

体外预应力加固桥梁锚固结构的细部分析

窦勇芝 汪孝龙

(柳州欧维姆工程有限公司 广西柳州 545002)

摘要:以南宁市邕江大桥体外预应力加固工程为背景,采用空间有限元分析方法,对锚固在原结构一般梁截面的锚固结构进行细部分析,根据获得的空间应力分布特点,考虑采用槽钢、螺纹钢和钢筋层对锚固结构进行局部加固的构造措施,分析表明:在锚固结构与原结构交接部位设置槽钢、螺纹钢,能有效地降低该位置混凝土的应力集中,使得应力分布趋于均匀,局部应力满足规范限值要求。同时,工程实践表明,该有限元细部分析方法较为符合实际锚固结构的受力特点,其计算结果和局部加固的构造措施,可作为同类体外预应力加固桥梁锚固结构设计和施工的重要参考。

关键词:体外预应力加固 锚固结构 有限元法 细部分析

1 引言

体外预应力加固是通过增设体外预应力索对既有混凝土梁体主动施加外力,以改善原结构受力状况的加固方法^[1]。体外预应力技术应用于旧桥加固,主要通过施加一定预加力产生的反弯矩,来部分抵消外荷载产生的内力,从而达到改善旧桥使用性能并提高承载能力的目的。其特点是体外索只在锚块和转向块处与结构相连,体外索完全依靠锚固系统提供预加力^[2]。在旧桥体外预应力加固中,锚固系统多可靠地锚固在横(隔)梁中,但有时出于方便施工,满足施工张拉空间的需要,锚固系统仅锚固在原结构一般梁截面的顶板、腹板或底板、腹板上,由于体外预应力结构锚固区较靠近原有结构与锚固结构的连接处,在体外索很大的锚下压力作用下,在连接处附近的局部应力较大,应力分布复杂且不均匀,导致在施工张拉过程中,极易引起混凝土结构局部开裂、破坏。一旦锚固结构出问题,将导致整个体外预应力加固体系的崩溃。故对此种情况下的锚固结构进行细部分析尤为重要。

文中运用空间有限元分析程序Ansys,对广西南宁市邕江大桥体外预应力加固工程中的锚固结构进行了细部分析,根据空间应力分布的特点,对锚固结构采取了局部的加固措施,经有限元线弹性分析表明,空间局部过大应力得到较大的改善,应力分布趋于均匀,应力值相对于新旧混凝土的抗拉设计强度均有足够的安全储备。通过张拉加固施工实践证明,该局部加固措施安

全、可靠,保证了锚固系统可靠地锚固在原结构一般梁截面上,可为同类体外预应力加固桥梁的设计和施工提供借鉴。

2 工程概况

广西南宁市邕江大桥是南宁市沟通邕江两岸的一座重要桥梁,邕江大桥为国内最早采用闭口薄壁杆件理论设计的一座悬臂式钢筋混凝土薄壁箱型城市桥梁。桥梁全长394.6m,桥梁全宽24.6m,设计荷载等级为汽-18、拖-80,桥梁结构跨径组成为(45+16)m(单悬臂简支梁)+23m(挂梁)+(16+55+16)m(双悬臂简支梁)+23m(挂梁)+(16+55+16)m(双悬臂简支梁)+23m(挂梁)+(16+45)m(单悬臂简支梁)。上部结构为两个独立的单箱三室截面,两个箱梁之间用简支板支承于箱梁的悬臂上;在墩台处设置刚接的连续横隔梁,其余的横隔梁均为简支,用以支承煤气、水管管道。下部结构北岸为埋置式桥台,南岸为U型桥台。桥墩采用双柱式,支承于分离式沉井基础上。1号墩和4~6号墩为筑岛及就地预制沉井基础,2号墩、3号墩因施工水位深达11m,采用预制双层薄壁钢筋混凝土浮运沉井,如图1。

