

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.05.018

大型吊装工程吊耳结构计算分析与加固

叶 斌¹, 胡宗军¹, 唐 琪², 覃文彬¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中铁上海工程局集团有限公司, 上海 201906)

摘要: 吊装作业常用的吊耳孔承压内壁处的受力情况复杂, 对其进行力学分析时合理地施加荷载能够确保求解的准确性。文章结合桥梁吊装工程实例, 采用 3 种不同的荷载施加方式对板式吊耳结构进行有限元仿真模拟, 对比分析了吊耳孔承压内壁位置的应力分布情况。建立合适的有限元计算模型, 分析钢箱梁与钢箱拱肋节段在吊装过程中吊耳结构的强度, 并根据计算结果提出可靠的吊耳结构加固方案, 确保整个吊耳结构的安全性。该研究可为大型工程结构的吊装过程提供安全保障。

关键词: 板式吊耳; 结构强度; 有限元分析; 结构加固; 吊装

中图分类号: U445.467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)05-0695-07

Calculation and strengthening of lifting lug structure in large hoisting engineering

YE Bin¹, HU Zongjun¹, TANG Qi², QIN Wenbin¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Shanghai Civil Engineering Co., Ltd. of CREC, Shanghai 201906, China)

Abstract: The load at the inner wall of the lifting lug hole commonly used in the hoisting operation is complicated, so reasonable application of load can ensure the accuracy of the results in mechanical analysis. In this paper, the finite element simulation for the plate lifting lug structure is carried out by using three different loading methods based on a bridge hoisting engineering. Then, the stress distribution of the inner wall of the lifting lug hole is compared and analyzed. The strength of different lugs of steel box girder and arch rib in the hoisting process is evaluated by using appropriate finite element model. According to the calculation results, a reliable structure strengthening scheme is proposed, which ensures the safety of the whole lifting lug structure. This study provides a safety guarantee for the hoisting process of large engineering structures.

Key words: plate lifting lug; structural strength; finite element analysis; structure strengthening; hoisting

0 引 言

工程结构和机械设备的吊装都离不开吊耳结构。吊耳一般安装在被吊结构上, 是保证吊运、装配安全的重要连接部件, 对于吊耳结构的强度计算具有重要的工程应用价值。

目前对于吊耳的强度校核主要采用理论计算和有限元法 2 种方法。理论计算法参考《钢结构设计标准》(GB 50017—2017), 通过截面强度校核公式分别对吊孔挤压应力、头部强度、封头处焊缝强度进行校核^[1]; 有限元法通过建立吊耳结构

模型, 模拟吊耳在荷载作用下的应力状态, 能够更加高效地求解吊耳结构上应力场和变形场的分布情况^[2-3]。在吊耳施加外力荷载的方式上, 常见的有荷载分布法^[4-5]、位移耦合法^[6-7]、接触算法^[8]等。不同的荷载施加方式往往会得出差异性较大的计算结果。

本文结合具体工程实例, 对比分析在不同荷载施加方式下, 吊耳孔承压内壁的应力计算结果差异, 并选用最为合适的荷载施加方式进行有限元分析计算, 完成吊耳结构的强度评估与结构加固。

收稿日期: 2023-04-08; 修回日期: 2023-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11772114)

作者简介: 叶 斌(1998—), 男, 安徽无为, 合肥工业大学硕士生;

胡宗军(1975—), 男, 山东日照, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: huzongjun@hfut.edu.cn.

