

PC 梁截面温度梯度对钢绞线预应力影响规律研究

李晓超

(中铁十二局集团第二工程有限公司, 山西 太原 030024)

摘要:该文以北京轨道交通燕房线 01 标高架区间 30 m 预应力混凝土简支箱梁施工为背景,开展锚下预应力、梁体温度的同步测试。基于梁截面不同高度温度实测数据,提出温度梯度分布模型,对温度梯度影响下钢绞线预应力变化展开研究;建立考虑截面温度梯度影响的数值模型,对梁体内的钢绞线预应力值变化量进行分析;将现场试验实测值及数值模型计算结果进行对比。研究表明:梁体截面竖向温度分布变化明显,顶板位置温度变化量最大,腹板上层与顶板交界位置受翼缘遮荫作用影响,温度变化不明显。在腹板下层及底板仍能受到部分阳光照射,使得该位置处的温度变化较腹板上层相对明显。考虑大气整体升温 and 正温度梯度的数值有限元模型能够有效预测温度对锚下有效预应力的影响。大气升温 and 正温度梯度综合作用下,锚下有效预应力有增大趋势,该文测试和数值模拟的最大值达到 4 kN 左右。综合考虑预应力的张拉时间,建议选择夜晚温度较低时进行预应力张拉施工,对今后预应力混凝土简支箱梁施工具有一定借鉴作用。

关键词:桥梁工程; 预应力钢绞线; 温度梯度; 现场试验

拉脱法(反拉法)检测技术作为一种预应力无损检测技术,具有操作便捷、精度较高等特点,在施工期预应力检测领域得到广泛应用。桥梁结构长期处于自然环境中,经受周期性温度变化、太阳辐射等因素影响,其内部形成明显的温度梯度。钢绞线张拉完成时和检测时温度不能保证完全一致,不同温度梯度下的钢绞线锚下有效预应力也会不同。

已有研究表明:温度变化对钢绞线的预应力值存在一定影响,且温度变化越大钢绞线松弛率越大;Sal-lal R Abid 开展了混凝土箱梁温度场测试研究,建立了竖向及横向最大温度梯度计算经验公式,但未涉及温度效应影响下的钢绞线应力变化;周浩等测试了钢绞线在 15 个温度水平下的热膨胀应变,但该研究是在高温或过火条件下开展的材料性能试验,对大气环境中的钢绞线力学变化规律指导意义不大;杨锡阶就温度对松弛率的影响及不确定度进行了评定。

综上所述,目前预应力结构中温度效应的研究主要集中在预应力抵抗结构温度效应的影响方面。在周期性变化的环境温度场作用下,钢绞线预应力值本身的变化规律未能得到足够重视。研究截面温度梯度对预应力变化的影响,不仅对拉脱法检测结果可进行精确修正,保证拉脱法测试值的准确性,有效控制张拉施

工质量,而且对预应力混凝土结构的耐久性、安全性起到积极作用。

该文依托北京轨道交通燕房线 01 标高架区间的 30 m 预应力混凝土简支箱梁,采用温度传感器及锚下压力传感器同步采集,开展为期 2 d 的锚下有效预应力与温度梯度测试,研究截面温度梯度对不同钢束预应力变化的影响规律,为进一步研究温度梯度对拉脱法检测结果修正奠定基础。

1 梁体截面温度梯度与锚下预应力测试

1.1 工程概况

依托工程预制箱梁共 186 片,箱梁长度有 32、30、28、26、25、20 m 共 6 种形式。

因为跨度 30 m 的箱梁数量最多,所以选择 30 m 箱梁预制为研究对象。

跨度 30 m 梁体共有 10 束钢绞线,其中 N1、N2、N5 钢束内均为 5 根预应力钢绞线,N3、N4 钢束内有 6 根预应力钢绞线,张拉控制应力为 $0.75f_{pk}=1\ 395$ MPa,张拉过程采用两端张拉,张拉力与延伸量双参数控制张拉应力,梁体截面尺寸如图 1 所示。

