

无背索斜拉桥塔梁墩固结区有限元分析

曾奎, 邱敏捷

(中铁二院成都勘察设计院有限责任公司, 四川 成都 610031)

摘要:为了研究无背索转体斜拉桥塔梁墩固结区的受力性能,以成都市杉板桥为研究背景,利用有限元分析方法,建立塔梁墩固结区精细有限元模型。研究结果表明:在使用阶段工况作用下,结构纵向受力构件均处于受压状态,梁体主跨侧纵向压应力在 -8.2 MPa(绝对值)以内,边跨侧在 -14.0 MPa(绝对值)以内。主梁弯矩区存在较大的压应力储备且满足规范要求,纵向预应力钢束布置合理;在5个工况作用下,固结区横向正应力为 $-8.5\sim 1.7$ MPa,小横梁悬臂根部顶板存在部分拉应力,均小于 1.7 MPa,可适当加强横向普通钢筋布置;无背索斜拉桥在活载作用下,桥塔产生的顺桥向弯矩应予以重视;转体施工阶段,主梁轴力通过塔墩梁固结,逐渐传递至桥墩,传递过程平稳。

关键词:无背索斜拉桥;转体施工;塔梁墩固结区;有限元分析;受力性能

中图分类号: U448.27 **文献标志码:** A

1 工程概况

杉板桥位于成都市绕城内快速路上,该桥为无背索斜拉桥,主跨跨越10股铁路线,为减小施工期间对铁路运营的影响,采用先平行铁路线路施工、然后转体就位的施工方法。该桥是目前世界上主跨跨径最大并采用转体施工工艺的无背索斜拉桥,其跨径布置为 $(40+188+55)$ m。主跨为钢箱梁,在中跨距主墩中心线 19.5 m处设置钢-混结合段,边跨为 55 m 预应力混凝土箱梁,梁宽均为 35 m,高 3.3 m,主塔为预应力混凝土桥塔,塔高约 109.8 m,倾角 58° 。为了保证转体阶段结构具有足够的整体刚度,塔梁墩采用固结

体系。桥型布置以及固结区域平面、横断面如图1、2所示。

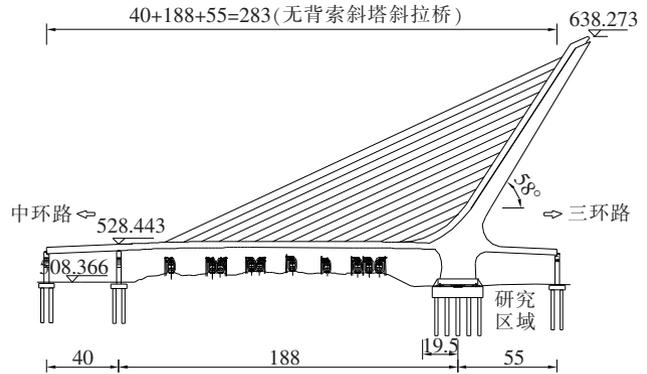


图1 杉板桥桥型布置(单位:m)