邕江大桥于1964年7月正式通车。经过近45年的正常营运后,2007年经检测确定该桥存在不同程度影响安全运营和正常使用的病害,其中该桥支点负弯矩区箱梁顶板出现大量横桥向裂缝,且大部分裂缝已贯通箱梁顶板,并向两侧腹板延伸,裂缝宽度大多在0.1~0.5mm间,个别裂缝宽

度达到1.0mm, 远超出《城市桥梁养护技术规范》CJJ99-2003第5.4.2条要求, 裂缝宽度、数量较1998年的检测结果增加较多。故针对箱梁支点负弯矩区承载力严重不足, 考虑按照汽-15、挂-80、人群3.5kN/m²的设计标准采用体外预应力索加固。

锚固结构采用C50自密实预拌混凝土, 尺寸为105cm×95cm×160cm, 如图2。体外预应力索单孔采用9φ^{15.24}带PE护套的环氧涂层钢绞线, 锚垫板的尺寸为240mm×240mm×290mm, 体外索锚下控制应力为0.6×1860MPa, 弹性模量取195GPa。

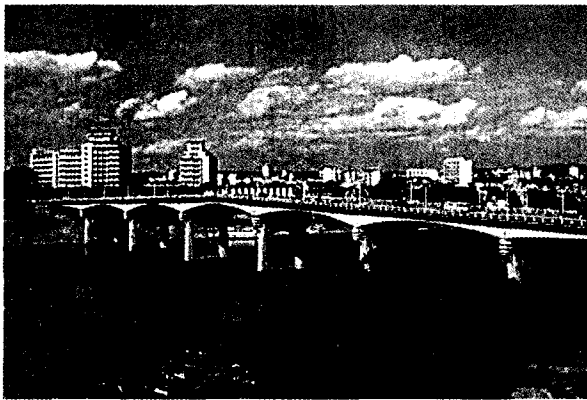


图1 邕江大桥总体图

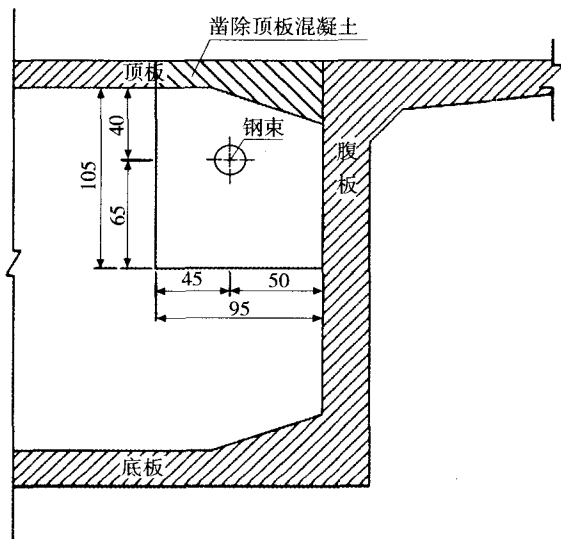


图2 梁截面锚固块布置(单位: cm)

3 有限元分析模型

3.1 有限元建模

原结构与锚固结构混凝土采用8节点、每节

点3个自由度的六面体实体单元Solid65模拟, 材料属性分别取C30、C50混凝土的材料参数, 混凝土弹性模量分别取30GPa、34.5GPa, 泊松比为0.1667。锚垫板采用8节点、每节点3个自由度的六面体实体单元Solid45模拟, 弹性模量取200GPa, 泊松比为0.1667。根据圣维南原理, 远离锚固结构的构件的受力状况对锚固结构受力的影响可以忽略不计, 建模时横向取1/2箱室宽度, 纵向箱梁取锚固段长3.2m, 竖向取梁全高, 采用映射网格进行分网, 如图3。同时, 在原结构与锚固结构连接位置处进行网格加密。按照理想弹性材料计算锚固段的应力分布。

