

边跨侧距索塔中心 62 m 处设置有施工临时辅助墩,在中跨合龙之后拆除。斜拉桥立面布置图见图 1。

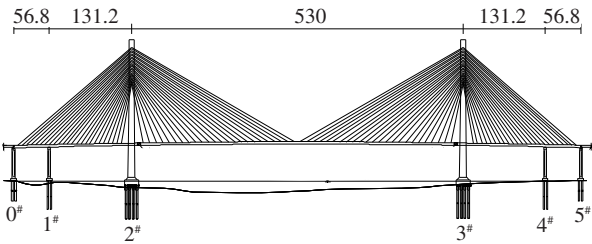


图 1 斜拉桥立面布置图(单位:m)

该桥塔区主梁采用支架现浇施工,边跨混凝土梁采用牵索挂篮浇筑,中跨组合梁采用桥面吊机吊装,边中跨同时“双悬臂施工”。一个标准梁段的施工流程图见图 2。

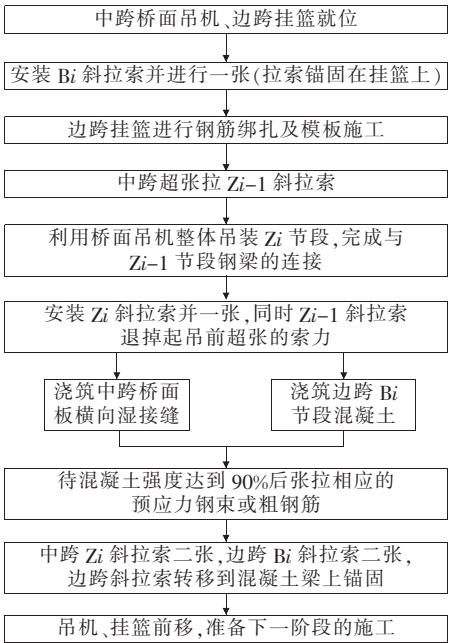


图 2 标准梁段施工流程图

2 有限元模型的建立

根据全桥的施工方案,采用 FBR_CAL_SUO 有限元软件^[10]建立了全桥平面杆系计算模型,全桥共有 1 106 个单元,1 067 个节点。全桥的结构离散图见图 3。计算模型中主梁、主塔及桩墩均采用梁单元进行模拟,并考虑实际结构尺寸和刚度。斜拉索采用仅受拉单元进行模拟,通过刚性连接的方式与主梁锚固点和主塔锚固点连接。该桥为半漂浮体系,塔梁支撑边界条件在施工过程中约束全部自由度,体系转换后释放

水平约束及转动约束。在主梁与过渡墩和辅助墩连接处施加竖向约束。

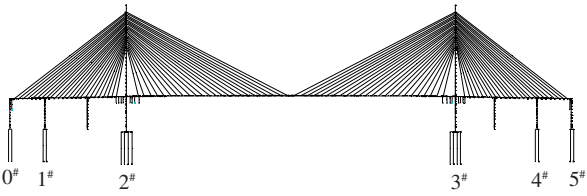


图 3 斜拉桥有限元模型

3 参数分析与施工控制

3.1 斜拉索索力

在双悬臂施工过程中,最不利荷载工况为中跨起吊组合梁。故选择组合梁起吊前后的超张拉和退张拉索力以及成桥后的最终调索索力进行参数分析,探讨双悬臂施工下的混合式组合梁斜拉桥超张拉、退张拉索力和最终调索索力是否需要更为严格的施工精度和施工控制标准。

(1) 中跨斜拉索超张拉索力

选取中跨斜拉索超张拉索力为变化量,在设计索力基础上增加 8%、5%、3%、1%,其他结构计算参数均不变,计算得到成桥状态下结构应力和线形的变化^[11]见表 1 和图 4。

从表 1 可知:当斜拉索超张拉索力逐渐增加时,成桥状态下的主梁结构应力响应并不敏感,主塔应力、塔顶偏位和斜拉索成桥索力波动均很小,唯有主梁竖向位移变化量随超张拉索力的增加而增加。从图 4 可知:由于边跨混凝土梁自重重大,起到了很好的压重和锚固作用,所以超张拉索力的变化对边跨混凝土梁线形影响很小,而对于中跨组合梁,其线形随着悬臂长度的增加,相应梁段的位移逐渐增大,在跨中处达到最大值,且超张拉索力增量越大,中跨组合梁位移变化量越大。