1 工程概况

京雄高速永定河特大桥主体结构为钢结构箱型 PK 断面梁与飞燕式箱型异形拱肋结构,采用分节段吊装、原位拼装的施工工艺。吊装作业拟采用自设计的 TPA 型顶部板式吊耳,吊耳结构由 1 块厚度为 30 mm 的耳板 N1、2 块厚度为 10 mm 的圆形环板 N3 及 6 块厚度为 20 mm 的肋板 N4、N5 焊接拼装而成,其结构如图 1 所示。卸扣使用极限工作荷载为 200 t 弓形卸扣,搭配六角螺栓型销轴。为保证吊装作业安全,需根据工程安全要求对吊耳结构进行强度分析。

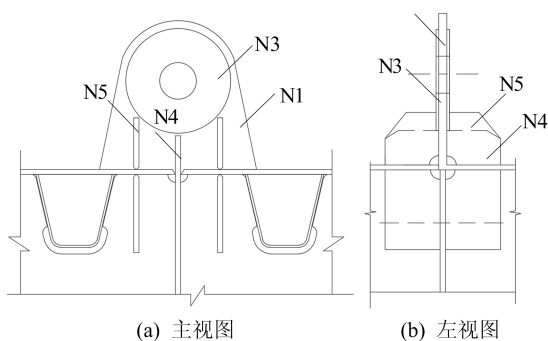


图 1 吊耳结构设计图

2 吊耳和销轴结构计算模型

有限元法^[9-10]求解结构的静力和动力问题非常有效,对于三维实体结构,常采用六面体单元进行网格划分,根据有限元法输出的应力值与材料的许用应力进行比对校核。本次桥梁吊装工程中,吊耳与销轴均控制在线弹性范围,选用第四强度理论进行评估。第四强度理论认为,形状改变比能是造成材料塑性破坏的最重要的原因。剪切应力和正应力共同组成 Von-Mises 等效应力,可以根据 Mises 应力对结构进行强度校核,即

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{0.5[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \leq f \quad (1)$$

其中: σ_{eq} 为 Mises 应力; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二、第三主应力; f 为材料的许用应力。

有限元法求解得到的 Mises 等效应力需要小于材料的许用应力。吊耳结构材料为 Q345 钢材,材料的弹性模量 $E_s = 2.1 \times 10^5$ MPa,泊松比 $\nu = 0.3$,材料的许用应力 $f = 295$ MPa。

利用有限元软件对吊耳结构进行等比例三维建模。建模时对结构进行适当简化,计算模型中

仅保留与吊耳直接接触的销轴部位。结构均采用八结点六面体单元,其中吊耳 32 955 个单元,销轴 37 632 个单元,如图 2 所示。

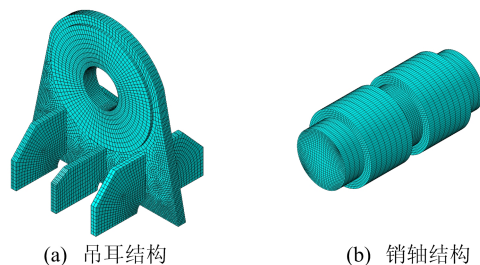


图 2 有限元计算模型

吊耳与被吊结构之间采用熔透焊,结构焊接位置均进行局部加强,具有较强的刚度与承载能力。基于此,对吊耳底面的位移、转角进行约束,以模拟吊装过程中结构对吊耳的约束作用。吊耳结构中,N4 肋板与 N5 肋板采用焊接方式直接与 N1 耳板相连接,采用有限元软件中的“绑定”约束进行连接,其位移关系满足:

$$u_i = u_i', v_i = v_i', w_i = w_i' \quad (2)$$

其中: u_i 、 v_i 、 w_i 分别为 N1 耳板上一点在空间笛卡尔坐标系 3 个方向上的位移; u_i' 、 v_i' 、 w_i' 分别为 N4 肋板或 N5 肋板上与之对应点的位移。

销轴与吊耳之间采用“创建接触对”的方式进行连接,定义吊耳孔壁为主面,销轴对应位置为从面,忽略切向摩擦作用,建立法向方向的“硬接触”,其通过拉格朗日乘子法进行约束,且满足:

$$\begin{cases} p = 0, & \delta > 0; \\ p \in (0, +\infty), & \delta = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中: p 为接触平面间法向接触应力; δ 为接触平面间的间隙。

