

多跨连拱桥边墩钢-混结合段的区域力学行为分析

梁 栋¹,熊章豪¹,彭亚荣²,孙永方³

(1. 河北工业大学土木与交通学院,天津 300401;2. 河北省高速公路京雄筹建处,河北 保定 071700;
3. 中交第三公路工程局有限公司,北京 101304)

摘 要 目的 研究上承式多跨钢箱连拱桥边墩钢-混结合段区域力学性能。方法 以白沟河特大桥为背景,基于有限元仿真分析和实桥测试的方法,对承受斜向力的连拱桥边墩区域力学行为进行研究。分析构件局部区域的应力,研究不考虑承压板的作用、不考虑开孔钢板端部承压的作用、不考虑 PBL 连接件的作用等情况下对局部区域应力的影响规律。结果 通过有限元结果对拱脚钢-混结合段进行应力区域划分,将三个应力区域产生的效应力分别定义为劈裂力 $T_{b,d}$ 、剥裂力 $T_{s,d}$ 、边缘拉力 $T_{et,d}$ 。不考虑承压板的作用时,内部接触面的剥裂力 $T_{s,d}$ 增幅最大,为 18.4%;不考虑开孔钢板端部承压作用时,边缘交界处的边缘拉力 $T_{et,d}$ 增幅最大,为 30.6%;不考虑 PBL 连接件的作用时,边缘交界处的边缘拉力 $T_{et,d}$ 增幅最大,为 31.4%。与既有研究不同的是钢箱拱肋斜插入大体积混凝土中,由于体积差异大又是斜向,因此内力传递扩散更迅速。结论 笔者所提的应力区域为内部裂缝易出现区域,研究结果可为防止混凝土出现结构裂缝提供技术依据。

关键词 桥梁工程;钢箱连拱桥;钢-混结合段;有限元分析

中图分类号 TU997;U448.22

文献标志码 A

Study of Regional Mechanical Behavior of the Steel-Composite Section of the Arch Footing

LIANG Dong¹, XIONG Zhanghao¹, PENG Yarong², SUN Yongfang³

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401;
2. Hebei Province Expressway Jingxiong Planning and Construction Office, Baoding, China, 071700; 3. CCCC Third Highway Engineering Bureau Co. Ltd., Beijing, China, 101304)

Abstract: To study the regional mechanical properties of the steel-mixed section of the side pier of the upper bearing multi-span steel box double-arch bridge. Taking the Baigou River Bridge as the

收稿日期:2022-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51978236);河北省交通运输厅科技计划项目(JX-202019)

作者简介:梁栋(1976—),男,教授,博士,主要从事桥梁结构的智能检测等方面研究。

background, based on the finite element simulation analysis and the actual bridge test method, the mechanical shape of the side pier area of the multi-arch bridge under oblique force was studied, and the local and regional stress of the components was analyzed. The influence law of local and regional focus is studied without considering the effect of pressure plate, the impact of open plate end pressure, and the development of PBL connector. The stress regions of the steel-mixed section were divided by finite element method, and the influential forces of the three stress regions were defined as splitting party, peeling force, and edge tension, respectively. Without considering the effect of the pressure plate, the increase of the cracking strength of the internal contact surface is the largest, which is 18.4%. The edge tension at the edge junction has the most significant expansion of 30.6% without considering the pressure acting at the end of the open plate. Without considering the effect of the PBL connector, the edge tension at the edge junction increases the most, 31.4%. Unlike the existing research, the steel box arch rib is inserted into the large volume of concrete transversely because of the significant volume difference and diagonal direction, so the internal force transfer and diffusion are more rapid. The stress area mentioned by the author is prone to internal cracks, and the research results provide the technical basis for preventing structural cracks in concrete.