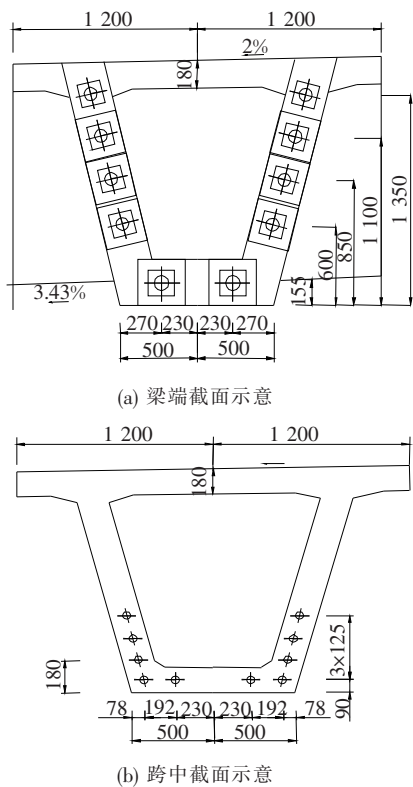


图 1 梁体尺寸(单位:mm)

号、10 号温度传感器距梁顶及梁底均为 3 cm,各测点分布位置如表 1 所示。

表 1 温度测点布置

测点编号	距梁底 距离/m	测点编号	距梁底 距离/m
1	1.57	6	0.65
2	1.45	7	0.50
3	1.25	8	0.35
4	1.05	9	0.20
5	0.85	10	0.05

采用穿心式压力传感器测试钢绞线锚下有效预应力值,传感器沿截面高度方向置于 N1~N5 束锚下,采用温度计直接测试大气温度的变化。梁体中温度传感器沿截面高度方向的布置如图 2 所示。

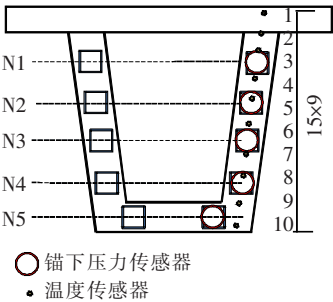


图 2 测点布置截面(单位:cm)

1.3.2 测试过程

进行锚下压力及梁体截面温度 48 h 同步测试,温度及锚下压力传感器采集频率为 1 次/(10 min),测试过程如图 3 所示。

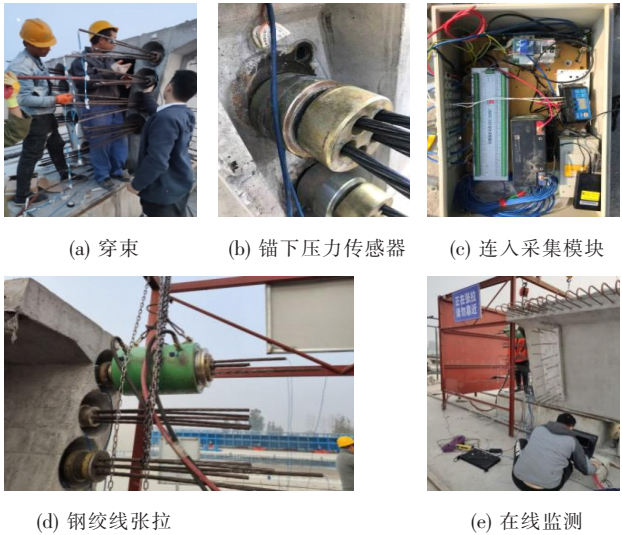


图 3 测试过程

(a) 穿束 (b) 锚下压力传感器 (c) 连入采集模块 (d) 钢绞线张拉 (e) 在线监测

1.2 张拉要求

为了保证预应力张拉的施工质量和安全,张拉施工做好张拉“双控”。

张拉前检查千斤顶、油压表是否在有效期范围,千斤顶有效工作期限为 3 个月(且张拉不超过 200 次,主要部件更换后应重新检定)。油压表应选用防震型,表面最大读数为张拉力的 1.5~2.0 倍,精度不应低于 1.0 级,另外,检查千斤顶、锚环、传力筒以及预留孔道四轴线是否同心。保证两端对称同步。