3 吊耳计算荷载

计算荷载主要来源于吊耳结构与被吊结构自重,通过卸扣经由绳索传递至吊钩处,根据空间力系平衡,易求得每个吊耳的实际所受卸扣对其施加的拉力。拉力通过销轴作用在吊耳孔内壁。销轴对吊耳孔内壁的作用力是一种面力荷载,有限元法对于这类荷载的施加方式一般分为 3 类。

1) 荷载分布法。根据吊耳的受力形式假定合适的荷载分布形式,直接将荷载作用于吊耳孔的承压面上,以此替代销轴对吊耳的作用力。

2) 位移耦合法。通过将吊耳承压面处的节点,与吊耳孔圆形 1 建立运动上的约束关系,来近似模拟其与卸扣销轴之间的边界条件。

3) 接触算法。先建立卸扣结构有限元模型,在吊耳孔与销轴接触位置建立接触对,在远离接触对的销轴两端施加荷载,进而对吊耳-卸扣体系进行非线性接触分析。

3.1 荷载分布法

荷载分布法的关键是对荷载分布方式的假定,通常有径向均匀分布、径向正弦分布、垂向正弦分布等假定,如图 3 所示,且分布荷载满足:

$$F = \int_0^\pi p(\theta) \sin \theta r_0 b_0 \theta d\theta \quad (4)$$

其中: r_0 为吊耳孔内半径; b_0 为吊耳板厚度; F 为吊耳外荷载; $p(\theta)$ 为吊耳承压面处的分布荷载集度。

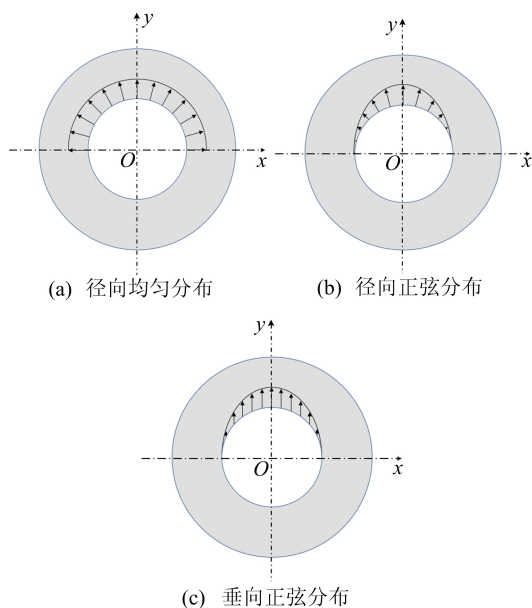


图 3 荷载分布法示意图

本文采用径向均匀分布荷载(图 3a),其销轴对吊耳荷载满足:

$$p(\theta) = p_0, \quad \theta \in [0, \pi] \quad (5)$$

吊耳面所受均匀分布荷载计算公式为:

$$p_0 = \frac{F}{r_0 b_0 \int_0^\pi \theta \sin \theta d\theta} = \frac{F}{r_0 b_0 \pi} \quad (6)$$

3.2 位移耦合法

将吊耳孔的承压面耦合于圆心处某一参考点,将承压面各节点与参考点之间建立一种运动上的约束关系,再将外力荷载直接作用于参考点。其中,采用运动耦合的方式时,被耦合区域的自由度被消除,跟随参考点进行强制运动;采用分布耦合的方式时,被耦合区域的自由度没有被完全消除,而是以一种加权的方式将参考点的荷载分布在被耦合区域的节点上,节点离参考点越远,所分配的荷载越小,且满足节点上的力与力矩等效于

参考节点处的力和弯矩。分布耦合根据加权方法还可以分为线性分布耦合、二次分布耦合和立方分布耦合。本文采用线性分布耦合对承压面区域 6 个方向的自由度进行约束。

3.3 接触算法

接触算法能够更准确地模拟吊耳与销轴之间的接触关系,是典型的边界条件非线性问题,本文考虑吊耳孔壁与销轴接触面法向的变形协调关系,忽略切向的摩擦力作用。

3.4 不同荷载施加方式下的计算结果

本文分别采用荷载分布法、位移耦合法、接触算法 3 种不同荷载施加方式对吊耳结构施加大小为 1 000 kN 竖直向上的荷载,计算得出吊耳的 Mises 应力分布如图 4 所示。