Key words: bridge engineering; steel box double arch bridge; steel-mixed section; finite element analysis

边墩钢-混结合段是多跨钢箱连拱桥的关键结构,其受力性能直接影响全桥的安全性及可靠性^[1]。混凝土界面抗剪破坏的多样性^[2-3]和多跨连拱桥边墩钢-混结合区的复杂性^[4-5],不仅体现在拱脚连接区的结构设计和结构形式上的独特性^[6-7],还表现在连接段和拱肋受预应力钢筋混凝土桥墩的力学行为影响较大。同时上承式钢箱拱桥拱脚钢-混结合段也是构件刚度骤变点,力学行为复杂,极易产生局部应力集中,以至引起结构失效^[8-10]。

国内外学者对混合梁钢-混结合段的力学行为与传力机理以及 PBL 抗剪连接件受力性能进行了众多研究。肖林等^[11]结合实际工程设计了 1:3 的缩尺桥塔钢-混结合段试验模型,运用非线性有限元模型分析了钢-混结合段的力学行为与传力机理;Cheng X 等^[12]进行了结合段钢格室开孔钢板的推出试验,结合有限元方法分析了结合段钢格室的传力机理;王庆贺等^[13]研究了下承式哑铃型钢管混凝土系杆拱桥的力学性能,采用有限元方法分析了结构参数变化对拱肋受力的影响;Q. H. Zhang 等^[1]基于剪切接头、穿孔

钢板和混凝土底座等关键构件的非线性等效刚度,建立了 PBL 剪力键内力传递分析方法;卫星等^[14]对三跨双层斜拉桥钢-混组合索塔采用 1:3 缩尺比例结合段模型进行试验研究,结合有限元分析了结合段的传力机理,得到了组合索塔 PBL 剪力键、承压板等结构构件的荷载分配关系;S. H. He 等^[15]对 PBL 剪力键在推出载荷下的结构响应进行试验,提出了 PBL 抗剪承载力计算公式;赵唯坚等^[16]通过单一参数法研究了结构参数对 PBL 剪力键的受力性能,并分析了各参数对其抗剪承载力的影响;C. Zhao 等^[17]提出了 PBL 剪力键承载力估算公式,该公式量化了剪切摩擦力的部分和通过钢筋的销作用。

现有研究表明,随着复杂空间曲线大跨径钢箱拱桥的发展,大体积混凝土桥墩斜插钢箱拱肋形成的边墩拱脚钢-混结合段引起的显著弯矩及轴力效应加剧了钢-混结合段结构受力的复杂性,其受力与传力特性有必要进一步研究。基于此,笔者以白沟河特大桥为背景,基于有限元分析和实桥测试相对比的方法,对承受斜向力的连拱桥边墩的区域力学行为进行研究,对大体积混凝土

桥墩进行应力区域划分,研究不考虑承压板的作用、不考虑开孔钢板端部承压的作用、不考虑 PBL 连接件的作用等情况对局部区域应力的影响,为防止混凝土出现结构裂缝提供技术依据。

1 多跨连拱桥边墩钢-混结合区域

白沟河特大桥是京雄高速进出雄安新区的门户桥梁,全长 1 763 m。主桥仿颐和园十七孔桥造型,共设 17 孔,每孔长 91 m,用钢量达到了 5.6 万 t,成为目前我国规模最大的上

承式钢箱连拱桥。大桥立面布置如图 1 所示。

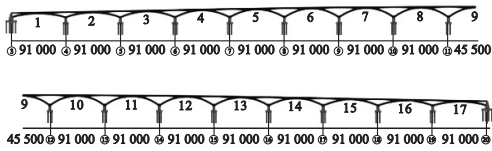


图 1 白沟河特大桥立面布置图

Fig. 1 General layout of Baigou river bridge

白沟河特大桥的桥墩内设置钢-混结合段,利用 PBL 键及预应力钢绞线与钢箱拱肋相连。笔者以承受不平衡水平力的③号墩的钢-混结合段作为研究对象,其构造截面 a-a 如图 2 所示。

