

鄂黄长江大桥塔索锚固区受力分析

朱玉 王宜均 王镛生 杨耀铨 南军强

摘要 我国的斜拉桥中,预应力混凝土桥塔有着广泛的应用。本文运用有限元方法,对鄂黄长江大桥空心预应力混凝土桥塔塔索锚固区进行了受力分析。指出了其力学特性,并对类似结构的设计提出了若干建议。

关键词 预应力混凝土 塔索锚固区 受力分析

近年来,斜拉桥以其挺拔的造型、较大的跨越能力,而被日益广泛采用。在已建和在建的斜拉桥中,普遍采用预应力混凝土桥塔。斜拉桥的桥塔是主要的承重构件,其上塔柱塔索锚固区是把主梁内力通过斜拉索传递到主塔的关键环节。由于斜拉索在塔上交叉锚固和采用锚固钢横梁的做法存在诸多不足,近年来常采用在塔索锚固区布设预应力束以平衡斜拉索的强大拉力。塑料波纹管 and 真空吸浆新工艺,为布设小半径、大吨位的 U 形(平面)预应力束提供了有利条件。

鄂黄长江大桥(简称鄂黄桥)为五跨一联、主跨 480m 的双塔双索面预应力混凝土斜拉桥,全漂浮体系。主梁为整体式 π 形断面,双向四车道,全桥宽 24.5m。花瓶形桥塔,主塔高 172.3m,上塔柱高 69.7m,为斜拉索塔上锚固区,箱形断面,外形尺寸 7.0×4.8 m,侧壁厚度为 1.0m,前壁厚度为 1.5m。每个塔柱有 29 对斜拉索锚固(0 号索除外),属密索体系。塔上索距 1.5m,梁上索距 8.0m。塔前壁设斜拉索钢锚固齿槽,塔索锚固区尾索段一个索距布设 6 束 $19\phi 15.24$ U 形预应力钢绞线,曲线半径 1.6m。U 形预应力束横桥向布设(开口于横桥向)。采用塑料波纹管、真空吸浆工艺。目前,这种大吨位、小半径预应力束形式国内应用较少,因而对这种束形式的塔索锚固区进行受力分析是非常必要的,以便较全面的掌握结构的应力状态,并可为同类结构的类似配束提供参考。

1. 结构形式与计算模型

鄂黄桥塔索锚固区的布设形式如图 1 所示。为详细考查塔索锚固区在施工、运营等各个阶段的应力状态及不同施工阶段之间的相互影响,此次计算采用的有限元模型与预应力束束方式比选时的模型略有不同:计算模型的高度沿塔高方向取为两个索距(3.0m),考虑到结构对称及荷载近似对称,仍取沿塔柱高为两个索距的 1/4 结构作为计算模型。

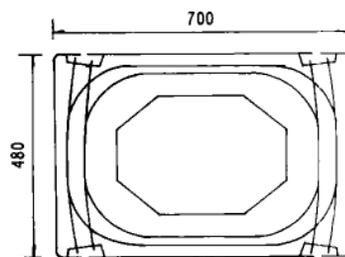


图 1 塔索锚固区 U 形预应力束布置

1.1 有限元离散

有限元离散计入了塔前壁斜拉索锚固齿槽及斜拉索预留孔,同时考虑了齿槽和索孔的倾斜,计算模型基本模拟了实际结构。此模型共离散为 4468 个节点,3544 个 8 节点块单元,单元刚度计算采用非协调插值列式,2 阶高斯积分点。材料特性作了以下简化:塔壁按各向同性的匀质弹性体考虑,未计入劲性骨架及普通钢筋;钢锚固槽及钢索导管也未计入。塔体按(50 号)混凝土,弹模 $E = 3.5 \times 10^7$ kPa,泊松比 $\mu = 0.163$ 。计算模型的有