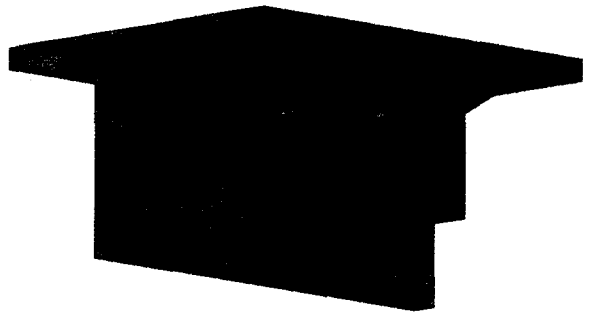


图3 锚固段有限元网格划分

3.2 边界条件、加载和求解

对该箱梁截面边缘均施加固定约束限制3个自由度, 空间应力分析时不考虑梁段的自重作用, 计算模型中的荷载为体外预应力索的锚下压力, 通过转化为面荷载施加在锚垫板上。采用修正的Newton-Raphson法求解。

3.3 有限元结果分析

图4为箱梁锚固结构在体外索锚下压力作用下的各应力云图。

(1) 图4(a)为横向应力 σ_x 云图, 拉应力峰值为2.23MPa, 主要分布在锚固结构与箱梁腹板连接处靠近锚固端的角隅区域; 压应力峰值为4.87MPa, 主要分布在锚垫板区域。

(2) 图4(b)为竖向应力 σ_y 云图, 拉应力峰值为1.24MPa, 主要分布在锚固结构与箱梁顶板连接处靠近锚固端区域以及锚固结构距锚固端近50cm区域范围内; 压应力峰值为5.87MPa, 主要分布在锚垫板区域。

(3) 图4(c)为纵向应力 σ_z 云图, 拉应力

峰值为3.53MPa, 主要分布在锚固结构与箱梁顶板、腹板连接处靠近锚固端区域; 压应力峰值为16.2MPa, 主要分布在锚垫板区域。

(4) 图4(d)、(e)分别为主拉应力 σ_1 云图和主压应力 σ_3 云图, 最大主拉应力峰值为3.92MPa, 主要分布在锚固结构与箱梁顶板连接处靠近锚固端区域; 最大主压应力峰值为17.4MPa, 主要分布在锚垫板区域。