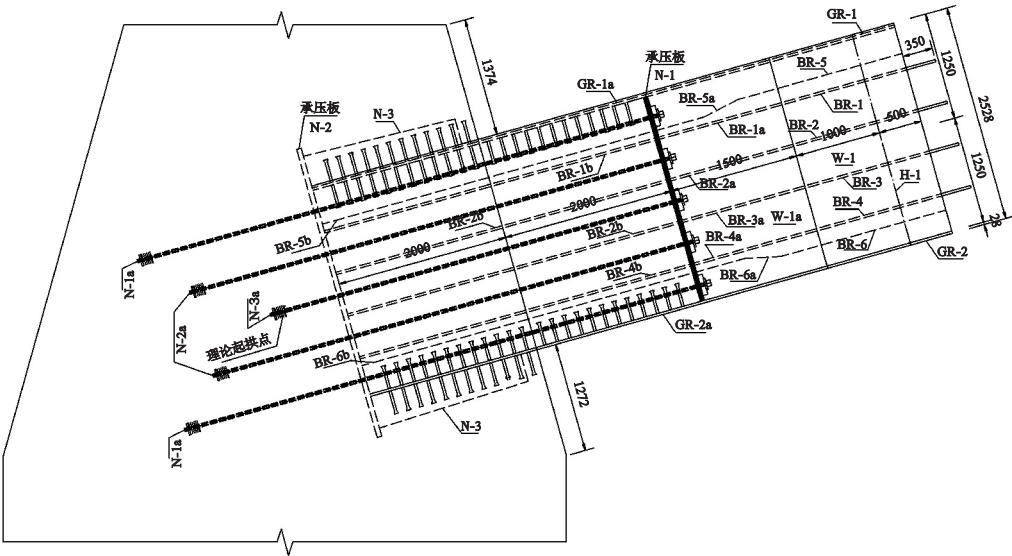


图 2 拱脚钢-混结合段截面 a-a 构造图

Fig. 2 Structural diagram of steel-mixed section a-a

2 拱脚钢-混结合区域应力分析

2.1 拱脚钢-混结合段局部模型边界荷载

为了确定③号墩局部模型的边界荷载取值,采用 MIDAS Civil 2019 进行结构总体计算,模型中未考虑拱脚钢-混结合段的细部构造,而是将钢箱梁与混凝土箱梁直接连接,该简化措施对结构分析的影响可忽略不计。建立的桥梁结构计算模型如图 3 所示。

在结构总体计算有限元模型中取③号墩

第 202515 号节点和 149889 号节点作为该墩局部模型的控制点,控制点截面分别为截面一、截面二。截面上的边界荷载如图 4 所示。

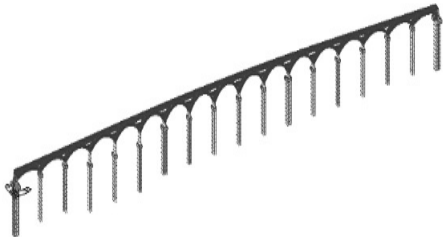


图 3 全桥有限元模型

Fig. 3 Full bridge finite element model

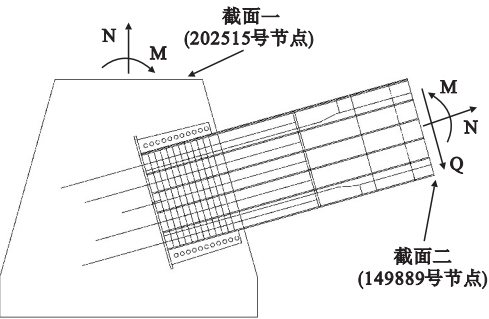


图 4 拱脚钢-混结合段边界荷载

Fig. 4 Boundary load of steel-mixed section of arch foot

白沟河特大桥的拱脚钢-混结合段的局部有限元分析主要考虑以下三种荷载组合。成桥初期的荷载组合(组合一):结构恒载+公路 I 级汽车荷载+人群荷载+混凝土收缩影响力+温度影响;承载能力基本组合(组合二): $1.1 \times$ 自重+ $1.0 \times$ 基础不均匀沉降+ $1.4 \times$ 汽车荷载+ $0.75 \times$ 人群荷载+ $0.75 \times (1.4 \times$ 温度+ $1.1 \times$ 风荷载);正常使用状态频遇组合(组合三): $1.0 \times$ 自重+ $1.0 \times$ 基础不均匀沉降+ $0.7 \times$ 汽车荷载+ $0.4 \times$ 人群荷载+ $0.8 \times$ 温度+ $0.75 \times$ 风荷载。通过对拱脚钢-混结合段控制截面内力的提取,可得到控制截面各种荷载工况下的内力取值,结果见表 1、表 2。

表 1 截面一不同荷载组合下内力取值

Table 1 Values of internal forces for different load combinations in section 1

荷载组合	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
组合一	-1 069.5	0	20.5
组合二	-2 670.7	0	59.7
组合三	-2 212.2	0	48.4