该桥主跨 530 m,根据 JTG F80/1—2017《公路工程质量检验评定标准》^[12](以下简称“评定标准”)中规定:组合梁斜拉桥成桥状态梁顶高程与理论值误差应在 $\pm L/10\,000$ 以内,该桥中跨组合梁即为 5.3 cm;混凝土梁斜拉桥成桥状态梁顶高程与理论值误差应在 $\pm L/5\,000$ 以内,对该桥边跨混凝土梁即为 10.6 cm。当超张拉索力增加 8%时,中跨组合梁竖向位移最大变化量达到 8.6 cm,超过了“评定标准”规定的允许值。当超张拉索力增量为 5%时,中跨组合梁竖向位

移最大变化量为 5.3 cm,并且此时结构应力变化量和塔偏变化量均很小。因此,该桥斜拉索超张拉索力施工精度应控制在 5%以内。

(2) 中跨斜拉索退张拉索力

选取中跨斜拉索退张拉索力为变化量,在设计索力基础上增加 5%、3%、2%、1%,其他结构计算参数均不变,计算得到成桥状态下结构应力和线形的变化如表 2 及图 5 所示。

表 1 斜拉索超张拉索力变化下成桥状态主要计算结果对比

索力增加/%	钢主梁最不利应力增量/MPa	桥面板最不利应力增量/MPa	混凝土梁最不利应力增量/MPa	主塔最不利应力增量/MPa	主塔塔偏最大变化量/cm	主梁竖向位移最大变化量/cm
8	-0.21	-0.03	0	0	0	8.6
5	-0.13	-0.02	0	0	0	5.3
3	-0.09	-0.01	0	0	0	3.3
1	-0.03	0	0	0	0	1.1

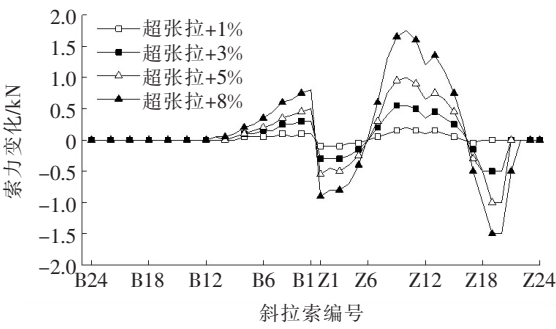
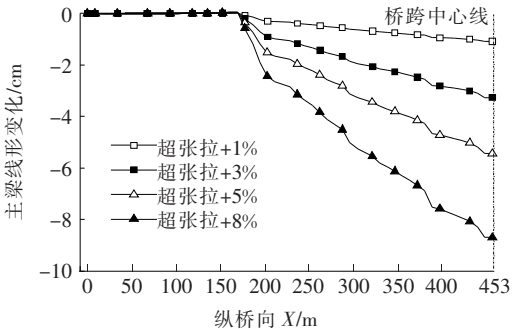


图 4 中跨斜拉索超张拉索力变化对成桥线形和索力的影响

表 2 斜拉索退张拉索力变化下成桥状态主要计算结果对比

索力增加/%	钢主梁最不利应力增量/MPa	桥面板最不利应力增量/MPa	混凝土梁最不利应力增量/MPa	主塔最不利应力增量/MPa	主塔塔偏最大变化量/cm	主梁竖向位移最大变化量/cm
5	-10.76	1.19	0.04	-0.13	1.6	15.4
3	-6.46	0.71	0.02	-0.08	1.0	9.3
2	-4.30	0.48	0.01	-0.05	0.7	6.2
1	-2.15	0.24	0	-0.03	0.3	3.1

从表 2 可知:斜拉索退张拉索力逐渐增加时,钢主梁和主塔的最不利应力均呈减小趋势,而桥面板的最不利应力在逐渐增加,在索力增加 5%时增量为 1.19 MPa,索力未增加前成桥状态桥面板最大压应力为 10.64 MPa,增加后变为 11.83 MPa,因此不构成控制因素,混凝土梁的最不利应力和塔偏增量均较小。从图 5 可知:退张拉索力的变化对边跨混凝土梁线形的影响很小,对于中跨组合梁,其线形变化趋势一开始随着悬臂长度的增加,相应梁段的位移逐渐增大,在 Z20 梁段处达到最大值,之后随着悬臂长度的增加而快速下降,在跨中处接近于 0,超张拉索力增量越大,中跨