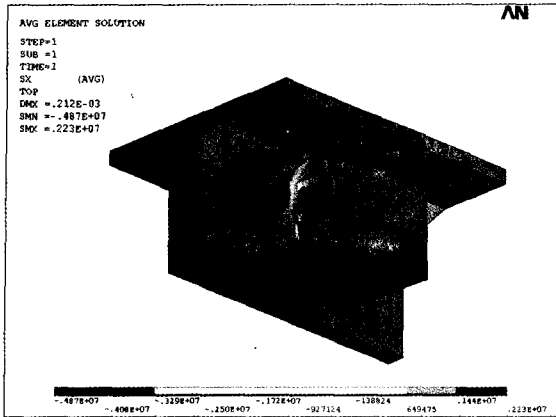


图4(a) 锚固结构横向应力 σ_x 分布

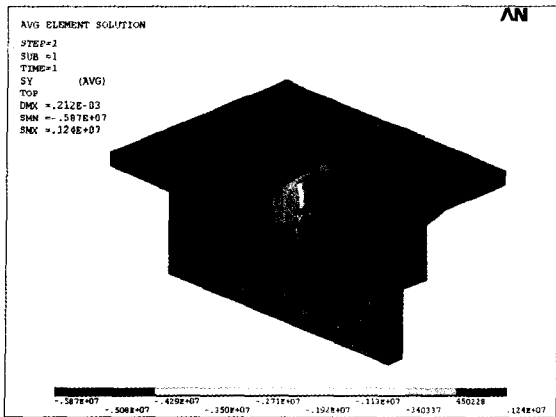


图4(b) 锚固结构竖向应力 σ_y 分布

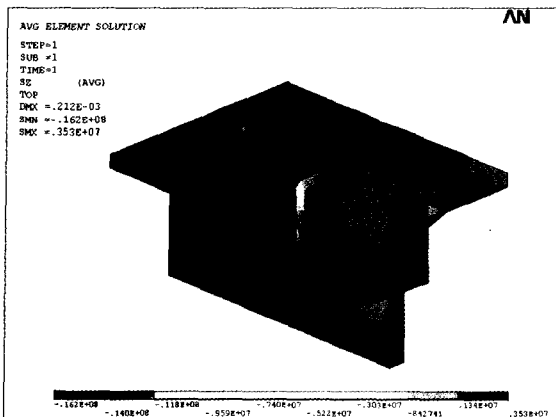


图4(c) 锚固结构纵向应力 σ_z 分布

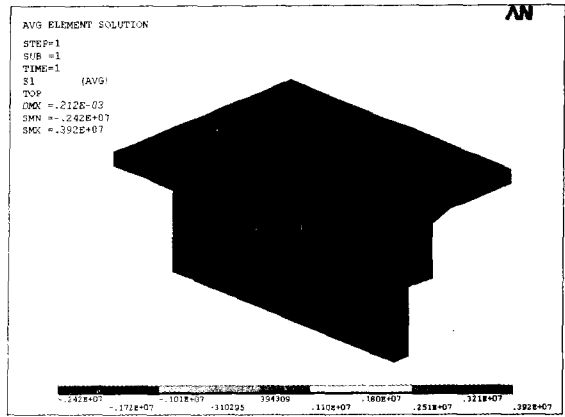


图4(d) 锚固结构第1主应力 σ_1 分布

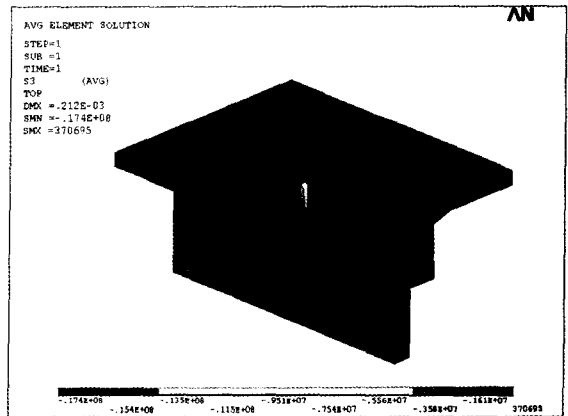


图4(e) 锚固结构第3主应力 σ_3 分布

图4 箱梁锚固结构在体外索锚下压力作用下的各应力云图

由上述各应力云图分析可知, 在体外索的锚下压力作用下, 锚固结构与箱梁顶板、腹板近锚固端连接处均产生向内侧变形, 同时由于箱梁顶板、腹板具有相应的抗弯刚度, 故约束锚固结构连接处的变形, 因而产生较大的局部拉应力分布, 其中峰值 σ_x 、 σ_z 和 σ_1 均超过了混凝土的抗拉设计强度值, 如峰值 σ_x 、 σ_z 和 σ_1 均超过了混凝土的抗拉设计强度值, 如峰值为3.92MPa, C30混凝土的抗拉设计强度值为1.39MPa, C50混凝土的抗拉设计强度值为1.83MPa, σ_1 约为C30混凝土的2.82倍, C50混凝土的2.14倍。另外, 由图5(a)、(b)、(c)各截面应力 σ_z 分布可知, 沿锚固结构纵向距锚垫板越远, 各应力值越小且衰减很快。