表 2 截面二不同荷载组合下内力取值

Table 2 Values of internal forces for different load combinations in section 2

荷载组合	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
组合一	-3 781.0	-1 526.3	-11 358.5
组合二	-12 003.9	-3 734.8	-38 824.2
组合三	-9 957.9	-4 444.3	-32 784.0

依据不同荷载工况下的内力,在对拱脚

钢-混结合段做局部模型分析时,叠加出最不利荷载工况受力。控制截面最不利荷载工况下的内力取值见表 3。

表 3 局部模型最不利荷载取值

Table 3 The most unfavourable load values for the local model

③号墩截面	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
截面 1	-2 670.7	0	59.7
截面 2	-12 003.9	-4 444.3	-38 824.2

2.2 拱脚钢-混结合段的局部模型

基于圣维南原理建立③号墩拱脚钢-混结合段模型,然后进行网格划分,在截面上设置虚拟梁和刚性面,将荷载及边界条件通过虚拟梁和刚性面添加到局部模型上。

为了提高计算效率,对模型进行适当简化:钢箱拱脚采用板单元模拟,边墩混凝土采用实体单元模拟,模型中未考虑混凝土中普通钢筋的影响,考虑到实际情况 PBL 剪力键孔中的混凝土形成混凝土榫约束钢筋,预应力钢绞线及贯穿钢筋采用内嵌实体中的钢筋单元模拟,在分析预应力损失的过程中不考虑预应力筋与混凝土之间的粘结滑移损失, PBL 剪力键与栓钉对应设置弹簧单元模拟,钢构件与混凝土构件的材料设置为线弹性本构关系。

在局部模型中混凝土和拱脚钢板共节点处理,拱脚的混凝土采用 8 节点六面体单元与 6 节点的五面体单元进行网格划分,拱脚钢板仿真分析采用以六面体主导的单元划分网格(见图 5)。③号墩钢-混结合段有限元模型共有 152 137 个单元和 260 799 个节点。

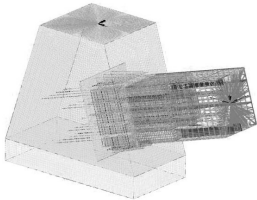


图 5 拱脚钢-混结合段局部模型

Fig. 5 Local model of steel-mixed section of arch foot

2.3 有限元分析与实测值对比

在③号墩内布置4个应变传感器,两个与承压板垂直,分别测量承压板上下混凝土所受压力;两个与承压板平行,布置在箱形拱肋顶、底板的外侧,测量拱肋造成的劈裂力。应变传感器型号为JMZX-215AT,测点布置如图6所示。应力传感器及采集仪器现场布置如图7所示。

