

# 下承式钢管混凝土系杆拱桥冬季施工技术措施

韩峰, 马帅帅

(中交一航局第五工程有限公司)

**摘 要:**为解决工程在冬季施工过程中气温低,昼夜温差大,拱脚、预应力孔道和拱肋等关键构件施工质量难以保证等问题,以蒙华铁路跨兰嘎一级路大桥 64 m 下承式钢管混凝土简支系杆拱桥为例,采取对拱脚等关键构件保温,对测温数据进行实时分析,并进行同条件养护试块抗压试验;在预应力孔道压浆前、压浆过程中及压浆完成后对梁体进行测温,结合测温数据及现场实际情况对保温效果进行动态调整;对整个拱肋混凝土压注及养护过程进行测温,结合拱肋混凝土强度增长情况对该保温养护措施进行分析和动态调整。结果表明,拱脚、预应力孔道、拱肋等关键构件混凝土冬季施工措施有效,保温养护效果良好,可为类似工程提供参考。

**关键词:**冬季施工;保温养护措施;动态调整;低温压浆

## 0 引言

北方冬季施工过程中,混凝土的养护措施直接影响施工质量、工期、成本。低温天气不利于混凝土的强度增长和快速成型,混凝土养护的三要素是介质的温度、湿度及养护延续时间<sup>[1]</sup>。当混凝土养护温度升高,水泥水化反应速率加快,混凝土强度增长也快。但若反应速率太快,则可能导致混凝土结构不密实,影响混凝土后期强度及结构安全使用功能<sup>[2]</sup>。在负温作用下,混凝土内部水分冻结成冰,体积膨胀,产生的冻胀应力破坏了混凝土内部结构,使混凝土的物理、力学性能遭受损害,引起混凝土的冻害<sup>[3]</sup>。混凝土导热性较差,对于大体积混凝土,水泥水化反应产生的热量聚集在混凝土内部,导致混凝土温升较高<sup>[4]</sup>。若养护温度较低,混凝土内表温差超过一定范围时,将导致混凝土开裂<sup>[5]</sup>。北方冬季施工中,对于后张法有黏结预应力混凝土梁,在预应力束张拉完成后,通过压浆孔灌注水泥浆或其他类似材料,若压浆后不及时采取保温养护措施或采取的保温措施不当,当梁体温度过低时可能产生冻胀问题,当冻胀应力超过一定范围时,将会导致梁体预应力束波纹管周围的混凝土开裂,影响结构耐久性<sup>[6]</sup>。一般情况下,新浇混凝土养护温度控制在 5~20℃ 之间为最佳<sup>[7]</sup>。从以往工程实践中可知,在冬季施工中,混凝土浇筑完成后的养护时间越长,混凝土强度发展越好<sup>[8]</sup>。在实际施工过程中,后续的施工工序又会对先前浇筑混凝土的保温养护措施造成一定的影响,间接影响混凝土的养护质量。因

此,冬季施工过程中,混凝土的保温养护是一个综合考虑、全盘布局的问题,既不能影响后续施工工序的正常进行,后续的施工工序也不能损害前期浇筑混凝土的保温养护效果。

## 1 工程概况

蒙华铁路跨兰嘎一级路大桥桥梁全长 130.65 m,中孔以 64 m 钢管混凝土简支拱跨越兰嘎一级路,线路中心与兰嘎一级路交角 51°40',桥下最小净空 5.56 m,两侧边孔采用 24 m 简支 T 梁。

桥梁主梁为双向预应力结构,端横梁和中间横梁设置横向预应力筋,梁部全长 66.5 m,采用单箱双室预应力混凝土箱形截面。跨中及端部梁高均为 1.9 m,梁端设进入孔,中横隔板设过人孔,边、中腹板每个箱室设置 1 个通风孔。梁部面板宽 12 m,底板宽 9.56 m。

拱肋横断面采用哑铃型钢管混凝土等截面,断面高 2.2 m,钢管外径 0.9 m,每根拱肋的两钢管之间用腹板连接。拱肋之间设 3 道一字撑和 2 道 K 撑。拱管内灌注 C50 补偿收缩混凝土。拱肋轴线采用二次抛物线,计算跨度为 64 m,拱肋矢高 12.8 m,矢跨比为 1:5,两榀拱肋中心距 8.11 m。

