

斜拉桥索梁锚固区应力分析

黄思友,侯兵,陈杰,李乐,冉光成

(中国中铁二局集团第四工程有限公司,四川成都 610300)

摘要:依据某矮塔斜拉桥,对索梁锚固区主梁受力进行现场试验,明确整个施工过程中的应力变化规律。通过采用弹性边界条件的索梁锚固区精细化分析模型,将计算结果与实测结果进行对比,验证了分析模型的准确性。同时,对索梁锚固区的主梁进行参数分析,研究索梁锚固区主梁在不同状态下的应力分布规律。结果表明:(1)在整个施工过程中,主梁索梁锚固区不同测点的应力在拉索张拉和下一根拉索安装前的应力变化较大,之后趋于稳定,翼缘板上部位置出现了拉应力。(2)收缩徐变、整体升温 and 整体降温对主梁混凝土压应力的影响较小。(3)温度变化对翼缘板锚固区混凝土的拉应力影响较大,桥梁设计时应充分考虑温度变化对索梁锚固区主梁翼缘板混凝土横向应力的影响。

关键词:矮塔斜拉桥;施工阶段;应力分析;索梁锚固区;试验研究

中图分类号: U443

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)10-0070-05

0 引言

斜拉桥拉索的拉力作用于主梁锚固点,索梁锚固区的构造较为复杂,受力相对集中,是控制设计的关键部位^[1-2]。因此,掌握锚固区域的应力分布情况十分重要。

国内外学者采用不同的方法对其进行了研究。华波等^[3]研究了组合式锚拉板索梁锚固区构件受力和抗疲劳性能。陈彦江等^[4]基于模型试验数据采用 ABAQUS 有限元分析软件,研究了锚拉板式索梁锚固区在设计荷载作用下的受力情况和传力机制。梅应华等^[5]分析了摩擦对锚拉板与混凝土主梁的受力影响。袁瑞等^[6]以实际工程为背景,对最大索力处的主梁进行了分析,发现主梁的应力过大,提出了锚固区主梁改进方法。陆春阳等^[7]依托上海长江大桥,采用数值分析的方法探讨了板件应力集中的改进方法。熊华涛^[8]对斜拉桥索梁锚固区的受力机理进行了分析,发现了容易出现应力集中的部位,通过自适应变量的遗传算法进行了优化。

矮塔斜拉桥索梁锚固区局部应力的影响因素很多。在当前的数值分析研究中,一些细节的处理尚需进一步完善。例如,模型边界条件应该如何简化,才能正确地反映索梁锚固区的受力。且目前的研究中主要是采用数值分析,缺少实测数据的验证,其计算

结果的准确性有待探究。因此,本文在大量实测数据的基础上验证计算分析模型,确定边界约束条件,探究不同参数对索梁区混凝土受力的影响。

1 工程概况

博罗东江特大桥主桥采用(90.8+180+90.8)m,桥面以上塔高 29.9 m。每个塔上共设计 7 根斜拉索,单个桥墩上边跨位置 A1~A17 共 17 个悬臂浇筑段,中跨位置 B1~B18 共 18 个悬臂浇筑段,如图 1 所示。其中,A5 块上对应安装有 1# 斜拉索,之后每隔 1 个悬臂浇筑块段,安装 1 根斜拉索,7# 斜拉索对应 A17 块悬臂浇筑段。为分析索梁锚固区施工过程中的受力特性,主要选取 A5 块进行分析。

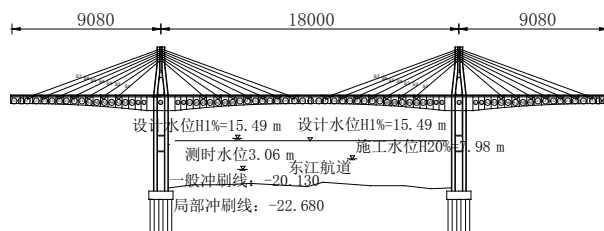


图 1 整体布置图(单位:cm)

2 现场试验

2.1 传感器布置

在 A5 块段塔浇筑混凝土前,将事先准备好的应力传感器布置在索梁的相应位置,以便索梁浇筑完成后监测索梁内部在接下来的施工阶段和成桥阶段的应力变化。具体传感器布置如图 2 所示。

