.5$ mm 的无缝钢管,水平布局均为平行型,间距为 91 cm,冷却水流速控制为 1.0 m/s,进口温度控制在

25℃以下。

水平方向:如图 10 布置,3 根独立水管均从左侧直管进水,蛇形管出水,其他 3/4 区域按对称布管。距外表面左右均为 45 cm,上下为 70 cm。单环路水管横向长度为 6 m,环路总长为 146 m。

垂直方向:层距为 85 cm,共设置 7 层水管,第 1~7 层水管平面距底部的距离依次为 0.4、1.25、2.1、2.95、3.8、4.65 和 5.5 m。

每一分区 7 层水管设置一台水泵,由分水器连接 21 根水管,水泵扬程和流量为 20 m、150 m³/h。分水器各设置一个安全泄水阀以保证后期控制通水速率,管径为 25 mm,分水器出口安装电磁阀。

混凝土内部管道总长 $146 \times 3 \times 4 \times 7$ m = 12 264 m,备料时考虑进出水立管布置方式按实际情况增加。

混凝土浇筑前,冷却水管确保进行不短于 1 h 的加压通水试验,查看水流量大小是否合适,发现管道漏水、阻水现象时及时修补。

每层循环冷却水管被混凝土覆盖即可通水,初始抽取深层江水作为冷却水,后期根据温度监测结果,通过积水池调控水温使进水温度与混凝土内部最高温度小于 25℃。

待冷却水管停止循环混凝土养生完成后,先用空压机将水管内残余水压出并吹干冷却水管,然后用注浆机向水管压注强度 40 MPa 以上的微膨胀水泥浆,以封闭管路。

4 智能温度控制实践

(1) 温度测点布置

为实时监控承台内部的温度分布情况,需要在内部布置温度测点。在两层冷却水管中间平面沿对称轴布置,测温点共设置 6 层,每层布设 16 个测点。第 1~6 层测点平面距底部距离依次为 0.1、0.9、2.5、3.4、5.1 和 5.9 m。温度测点布置如图 11 所示,其中 N1 和 N9 测点距离边界 10 cm, N12 距离顶角点 15 cm。N13、N14、N15 和 N16 测点为预留测量冷却水进口及两个出口的测点(两个出口选择 1/4 部分左右两个管道出口,中间管道出口不测量)。

(2) 智能温控系统设计方案

对每个管路单独控制水流量来控制温度场。电控系统采用 PLC 为核心控制器,温度采集传感器采用 Pt100 二线制接线方式,按照测温点布置方案预埋在混凝土内部。

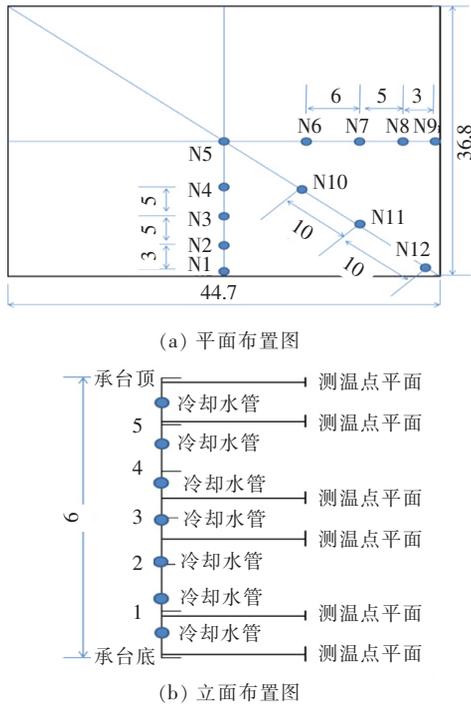


图 11 温度测点布置图(单位:m)

(3) 分水器设计与安装

156# 承台浇筑过程中设置 4 个集分水器,主管管径为 25 cm,长度为 2.49 m,主管上焊接 6 根下支管,下支管上焊接法兰盘与电磁阀连接,每个分水器安装一个安全泄水阀。下支管长度为 17 cm,伸入分水器 2 cm,管径为 8 cm,间距为 32 cm。集分水器加工图如图 12 所示。

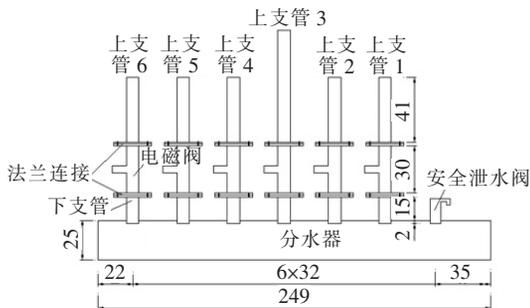


图 12 集分水器加工图(单位:cm)