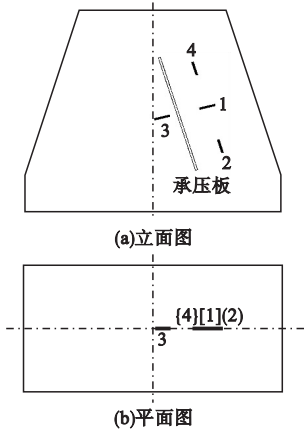


图6 ③墩传感器布置立、平面图
Fig. 6 ③ pier sensor arrangement vertical and plan view

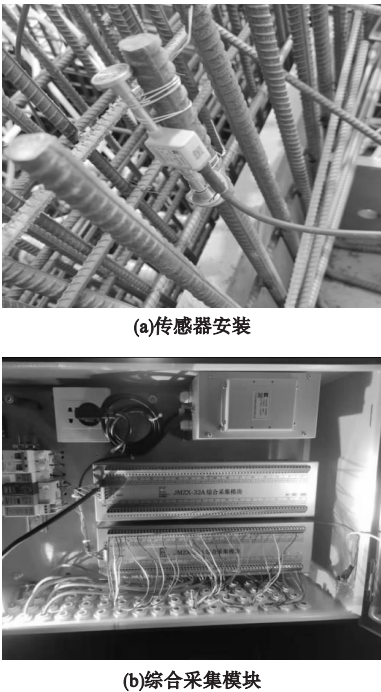


图7 传感器数据采集与传输
Fig. 7 Sensor data acquisition and transmission

为验证局部有限元模型的合理性,选择成桥未通车时间段应力传感器实测值与自重荷载作用下局部有限元模拟值进行比较,结果如图8所示。

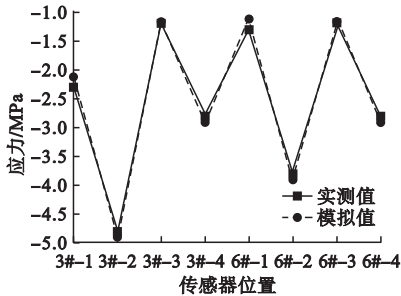


图8 应力实测值与模拟值结果对比
Fig. 8 Comparison of measured and simulated stresses

对比不同位置测点处应力实测值与有限元模拟值可知:①有限元模型的仿真度较好,最大偏差为7.87%;②符合实际情况的受力分析:两个与承压板平行位置的应力传感器由于劈裂力的影响,明显大于承压板上下混凝土所受压应力。

2.4 拱脚钢-混结合段区域应力分析

图9给出了③号墩拱脚钢-混结合段模型在最不利荷载工况组合下各构件的应力分布状况。由图9(a)可以看出,除混凝土端面有局部应力集中外,混凝土区域压应力均低于13.3 MPa;由于加劲肋的设置,应力在加劲肋和混凝土的接触处分布的并不均匀,经过传递,内部混凝土的应力逐渐均匀,混凝土应力满足结构设计要求且有较高的安全储备。从图9(b)、图9(c)可以看出,钢箱拱脚的整体应力水平不高,绝大部分区域的Mises应力低于121.9 MPa,其中只有加载段及其加劲肋与相邻腹板相交区域局部存在应力集中现象。因为加劲肋的存在,拱脚钢箱应力从加载处沿纵向到承压板位置过渡逐渐减小,加劲肋构造变化引起的刚度变化使得力的传递更为平缓,实现力由拱脚钢箱传递到混凝土墩。预应力钢绞线的设置使得混凝土与承压板紧密贴合,加强了钢-混结合段的整体性。

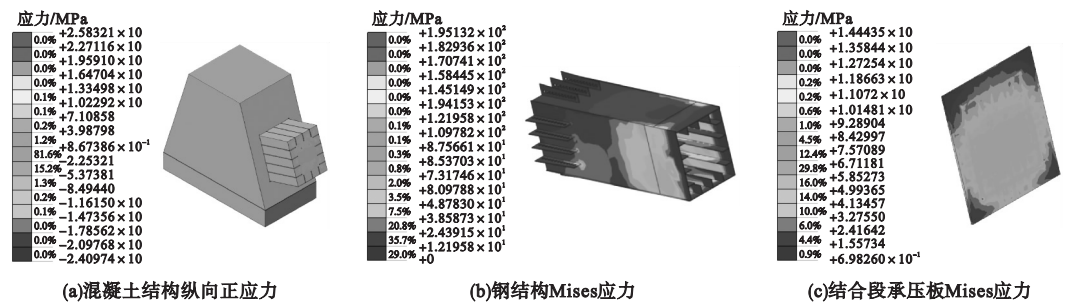


图 9 ③号墩拱脚钢-混结合段应力分布

Fig. 9 Stress distribution of steel-concrete joint section of ③ pier arch foot

在最不利荷载工况组合下,图 10 给出了③号墩拱脚钢-混结合段模型剖面 a-a 的应力分布状况。由图 10(a)可以看出,C50 混凝土的抗拉强度设计值为 1.89MPa,图示显示的阴影部分为最大主应力大于 1.89 MPa 的应力区域。如图 10(b)所示,截取剖面 a-a,将断面作为底部,应力值作为竖轴

能够直观地看出应力值较大的区域。可以看出,预应力钢绞线端部附近区域应力水平高于周围其他区域应力水平,PBL 剪力键与承压板接触界面应力值比混凝土与承压板接触界面应力值较大,各钢构件形状直角处易产生应力集中现象,可能会引起内部结构的局部开裂。