桥面纵坡采用全桥刚性旋转实现,吊杆垂直梁部平行布置,间距 5 m,全桥共设 9 对吊杆。

## 2 拱脚混凝土浇筑及保温养护

为保证拱脚与系梁的整体性,要求拱脚系梁混凝土一次浇筑完成且不可有施工缝。实际施工过程中,浇筑拱脚混凝土前,系梁腹板、跨中 40 m 段顶板及翼缘板已浇筑完成。为保证新旧混凝

土的整体性,浇筑前先将新旧混凝土交界面凿毛,并在凿毛界面喷水使其表面湿润但不积水。由于拱脚钢筋间距过小,为保证拱脚混凝土的密实性,用泵送自密实混凝土(流动性较大)浇筑拱脚,每层浇筑完成后用附着式振捣器振捣。因混凝土流动性较大,为确保顶板标高及拱脚混凝土顺利浇筑,顶板浇筑完成后需间歇4 h。考虑模板支护、混凝土运输及泵车堵管等问题,拱脚混凝土浇筑分2次进行,每次间隔时间在2 h以内。

在大体积混凝土施工过程中,施工质量控制的重点是混凝土内表温差不超过 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[9]</sup>。冬季施工中,既要控制混凝土内表温差,还要确保混凝土强度的增长不影响紧后施工工序按时开始。浇筑前,需按预定的保温养护措施计算在本次浇筑过程中及浇筑完成后混凝土内部产生的水化热,用理论计算指导制定合理的保温养护措施。

### 2.1 拱脚 ANSYS 水化热分析模型的建立

使用 ANSYS 软件建立水化热分析模型,根据混凝土浇筑方案,通过定义生死单元将梁端顶板及翼缘板、拱脚划分为3个浇筑阶段,其中梁端顶板及翼缘板为第1阶段浇筑,拱脚分2个阶段浇筑。按计划浇筑时给新旧混凝土交界面节点赋予初始温度。保温养护时,拱脚模板采用钢板,导热性较强,易导致混凝土温度的降低,故在拱脚表面按预定保温棚内的温度施加初始温度、空气对流系数。浇筑每层混凝土时,按前期混凝土浇筑时浇筑温度模拟该层混凝土单元的初始温度。第1层混凝土浇筑完成后时间间隔按4 h计,第2层混凝土浇筑完成后的时间间隔按2 h计。水化热分析模型如图1所示。通过计算可知,拱脚混凝土在养护期间内部的最高温度为 $34.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若要控制混凝土内表温差且保证混凝土强度的增长不影响后续施工工序的按时进行,则要求混凝土养护温度不低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

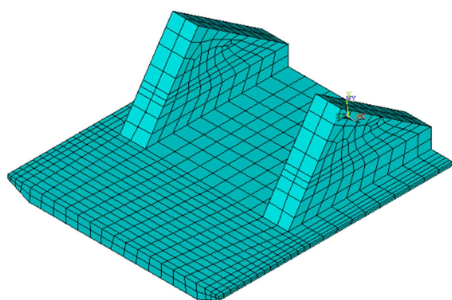


图1 水化热分析模型

### 2.2 保温养护措施

混凝土浇筑前,在左右两幅拱脚前侧、后侧及顶部预埋测温传感器。翼缘板和梁端采用木模板,拱脚采用钢模板,模板支护完成后用脚手架、棉被搭设暖棚,棚内放置8个火炉和5个温度计。混凝土浇筑完成后,需立即启动火炉升温加热,以保持暖棚内足够的温度,避免温度过低导致混凝土凝结时间变长。火炉开始加热后需每隔4 h对暖棚内温度进行1次监测,气温骤降和寒潮期间,应适当增加温度监测次数。以距混凝土面50 cm的温度为准,测四边角和中心温度的平均数为暖棚内气温值,如发现温度不达标,及时调整火炉温度保障措施,可以在火炉周围铺设保温材料,如保温棉、保温毡等,确保火炉能够持续保持温度在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,以确保混凝土强度稳定增长。拱脚混凝土浇筑完成后预留同条件养护试块,试块应远离火炉,并在混凝土浇筑完成72 h后做抗压试验,为拆模提供依据。混凝土浇筑完成后利用火炉给暖棚加温,拆除模板后,用棉被加电热毯包裹拱脚继续养护。