收稿日期: 2022-11-06

作者简介: 黄思友(1987—),男,本科,高级工程师,从事桥梁建设及施工工作。

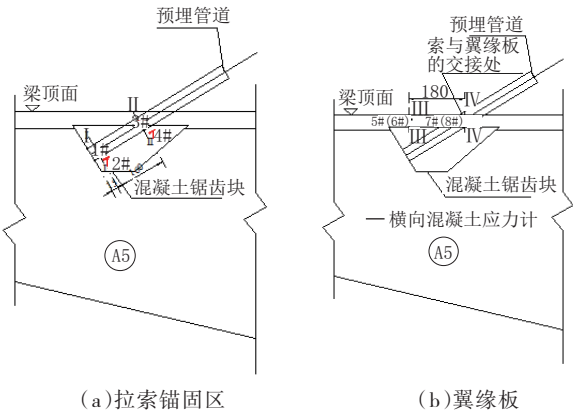


图2 传感器布置图模型

2.2 测试结果

对施工全过程进行监测,依据现场实测数据明确索梁锚固区混凝土的实际受力状态和不同施工阶段塔索梁锚固区混凝土应力的变化规律,为此类桥梁的后续施工提供技术支撑。1#和3#测点沿拉索方向,2#和4#测点为竖向传感器,5#~8#测点均为横向传感器。具体应力变化见表1。

在整个施工过程中,A5块主梁索梁锚固区不同测点的应力在1号索张拉后7号块浇筑后应力变化较大,之后趋于稳定,且最大压应力仅为6.4 MPa,远小于容许压应力。施工过程中,锚固区翼缘板上部位置出现了拉应力,最大为1.0 MPa,未超出容许拉应力。在桥面铺装后,压应力会增大,最大达到了7.8 MPa,拉应力变成压应力。因此,建议以后同类桥梁施工过程中在锚固区翼缘板上部增加横向拉筋。

3 有限元建模

3.1 锚固区局部模型

取其A5块对应锚固区及附近的箱梁节段为研究对象,拉索倾斜角 45.06° ,锚块长度为3 762 mm,起点位于A5块翼缘板下端远离中跨侧114.8 mm处,宽1450 mm,其余部分均按照实际尺寸建立有限元模型,如图3所示。为有效模拟锚垫板与承压板之间的作用,承压板与锚垫板紧密贴在一起,即在锚垫

表1 索梁锚固区测点应力

序号	测试工况名称	各测点应力 /MPa							
		1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
1	1号斜拉索安装后	-5.3	-4.0	-2.1	-1.4	0.5	0.5	0.3	0.4
2	7号块浇筑后	-6.4	-4.5	-3.5	-1.1	0.9	1.0	0.6	0.5
3	7号块张拉后	-3.3	-5.0	-1.8	-1.5	0.2	0.2	0.1	0.1
4	8号块浇筑后	-4.0	-4.7	-3.4	-1.5	0.7	0.7	0.6	0.4
5	8号块张拉后	-3.7	-3.2	-1.9	-1.3	0.2	0.2	0.1	0.1
6	3号斜拉索安装后	-5.1	-3.7	-2.0	-1.5	0.3	0.2	0.2	0.2
7	11号块浇筑后	-4.4	-4.3	-2.6	-1.5	0.2	0.3	0.2	0.2
8	11号块张拉后	-3.5	-4.6	-1.7	-1.3	0.3	0.3	0.2	0.2
9	12号块浇筑后	-4.5	-3.8	-3.0	-0.9	0.3	0.3	0.2	0.2
10	12号块张拉后	-3.4	-4.3	-2.7	-1.5	0.4	0.4	0.2	0.2
11	6号斜拉索安装后	-4.8	-5.2	-2.3	-1.1	0.3	0.3	0.2	0.2
12	17号块浇筑后	-3.8	-4.4	-2.4	-1.4	0.6	0.9	0.5	0.5
13	17号块张拉后	-3.9	-3.6	-2.4	-1.5	0.7	0.6	0.4	0.4
14	边跨浇筑后	-3.6	-4.9	-2.7	-1.9	0.5	0.7	0.5	0.4
15	边跨张拉后	-4.0	-4.0	-3.0	-1.3	0.2	0.2	0.2	0.1
16	18号块浇筑后	-4.1	-4.2	-2.8	-1.5	0.2	0.2	0.1	0.1
17	18号块张拉后	-4.8	-4.9	-2.0	-1.1	0.2	0.2	0.1	0.1
18	7号斜拉索安装后	-4.8	-4.0	-2.7	-1.3	0.2	0.2	0.1	0.1
19	中跨浇筑后	-4.7	-4.5	-2.8	-1.3	0.2	0.2	0.1	0.1
20	中跨张拉后	-3.3	-5.0	-2.4	-1.0	0.2	0.2	0.1	0.1
21	二期铺装	-7.5	-7.8	-4.6	-2.8	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1