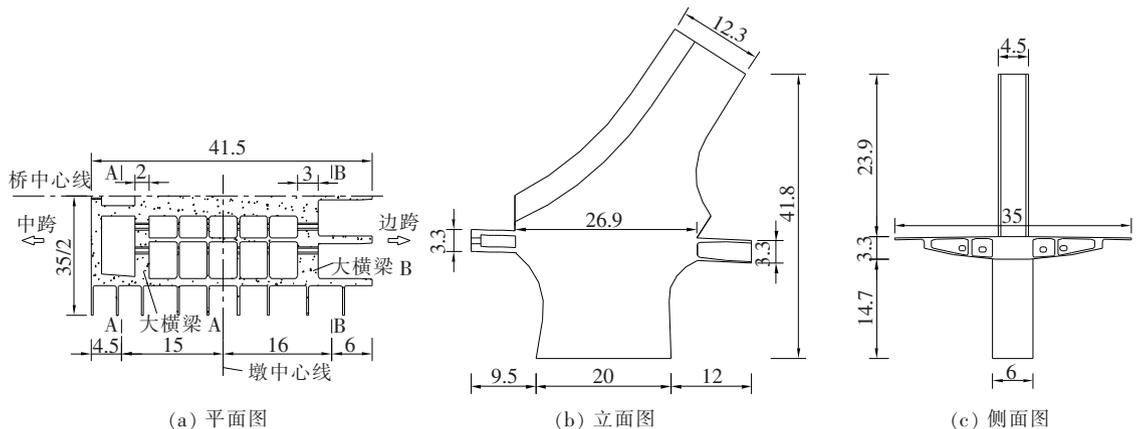


图2 塔梁墩固结区构造(单位:m)

由于塔梁墩固结区域受轴力、剪力、弯矩和扭矩复合作用,受力十分复杂,且无背索斜拉桥相比于常规斜拉桥在活载作用下,塔梁墩固结区域存在较大负弯矩。目前,国内外对塔梁墩固结区进行了一系列研究^[1-9],但针对大跨径无背索转体斜拉桥在塔梁墩固结区的研究较少,尚无可借鉴的经验。为了保证此处受力的合理性,在荷载作用下具有良好的工作性能,该文利用 Midas/Civil 以及 Abaqus 分别建立全桥模型和塔梁墩固结区域精细有限元模型,对塔梁墩固结区域的受力性能进行研究。

2 有限元模型

整体有限元模型见图 3,主梁和塔柱采用空间梁单元模拟,拉索采用索单元模拟,为正确模拟拉索的空间位置,主梁和塔柱拉索锚固位置建立刚臂。

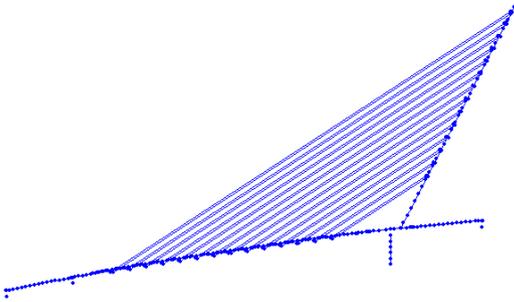


图 3 整体有限元模型

局部模型横桥向取桥梁全宽,竖向取自墩底向上 41.8 m,顺桥向沿主墩中心线主跨侧长 19.5 m,边跨侧长 22 m;塔柱为“凸”字形实心截面、主墩为矩形实心截面。为了造型美观和受力合理,塔底和墩顶设置圆弧形倒角,塔柱在顺桥向宽由 26.9 m 变化到 12.3 m,横桥向宽为 4.5 m。墩顶在顺桥向宽由 26.9 m 变化到 20 m,横桥向宽度为 6 m,局部模型具体尺寸如图 2 所示。

局部模型混凝土结构采用 C3D8R 实体单元模拟,

预应力筋采用 T3D2 桁架单元模拟。有限元模型网格整体尺寸为 100 cm×100 cm,固结区域为 50 cm×50 cm。模型共 238 797 个单元,其中混凝土结构单元 230 331 个,预应力筋单元 8 466 个,模型中的 C50 混凝土弹性模量为 3.45×10^4 MPa,泊松比为 0.2;预应力筋弹性模量为 1.95×10^5 MPa,泊松比为 0.3。

耦合局部模型主跨侧、边跨侧以及桥塔截面上所有节点自由度以各截面形心处为参考点,提取整体模型中相同位置处各工况对应的内力值,施加到参考点,荷载工况如表 1 所示,采用降温法模拟固结区域预应力钢束,局部模型区域内不考虑活载作用。约束主墩底面上节点所有自由度。局部有限元模型如图 4 所示。

表 1 荷载工况

工况	阶段	最不利荷载	荷载组合
①	施工阶段	转体最大悬臂	1.2 倍恒载
②	使用阶段	主跨最大轴力	1.2 倍恒载+1.4 倍活载
③	使用阶段	主跨最大负弯矩	1.2 倍恒载+1.4 倍活载
④	使用阶段	边跨最大负弯矩	1.2 倍恒载+1.4 倍活载
⑤	使用阶段	主跨最大扭矩	1.2 倍恒载+1.4 倍活载