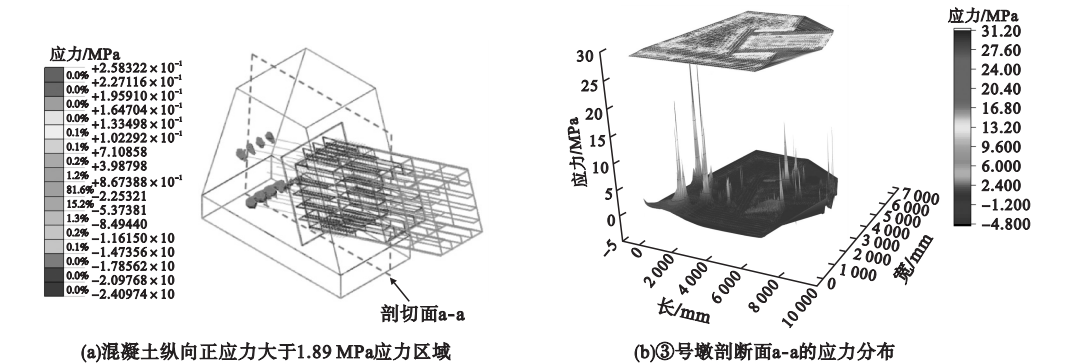


图 10 ③号墩拱脚钢-混结合段混凝土应力分布

Fig. 10 Stress distribution of concrete in steel-mixed section of pier ③ arch foot

3 拱脚钢-混结合区域应力指标

基于应力云图,在分析和设计上参考《结构设计原理》,端部锚固区的总体区域存在一些局部应力较大的位置,即局部位置存在较大混凝土拉应力,应力较大区域如图 11 所示。将拱脚钢-混结合段剖面 a-a 表面区分为钢绞线端部锚固区域、端部锚固区的总体区域、 $T_{b,d}$ 劈裂应力区域、 $T_{s,d}$ 剥裂应力区域、 $T_{et,d}$ 边缘应力区域。其中,钢绞线端部锚固区域是指锚具垫板及附近周围混凝土的区域;端部锚固区的总体区域是指钢绞线端部锚固区域以外的混凝土区域。

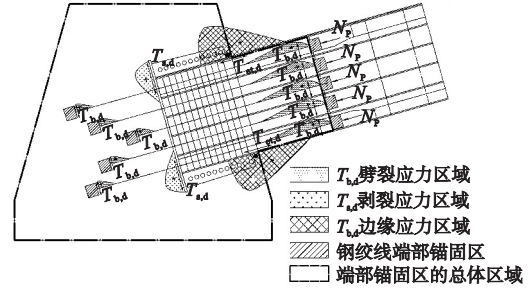


图 11 边墩拱脚钢-混结合段区域应力位置
Fig. 11 Regional stress position of steel-concrete joint section of side pier arch foot

对 $T_{b,d}$ 劈裂应力区域、 $T_{s,d}$ 剥裂应力区域、 $T_{et,d}$ 边缘应力区域对应的拉应力分布积分可以分别得到相应拉应力的合力,即定义为劈裂

力 $T_{b,d}$ 、剥裂力 $T_{s,d}$ 、边缘拉力 $T_{et,d}$ 。三个位置存在的不均匀分布拉应力,是由在锚具垫板下且距锚固面一定距离处产生的与锚固力方向垂直的横向拉应力以及在钢箱板界面附近边缘区两侧面产生的拉应力引起的。

图 10(b) 给出了③号墩剖面 a-a 的应力分布,结合图 11 拱脚钢-混结合段区域应力位置可知,劈裂力 $T_{b,d}$ 产生的应力水平更高,局部峰值接近 20 MPa;边缘拉力 $T_{et,d}$ 产生的应力效应次之,局部峰值接近 5 MPa;剥裂力 $T_{s,d}$ 产生的应力水平较低,局部峰值接近 2 MPa。由于 C50 混凝土的抗拉强度设计值为 1.89 MPa,因此笔者所提应力区域易产生内部裂缝,应多加关注。

4 拱脚钢-混结合段区域应力影响因素分析

为了研究各构件在拱脚钢-混结合段中对预应力钢束端部的劈裂力 $T_{b,d}$ 、边缘交界处的边缘拉力 $T_{et,d}$ 、内部接触面的剥裂力 $T_{s,d}$ 的影响,笔者建立以下四种模型进行有限元分析:模型 1 为第 2 节中建立的③号边墩有限元模型,考虑了 PBL 剪力键、开孔钢板端部承压及 N2 承压板的作用;模型 2 不考虑 N2 承压板的作用;模型 3 不考虑开孔钢板端部承压的作用;模型 4 不考虑 PBL 剪力键的作用。图 12 给出了以上 4 种有限元模型中 3 种应力指标的应力分布情况。