限元离散示于图2。

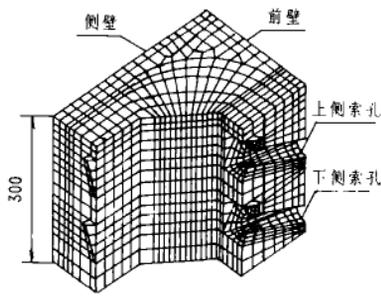


图2 单元离散

1.2 边界条件

在前壁和侧壁的对称面处,分别约束其横桥向和顺桥向的线位移;底面约束其竖向位移。

1.3 荷载及荷载工况

1.3.1 预应力

预应力的作用换算为等效外荷载。在有效预应力的计算中,主要考虑了摩擦损失 σ_{s1} ,锚具变形、钢筋回缩损失 σ_{s2} (计入了负摩擦),预应力筋的松弛损失 σ_{s3} 。由于采用塑料波纹管以减小摩擦损失,其相应参数为:摩擦系数 $\mu=0.2$,管道偏差系数 $K=0.001$ 。等效预应力荷载的施加计入了预应力值的沿程变化。

1.3.2 斜拉索力

斜拉索力按最不利组合值来取值,分别为尾索索力($N_{max}=6810kN$),邻索索力($N_{max}=6235kN$),实际施加时,分别相应换算为18个均匀分布在索孔周围的节点力,其作用方向与相应索孔的倾角一致。

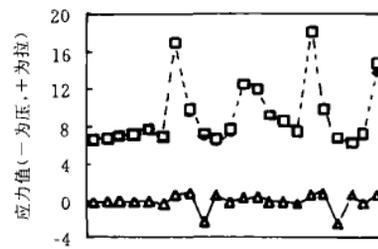
1.3.3 荷载工况

为仔细考查塔索锚固区在各个阶段的应力状态,文中设置了五种荷载工况:工况一,仅施加斜拉索索力(未张拉预应力束),此工况为虚拟的,设置此工况目的在于考查斜拉索力作用下塔体的应力分布特点,为合理布束提供依据;工况二,仅张拉下侧索孔处预应力束;工况三,张拉全部(两索孔处)预应力束;工况四,张拉全部(两索孔处)预应力束,仅施加下侧斜拉索索力;工况五,张拉全部(两索孔处)预应力束,并施加全部斜拉索(两索)索力。

2. 结果与建议

按照前述建立的有限元模型,运用SAP93有限元分析软件对鄂黄桥塔索锚固区进行了线弹性空间应力分析。

工况一,对于仅施加斜拉索索力的情形,塔前壁的受力最为不利。前壁外侧全部为拉应力,其对称面处最小拉应力为6.2MPa,两个斜拉索孔附近均存在明显的应力集中,应力集中表现出对索孔中心的显著偏离,且具有不对称性,即最大拉应力出现在下侧索孔上缘(18.0MPa,上侧索孔的上缘16.9MPa),索孔下缘拉应力明显减小(9.6MPa,上侧索孔的下缘9.8MPa),较大的拉应力出现在索孔下缘正下方20cm处(13.7MPa)。这主要是由斜拉索锚固槽的深度不一(上深下浅)和索孔倾斜所致。塔侧壁的应力沿塔高度方向分布均匀,沿横截面方向弯曲应力特征明显,内侧约为5.3MPa拉应力,外侧为压应力约1.8MPa。图3为塔前壁外侧对称面处正应力、主应力沿塔高度方向的变化(自上而下),图中正应力峰值点处为斜拉索孔的上缘节点,左侧为上索孔,右侧为下索孔。



离散点(自上向下)

图3 正应力、主应力沿塔高度方向的变化
(塔前壁外侧对称面处,工况一)

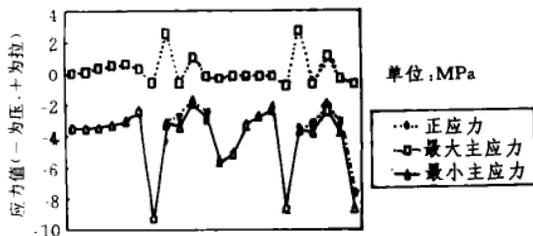
工况二分析表明,塔前壁外侧均为压应力,压应力沿塔高度方向扩散(自下而上逐渐减小),即由下侧索孔附近的7.5MPa递减至上部的1.3MPa。前壁内侧应力表现出一定的跳跃性,从总体而言,下侧索孔至上侧索孔下缘仍为压应力,最大值为5.6MPa,最小值为0.7MPa,这主要是由锚固槽的存在引起的。值得指出的是,上侧索孔锚固槽上缘出现3.1MPa的拉应力,这在施工过程中应引起注意。鄂黄桥在此处设置钢锚固槽有益于降低拉应力的值。塔侧壁存在类似的应力扩散现象,但无跳跃,内侧均为压应力,最大值为5.9MPa,最小值为2.5MPa;外侧下部为压应力,最大值为1.0MPa,上部为拉应力,最大值为0.9MPa。