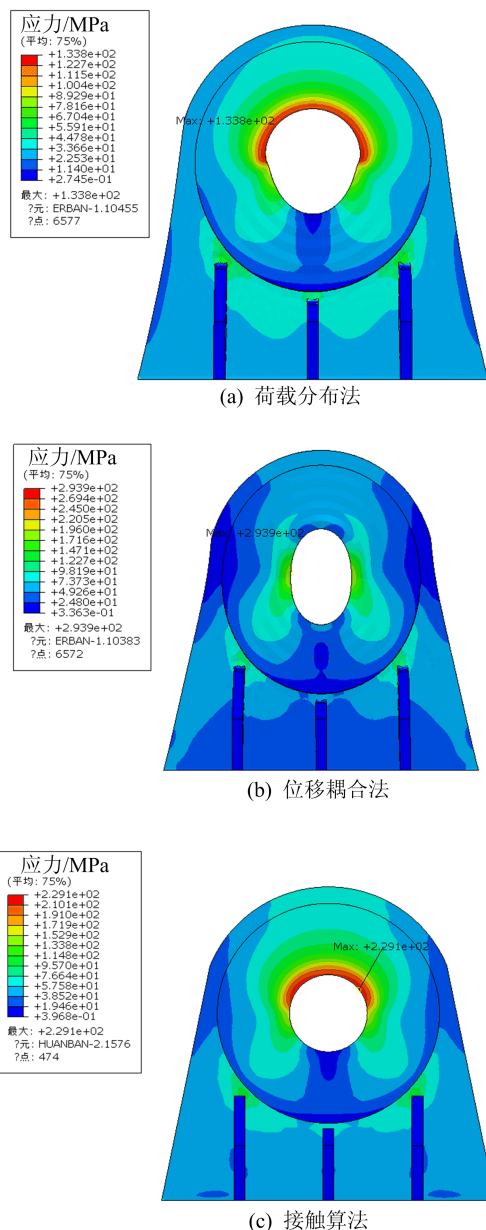


图 4 吊耳结构 Mises 应力分布有限元计算结果

创建围绕吊耳孔圆周的圆形及厚度路径,如图 5 所示。路径 1、路径 2、路径 3 分别对应于荷载分布法、位移耦合法、接触算法计算结果中吊耳承压内壁应力最大的圆形路径。路径 A、路径 B、路径 C 分别对应于荷载分布法、位移耦合法、接触算法计算结果中吊耳承压内壁应力最大的厚度路径,不同路径上单元的 Mises 应力值如图 6 所示。

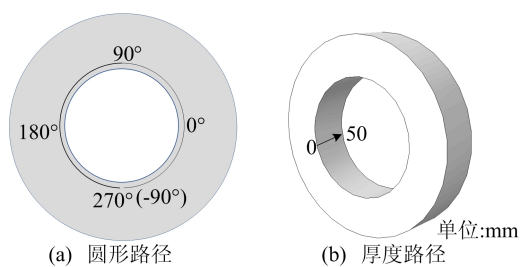
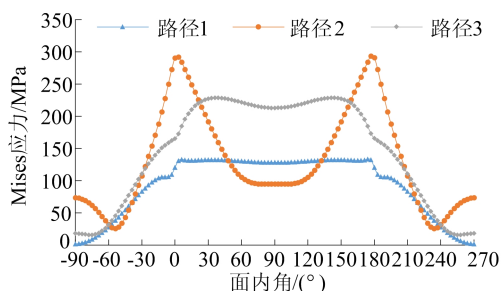
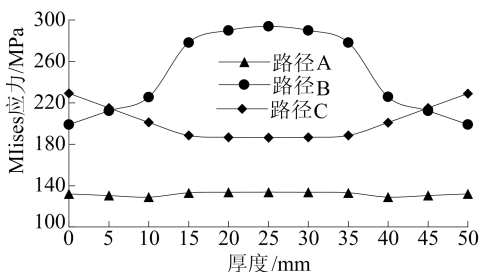