上支管管径为 8 cm,上支管 1、2、4、5、6 长度为 41 cm,上支管上分别焊接 3 根分支管,支管 3 长度为 71 cm,支管上分别焊接 6 根分支管,分支管管径为 2.5 cm,长度为 32 cm,伸入支管 2 cm,分支管之间的间距为 10 cm,分支管与上支管采用满焊连接。

(4) 156# 承台温控效果分析

156# 承台历时 66 h 整体一次性浇筑完成。由于

正值夏季,天气炎热,承台坑内空气流通不畅,在日照的作用下大气、钢筋和水管温度均较高,故每根冷却水管在浇筑混凝土开始之前 1 h 即通水,智能温控系统随即开机工作,总计采集了 20 d 的数据。

由于温控系统的采样频率为 20 min 采集一次数据,总数据量庞大,故选取 3 h 作为间隔进行统计分析,分别选取每层中心 4 个测点(4、5、6、10)及承台边缘处 5 个测点(1、2、8、9、12)进行分析。由于篇幅所限,该文仅列出部分区域测点的温度变化曲线,如图 13 所示。

由图 13 可得:

(1) 混凝土浇筑前的温度为 28 °C 左右,空气环境温度为 27 °C 左右,冷却水初始温度为 25 °C。由于前期水化热较大,且大于冷却水带走的热量,所以在混凝土浇筑后的 36 h 内,承台混凝土内部温度迅速升高。在 36 h 之后,水化热产生的热量小于冷却水带走的热量,温度开始缓慢下降。

(2) 在同一水平层内,中心区域各测温点的升降温速率比较接近,外表面区域的升降温速率也比较接近,且前者大于后者,这是因为外表面区域向外界散热所致。初始下降速率略大,为 2.1~3.4 °C/d,后期下降速率略小,为 1~1.3 °C/d。

(3) 同一水平层内,承台混凝土内部各测温点温度变化趋势基本一致,大部分区域温度比较接近,内部温度梯度较小,最高温度为 55 °C 左右。中心测点温度相对不是最大值,这与常识相悖,原因是冷却水管道进水管在中心部位,温度较低的冷却水首先对中心区域进行冷却,使其温度反而略低于大部分区域。混凝土温度最低处位于承台四周处,此处温度最高值为 45 °C,说明四周围堰和环境加强了散热,但是由于混凝土导热系数较低,造成四周表面处温度梯度较大。芯表温差最大为 15 °C 左右,也说明围堰等外部“保温”效果较好,避免了芯表温差的增大。

(4) 承台顶层温度相对较高,而不是随外界环境温度而变化,这是因为当地气温较高,日照强烈,加上采用冷却水管出水养护承台顶部,使得承台顶部形成一个良好的“保温层”。