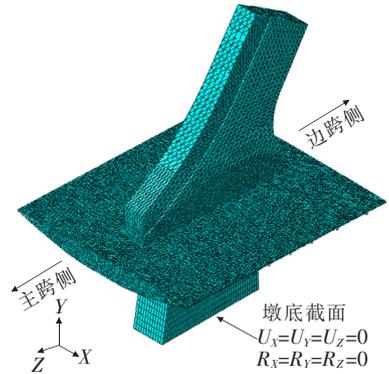


图 4 局部有限元模型

在恒载作用下,局部分析模型塔底截面以及各关键截面内力值与整体模型相同位置内力值如表 2 所示。

表 2 荷载内力值

位置	轴力			剪力			弯矩		
	整体/ kN	局部/ kN	相对误 差/%	整体/ kN	局部/ kN	相对误 差/%	整体/ (kN·m)	局部/ (kN·m)	相对误 差/%
A-A 截面	-129 204	-127 400	-1.4	19 098	19 780	3.5	-9 511	-9 074	-4.8
B-B 截面	0	0	0	-20 758	-21 610	4.1	-127 160	-131 100	3.1
墩底截面	-382 218	-407 000	6.5	0	0	0	306 561	316 400	3.2

由表 2 可以看出:局部模型与整体模型内力值相

对误差均在 6.5% 以内。所以局部实体模型积分计算

出的固结区截面内力结果与整体模型计算结果十分接近,证明了局部模型边界条件施加正确,分析结果能够反映实桥的受力状态。

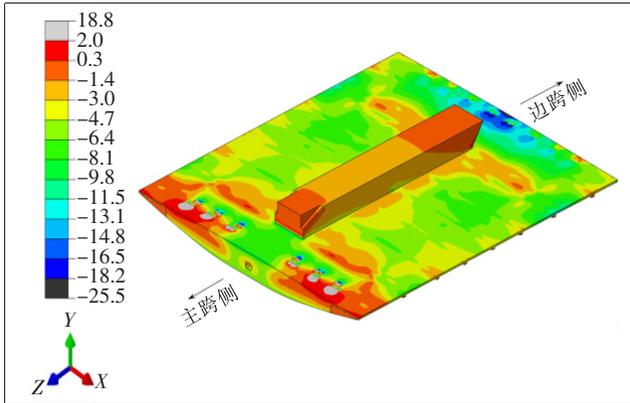
3 计算结果分析

3.1 整体受力分析

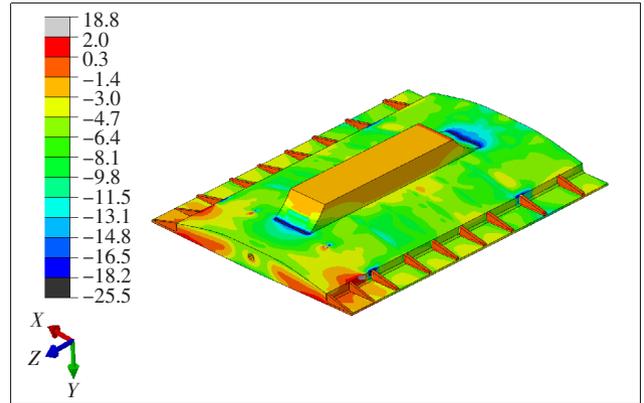
由于工况较多,该文仅给出工况③荷载作用下,固

结区域应力分布情况,如图5、6所示。由于靠近边界区域结构应力分布失真,分析时不考虑这部分区域。

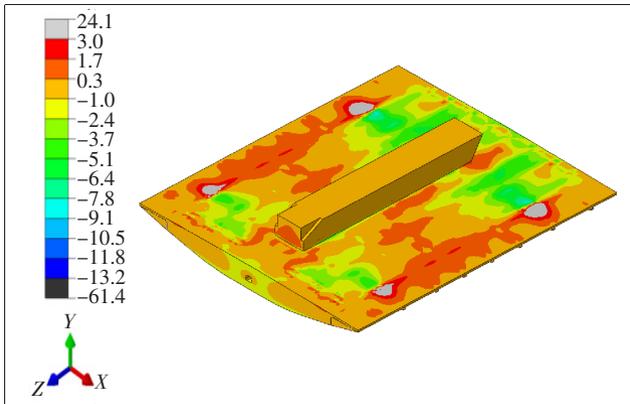