工况三分析表明,塔前壁外侧均为压应力,最

小压应力为 8.3MPa。同工况一类似,前壁外侧表现出明显的应力集中,下侧索孔上缘为最大压应力 26.6MPa,下缘压应力为 13.0MPa,下部较大压应力出现索孔下缘正下方 20cm 处 (21.3MPa)。内侧也均为压应力,最大压应力为 3.65MPa。侧壁应力沿塔高度方向分布均匀,对称面处内侧最大压应力为 9.9MPa,外侧最小压应力 0.4MPa。侧壁最大压应力出现在内侧加腋处,其值为 11.2MPa。此外,塔前壁外侧与侧壁外侧相交处有 1.5MPa 拉应力,分布宽度约为 15cm。

工况四分析表明,施加下侧斜拉索力除对其锚固区附近影响较大(外塔前壁对称面处压应力降低约 13MPa),对上侧索孔处塔壁混凝土应力影响不显著。

工况五对于成桥运营状态,塔壁均处于受压状态,但前壁和侧壁均表现出明显的弯曲应力特征,前壁内侧最小压应力为 10.1MPa,外侧最小压应力为 2.2MPa;侧壁内侧最小压应力为 4.2MPa,外侧最小压应力为 2.1MPa,弯曲应力的存在降低了结构的承载力。前壁内侧在斜拉索锚固槽的侧壁出现 2.1MPa 的拉应力,应引起设计者的注意。塔前壁外侧与侧壁外侧相交处仍有 1.4MPa 拉应力,分布宽度未变(15cm),可见此拉应力系由张拉预应力束阶段(工况三)U形预应力束锚固引起的,斜拉索的张拉锚固对其影响微弱。另外,塔前壁加腋处受齿槽开挖的削弱,在齿槽处出现 1.5MPa 拉应力,设计时应局部加强此处的构造。图 4 为运营状态塔前壁外侧对称面处正应力、主应力沿塔高度方向的变化(自上而下),



离散点(自上向下)

图 4 正应力、主应力沿塔高度方向的变化
(塔前壁外侧对称面处,工况五)

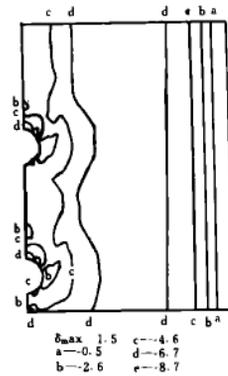


图 5 正应力等值线图
(前壁外侧)

图中正应力峰值点处为斜拉索孔的上缘节点,左侧为上索孔,右侧为下索孔。图 5 为运营状态塔前壁外侧正应力等值线图,图中+号表示拉应力,-号表示压应力,单位为 MPa。

从以上的分析结果可知,在预应力混凝土桥塔的设计中,对塔索锚固区应注意以下问题:

2.1 塔前壁外侧是拉应力最易出现的地方,且应力集中明显,布设预应力束时,应考虑加强此处的压应力储备,如,布设 U 形预应力束,可采用横桥向布束方式,它获得的压应力储备比顺桥向布束高,并且配束率比顺桥向布束时还要低。同时,还应注意加强索导管预留孔出口端的构造措施。

2.2 施工(工况二)和运营(工况五)阶段显示,斜拉索锚固槽的上缘和侧壁分别出现 3.1MPa 和 2.1MPa 的拉应力,应加强此处的防裂构造措施。鄂黄桥在此处设置了既做施工模板又可防裂的钢锚固槽。

2.3 预应力束锚固时在塔前壁与侧壁相交处产生宽约 15cm 的拉应力区,可设置倒圆角,释放此处角隅的应力,同时也便于施工脱模。

2.4 各个工况均表明,塔前壁与侧壁以弯曲应力为主。成桥运营(工况五)状态,最小压应力均出现在塔前侧壁的外侧表面,建议 U 形预应力束靠近塔壁的外侧布设,以减小塔壁的弯曲应力,使塔壁受压均匀。