4 考虑局部加固的有限元分析模型

根据各向应力分布的特点, 尤其是锚固结构与箱梁顶板、腹板连接处产生应力集中的特点, 制定了相应的局部加固措施, 以期达到改善应力

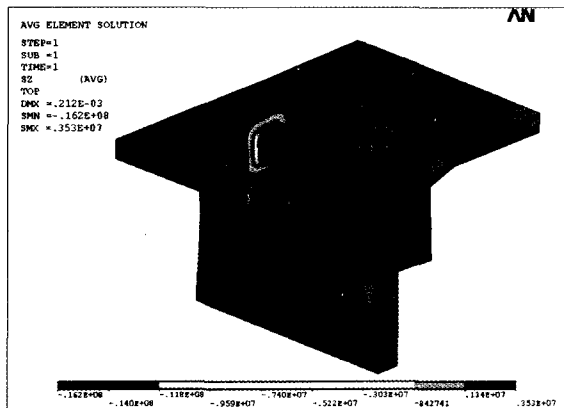
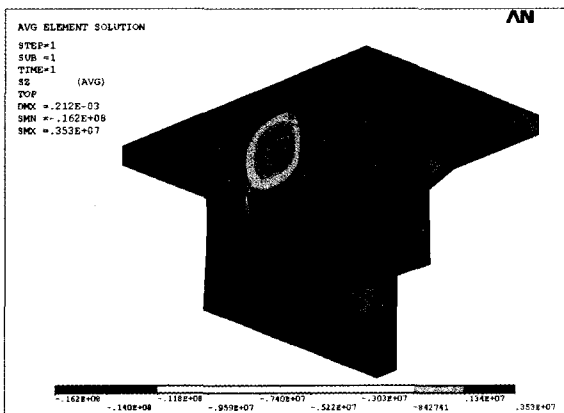
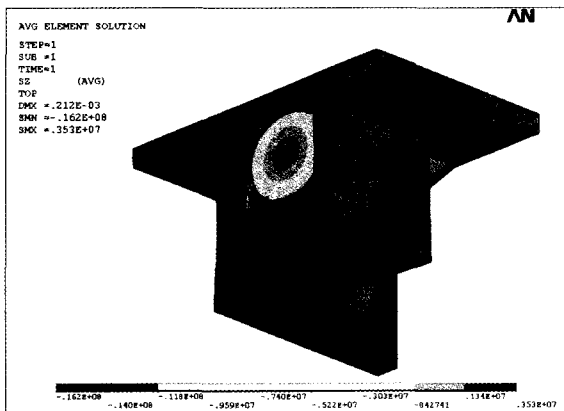
图5 (a) 距锚固端0.1m处截面应力 σ_x 分布图5 (b) 距锚固端0.2m处截面应力 σ_x 分布图5 (c) 距锚固端0.3m处截面应力 σ_x 分布

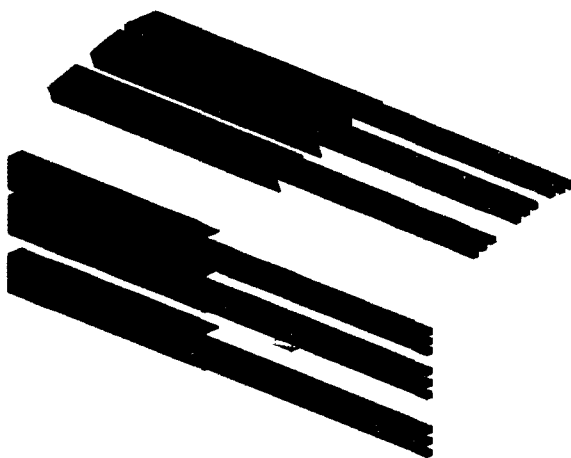
图5 距锚固端不同距离的截面应力分布

集中分布区域,使得拉应力分布趋于均匀,其值满足混凝土抗拉强度设计值要求。局部加固措施如下:在锚固结构与箱梁顶板、腹板连接处沿纵向分别并排设置3根14b型普通槽钢,同时将3根直径 $\phi 28$ 的螺纹钢一端预埋入锚固结构中,与钢筋骨架焊接,另一端与1根槽钢焊接,通过设置螺纹钢将槽钢与锚固结构可靠连接。另外,在距离