由图5(a)、(b)可以看出:除预应力筋锚固处以外,固结区在墩梁结合部角隅处存在应力集中,此处轴向最大压应力为 -21.5 MPa ,整体应力水平较低,大部分小于 -12.2 MPa (绝对值);塔梁结合部前端混凝土应力较大,这是由于塔梁墩竖向贯通,对主梁提供较大的支撑刚度,对主梁纵向变形起到约束作用。



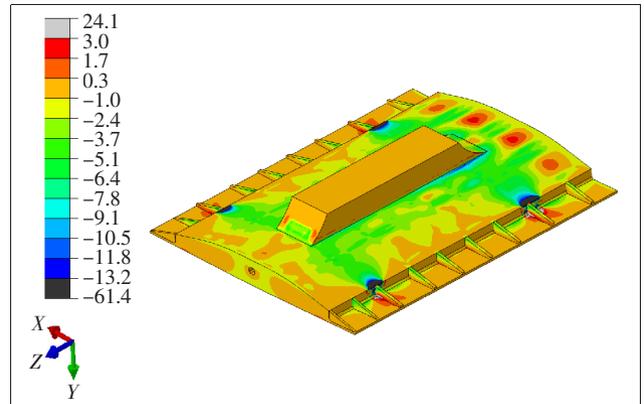
(a) 顶板纵向正应力



(b) 底板纵向正应力



(c) 顶板横向正应力



(d) 底板横向正应力

图5 塔梁墩固结区应力分布(一)(单位:MPa)

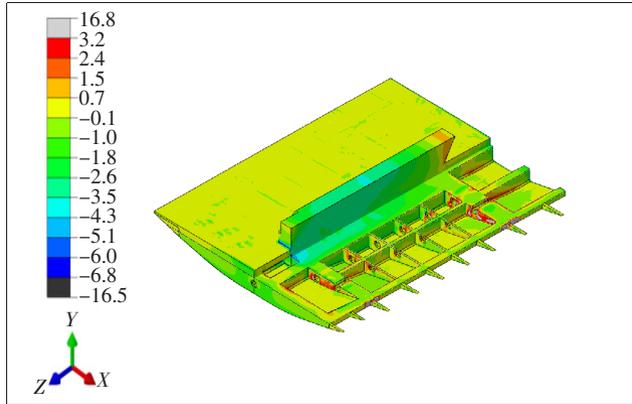
由图5(c)、(d)可以看出:固结区横向正应力为 $-7.8\sim 1.7\text{ MPa}$ 。整体呈现出底板大于顶板的趋势,这是由于主梁横向仅在桥面中心处即墩梁固结处存在竖向支撑,横向正应力分布类似于悬臂板,墩顶存在横桥向负弯矩;大横梁A和B区域受横向预应力影响,横向几乎处于全截面受压状态。

从图6(a)可以看出:塔和墩基本处于受压状态,竖向正应力大部分小于 -6.8 MPa (绝对值),在主跨侧墩梁结合部倒角处存在应力集中,这是由于桥塔预应力在此处锚固;塔墩竖向正应力表现出主跨侧大、边

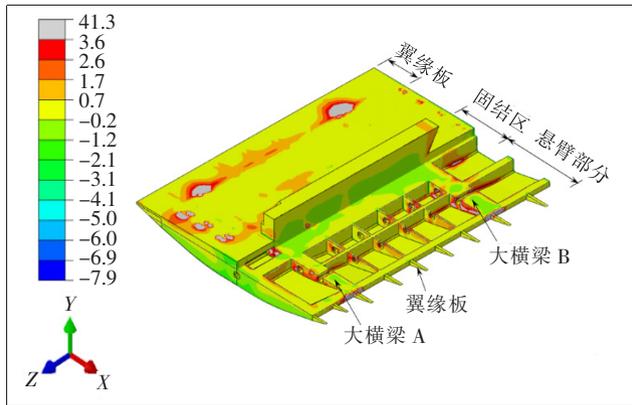
跨侧小的规律,这是由于主塔顺桥向弯矩引起的;大横梁A和B表面以及边跨侧塔根部倒角处存在竖向拉应力,基本小于 3 MPa ,且分布区域较小。