张拉过程中做好应力的控制。根据张拉摩阻试验结果确定摩阻损失,再计算出张拉力。张拉时要两端、左右同步对称张拉,保证两端伸长量一致。认真量取并记录油表读数、夹片回缩量、钢绞线伸长量以及持压时间。以油压表读数控制张拉力,伸长值作校核,如果张拉油表读数与计算的油表读数不相符以及实际伸长量超出计算伸长量的±6%时,张拉操作人员要立即停止张拉,分析原因并处理后,方可继续进行张拉。

1.3 测试方案

1.3.1 测试设备

浇筑混凝土前,在距梁端 1 m 位置的钢筋骨架内,沿高度方向间隔 15 cm 布置温度传感器(预埋式 JMT-36B 智能温度传感器),共计 10 个温度测点,1

1.4 温度梯度

测试时长为 48 h,沿截面高度各温度测点随时间变化如图 4 所示。

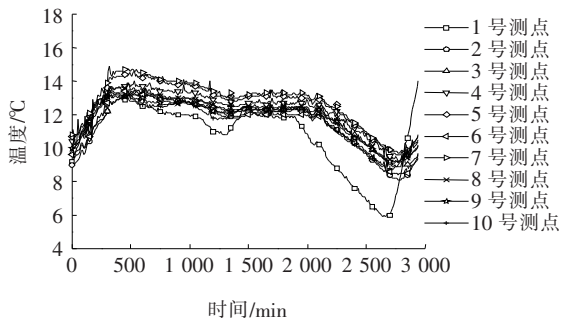


图 4 测点温度随时间变化曲线

由图 4 可以看出:48 h 内各测点温度随时间呈周期性变化,白天梁体温度整体上升,夜晚温度整体下降。沿截面高度方向存在明显的温度梯度,靠近梁体上缘位置的 1 号测点由于受到太阳直射的影响,变化规律与其他测点存在明显差异,其他各测点温度变化趋势基本相同。进一步分析温度分布规律,测试过程中第 2 700~2 940 min(08:00~12:00 时段),混凝土内部温度存在明显温度梯度变化,选取此时间范围内的温度数据作为分析数据,以温度最低的测点 7 为基准温度得到截面竖向温度梯度如图 5 所示。

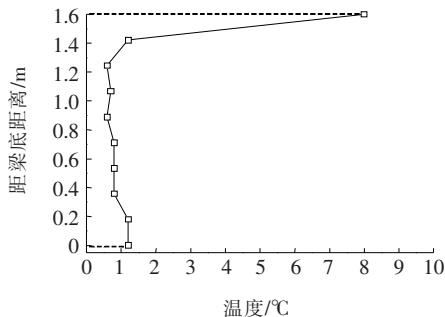


图 5 梁体竖向温度梯度(7 号测点)

由图 5 可知,梁体截面竖向温度分布变化明显,顶板位置温度变化量最大,腹板上层与顶板交界位置受翼缘遮荫作用影响,温度变化并不明显。在腹板下层及底板仍能受到部分阳光照射,使得该位置处的温度变化较腹板上层相对明显。后续将利用该温度梯度分布开展进一步分析。