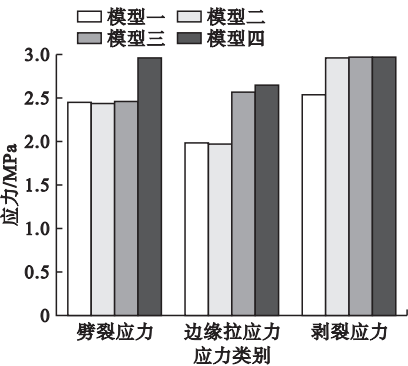


图 12 拱脚钢-混结合段区域应力值对比

Fig. 12 Comparison of regional stress values in steel-mixed section of arch foot

由图 12 可以得出,不考虑承压板的作用时,内部接触面的剥裂力 $T_{s,d}$ 增大,增幅为 18.4%;预应力钢束端部的劈裂力 $T_{b,d}$ 和边缘交界处的边缘拉力 $T_{et,d}$ 基本不变。不考虑开孔钢板端部承压作用时,内部接触面的剥裂力 $T_{s,d}$ 增大,增幅为 18.1%;边缘交界处的边缘拉力 $T_{et,d}$ 增大,增幅为 30.6%;预应力钢束端部的劈裂力 $T_{b,d}$ 基本不变。不考虑 PBL 连接件的作用时,内部接触面的剥裂力 $T_{s,d}$ 增大,增幅为 19.2%;边缘交界处的边缘拉力 $T_{et,d}$ 增大,增幅为 31.4%;预应力钢束端部的劈裂力 $T_{b,d}$ 增大,增幅为 21.7%。

综合分析可知,在劈裂力 $T_{b,d}$ 、边缘拉力 $T_{et,d}$ 、剥裂力 $T_{s,d}$ 的作用下,所有模型的拉应力变化趋势基本一致,且都导致该区域混凝土部分开裂。由于模型中未考虑箍筋和钢筋的影响,所以应配置抵抗锚下劈裂力的封闭式箍筋,间距不应大于 100 mm,梁端截面应配置抵抗表面剥裂力的抗裂钢筋。

5 结 论

(1) 通过有限元结果对拱脚钢-混结合段进行应力区域划分,三个区域位置对应的拉应力最大,并存在内部开裂的风险。拱脚钢-混结合段构造设计合理,应力传递平缓,局部有应力集中现象,材料均符合强度设计要求,具备一定的安全储备。与既有研究不同的是钢箱拱肋斜插入大体积混凝土中,由于体积差异大又是斜向,因此内力传递扩散更迅速。

(2) 考虑承压板、开孔钢板端部承压、PBL 连接件的作用均能降低三个拉应力指标的幅值,其中 PBL 连接件的效果最佳。笔者所提的应力区域为内部裂缝易出现区域,研究结果可以防止混凝土出现结构裂缝提供技术依据。

参考文献

[1] ZHANG Q H, JIA D L, BAO Y. Analytical study on internal force transfer of perfobond rib shear connector group using a nonlinear