从图6(b)、(c)可以看出:固结区主拉应力除在预应力锚固处较大外,大部分低于 1.7 MPa ;大横梁A和B局部拉应力达到 3.8 MPa ,但都分布于横梁表层,影响范围较小,应加强横梁过人孔位置普通钢筋设置;翼缘板受横向预应力影响,出现较大拉应力,而实际施工过程中,先施工主梁并张拉横向预应力,结构变形后再施工翼缘板,计算模型未考虑施工阶段,而实际

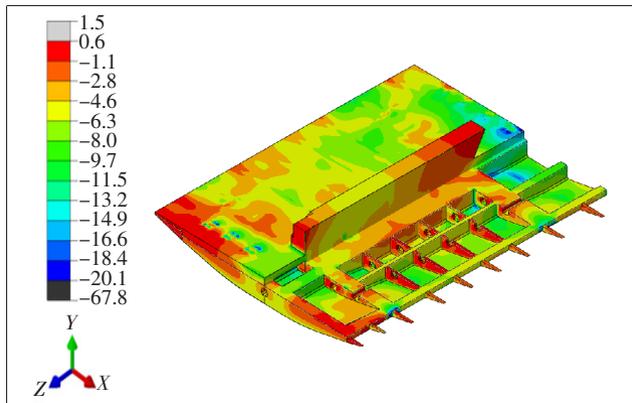
此处拉应力较小,对结构受力不影响,所以不予考虑;主压应力在墩梁结合部角隅处存在应力集中现象,其余大部分小于 -13.2 MPa(绝对值);大横梁 B 负方向和大横梁 A 正方向处于负弯矩区,此处设置纵向预应力钢束,梁体顶板主压应力均不低于 -6.3 MPa(绝对值),说明具有足够的压应力储备,预应力钢束布置合理。



(a) 竖向正应力



(b) 主拉应力



(c) 主压应力

图 6 塔梁墩固结区应力分布(二)(单位:MPa)

3.2 应力沿路径变化规律

在塔梁墩固结区选取 7 条应力路径进行分析,路径 1~5 位于主梁顶板,路径 6 和 7 分别位于塔底和墩顶处,应力路径位置示意如图 7 所示,应力变化规律如图 8~10 所示。图 9 中横桥向坐标原点对应桥梁中心线位置;图 8、10 中顺桥向坐标原点对应墩中心线位置,坐标轴负方向对应主跨侧,正方向对应边跨侧。

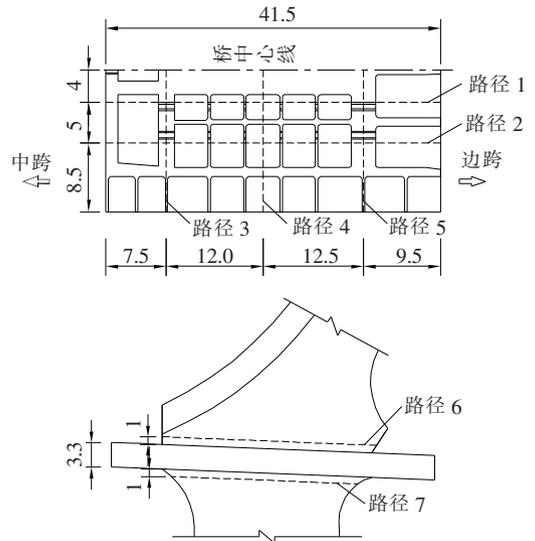
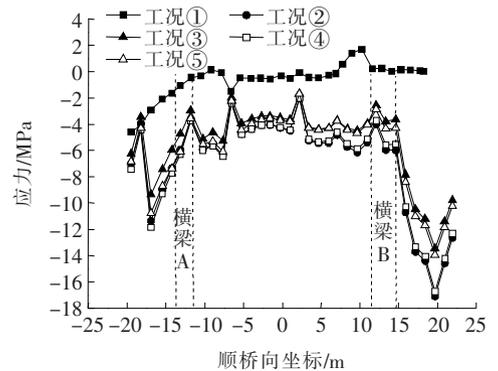
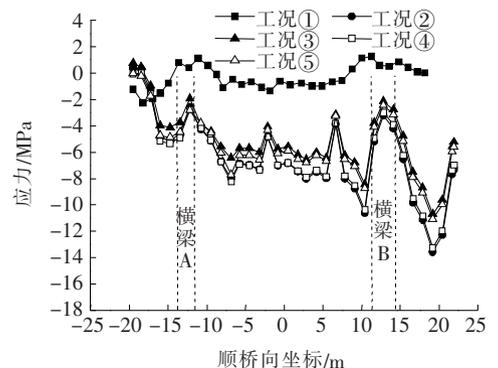