组合梁位移变化量也越大。这是因为在边中跨双悬臂施工过程中,永久辅助墩在边跨 B20 梁段施工后完成了与主梁的连接,增加了边跨的刚度,约束了主塔的变形,对主梁的位移起到了限制作用。斜拉索退张拉索力的变化对成桥索力的影响很小,当退张拉索力增加 5%后,成桥索力变化最大差值为 73.5 kN,最大变化幅度仅为 1.4%。

退张拉索力增加时,对中跨主梁竖向位移的影响比超张拉索力增加时更大。在退张拉索力增加 5%时,中跨组合梁竖向位移最大变化量就有 15.4 cm,远远超过了“评定标准”规定的允许值。但退张拉索力增

量为 1% 时,中跨组合梁竖向位移最大变化量为 3.1 cm,并且此时结构应力变化量和塔偏变化量均很小。

因此,该桥斜拉索退张拉索力施工精度应控制在 1.5% 以内。

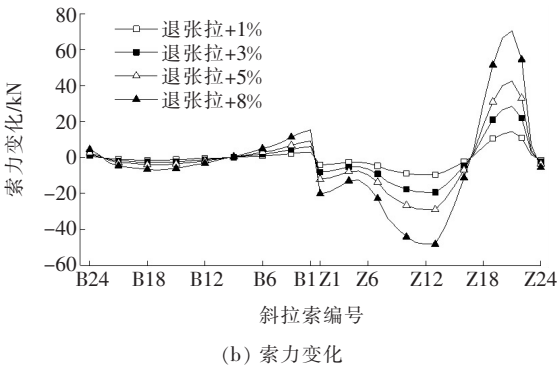
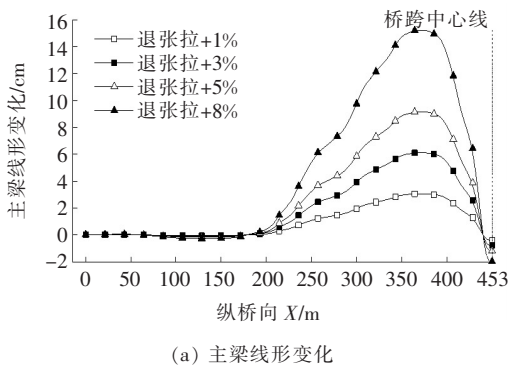


图 5 中跨斜拉索退张拉索力变化对成桥线形和索力的影响

(3) 全桥斜拉索最终调索索力
选取全桥斜拉索最终调索索力为变化量,在设计索力基础上增加 5%、3%、1%,其他结构计算参数均不变,计算得到成桥状态下结构应力和线形的变化如表 3 及图 6 所示。
从表 3 可知:最终调索索力逐渐增加时,对成桥状态下主梁和主塔的应力影响很小,对线形的影响却很

大。从图 6 可知:最终调索索力的变化对边跨混凝土梁线形的影响很小,对于中跨组合梁,其线形随着悬臂长度的增加,相应梁段的位移逐渐增大,在跨中处达到最大值,且最终调索索力增量越大,中跨组合梁位移变化量也越大。最终调索索力的变化对成桥索力影响较大,当最终调索索力增加 5% 时,索力最大差值为 293 kN,变化幅度为 4.58%。

表 3 斜拉索最终调索索力变化下成桥状态主要计算结果对比

索力增加/%	钢主梁最不利应力增量/MPa	桥面板最不利应力增量/MPa	混凝土梁最不利应力增量/MPa	主塔最不利应力增量/MPa	主塔塔偏最大变化量/cm	主梁竖向位移最大变化量/cm
5	-6.29	0.12	0.11	0.35	8.4	32.7
3	-3.78	0.07	0.06	0.21	5.0	19.6
1	-1.26	0.02	0.02	0.07	1.7	6.5