板与承压板之间建立接触单元并进行耦合,预埋管道与混凝土之间采用固结的连结方式。采用整体法进行受力计算,对主梁纵向预应力采用等效荷载法施加在 A5 块的端部。

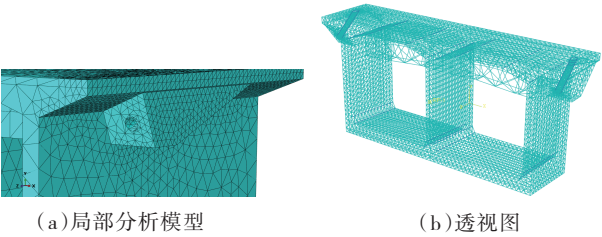


图3 索梁锚固处局部模型

现有的边界条件均采用固结,与实际情况不符。在浇筑后续块段时,已浇筑的所有块段均会产生变形。取局部建立有限元分析模型时,若直接采用根部固结的方式而不考虑对应的弹性变形,会使计算结果偏大,偏于保守,增加建设成本。因此,为了更准确地计算索梁锚固区的受力分析,建议建立局部分析模型时,根部竖向边界条件采用弹性支撑,其中刚度的计算可以依据 Midas 中建立的梁单元模型计算。计算分析模型如图 4 所示。

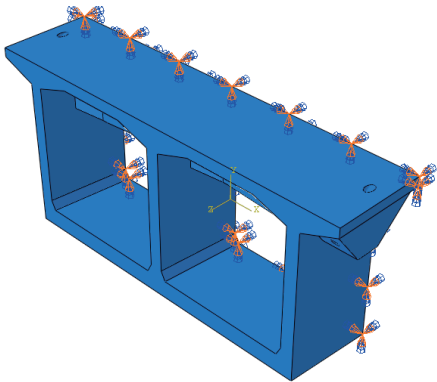


图4 弹性支撑边界条件

3.2 模型验证

对比分析固结边界和弹性支撑边界条件下两种模型的计算结果,如图 5 所示。

由图 5(a)可知,固结时根部产生的应力较大,且极易出现应力集中的现象,不好直观地判断出需要的计算结果。随着距离根部位置的增大,影响逐渐减小。由图 5(b)可知,采用弹性连结时,计算结果与图 6 中的实测数据相一致。说明修正后的该计算分析模型可以有效计算索梁在不同施工阶段的受力特征。