1.5 时间效应修正后考虑温度效应影响的锚下有效预应力测试值

钢绞线锚下预应力残余率时程变化参见图 6。

由图 6 可知:张拉结束后,受时间及温度效应双重作用影响变化显著,预应力值随时间变化而逐渐减小,

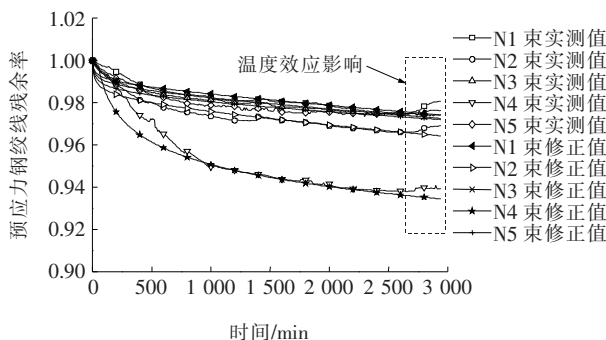


图 6 钢绞线锚下预应力时程曲线

前期衰减变化显著,后期逐渐趋于平稳。同时锚下预应力随温度变化产生一定的周期性波动,当白天温度升高时,锚下预应力值增大,夜晚温度降低时,锚下预应力随之减小,该变化特征与文献[8]中的研究结论一致。

该文主要研究温度对预应力的影响,因此需对测试结果进行修正,采用文献[8]中的修正公式剔除时间效应对预应力的影响,公式为:

$$y = t^a e^{b(t-1)} \quad (1)$$

式中: t 为张拉锚固后经历的时间, $t \geq 1$ min; y 为钢绞线锚下预应力残余率,即每个时刻钢绞线剩余预应力与初始预应力的比值; a 与 b 为待定系数。

基于式(1),对 N1~N5 束钢绞线分别采用线性拟合,得到仅考虑时间效应的锚下预应力变化曲线和实测曲线对比如图 7 所示。

将图 6 中各束钢绞线实测值分别减去对应修正值,即得到仅考虑温度效应影响下的锚下有效预应力变化量,选取 2 700~2 940 min(08:00 到 12:00 时段)温度变化最大的时间段进行分析,结果见图 7。

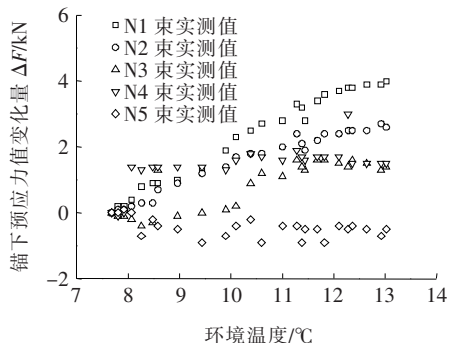


图 7 温度效应影响下锚下有效预应力变化

由图 7 可知:在温度效应影响下,除 N5 束外,其余钢绞线锚下有效预应力值随温度升高均有增大趋势。各束预应力值变化量存在差异,靠近截面上缘的 N1 束变化最大达到 4 kN,沿梁体截面高度方向,从上至下各束预应力值变化量逐渐减小。分析其原因为:环境温度

整体升温 and 温度梯度综合影响下,梁体顶部变形较大从而引起靠近截面上缘的钢绞线预应力值变化显著,而截面下缘受温度梯度影响较小,锚下预应力值变化并不明显。由此可见竖向温度梯度效应对锚下预应力变化存在一定影响,针对此规律进一步开展基于数值模拟的截面温度梯度对钢绞线应力特性的影响分析。

2 基于数值模型的截面温度梯度下钢绞线应力特性分析

2.1 有限元模型

利用 Abaqus 有限元分析软件开展考虑截面温度梯度下钢绞线预应力值的变化研究,采用钢筋混凝土数值模型中的分离式有限元模型进行模拟。将箱梁沿高度方向分层,每层厚度根据分层高度处的尺寸进行调整,每层的厚度及高度参见图 8 及表 2。

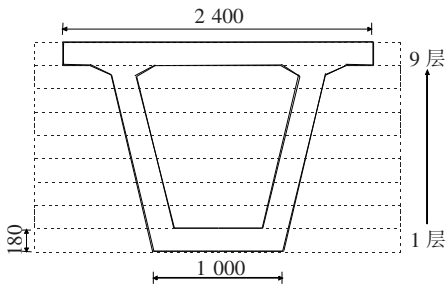


图 8 截面高度方向分层(单位:mm)