图 5 计算结果提取路径



(a) 沿圆形路径方向上应力分布



(b) 沿厚度路径方向上应力分布

图 6 3 种荷载施加方式对应的应力分布

在圆形路径上,3 种荷载施加方式对应的应力分布曲线呈现出类似的特征,吊耳承压内壁圆形路径上的单元,分别在面内角对应 6° 、 3° 、 36° 的位置出现了 Mises 应力的最大值,在 90° 位置附近出现了 Mises 应力的极小值。

在厚度路径上,荷载分布法所得计算结果中应力分布比较均匀,位移耦合法所对应的应力分布呈现中心较大、两端较小的特点,而接触算法的应力分布的趋势与位移耦合法相反。

荷载分布法计算得出的应力结果偏小,接触应力均匀分布的假设过于理想化,使得吊耳孔承

压内壁的应力十分均匀,不能够真实反映吊耳结构受力状态下的应力情况;位移耦合法通过假定吊耳承压内壁的变形协调关系近似计算接触问题,线性分布耦合的方式相较于绝对运动耦合的方式其约束刚度更小,但仍难以避免计算过程中引起的局部应力集中,从而计算结果过于保守,参考意义有限。

接触应力分布的有限元计算结果如图 7 所示。

从图 7a 可以看出,法向接触应力沿着轴向的分布并不均匀,呈现出两端区域较大、中间区域较小的特征,这一点区别于前 2 种方法。当外力荷载中存在垂直于吊耳平面的面外分力时,这种区别将更为明显。

从图 7b 可以看出,当额外施加 400 kN 的面外分力时,接触应力沿轴向分布的不均匀性更加明显。这种情况下采用荷载分布法或位移耦合法所计算的结果将很难获得与真实受力相符合的计算结果。

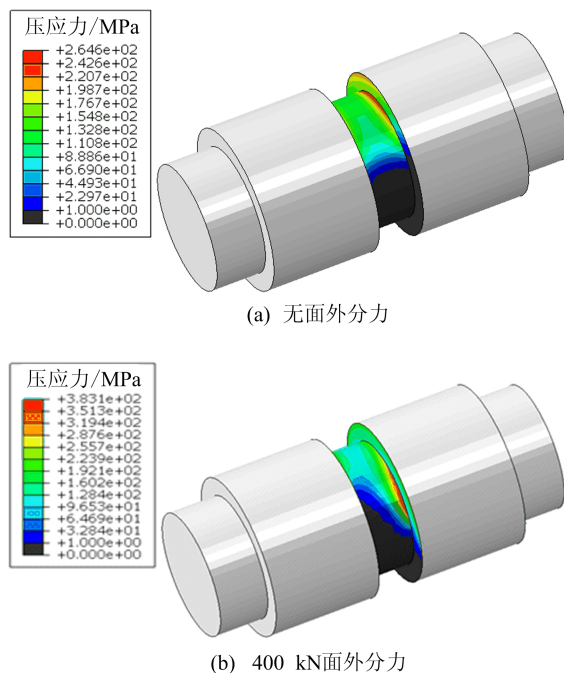


图 7 接触应力分布有限元计算结果

荷载的分布形式与变形协调条件会随着结构的尺寸、材料的性能、荷载的方向等因素而改变^[11-12],这是接触问题的难点。对于特定情况下的吊耳强度校核问题,通过合理的假设,避免接触算法引入的非线性计算,能够很大程度提高计算效率。

但对此本次工程中的自设计 TPA 型顶部板

式吊耳,其承担的荷载复杂多变,利用接触问题的非线性算法,能够更好地帮助建设单位选用更加安全、经济的吊耳结构设计方案。

4 工程实例

本节采用有限元法对永定河特大桥梁吊装过程中的吊耳结构进行力学分析,吊耳结构见图 1。根据第 3 节中接触算法所对应方式对吊耳结构施加荷载,并按照式(1)进行强度校核。