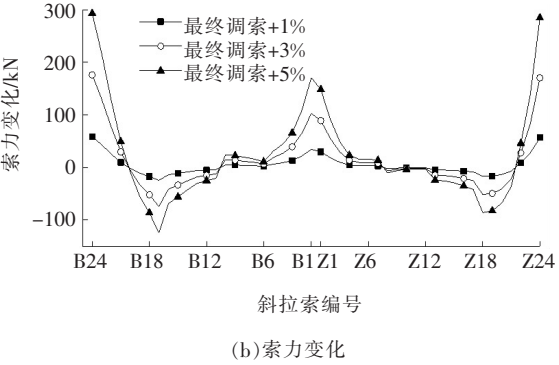
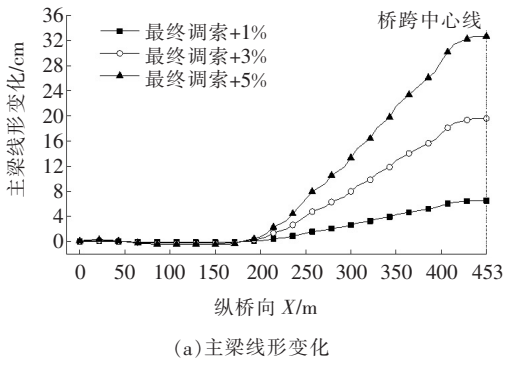


图 6 全桥斜拉索最终调索索力变化对成桥线形和索力的影响

对比超张拉、退张拉和最终调索的索力分别增加 5% 的情况,主塔塔偏的最大变化量依次为 0、1.6、8.4 cm;中跨主梁竖向位移的最大变化量依次为 5.3、15.4、32.7 cm。由此可见,越接近成桥的索力工况,

对成桥状态下结构线形的影响更大。但无论是中跨斜拉索超张拉或退张拉索力还是全桥斜拉索最终调索索力,索力的变化对边跨混凝土梁线形的影响都十分有限,说明边跨混凝土梁主要起锚固梁作用,对索力的变

化并不敏感。当最终调索索力增加 1% 时,虽然成桥状态下主梁和主塔的结构应力响应很小,但是中跨组合梁竖向位移最大变化量却有 6.5 cm,超过了“评定标准”规定的允许值。因此,对于斜拉索最终调索索力施工精度,应对其进行严格控制。

由以上对索力的参数分析可知:该桥中跨线形对索力变化非常敏感,因此,在该桥施工控制过程中,应以“线形控制为主,索力控制为辅”。

3.2 主梁重量

参考已往的斜拉桥结构参数分析文献,发现主梁

重量是影响斜拉桥结构行为的最重要和最敏感参数之一^[13]。对于混合梁斜拉桥,有着边跨重中跨轻的结构特点,无论是边跨混凝土梁超方导致的梁段超重,还是中跨钢箱梁制造误差以及焊缝误差引起的超重,都会对结构行为产生重要的影响。

(1) 边跨混凝土梁重量

选取边跨混凝土梁重量为变化量,在设计重量基础上增加 8%、5%、3%、1%,其他结构计算参数均不变,计算得到成桥状态下结构应力和线形的变化如表 4 及图 7 所示。

表 4 混凝土梁重量变化下成桥状态主要计算结果对比

重量增加/%	钢主梁最不利应力增量/MPa	桥面板最不利应力增量/MPa	混凝土梁最不利应力增量/MPa	主塔最不利应力增量/MPa	主塔塔偏最大变化量/cm	主梁竖向位移最大变化量/cm
8	11.70	0.10	2.82	0.50	23.9	14.3
5	7.31	0.06	1.76	0.31	14.9	8.9
3	4.38	0.04	1.06	0.19	9.0	5.4
1	1.46	0.01	0.35	0.06	3.0	1.8

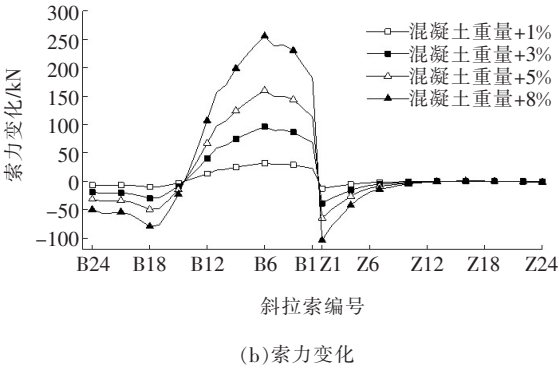
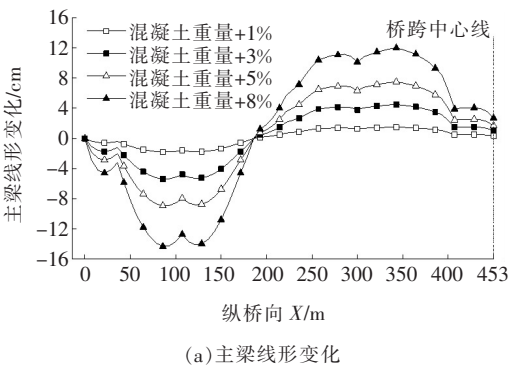