表 2 数值模型的参数设置

层数	层高/mm	层宽/mm	层数	层高/mm	层宽/mm
1	180	1 045	6	180	400
2	180	400	7	180	400
3	180	400	8	160	400
4	180	400	9	180	2400
5	180	400			

采用二维桁架的建模方式模拟预应力束,先通过二维曲线生成几何形状,再将预应力束赋予截面面积,预应力束的截面面积及空间位置参见表 3 及图 9。

表 3 预应力束的截面参数

预应力钢筋编号	截面面积/mm ²	预应力钢筋编号	截面面积/mm ²
N1	700	N4	840
N2	700	N5	700
N3	840		

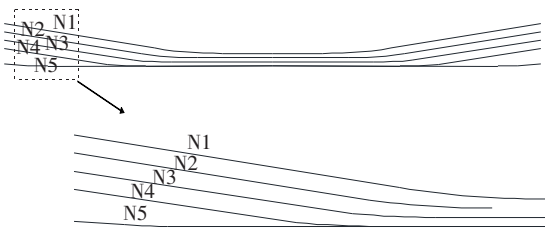


图 9 预应力束布置示意

取全模型开展数值模拟分析,混凝土和钢筋单元纵向尺寸均为 18 cm,共划分 2 319 个单元,混凝土采用 CPS4 单元,预应力钢筋采用 T2D2 单元。混凝土与钢筋之间的黏结采用 Embedded Region 实现。为方便在混凝土上施加温度力变化,全模型采用孤立网格,由图 5 的计算结果逐层在孤立单元节点处施加温度梯度。对应各节点的层数参见图 10。分析过程中同时考虑大气的整体升温。

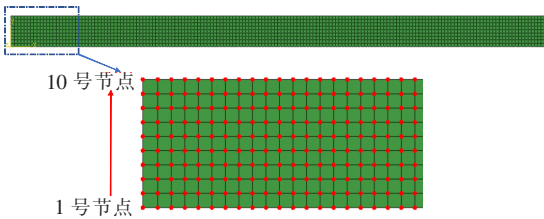


图 10 部分单元节点高度方向的分层

2.2 计算结果

施加节点温度后钢绞线预应力值计算结果如图 11 所示。

由图 11 可看出:钢绞线预应力值变化量沿截面高度从上至下(N1~N5)逐渐减小,且与温度梯度呈正相关,分析其原因为:梁顶部受太阳直射,温度较高引起的梁体变形也较大,导致靠近梁体截面上部的钢绞线预应力值变化较大。

提取图 11 中钢绞线预应力值变化量结果,将有限元计算结果、锚下压力传感器测试结果进行对比分析,结果见图 12。

由图 12 可以看出:

(1) 有限元计算结果和锚下压力传感器的测试结果总体吻合,数值有限元模型能有效预测温度梯度对锚下有效预应力的影响。但是 N5 的规律有所差异,分析其原因:N5 的锚下压力环安装时由于在梁底部,空间狭小,导致压力环和锚垫板之间存在安装缝隙,测试出现一定偏差。

(2) 数值模拟和测试结果均显示:大气升温 and 正温度梯度综合作用下,锚下有效预应力有增大趋势,该

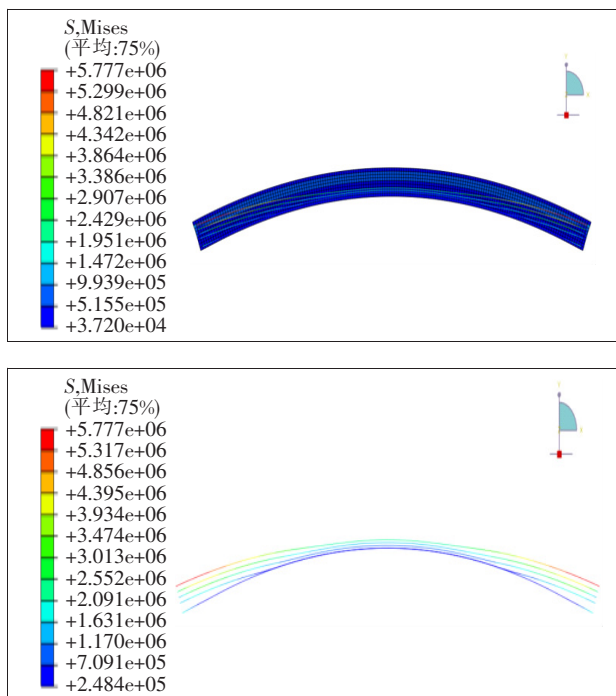


图 11 考虑截面温度梯度后钢绞线预应力值变化结果(单位:Pa)