4.1 计算荷载说明

吊装作业过程中,被吊物体需保证其空间姿态与成桥状态一致以满足结构落架、安装的要求;其次,为最大程度地降低被吊物体的局部应力过大的风险,吊耳结构也需要按照特定角度与被吊物体进行焊接,因此,不能保证吊耳结构总是处于最佳的受力状态。

设吊绳拉力 F 在吊耳片平面内分力与水平面夹角为面内角 α ,拉力 F 偏离吊耳平面的偏角为面外角 β ,如图 8 所示。在吊装作业中会出现较小的面内角 α 和较大面外角为 β ,对吊耳结构受力产生不利影响。

考虑到吊装作业过程中可能出现的轻微晃动,计算时对拉力施加 1.2 倍的动载系数。

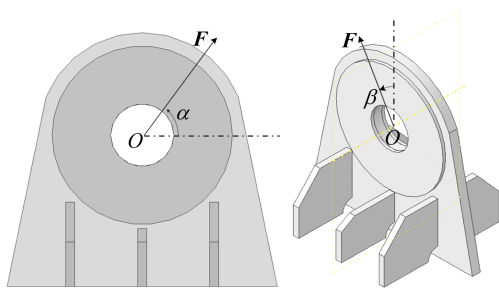


图 8 吊耳结构受力简图

4.2 钢箱梁吊耳计算

主梁钢箱梁最重节段为 245 t,采用双吊钩四吊点进行吊装作业。钢箱梁节段结构规整、重力分布均匀、吊点布置对称,吊装过程取面外角 $\beta=0^\circ$,面内角根据施工方案,保守考虑取 $\alpha=60^\circ$ 。单个吊耳承受的吊绳拉力^[13]为:

$$F = \frac{1.2G}{4\sin\alpha} = \frac{2\,450\text{ kN}}{4\sin 60^\circ} = 848.7\text{ kN}.$$

本文按照有限元法接触算法,计算得出的 Mises 应力分布如图 9 所示。从图 9 可以看出,吊耳结构上的最大 Mises 应力为 157 MPa,小于 Q345 钢的许用应力,且存在一定的安全裕度,吊耳结构强度安全可靠。

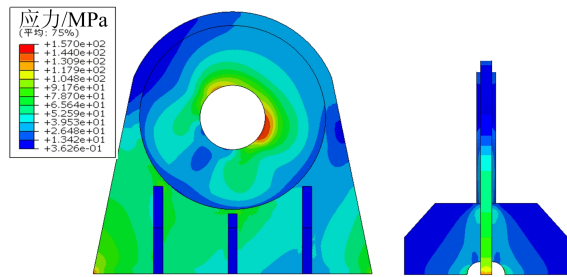


图 9 钢箱梁吊耳 Mises 应力分布有限元计算结果

4.3 拱肋吊耳计算

拱肋结构在吊装过程中不同于钢箱梁吊装时的“平起平落”,其各个拼接节段不仅存在较大的倾斜角度,而且横截面沿轴线不断变化,由四边形逐渐过渡为五边形,整体结构呈现内倾式“麻花”状。

拱肋结构同样采用双吊钩四吊点进行吊装,其 4 个吊耳所受的拉力大小、方向均存在较大差异,可根据有限元法计算出拱肋每个节段 4 根吊绳的张力^[14-15],然后把吊绳张、拉力作为吊耳荷载,选取危险工况对吊耳结构进行精细分析。