4 参数分析

4.1 收缩徐变

考虑混凝土的收缩徐变对索梁锚固区受力的影响,计算结果见表 2。

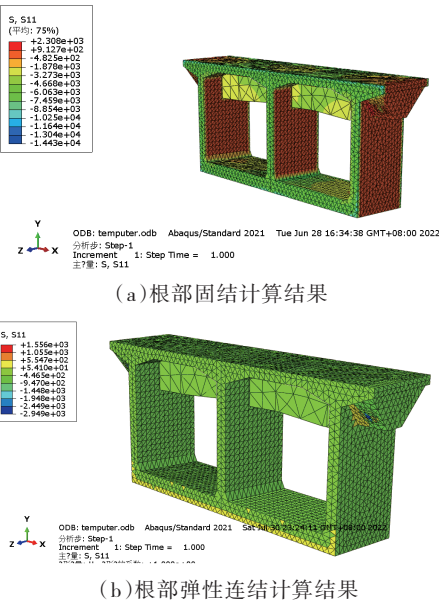


图5 中跨合龙后计算结果

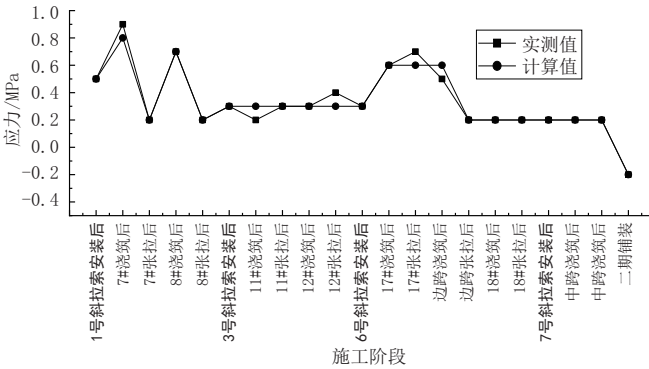


图6 5#测点对比分析结果

表2 A5块主梁索梁锚固区测点应力

序号	测试 工况 名称	各测点应力 /MPa							
		1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
1	二期 铺装	-7.8	-7.6	-4.2	-2.5	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1
2	收缩 徐变	-8.6	-8.1	-5.6	-3.6	-0.4	-0.4	-0.2	-0.2

由表 2 可知,收缩徐变对锚固区混凝土应力沿横向变化较小,沿竖向随着时间的变化会有所增大,但变化幅度不大,说明收缩徐变对索梁锚固区的混凝土的应力影响较小。

4.2 整体温度

一年四季,桥梁经历从冬季的低温到夏季的高温。因此,温度的变化也是桥梁受力不可忽略的一个重要因素。采用上述计算分析模型对索梁锚固区进行整体升温 10℃和 20℃、整体降温 10℃和 20℃的受力分析。限于篇幅,仅给出 1# 测点和 5# 测点的数据。具体计算结果如图 7 所示,分析结果见表 3 和表 4。

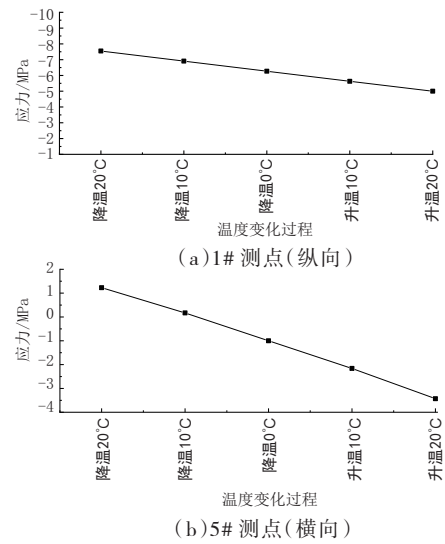


图 7 整体温度变化对索梁受力的影响
表 3 整体温度变化对索梁受力的影响(1# 测点)

温度变化	应力 /MPa	相对于 0℃温度的 变化值 /MPa	相对于 0℃温度 比值 /%
整体降温 20℃	-7.55	1.28	20.4
整体降温 10℃	-6.91	0.64	10.2
整体降温 0℃	-6.27	0	0
整体升温 10℃	-5.63	-0.64	-10.2
整体升温 20℃	-4.99	-1.28	-20.4

表 4 整体温度变化对索梁受力的影响(5# 测点)

温度变化	应力 /MPa	相对于 0℃温度的 变化值 /MPa	相对于 0℃温度 比值 /%
整体降温 20℃	1.23	-2.23	-223.0
整体降温 10℃	0.17	-1.17	-117.0
整体降温 0℃	-1	0	0
整体升温 10℃	-2.17	1.17	117.0
整体升温 20℃	-3.23	2.23	223.0

由图 7 可知,整体升温和整体降温对锚固区混凝土受力的影响基本呈线性变化,锚固区锚垫板下应力最大。整体降温时,混凝土的压应力增大,由外向内影响逐渐减小;整体升温时,混凝土的压应力会减小,温度的变化对锚固区混凝土纵向应力和竖向应力的影响较小,最大仅为 20.4%。但是温度的变化对翼缘板锚固区混凝土的应力影响较大。从表 3 和表 4 中也可知,整体降温 20℃时,锚固区外侧横向出现拉应力,横向应力发展规律从翼缘板向腹板方向拉应力逐渐减小,对混凝土应力的影响达到 233%。因此,桥梁设计时应考虑温度变化对锚固区翼缘板混凝土应力的影响。