图 7 路径示意图(单位:m)



(a) 路径 1 顺桥向正应力



(b) 路径 2 顺桥向正应力

图 8 顺桥向正应力变化规律

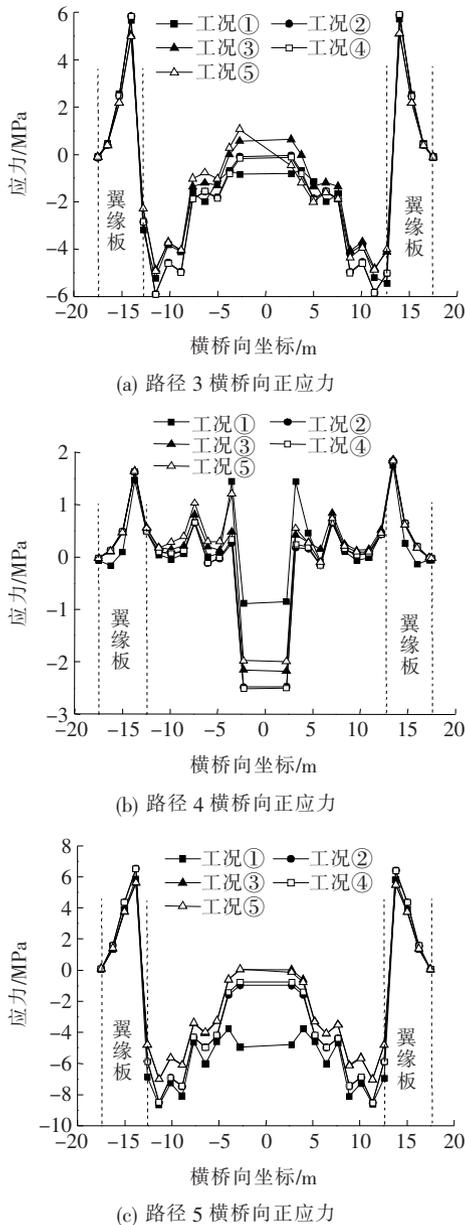


图9 横桥向正应力变化规律

从图8可以看出:路径1和2顺桥向正应力分布除了工况①(最大悬臂工况)存在较大差异外,其余工况变化规律基本一致;横梁A和横梁B之间,顺桥向正应力变化较为平稳,路径1、2应力分别为 $-6.5 \sim -1.7$ MPa, $-8.2 \sim -2.1$ MPa;横梁A负方向承受主梁巨大的轴力,且存在纵向预应力作用,应力水平较高,路径1、2最大值分别为 -11.8 MPa、 -5.3 MPa,两者差异较大,这是由于路径1位于预应力锚固区,局部应力较大;横梁B正方向除局部预应力锚固位置外,路径1大部分应力为 $-14 \sim -8.4$ MPa,路径2大部分应力为 $-11.0 \sim -7.9$ MPa,说明边跨负弯矩区存在较大的压应力储备;工况①作用下,路径1和2顺