图 7 边跨混凝土梁重量变化对成桥线形和索力的影响

从表 4 可知:混凝土梁重量逐渐增加时,结构的最不利应力都在增大,主塔塔偏最大变化量急剧增加。从图 7 可知:混凝土梁重量增加对边跨和中跨的线形都有着较大的影响。混凝土梁重量增加 8% 后,其边跨主梁竖向位移最大变化量有 14.3 cm,中跨主梁竖向位移最大变化量也有 12 cm,主塔塔偏的最大变化量更是达到了 23.9 cm,因此混凝土梁重量是影响成桥状态下结构应力和线形的一个敏感性因素。混凝土梁重量的变化对成桥索力影响较大,当混凝土梁重量增加 5% 时,索力最大差值为 191.9 kN,变化幅度为 4.08%。

在混凝土梁重量增加 5% 时,中跨组合梁竖向位移最大变化量有 7.5 cm,大于“评定标准”要求的 5.3

cm,主梁线形超出了规范允许值。当混凝土梁重量增加 3% 时,边跨混凝土梁竖向位移最大变化量为 5.4 cm,小于“评定标准”要求的 10.6 cm,中跨组合梁竖向位移最大变化量为 4.5 cm,小于“评定标准”要求的 5.3 cm,满足施工控制精度要求。所以该桥混凝土梁重量的施工精度,应控制在 3% 以内,根据重量换算成主梁截面板厚,即混凝土梁板厚平均误差应控制在 1 cm 以内。

考虑到混凝土梁在施工过程中很容易由涨模导致板厚产生偏差,在前几个梁段悬臂浇筑时,一定要通过参数识别和反馈分析来确定实际板厚的平均超厚情况,以便采取相应的措施^[14]。

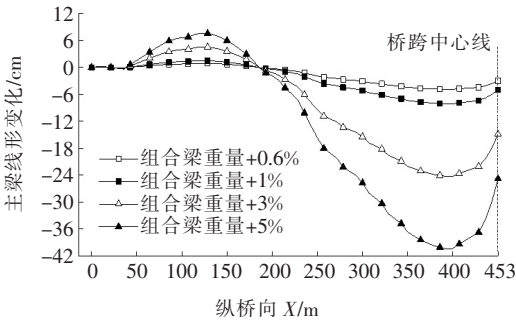
(2) 中跨组合梁重量

选取中跨组合梁重量为变化量,在设计重量基础上增加 5%、3%、1%、0.6%,其他结构计算参数均不

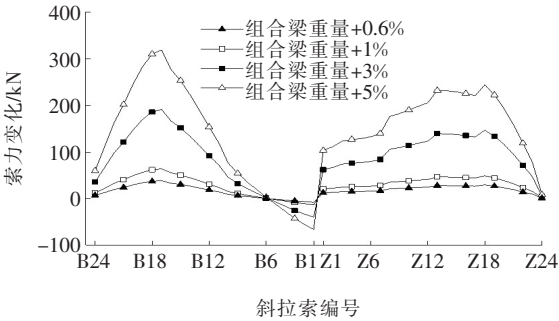
变,计算得到成桥状态下结构应力和线形的变化如表 5 及图 8 所示。

表 5 组合梁重量变化下成桥状态主要计算结果对比

重量增加/%	钢主梁最不利应力增量/MPa	桥面板最不利应力增量/MPa	混凝土梁最不利应力增量/MPa	主塔最不利应力增量/MPa	主塔塔偏最大变化量/cm	主梁竖向位移最大变化量/cm
5	16.65	-1.11	0.97	0.74	24.7	40.4
3	9.99	-0.67	0.57	0.20	14.8	24.3
1	3.33	-0.23	0.17	0	4.9	8.1
0.6	2	-0.14	0.09	0	3.0	4.9