### 2.3 现场实际测温及数据分析

暖棚内温度计及预埋在拱脚混凝土内部测温传感器读数如图2所示。其中暖棚代表暖棚内温度计读数;左幅1、左幅2分别表示预埋在左幅拱脚与顶板相交处前侧、后侧的温度传感器读数;左幅3表示预埋在左幅拱脚顶部测温传感器的读数;右幅1、右幅2分别表示预埋在右幅拱脚与顶板相交处前侧、后侧的温度传感器读数;右幅3表示预埋在右幅拱脚顶部测温传感器的读数;理论1和理论3分别表示通过水化热分析模型计算的左侧及右侧拱脚混凝土内部温度理论值。

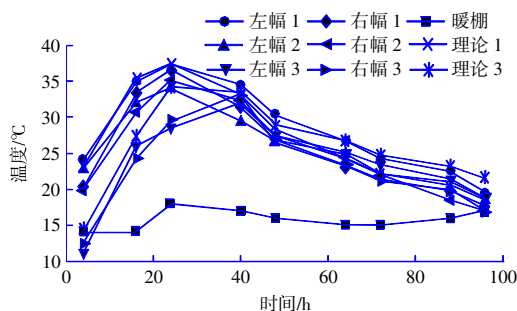


图2 拱脚养护现场实测温度曲线图

由图2可知:1) ANSYS 水化热分析模型计算结果与现场实测温度基本吻合,理论计算指导

实际取得了良好的保温养护效果；2) 采取此种保温措施可通过调整火炉中煤的用量将保温棚内的温度控制在 15℃ 左右，即拱脚养护温度受外界环境温度影响较小。搭设暖棚采用的棉被和脚手架可重复利用，较为经济，建议在北方冬季混凝土施工中采取此种保温养护措施。

### 3 预应力孔道压浆梁体保温

#### 3.1 梁体保温措施

预应力束张拉完成前，就预应力孔道压浆前梁体加温、压浆过程中及压浆完成后梁体保温措施进行试验。用棉被和电热毯包裹系梁顶板、翼缘板、腹板及拱脚，棉被在上，电热毯在下，并在系梁每个箱室各放置 1 台功率为 3 kW 的电暖气，根据现场实际情况，用篷布包裹梁体支架，并在底板下放置 32 个装满煤的油桶，用油桶内的煤给梁体底板升温。梁体加温 24 h 后，通过预埋的测温元件给拱脚和系梁测温，采取此种保温措施在外界气温降低至 -18℃ 时测得梁体底板最低温度为 7.5℃，此种保温措施可行。在预应力孔道压浆开始前、压浆过程中及压浆完成后 3 d 内在每天 6:00—8:00 对梁体进行测温，确保梁体温度不低于 5℃。

#### 3.2 现场实测数据分析

施工现场测温曲线图如图 3 所示。

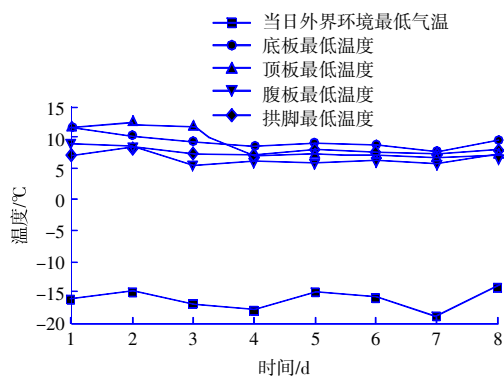


图3 预应力孔道压浆现场实测温度曲线图

由图 3 可知：1) 预应力孔道压浆开始后 2 d 梁体各处温度均在 7℃ 以上，自预应力孔道压浆开始至保温养护结束，梁体底板、腹板、拱脚顶板最低温度均在 5℃ 以上；2) 底板、腹板、拱脚最低温度与外界环境最低气温变化趋势基本一致。