4.3 梯度温度

索梁锚固区在太阳照射的一面和未照射的一面

会出现温度差,两侧的温度不同也会对其受力产生影响。因此,梯度温度也是桥梁受力不可忽略的一个重要因素。采用上述计算分析模型对索梁锚固区进行温差 10℃和温差 20℃的三向应力进行受力分析。本文对 1# 测点的三向应力进行了分析,具体计算结果如图 8~ 图 10 所示,分析结果见表 5。

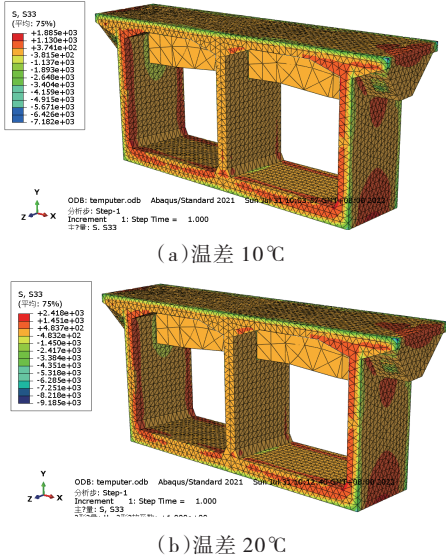


图 8 纵向计算分析结果(单位:kPa)

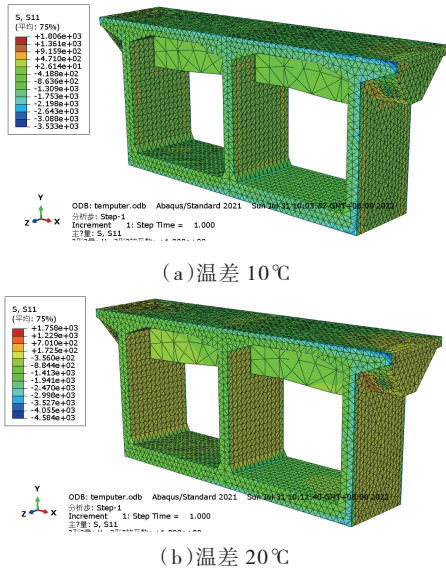


图 9 横向计算分析结果(单位:kPa)

从表 5 可以看出,梯度温度对 X 方向的混凝土应力影响较大,受力最大的部位主要集中在锚固区锚垫板下的混凝土,当温差达到 10℃时,相对于温差为 0℃时 X 方向的混凝土应力变化达到了 232.3%;当温差达到 20℃时,相对于温差为 0℃时 X 方向的混凝土应力变化达到了 338.7%,且出现的是横向拉应力,应力发展规律从翼缘板外侧向腹板方向逐渐减小。因此,桥梁设计时应充分考虑梯度温度对索梁锚固区混凝土横向应力的影响。

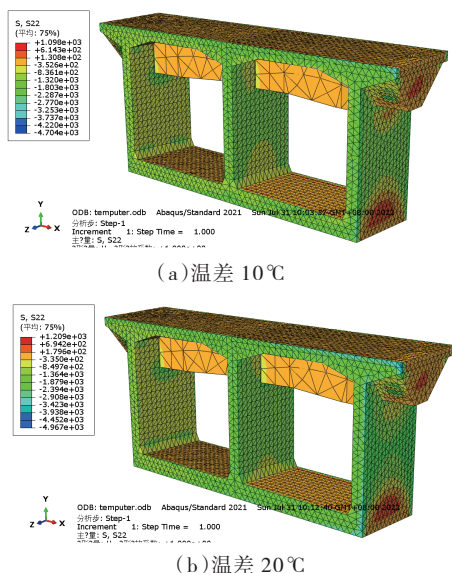


图 10 竖向计算分析结果(单位:kPa)

表 5 梯度温度变化对索梁受力的影响(1#测点)