- spring model [J]. Journal of bridge engineering, 2017, 22(10): 04017081.
- [2] 郑开启, 刘钊. 基于受压区分区破坏机制的有腹筋 RC 梁受剪承载力公式[J]. 中国公路学报, 2020, 33(1): 79–86.
(ZHENG Kaiqi, LIU Zhao. Shear strength formula for RC beams with stirrups based on distinct failure mechanism in rezoned compression zone [J]. China journal of highway and transport, 2020, 33(1): 79–86.)
 - [3] 于磊, 车轶, 宋玉普. 若干规范无腹筋梁受剪承载力公式比较[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(4): 90–94.
(YU Lei, CHE Yi, SONG Yupu. Comparison among shear design formulae in different codes for beams without web reinforcement [J]. Advances in science and technology of water resources, 2010, 30(4): 90–94.)
 - [4] 施洲, 顾家昌, 余万庆, 等. 大跨度斜拉桥双向曲面混合桥塔钢-混结合段受力性能研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(6): 73–85.
(SHI Zhou, GU Jiachang, YU Wanqing, et al. Study on the mechanical behavior of bi-directionally curved composite pylon steel-concrete joints for a long-span cable-stayed bridge [J]. China journal of highway and transport, 2022, 35(6): 73–85.)
 - [5] 秦凤江, 周绪红, 梁博文, 等. 大跨度自锚式悬索桥主梁钢-混结合段模型试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 52–64.
(QIN Fengjiang, ZHOU Xuhong, LIANG Bowen, et al. Experiment on steel-concrete joint of hybrid girder of a long-span self-anchored suspension bridge [J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(9): 52–64.)
 - [6] 周萌, 宁晓旭, 聂建国. 系杆拱桥拱脚连接结构受力性能分析的多尺度有限元建模方法[J]. 工程力学, 2015, 32(11): 150–159.
(ZHOU Meng, NING Xiaoxu, NIE Jianguo. Multi-scale fea modeling method for mechanical behavior analysis arch feet on tied arch bridges [J]. Engineering mechanics, 2015, 32(11): 150–159.)
 - [7] 占玉林, 赵人达, 毛学明, 等. 东平大桥钢-混结合段模型试验[J]. 桥梁建设, 2011(4): 20–24.
(ZHAN Yulin, ZHAO Renda, MAO Xuemin, et al. Model test of steel and concrete joint section of Dongping bridge [J]. Bridge construction, 2011(4): 20–24.)
 - [8] 周阳, 蒲黔辉, 施洲, 等. 铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段传力及疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(11): 77–83.
(ZHOU Yang, PU Qianhui, SHI Zhou, et al. Study on mechanics behavior and fatigue performance of steel-concrete composite joints of railway hybrid girder cable-stayed bridges [J]. China civil engineering journal, 2015, 48(11): 77–83.)
 - [9] 张奇志, 吴宝诗. 九江长江公路大桥钢-混结合段模型试验研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(5): 68–74.
(ZHANG Qizhi, WU Baoshi. Model test study of steel and concrete joint section of Jiujiang Changjiang river highway bridge [J]. Bridge construction, 2013, 43(5): 68–74.)
 - [10] 周阳, 蒲黔辉, 施洲, 等. 混合梁斜拉桥钢-混结合段剪力连接件群力学性能试验研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(10): 134–141.
(ZHOU Yang, PU Qianhui, SHI Zhou, et al. Study on mechanical behavior of group shear connectors for steel-concrete composite joint of hybrid girder cable-stayed bridge [J]. Journal of the China railway society, 2017, 39(10): 134–141.)
 - [11] 肖林, 叶华文, 卫星, 等. 斜拉桥桥塔钢-混结合段的力学行为和传力机理研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 88–96.
(XIAO Lin, YE Huawen, WEI Xing, et al. Study on mechanical behavior and load transfer mechanism of steel-concrete composite joint of cable-stayed bridge pylon [J]. China civil engineering journal, 2014, 47(3): 88–96.)
 - [12] CHENG X, NIE X, FAN J S. Structural performance and strength prediction of steel-to-concrete box girder deck transition zone of hybrid steel-concrete cable-stayed bridges [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(11): 04016083.
 - [13] 王庆贺, 王超, 何英, 等. 下承式哑铃型钢-混凝土系杆拱桥静力性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(3): 496–503.
(WANG Qinghe, WANG Chao, HE Ying, et al. Mechanical performance of dumbbell-shaped concrete-filled steel tubular tied arch bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(3): 496–503.)
 - [14] 卫星, 强士中. 斜拉桥桥塔钢-混凝土结合段传力机理试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 255–260.
(WEI Xing, QIANG Shizhong. Specimen test for mechanics behavior of steel-concrete composite joint in pylon of cable-stayed bridge [J]. Engineering mechanics, 2013, 30(1): 255–260.)
 - [15] HE S H, FANG Z, FANG Y W. Experimental study on perfobond strip connector in steel-concrete joints of hybrid bridges [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 118: 169–179.
 - [16] 赵唯坚, 陈德昊, 包龙生, 等. PBL 剪力键受力性能研究及其承载力影响因素分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(5): 864–871.
(ZHAO Weijian, CHEN Dehao, BAO Longsheng, et al. Study on mechanical behavior of the PBL shear connector and its bearing capacity influence factors [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(5): 864–871.)
 - [17] ZHAO C, LI Z, DENG K. Experimental investigation on the bearing mechanism of perfobond rib shear connectors [J]. Engineering structures, 2018, 159: 172–184.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)