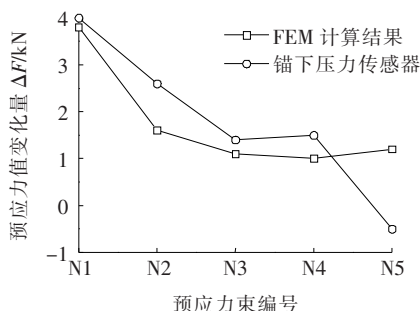


图 12 预应力试验实测值、理论计算值及数值模拟值对比(单根钢绞线)

文测试值和模拟值最大达到 4 kN。反之在日最高温度张拉时,会导致夜间预应力损失 4 kN 左右。综合考虑预应力的张拉时间,宜选择夜晚温度较低时进行预应力张拉施工。

3 结论

(1) 梁体截面竖向温度分布变化明显,顶板位置温度变化量最大,腹板上层与顶板交界位置受翼缘遮荫作用影响,温度变化并不明显。在腹板下层及底板

仍能受到部分阳光照射,使得该位置处的温度变化较腹板上层相对明显。

(2) 考虑大气整体升温 and 正温度梯度的数值有限元模型能够有效预测温度对锚下有效预应力的影响。

(3) 综合考虑预应力的张拉时间,燕房线 01 标的预应力混凝土简支箱梁张拉,尽量选择一天中温度相对较低时进行,从而确保预应力混凝土简支箱梁张拉施工质量。

参考文献:

- [1] 张峰,高磊,徐向锋. 施工期钢绞线锚下有效预应力测试技术[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017(8).
- [2] Hiroaki Miyatake, Takeshi Oshita, H KUBO, et al. A New Manual for Ground Anchor Inspection, Integrity Investigation and Remedial Measures [C]. International Conference on Ground Anchorages and Anchored Structures in Service. London,2008.
- [3] Geotechnical Control Office, Civil Engineering Services Department. Model Specification for Prestressed Ground Anchors[S]. Hong Kong: Government Publications Centre,1989.
- [4] 韩侃,李登科,吴冠仲. 预应力锚索锚固力拉拔试验分析[J]. 岩土工程学报,2011(s1).
- [5] 成剑波,姚晨,张峰. 反拉法检测预应力钢绞线工作应力的模型试验研究[J]. 公路与汽运,2015(3).
- [6] 张峰,刘佳琪,高磊,等. 夹片咬合力测试方法[J]. 交通运输工程学报,2019(3).
- [7] 张元海,李乔. 桥梁结构日照温差二次力及温度应力计算方法研究[J]. 中国公路学报,2004(1).
- [8] 张峰,叶见曙,刘佳琪,等. 拉脱法测试技术一时间及温度效应修正[J]. 中国公路学报,2019(9).
- [9] 劳晓春,汤立群,任鹏. 桥梁内部预应力钢绞线应变的长久监测与分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2003(11).
- [10] Sallal R Abid, Nildem Taysi, Mustafa Özakça. Experimental Analysis of Temperature Gradients in Concrete Box-Girders[J]. Construction and Building Materials, 2016(106):523-532.
- [11] 周浩,杜咏,李国强. 预应力钢绞线温度膨胀及高温蠕变性能试验研究[J]. 工程力学,2018(6).
- [12] 杨锡阶,王时越,缪云伟. 温度对预应力钢绞线松弛性能的影响及不确定度评定[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017(10).