3. 结论

通过对鄂黄长江大桥塔索锚固区的受力分析,可以得到如下初步结论: (下转第 22 页)

9. 穿布新增预应力束

预应力束选用环氧全涂装无粘结筋,采用OVM-ul型,即无粘结钢绞线束置于PE管中,管内填充环氧树脂被覆膜,高强钢丝之间涂一层油脂层。张拉端锚具采用BM15-3型;固定端锚具采用OVM15H-3型。因新增预应力束和底面基本等高,设计图中部分钢束的锚固点距底面15cm,故穿束时需在原底板齿板上开槽,以利于顺利穿束,开槽时注意不要扰动附近底板束,穿束时注意不要损坏钢绞线外的PE护套。

10. 张拉预应力束

预应力束穿束就位后,即可进行张拉,对同一齿板束预应力进行张拉时,为消除由张拉次序先后引起的预应力束的弹性压缩损失,宜采用超张拉式重复张拉的方法,调整各束的预加力,使得各根钢束的有效预加力基本相等,张拉过程中应对新增齿板区域及原底板裂缝进行观测,以防止意外发生并检验加固效果,如有异常情况发生,应立即停止张拉。

11. 封锚及体外预应力束防护

体外预应力束张拉完成后,应给张拉端套上凹形模套,然后按常规方法封锚。齿板中间悬空部分预应力束用聚乙烯带进行防护。

五、加固效果分析

1. 箱梁内体外预应力

在主梁支点附近增加体外预应力,可明显改善该桥主梁的受力状态,通过对主梁底板增加预

应力,达到降低主梁支点附近拉应力,限制底板裂缝的继续伸展,保证结构的整体受力,弥补原桥的先天不足。从计算结果可以看出,加固前在荷载组合I、II、III情况下,主梁上下缘均出现拉应力,以边跨距支点6米左右为最大,其值为1.72MPa。加固后该截面的拉应力降到0.19MPa,主梁上下缘的拉应力均小于0.5MPa。

2. 新增齿板应力验算

为了保证在增加预应力束后箱梁底齿板范围内底板有一定压应力储备,不至于因新增预应力束的张拉引起齿板附近底板产生新的裂缝,故应对箱梁齿板范围内的局部应力进行验算,根据新增齿板的实际位置建立的空间实体模型及计算结果如下。从计算结果看齿板上缘一定范围内存在较大的压应力,在齿板锚头处前缘底板出现部分拉应力,其最大拉应力未超出0.5MPa(不计普通钢筋作用),其它部分拉应力也未超出设计容许值,说明在新增预应力束张拉后,新增齿板及齿板附近底板处于良好的受力状态。

六、结语

该桥加固工程于1999年8月下旬正式开工,2000年1月上旬完成了全部主体工程。在加固过程中,由于采用了较先进的加固手段和施工工艺,在桥梁加固领域中具有一定的代表性。由于方法得当,措施得力,桥梁加固后刚度得到大幅度提高,箱梁通车运营时的振幅明显减少,改善了箱梁的运营环境,达到了设计加固目的。

(上接第15页)

3.1 建立塔索锚固区的有限元分析模型时,应考虑齿槽开挖和索孔倾斜的影响,这样才能较真实的反映塔前壁的应力分布。

3.2 在斜拉索力的作用下,塔前壁的受力最为不利,计算表明,鄂黄桥塔索锚固区采用横桥向布设的U形预应力束,保证了在此处有一定的压应力储备,这种布束能较好的满足设计要求。

3.3 塔前壁内侧锚固槽上缘最不利的受力状况(可能造成开裂),出现在预应力束部分张拉阶

段(工况二),而不是全部预应力束张拉完毕。这在施工过程中应引起注意。

3.4 从正应力和主应力的关系(图3.4)可知,塔索锚固区的受力以正应力为主,换句话说,只要控制塔索锚固区正应力分布,塔索锚固区的受力就可得到有效控制。

3.5 工况三表明,鄂黄桥塔索锚固区采用的预应力布束方式,预应力束张拉和斜拉索挂索可分别进行,方便了施工。