选取吊绳张力较大、面内角和面外角都为不利的拱肋节段进行吊耳结构核算,各个吊耳的外力与 Mises 应力最大值见表 1 所列。

表 1 拱肋吊耳结构计算参数与结果

吊耳编号	F/kN	$\alpha/(\text{°})$	$\beta/(\text{°})$	$\sigma_{\text{eq}}/\text{MPa}$
G2a	860.6	59.7	26.5	1 057.0
G2b	861.7	51.6	22.2	734.2
G2c	632.6	52.2	20.3	501.7
G2d	516.2	62.5	21.5	529.9
G3a	494.3	58.4	20.4	387.6
G3b	598.2	51.7	17.6	423.7
G3c	929.0	43.8	17.1	652.8
G3d	732.5	51.5	17.7	521.1
G4a	666.6	67.1	10.7	296.1
G4b	814.9	65.3	8.6	308.1
G4c	933.0	51.7	9.8	420.5
G4d	521.8	55.6	11.9	268.5

其中,外力面外偏角最大的 G2a 吊耳与外力较大的 G3c 吊耳的 Mises 应力分布有限元计算结果如图 10 所示。

从图 10 可以看出:G2a 吊耳与 G3c 吊耳的最大 Mises 应力分别为 1 059.0、652.8 MPa,均位于 N5 肋板上部与 N1 耳板交界处;吊耳孔内壁的最大 Mises 应力分别为 341.1、352.5 MPa;吊耳底部焊接面的最大 Mises 应力分别为 195.1、251.4 MPa。另外在 N3 环板下缘出现了大面积的高应力区,在面外分力较大的 G2a 吊耳上高应

力区更为明显,超过了吊耳使用材料 Q345 钢的许用强度 295 MPa,不满足安全要求。

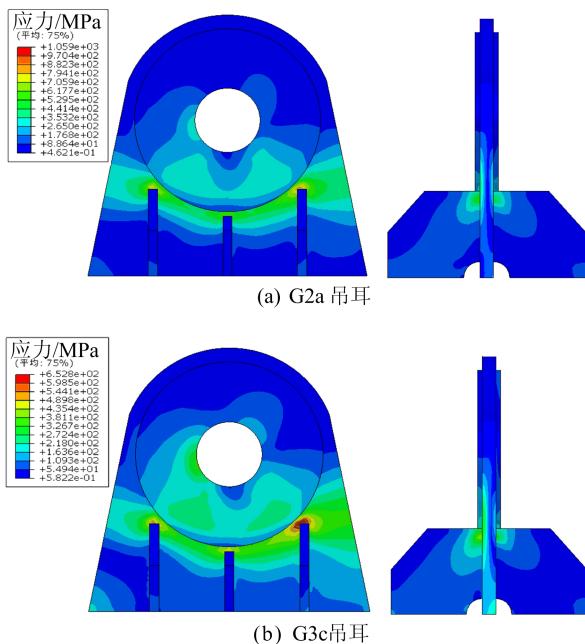


图 10 拱肋吊耳 Mises 应力分布有限元计算结果

4.4 吊耳加固方案

当吊耳结构承受较大的面外分力, N3 环板下缘与 N1 耳板相邻处的截面尺寸引起了应力集中,难以避免地出现了面积较大的高应力区,改变环板形式,将其向下延伸到底部(留有 35 mm 过焊孔),是较为有效的处理方案^[16-17];面外分力的出现也会加大吊耳孔承压内壁沿着厚度方向上的不均匀性,导致吊耳孔附近出现大于许用应力的高应力区,将原 N1 板由 30 mm 加厚为 40 mm,原 N3 板由 10 mm 加厚为 40 mm,提高吊耳孔与销轴的接触面积;为抵抗面外分力引起的弯矩,将 N4 肋板、N5 肋板厚度由 20 mm 增加为 30 mm, N4 板由 130 mm 加高为 260 mm,原来的 N5 板由 198 mm 加高至 320 mm。加固后的吊耳结构如图 11 所示。