### 4 拱肋混凝土保温养护

#### 4.1 保温措施

拱肋焊接完成后在拱肋与拱脚相接处、拱肋

内外  $L/4$  处、拱肋内外  $L/2$  处焊接 5 个测温传感器，全桥共焊接 10 个。用加强型防爆阻燃电伴热带缠绕拱肋的方式给拱肋加温，缠绕时电伴热间距控制在 20 cm 左右，然后用土工布包裹拱肋的方法给拱肋保温，土工布包裹层数不少于 5 层。拱肋混凝土压注完成后保温养护 7 d，压注前 24 h 给拱肋升温。在每天 6:00—8:00 及 14:00—16:00 实测混凝土压注前、压注过程中、压注完成后 7 d 内拱肋表面温度。该施工工序的后续工序是安装、张拉吊杆，按设计要求张拉吊杆时拱肋混凝土强度须达到设计强度的 100%<sup>[10]</sup>，拱肋混凝土的保温养护不仅要防止拱肋混凝土受冻，还要确保混凝土的强度增长速度不影响吊杆张拉按时开始。

#### 4.2 现场实测数据分析

外界环境最低温度、外界环境最高温度、拱肋最低温度、拱肋最高温度如图 4 所示。

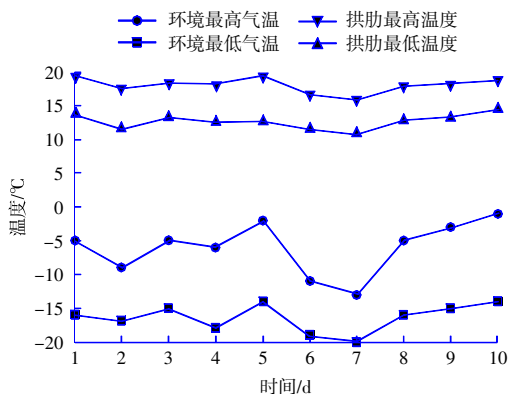


图4 拱肋施工现场实测温度

由图 4 可知：1) 外界气温最低 -20℃，最高 -3℃，拱肋温度介于 10~20℃ 之间，混凝土养护温度控制在最佳范围内；2) 拱肋温度受外界环境气温的影响较小。保温养护 7 d 后，在拱肋上开孔，用混凝土回弹仪测得拱肋混凝土强度为 50 MPa，达到设计值的 100%。

### 5 结语

1) 拱脚混凝土是系杆拱桥传力体系正常工作的核心构件，浇筑前用 ANSYS 有限元软件建立拱脚浇筑及养护过程水化热分析模型计算水化热，指导拱脚浇筑完成后的保温养护，取得了良好的养护效果。

2) 结合施工现场实际温度监控和同温养护试件的强度试验，对冬季施工过程中的保温养护措施进行了实时监测和分析。结果表明，采取的拱

脚混凝土、拱肋混凝土保温养护措施效果良好。

3) 在预应力孔道压浆时及压浆完成后的保温养护过程中采取的措施保证了梁体温度满足规范要求及施工安全。施工过程中采取的保温养护措施可为类似工程施工提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 姚刚,余志给,杨阳,等.单室箱梁电热器养护温度场及温度应力分析[J].土木工程学报,2018,51(3):109-114,128.
- [2] 徐岳,王亚军,万振江.预应力混凝土连续梁桥设计[M].北京:人民教育出版社,2000.
- [3] 王晓光.浅谈冬季混凝土施工的质量控制措施[J].施工技术,2010,39(S2):195-197.
- [4] 余志给.单室箱梁电热器养护温度场及温度效应研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [5] 裴立峰.大体积混凝土温度裂缝控制研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2008.
- [6] 何凌.32 m 预应力后张梁波纹管管道浆体早期冻胀与沿管道裂纹成因关系的试验研究[D].西安:西南交通大学,2006.
- [7] 刘旭轩.高原常年低温地区大跨连续梁施工质量控制技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2015.
- [8] 蔡建钢.高墩大跨连续刚构桥的温度效应研究[D].西安:长安大学,2005.
- [9] 才素平.大体积混凝土施工技术及其应用[D].西安:西安建筑科技大学,2009.
- [10] 刘学明.郑万铁路尼尔森体系钢管混凝土拱桥施工监控及吊杆张拉控制优化研究[D].兰州:兰州交通大学,2017.