(a) 主梁线形变化



(b) 索力变化

图 8 中跨组合梁重量变化对成桥线形和索力的影响

从表 5 可知:中跨组合梁重量逐渐增加时,除了桥面板最大压应力有所减小,其他结构的最不利应力都在相应增大,主塔塔偏和主梁竖向位移的最大变化量均大幅度增加。所以组合梁重量也是影响成桥状态下结构应力和线形的一个敏感性因素,其敏感性要大于混凝土梁重量。从图 8 可知:组合梁重量对中跨主梁线形影响极大,组合梁重量增加 5% 时,中跨主梁竖向位移最大变化量达到了 40.4 cm。组合梁重量的变化对成桥索力影响也很大,当组合梁重量增加 5% 时,索力最大差值为 319 kN,变化幅度达到 6%。

当组合梁重量增加 0.6% 时,边跨混凝土梁竖向位移最大变化量为 1 cm,小于“评定标准”要求的 10.6 cm,中跨组合梁竖向位移最大变化量为 4.9 cm,小于“评定标准”要求的 5.3 cm,满足施工控制精度要求。所以该桥组合梁重量的施工精度,应控制在 0.6% 以内。组合梁由钢主梁和桥面板两部分构成。对于钢主梁,考虑到预制时厂家的制造误差以及现场施工时的焊缝误差,因此宜对钢梁重量进行逐段称重,在梁重实际值与理论值有较大偏差的情况下需根据实际情况对梁段的拼装线形进行相应的调整^[1]。对于桥面板,由于组合梁重量对成桥线形影响极大,应在桥面板预制

过程中严格控制板厚,减少出现超重现象。

3.3 挂篮过辅助墩悬臂长度

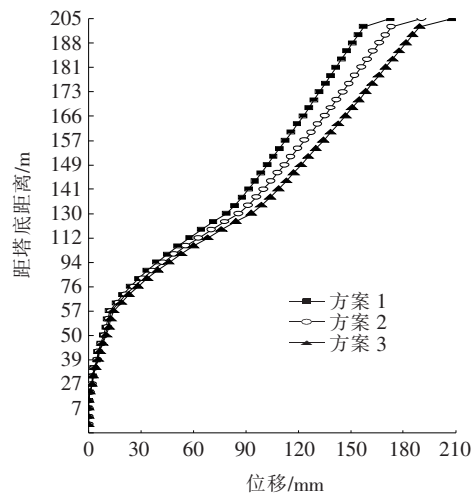
为了减小主梁最大双悬臂长度,该桥在边跨设置有施工临时辅助墩,位于 B8 节段下方,临时墩与主梁连接后,可有效约束施工过程中主塔的变形,显著降低主塔的受力及位移^[15];还设置有永久辅助墩(位于 B18 节段下方)来提高桥梁整体刚度并承担边跨的压重。原设计图纸施工过程中为方便边跨牵索挂篮的移动与架设,在挂篮分别悬臂通过施工临时辅助墩和永久辅助墩两个梁段后,再浇筑各自辅助墩的剩余墩身,安装永久支座让主梁与施工临时辅助墩或永久辅助墩形成连接,并搭设落地支架浇筑辅助墩顶横梁后浇混凝土。但是施工临时辅助墩和永久辅助墩的剩余墩身以及永久辅助墩墩顶横梁的施工周期较长,挂篮仅仅过辅助墩悬臂两个梁段可能导致现场作业出现较严重的“窝工”情况,进而影响工期。所以,有必要对增加挂篮过辅助墩悬臂长度的情况进行参数分析。

(1) 挂篮过施工临时辅助墩悬臂长度

针对挂篮过施工临时辅助墩悬臂长度进行计算论证,主要计算结果见表 6 及图 9。其中:方案 1 是原设计方案的挂篮悬臂通过临时墩 2 个梁段后主梁再与临

表 6 3 种过临时墩方案的施工过程主要计算结果对比

方案	钢主梁最大压应力/MPa	钢主梁最大拉应力/MPa	桥面板最大压应力/MPa	桥面板最大拉应力/MPa	混凝土梁最大压应力/MPa	混凝土梁最大拉应力/MPa	斜拉索最大拉应力/MPa	连接临时墩前塔顶最大偏位/cm	连接临时墩前塔顶最大偏位工况下主塔最小压应力/MPa
1	128.23	37.46	11.62	1.33	12.75	1.32	847.3	17.3	1.53
2	127.96	37.46	11.12	1.33	12.75	1.32	847.3	19.0	1.50
3	127.91	37.46	10.61	1.33	12.73	1.32	847.3	20.8	1.47



(注:负值为边跨侧,正值为中跨侧)