桥向正应力分别为 $-4.6 \sim 1.7$ MPa和 $-2.3 \sim 1.3$ MPa,由于转体阶段仅浇筑4 m长边跨,转体完成后再浇筑剩余部分,且仅张拉横向预应力,所以顺桥向应力水平较低。横梁A和横梁B之间压应力小于 -1.5 MPa(绝对值)。

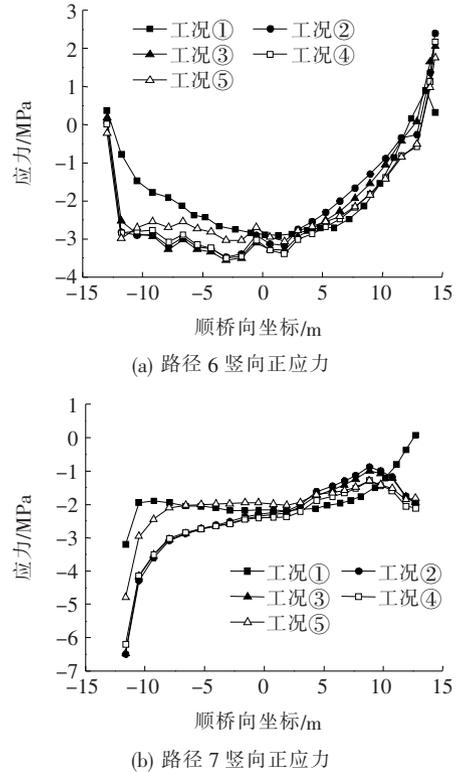


图10 竖向正应力变化规律

从图9可以看出:翼缘板处横向应力波动较大,这是由于模型未在此处建立施工阶段,所以以下分析均不考虑此区域;路径3横桥向正应力分布除了工况⑤(主跨最大扭矩)外,其余工况均关于桥梁中心线左右对称,路径4、5横桥向正应力均关于桥梁中心线左右对称。说明主跨扭矩对横梁A负方向影响较大;路径3、5横向应力分布规律与悬臂梁相似,均表现为近塔侧横向压应力小,远塔侧横向压应力大。路径3横向应力为 $-5.9 \sim 1.1$ MPa,最大横向拉应力出现在工况⑤塔根部。路径5横向应力为 $-8.5 \sim 0.1$ MPa;路径4处无横向预应力,横向正应力为 $-2.2 \sim 1.6$ MPa,最大横向拉应力出现在翼缘板根部。

从图10可以看出:路径6(塔根部)和路径7(墩顶部)竖向正应力在工况②~⑤作用下,除两端角隅处外,均表现出主跨侧压应力大、边跨侧压应力小的分布规律,而工况①作用下,竖向应力水平沿顺桥向分布较为均匀,说明使用阶段活载作用下,桥塔产生了顺桥向弯矩;路径6竖向正应力为 $-3.6 \sim 2.2$ MPa,竖向拉

应力最大值出现在边跨侧塔根部倒角处。路径 7 竖向正应力为 $-6.5 \sim 0.1$ MPa, 最大压应力出现在主跨侧墩顶倒角处。由此可见, 塔底和墩顶除了在倒角处存在应力集中以外, 大部分区域均处于受压状态, 且压应力水平较低。

3.3 构件传力比例

塔梁墩固结区主梁轴向压力主要由两个部分承担, 即梁体实心部分和悬臂部分, 划分示意图如图 11 所示。根据有限元分析结果, 沿顺桥向选取若干截面, 对工况①(无纵向预应力)作用下截面应力进行积分, 得到梁体实心部分和悬臂部分轴力, 轴力沿顺桥向变化规律见图 12, 横坐标原点对应大横梁 A 位置。

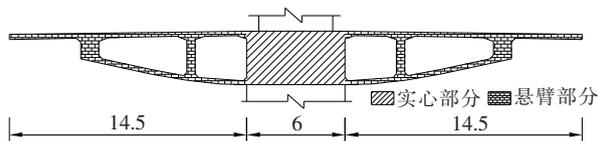


图 11 墩中心截面(单位:m)