方向	温度变化	应力 / MPa	相对于 0℃ 温度的变化值 /MPa	相对于 0℃ 温度的比值 /%
X 方向	温差 20℃	1.36	1.05	338.7
	温差 10℃	1.03	0.72	232.3
	温差 0℃	0.31	0	0
Y 方向	温差 20℃	-4.75	1.28	36.9
	温差 10℃	-4.46	0.99	28.5
	温差 0℃	-3.47	0	0
Z 方向	温差 20℃	-8.62	2.35	37.5
	温差 10℃	-8.08	1.81	28.9
	温差 0℃	-6.27	0	0

5 结 论

(1)在整个施工过程中,主梁索梁锚固区不同测点的应力在拉索张拉和下一根拉索安装前的应力变化较大,之后趋于稳定,且最大压应力远小于容许压应力。翼缘板上部位置出现了拉应力,建议设计中应考虑在翼缘板上部增加横向拉筋,确保结构的安全。

(2)实测数据与理论计算的对比分析结果验证了该计算分析模型的正确性和合理性,为精确计算索梁锚固区混凝土的受力提供了技术支撑。

(3)收缩徐变对混凝土横向应力的影响较小,竖向应力随着时间的变化会有所增大,但变化幅度不大。

(4)整体升温和整体降温对翼缘板混凝土受力的影响基本呈线性变化。整体降温时,混凝土的压应力增大,由翼缘板向腹板方向的影响逐渐减小。整体升温时,混凝土的压应力会减小,温度的变化对混凝土纵向应力和竖向应力的影响较小。但是温度的变化对横向混凝土的应力影响较大,整体降温 20℃时,横向出现拉应力,从翼缘板向腹板方向拉应力逐渐减小,对混凝土应力的影响达到 233%。因此,桥梁设计时应考虑温度变化对混凝土应力的影响。

(5)梯度温度对 Y 方向和 Z 方向的混凝土应力影响较小,但是对 X 方向的混凝土应力影响较大。当温差达到 10℃时,相对于温差为 0℃时 X 方向的混凝土应力变化达到了 232.3%;当温差达到 20℃时,相对于温差为 0℃时 X 方向的混凝土应力变化达到了 338.7%,且出现的是横向拉应力,从翼缘板外侧向腹板方向逐渐减小。因此,桥梁设计时应充分考虑梯度温度对索梁锚固区混凝土横向应力的影响。

参考文献:

[1] 苗家武.超大跨度斜拉桥设计理论研究[D].上海:同济大学,2006.

[2] 李小珍,蔡婧,强士中.大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构型式的比较研究[J].土木工程学报,2004(3):73-79.

[3] 华波,王宽.浅谈后张法 T 梁预应力损失[J].科技资讯,2011(9):44-45.

[4] 陈彦江,辛光涛,李勇,等.斜拉桥锚拉板式索梁锚固区试验模型优化研究[J].工业建筑,2014,44(S1):567-571.

[5] 梅应华,朱大勇,严瑾.混凝土主梁斜拉桥锚拉板式索梁锚固区受力性能研究[J].世界桥梁,2019,47(1):26-31.

[6] 袁瑞,张敏,罗嗣碧.金沙江特大桥索梁锚固区受力分析与结构设计[J].公路,2019,64(10):89-93

[7] 陆春阳,吴冲,苏庆田,等.斜拉桥分离式钢箱组合梁剪力滞效应和应力集中[C]//第十九届全国桥梁学术会议论文集(下册),2010:293-298.

[8] 熊华涛.大跨径斜拉桥索梁锚固区力学特征分析及优化[J].中外公路,2021,41(6):145-148.

(上接第 53 页)

未来坦桑尼亚还需要建立更完善的规范标准体系,并做好路网规划,真正从系统上全面改善区域范围内的交通状况。

参考文献:

[1] 贾聪惠.基于英标规范体系的混凝土桥梁设计方法研究[J].城市道

桥与防洪,2019(6):99-103.

[2] Road Geometric Design Manual[S].Tanzania:Ministry Of Works, 2011.

[3] Pavement and Materials Design Manual [S].Tanzania:Ministry Of Works, 1999.

[4] A Guide to Traffic Signing[S].Tanzania:Ministry of Infrastructure Development, Safety and Environment Unit, 2009.