(5) 实际测量数据与前文模拟计算数据比较发现,相同工况下温度变化趋势基本一致,最高温度比较接近,说明模拟计算采用的基础数据比较接近实际。

通过采用智能温控技术,承台混凝土外观质量得到了保证,表面平整,且无裂缝、蜂窝麻面现象。

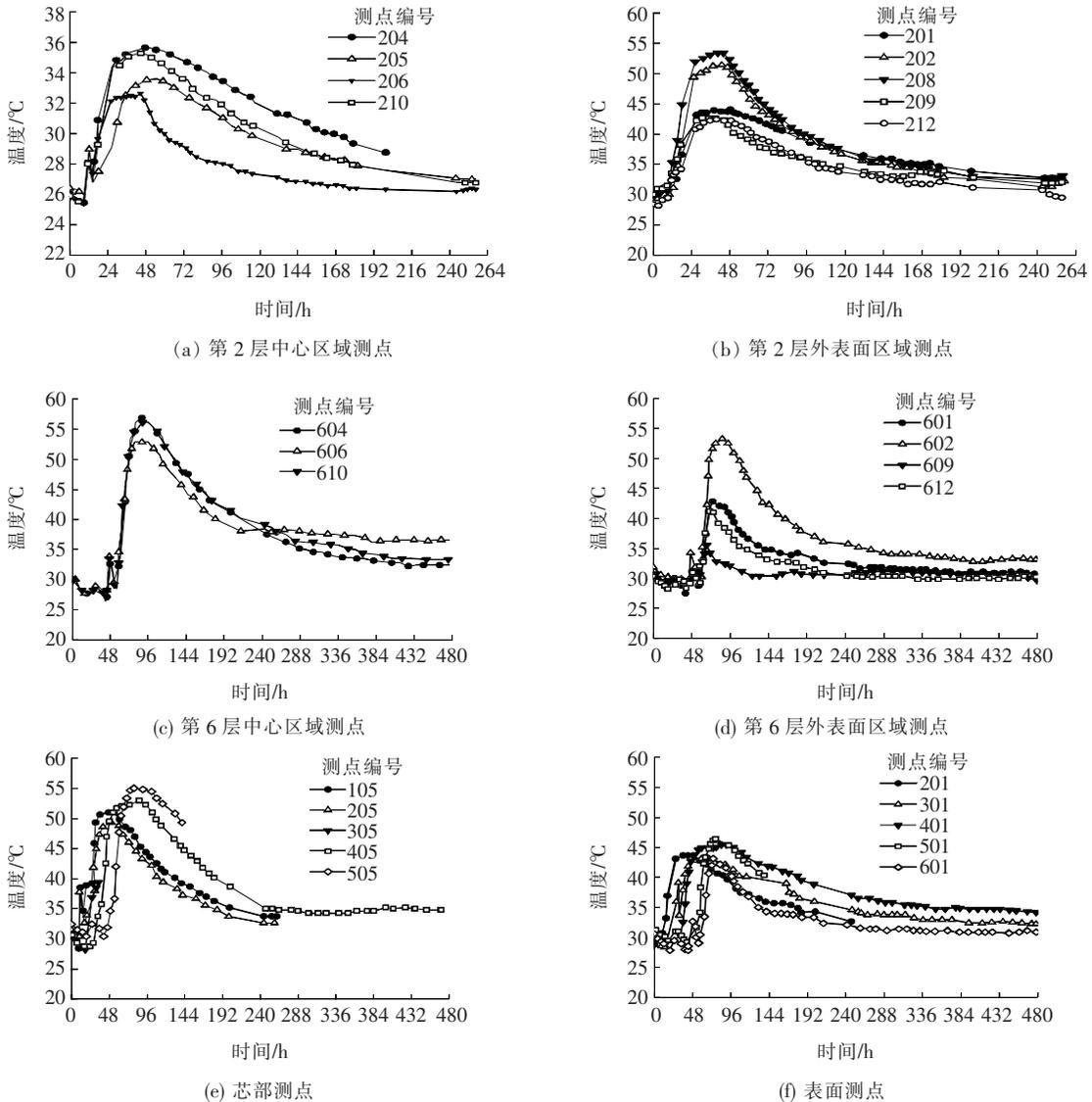


图 13 不同位置测点温度变化曲线(注:测点编号 xyz 中, x 为第 x 层, yz 为编号)

5 结论

(1) 自然冷却时,承台顶面由于直接和大气环境接触,表面温度变化不大,承台内部温度随浇筑时间的增大而升高,速率逐渐降低。内部温度场趋于一致,在靠近外侧面附近温度略有下降,在靠近顶部附近温度梯度较大。

(2) 冷却水管长度对大体积混凝土的散热效果影响不大。水平方向分区对称布置管道,通过合理设置管道参数,可实现良好的降温效果。

(3) 在承台施工过程中设置智能温度控制系统,对冷却水进水温度、承台温度进行实时监控和调节,具有较好的温控效果,可有效保证施工质量。

参考文献:

- [1] 赵建,田亮,高伟. 混凝土水化效应的抗裂性能优化与数值模拟分析[J]. 铁道建筑技术,2017(8).
- [2] 祝云,温超凯,刘晓钰,等. 热带海洋地区 C50 大体积混凝土施工技术[J]. 中外公路,2019(6).
- [3] Truman K Z, Petruska D J, Norman C D. Creep, Shrinkage, and Thermal Effects on Mass Concrete Structure[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(6): 1 274-1 288.
- [4] 魏德敏,洪川海,李重阳,等. 大体积混凝土基础的水管冷却温度场研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016(4).
- [5] 张超,常晓林,刘杏红. 大体积混凝土施工期冷却水管埋设形式的优化[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014(3).
- [6] 谢朋林,强伟亮,龙永游. 文莱淡布隆地区大体积混凝土施工技术[J]. 施工技术,2019(15).