图 9 3 种方案连接临时墩前主塔最大纵向位移图

时墩形成连接;方案 2 是挂篮悬臂通过临时墩 3 个梁段后主梁再与临时墩形成连接;方案 3 是挂篮悬臂通过临时墩 4 个梁段后主梁再与临时墩形成连接。

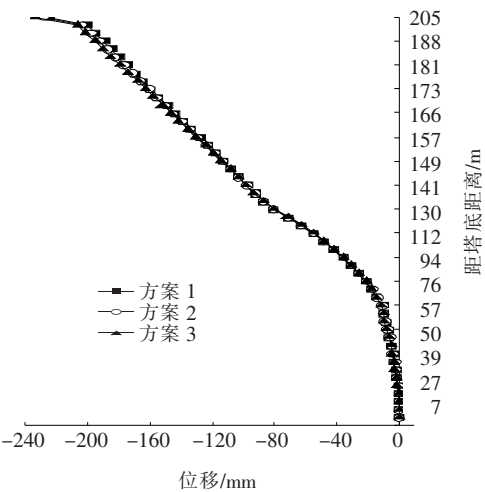
从表 6 可以看出:3 种过临时墩方案施工过程中的结构应力均符合规范要求。边跨主梁与施工临时墩连接前的最不利工况为最大悬臂梁段中跨起吊组合梁,此时塔偏最大(往中跨方向)且下塔柱压应力储备最小。从表 6、图 9 中知:3 种方案下边跨主梁连接临时墩前主塔最大纵桥向偏位随着悬臂长度的加大而变大,下塔柱压应力储备随悬臂长度的加大而变小。其中方案 3(悬臂 4 个梁段)塔顶偏位达到 20.8 cm,下塔柱最小压应力储备为 1.47 MPa。

该桥地处台风多发地区,施工过程中风荷载会对桥梁产生不利影响,有时还可能会加大最不利工况下的塔顶偏位,导致塔柱压应力储备变小甚至在极限状态下出现拉应力。而且连接施工临时墩前主梁悬臂长度对塔偏影响大,此时塔柱压应力储备小,所以不宜增加挂篮过临时墩的悬臂长度,应采用设计方案即方案 1;在双悬臂状态下挂篮过施工临时墩最大悬臂长度应控制在 2 个梁段(B9 梁段施工完成且桥面吊机和挂篮前移后)。并且在双悬臂施工状态下,应控制好塔柱两

边的重量差,特别是在未连接临时墩前的最大悬臂梁段施工时。

(2) 挂篮过永久辅助墩悬臂长度

针对挂篮过永久辅助墩悬臂长度进行计算论证,主要计算结果见图 10、表 7。其中,方案 1 是原设计方案的挂篮悬臂通过永久墩 2 个梁段后主梁再与永久墩形成连接;方案 2 是挂篮悬臂通过永久墩 3 个梁段后主梁再与永久墩形成连接;方案 3 是挂篮悬臂通过永久墩 4 个梁段后主梁再与永久墩形成连接。



(注:负值为边跨侧,正值为中跨侧)

图 10 3 种方案连接永久墩前主塔最大纵向位移图

在挂篮过永久辅助墩时,因为在已施工梁段 B8 下方连接有施工临时墩,而临时墩能在一定程度上限制主塔的变形。从图 10、表 7 可知:在边跨主梁过永久辅助墩时塔柱有一定的压应力储备,增加一个悬臂梁段对塔偏和塔应力的影响较挂篮过临时辅助墩时小,过永久辅助墩的 3 种施工方案,其结构应力均符合规范要求,由于此时主塔压应力较挂篮过施工临时辅助墩时储备大些,所以可采用方案 3:挂篮悬臂通过永久辅助墩 4 个梁段(B21 梁段施工完成且桥面吊机和挂篮前移后)主梁再与永久墩形成连接。但是 3 种方案下连接永久墩前的塔顶最大偏位都很大,维持在 23 cm

表 7 3 种过永久墩方案的施工过程主要计算结果对比

方案	钢主梁最大压应力/MPa	钢主梁最大拉应力/MPa	桥面板最大压应力/MPa	桥面板最大拉应力/MPa	混凝土梁最大压应力/MPa	混凝土梁最大拉应力/MPa	斜拉索最大拉应力/MPa	连接永久墩前塔顶最大偏位/cm	连接永久墩前塔顶最大偏位工况下主塔最小压应力/MPa
1	128.42	37.46	11.58	1.33	12.76	1.32	847.3	22.6	2.35
2	128.60	37.46	11.57	1.33	12.76	1.32	847.3	23.0	2.43
3	128.76	37.46	11.57	1.33	12.76	1.32	847.3	23.4	2.50