锚固端内侧50cm范围内,布置5层相距10cm的竖向、横向直径 $\phi 16$ 的钢筋层。

4.1 考虑局部加固的有限元建模

在上述有限元建模的基础上,槽钢采用实体单元Solid45模拟^[3],直径 $\phi 28$ 的螺纹钢采用杆单元Link8模拟,如图6。槽钢与混凝土考虑共用节点连接相互作用,螺纹钢考虑与相邻槽钢实体单元或混凝土实体单元耦合节点连接。另外,距离锚固端内侧50cm范围内的直径 $\phi 16$ 钢筋层采用杆单元Link8模拟,考虑与相邻混凝土实体单元共用节点连接相互作用,同时通过配筋率考虑分布钢筋对混凝土的增强作用。

图6 槽钢和 $\phi 28$ 螺纹钢网格划分

4.2 有限元结果分析与比较

设置槽钢、螺纹钢和钢筋层加固锚固结构后,由图7各应力云图可看出,锚固结构的受力得到了明显的改善。

(1) 横向、竖向拉应力均明显减小,横向、竖向拉应力峰值分别为1.03MPa、1.0MPa,较加固前分别减小53.8%、19.4%,其分布区域基本不变;横向、竖向压应力减小不明显,仍主要分布在锚垫板区域。

(2) 纵向拉压应力均明显减小,拉应力峰值为1.47MPa,较加固前减小58.4%,在锚固结构与箱梁顶板、腹板连接处靠近锚固端区域的局部应力趋于均匀分布;压应力峰值为13.5MPa,较加固前减小16.7%,峰值仍主要分布在锚垫板区域,且沿着锚垫板纵向,应力值衰减很快。

(3) 主拉应力明显减小,在锚固结构与箱

梁顶板、腹板连接处靠近锚固端区域仍有应力集中, 但较加固前分布趋于均匀, 主拉应力峰值为1.72 MPa, 较加固前减小56.1%; 主压应力减小不明显, 峰值为17.1MPa, 仍主要分布在锚垫板区域。