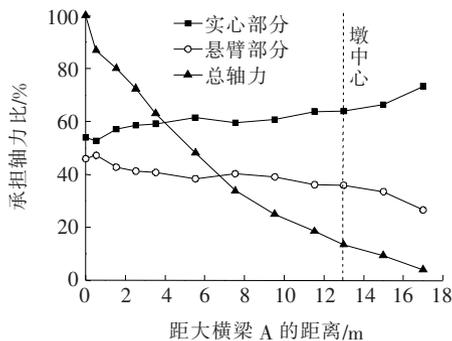


图 12 塔梁墩固结区轴力变化规律

由图 12 可以看出: 固结区梁体实心部分承担轴力比例沿着顺桥向逐渐增大, 承担比例平均为 61% 左右, 悬臂部分则相反, 承担比例平均为 39% 左右; 总轴力通过塔墩梁固结, 逐渐传递至桥墩, 传递过程平稳, 大部分轴力在墩中心之前已传递完全, 在墩中心处降至 14% 左右。

4 结论

采用有限元法对无背索斜拉桥塔梁墩固结区域的受力性能进行研究, 得到以下结论:

(1) 在使用阶段工况作用下, 结构纵向受力构件基本处于受压状态, 塔梁墩固结倒角处存在应力集中现象, 但纵向压应力都在 -21.5 MPa(绝对值) 以内。其余部分梁体主跨侧纵向压应力均在 -8.2 MPa(绝

对值) 以内, 边跨侧均在 -14 MPa(绝对值) 以内。说明在主梁负弯矩区存在较大的压应力储备且满足规范要求, 纵向预应力钢束布置合理。

(2) 在 5 个工况作用下, 固结区横向正应力为 $-8.5 \sim 1.7$ MPa。由于主梁仅在墩梁固结处存在竖向支撑, 横向正应力分布规律类似于悬臂板, 表现为底板横向压应力略大于顶板。大横梁受预应力影响, 横向几乎处于全截面受压状态, 墩中心处小横梁悬臂根部顶板存在局部拉应力, 但都小于 1.7 MPa, 可适当加强该处横向普通钢筋布置。

(3) 在使用阶段工况作用下, 塔根部、墩顶部竖向正应力表现出主跨侧压应力大、边跨侧压应力小的分布规律, 说明无背索斜拉桥使用阶段活载作用下, 桥塔产生的顺桥向弯矩应当予以重视。

(4) 转体施工阶段, 固结区梁体实心部分承担轴力比例沿着顺桥向逐渐增大, 承担比例平均为 61% 左右, 悬臂部分沿着顺桥向逐渐减小, 承担比例平均为 39% 左右; 主梁轴力通过塔墩梁固结, 逐渐传递至桥墩, 传递过程平稳, 大部分轴力在墩中心之前已传递完全, 在墩中心处降至 14% 左右。

参考文献:

- [1] 戴公连, 粟森, 刘文硕, 等. 槽型断面梁斜拉桥塔梁墩固结区受力特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(1): 27-32.
- [2] 周敏, 戴公连, 粟森. 槽型断面斜拉桥塔梁墩固结区应力的数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(4): 35-40.
- [3] 刘永健, 周绪红, 颜东煌, 等. 单边索斜塔钢-混凝土结合梁斜拉桥塔梁根部应力分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 65-69.
- [4] 虞庐松, 朱东生. 部分斜拉桥塔梁墩固结点局部应力分析[J]. 桥梁建设, 2008, 38(1): 54-57.
- [5] 陈小玲. 单索面矮塔斜拉桥塔梁墩固结局部应力分析[J]. 交通科技, 2012(1): 4-6.
- [6] 俞英, 王亚飞. 混合梁斜拉桥塔梁墩固结区受力性能试验研究[J]. 交通科技, 2018(1): 25-27.
- [7] 宋军, 周建庭, 陈增顺. 基于子模型法的斜拉桥塔梁墩固结段局部分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(3): 379-384.
- [8] 宋宪毅, 王敏. 长门特大桥塔梁墩固结区局部构造设计参数分析[J]. 世界桥梁, 2018, 46(2): 10-14.
- [9] 胡玉柳. 长门特大桥主桥塔梁墩固结区模型试验研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(2): 75-79.