左右,施工过程中应严格控制施工临时荷载和桥顶偏位,采取相应的抗风措施,保证施工安全。

4 结论

(1) 该桥中跨斜拉索超张拉索力应控制在 5%以内,中跨斜拉索退张拉索力应控制在 1.5%以内,全桥斜拉索最终调索索力应控制在 1%以内。斜拉索索力的参数分析结果表明:越接近成桥的索力工况,对成桥状态下结构线形的影响越大;和中跨相比,边跨混凝土主梁线形对索力的变化不敏感。在施工控制过程中,该桥应以线形控制为主,索力控制为辅。

(2) 主梁重量对混合式组合梁斜拉桥成桥状态的结构行为有显著影响,中跨组合梁重量的敏感性要大于边跨混凝土梁重量。该桥混凝土梁重量的施工精度应控制在 3%以内,即混凝土梁板厚平均误差应控制在 1 cm 以内;组合梁重量应控制在 0.6%以内,在梁重实际值与理论值有较大偏差的情况下应根据实际情况对索力和梁段的拼装线形进行相应的调整。

(3) 在双悬臂施工过程中,挂篮过施工临时辅助墩悬臂长度对塔偏影响大,此时塔柱压应力储备小,不宜增加悬臂长度,所以挂篮过临时墩最大悬臂长度应控制在 2 个梁段;挂篮过永久辅助墩时,由于已有临时墩限制主塔的变形,塔柱也有一定的压应力储备,增加 2 个悬臂梁段对塔偏和塔应力的影响较小,所以挂篮过永久辅助墩最大悬臂长度可适当增加,最大可控制在 4 个梁段。为保证施工安全,在双悬臂施工状态下,应控制好塔柱两边的重量差。

参考文献:

[1] 李乔,卜一之,张清华. 大跨度斜拉桥施工全过程几何控制概论与应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2009.

[2] 唐启. 泉州湾跨海大桥钢混组合梁施工控制参数敏感性分析[J]. 世界桥梁,2016,44(5):57—61.

[3] LI Zhongsan, LEI Junqing, YAN Donghuang. Analysis of Parameters' Sensitiveness of Long-Span Hybrid Girder Cable-Stayed Bridge [J]. Key Engineering Materials, 2012,517:817.

[4] 罗巍巍,彭杰,保云辉,等. 温度效应对混合—组合梁斜拉桥受力性能影响分析[J]. 湖南交通科技,2019,45(3):99—101,171.

[5] 胡明义,黄冰释,余俊林,等. 鄂东长江公路大桥设计关键技术[J]. 桥梁建设,2011,41(5):64—68.

[6] 苟勇,林伟,罗载重,等. 奇龙大桥独塔钢混结合梁斜拉桥施工主要技术[J]. 公路,2018,63(2):116—119.

[7] 姚森. 不对称双悬臂混合梁斜拉桥主梁施工方法研究[J]. 交通科技,2018(6):43—47.

[8] 彭建萍. 混合梁斜拉桥不对称双悬臂施工技术[J]. 桥梁建设,2018,48(1):118—122.

[9] 付炳宁,宋松林,冯云成. 不对称悬臂施工的混合梁斜拉桥分析[J]. 中外公路,2017,37(2):146—150.

[10] 李传习,夏桂云. 大跨度桥梁结构计算理论[M]. 北京:人民交通出版社,2002.

[11] 刘增武,辛景舟,周水兴,等. 异形索塔斜拉桥参数敏感性分析[J]. 中外公路,2020,40(5):76—80.

[12] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程质量检验评定标准第一册:土建工程:JTG F80/1—2017[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

[13] 张玉平. 多塔空间索斜拉桥施工控制关键技术研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2014.

[14] 肖勇刚,刘楚南. 考虑轮迹横向分布的钢箱梁桥面板 U 肋处受力与疲劳分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(1):41—46,59.

[15] LOZANO-galant J A, PAYA-Zaforteza L, XU D, et al. Analysis of the Construction Process of Cable-Stayed Bridges Built on Temporary Supports[J]. Engineering Structures, 2012,40(7):95—106.