(4) 图7 (f) 为槽钢的Mises应力云图, 其应力峰值为18.9MPa, 远小于钢材的抗拉设计强度, 且距离锚固端越远, 槽钢的Mises应力越小。

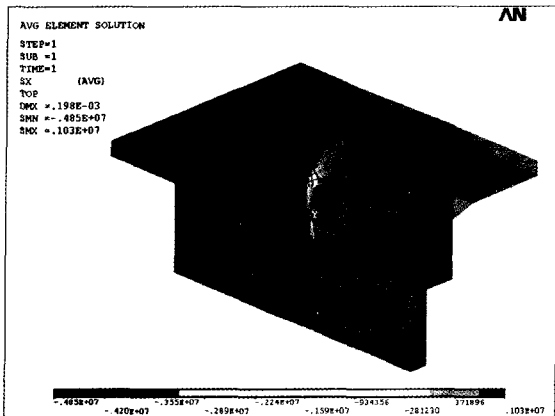


图7 (a) 锚固结构横向应力 σ_x 分布

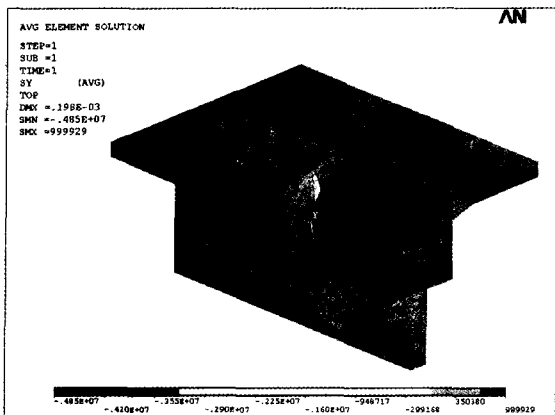


图7 (b) 锚固结构竖向应力 σ_y 分布

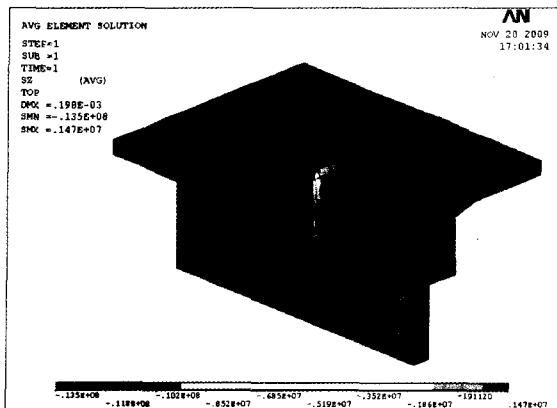


图7 (c) 锚固结构纵向应力 σ_z 分布

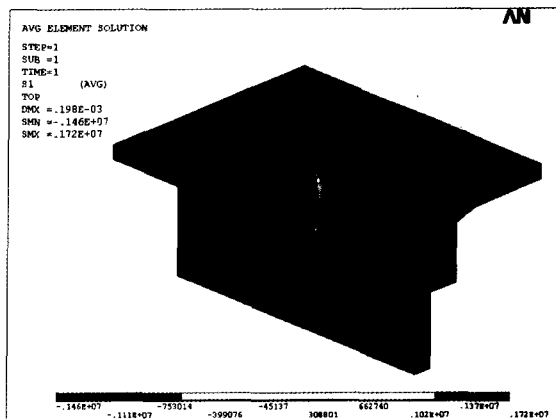


图7 (d) 锚固结构第1主应力 σ_1 分布

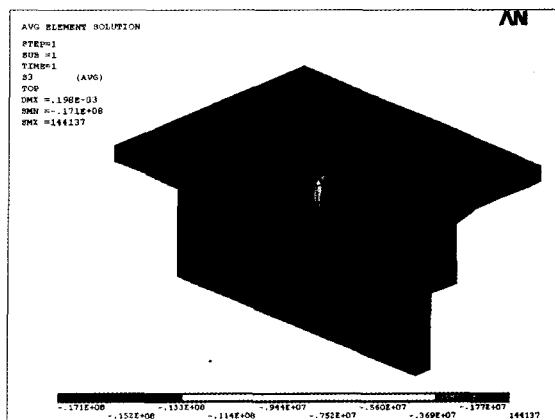


图7 (e) 锚固结构第3主应力 σ_3 分布

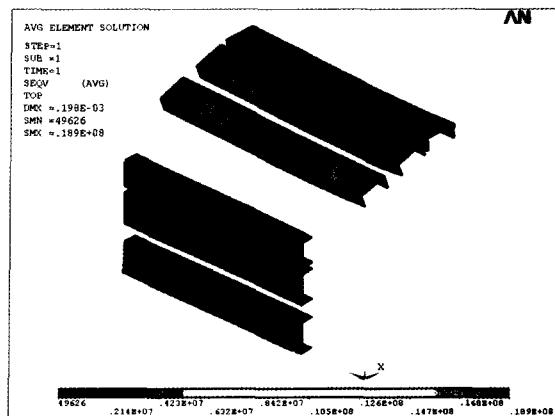


图7 (f) 槽钢的Mises应力分布

图7 加固后各应力云图

由上述各应力云图分析比较可知, 通过设置槽钢、螺纹钢和钢筋层局部加固锚固结构措施, 在锚固结构与箱梁顶板、腹板连接处以及锚固端面的刚度增加, 抵抗变形能力增强。同时, 通过槽钢、螺纹钢与锚固结构之间力的传递, 较好地改善了连接处以及附近区域的应力分布。经过计

算,在连接处仍出现有应力集中的区域,其峰值均小于C50混凝土的抗拉设计强度值,强度设计值约为主拉应力峰值的1.06倍。另外,锚垫板区域主要为受压区域,其主压应力均小于C50混凝土的抗压设计强度值22.4MPa。因此,经局部加固的锚固结构应力分布均有相当的安全储备。

5 施工方案与实施

由于该体外预应力加固的锚固结构直接锚固在箱梁截面的顶板、腹板上,原施工方案为:①在箱梁顶板、腹板上钻孔植筋;②锚垫板、预埋管定位安装;③绑扎钢筋;④安装模板;⑤浇筑混凝土;⑥混凝土养护、拆模;⑦穿体外索;⑧张拉体外索。经过现场检测,原结构混凝土表层均存在不同程度的碳化,混凝土强度不足;同时,考虑到为改善锚固结构与箱梁顶板连接处的局部应力分布,保证锚固结构与箱梁截面的可靠连接以及便于施工和安全操作,对原施工方案进行了如下改进:①对锚固结构相应于箱梁顶板范围混凝土进行开“天窗”处理,即将原顶板混凝土凿除,露出所有钢筋骨架;②腹板上钻孔植筋;③安装槽钢、螺纹钢,通过压力灌胶法,保证槽钢与原结构混凝土可靠粘结,同时螺纹钢分别与槽钢、钢筋骨架可靠焊接;④锚垫板、预埋管定位安装;⑤绑扎钢筋,对于顶板上钢筋须与原结构受力主筋可靠焊接。其余工序⑥~⑩同原施工方案④~⑧。

在体外预应力索张拉过程中,严格按7级分级张拉,并进行施工监控,对原结构的关键截面、部位布置测点进行监测,尤其对锚固结构进行重点监测。对于锚固结构,测点主要布置在近锚固端顶板连接处和自由底面,经监测测点横向最大拉应力为0.306MPa^[4],与有限元计算结果0.320MPa较为一致。在整个施工分级张拉过程中,严密观察锚固结构各关键部位,经现场检查,在张拉过程中均未出现影响结构安全的混

凝土裂缝,表明新增锚固结构与原有箱梁截面连接可靠,有效地通过锚固结构将体外预加力施加到原梁体构件上,各项应力值均满足规范限值要求。同时,也表明有限元空间分析计算结果较为准确,能较好地反映实际构件受力分布情况。

6 结语

(1)通过对锚固在箱梁一般截面上的构件进行有限元线弹性细部分析,可知:此类锚固结构的受力分布较为不利,各主要应力值均不同程度地超出混凝土设计强度值,在距离锚固端0.5m的范围内,横竖向拉应力较大,在锚垫板区域附近有较大主压应力,在锚固结构和箱梁连接处存在局部应力集中现象,但其分布范围和纵向深度均不大。

(2)考虑在锚固结构与箱梁交接部位设置槽钢和螺纹钢连接,以及距离锚固端0.5m的范围内布置钢筋层,通过有限元计算结果可知,能有效降低连接处混凝土的应力集中,并改善应力分布趋于均匀,满足规范要求。

(3)对于体外预应力加固桥梁的锚固结构的设置,应视旧桥构件部位、既有混凝土状况以及施工操作难易,合理选择锚固结构型式,并进行必要的锚固结构设计计算,采取有效的构造措施,保证锚固结构在整个体外预应力加固体系中安全、可靠地使用。上述提到的局部加固构造措施亦可为同类体外预应力加固桥梁锚固结构的设计和施工提供参考。

参考文献

- [1] JTG/T J22-2008,公路桥梁加固设计规范[S].
- [2] 杨美良,李传习,张建任,卢春玲.体外预应力桥梁锚固结构的受力性能与配筋研究[J].工程力学,2008,25(6):159-164.
- [3] 刘敏.粘钢加固钢筋混凝土结构的有限元分析[D].重庆:重庆大学,2003.
- [4] 广西大学设计研究院.南宁市邕江大桥体外预应力张拉试验阶段报告[R].广西:2009.