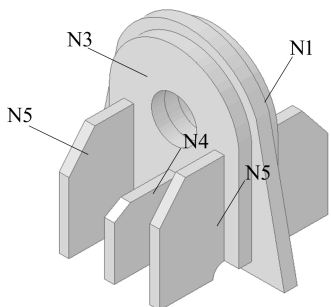


图 11 加固后的吊耳结构

对加固后的吊耳结构进行有限元法计算,吊耳结构 Mises 应力分布如图 12 所示。

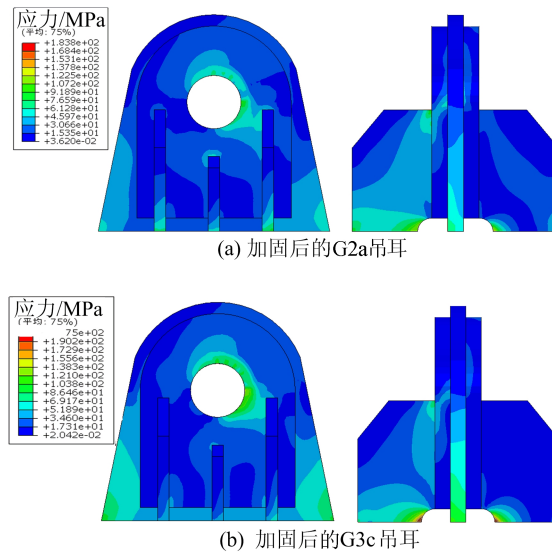


图 12 加固后的拱肋吊耳 Mises 应力分布有限元计算结果

加固后的 G2a 吊耳和 G3c 吊耳在 N5 肋板上部与 N3 耳板交界处的最大 Mises 应力分别为 183.8、184.7 MPa;吊耳孔内壁的最大 Mises 应力分别为 138.1、207.5 MPa;吊耳底部焊接面的最大 Mises 应力分别为 98.1、142.6 MPa。

加固后的吊耳结构各部位的 Mises 应力均减小,对于面外分力较大的 G2a 吊耳,效果更加明显。加固后的吊耳结构 Mises 应力小于 Q345 钢的许用应力 295 MPa,存在一定的安全裕度,吊耳结构安全可靠。

5 结 论

有限元法的应用为解决工程吊耳结构的强度校核问题提供了很大的便捷,当需要关注吊耳孔内壁处的应力时,不同施加荷载方式会影响最终的计算结果。接触算法能够更为准确地描述销轴与吊耳之间的接触关系,计算结果也更具有参考意义。荷载分布法和位移耦合法是一种近似的求解模型,通过对吊耳孔内壁处的应力和位移的合理假设,能够很大程度地提高计算效率。但随着荷载方向的变化,特别是出现吊耳面外分力时,吊耳内壁的法向接触力发生显著变化,其分布区域与数值呈现不规则性,会对荷载分布法和位移耦合法的使用带来不利。拱桥分节吊装、原位拼装的施工工艺使得每个吊耳的受力形式多变,接触算法更加适合工程计算。

(下转第 707 页)

- Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24: 372-380.
- [15] KANG B, ZHA F S, LI H C, et al. Bio-mediated method for immobilizing copper tailings sand contaminated with multiple heavy metals[J]. Crystals, 2022, 12(4): 522.
- [16] DE OLIVEIRA D, HORN E J, RANDALL D G. Copper mine tailings valorization using microbial induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 298: 113440.
- [17] JIN C Y, LIU H Y, GUO M X, et al. Experimental study on tailings cementation by MICP technique with immersion curing[J]. PLoS ONE, 2022, 17(8): e0272281.
- [18] KANG B, ZHA F S, DENG W H, et al. Biocementation of pyrite tailings using microbially induced calcite carbonate precipitation[J]. Molecules, 2022, 27(11): 3608.
- [19] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.
- [20] 黄容聘, 邵光辉, 陈飞扬. 微生物单点注浆固土胶结区的形态演变特征[J]. 林业工程学报, 2019, 4(6): 158-164.
- [21] 彭劫, 黄慕凡, 谢高强, 等. 微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的注浆方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 259-264.
- [22] 周杨, 张家铭, 朱纪康, 等. 基于原生微生物 MICP 的土体加固试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(5): 132-139.
- [23] TOBLER D J, MACLACHLAN E, PHOENIX V R. Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 270-278.
- [24] CHENG L, CORD-RUWISCH R. In situ soil cementation with ureolytic bacteria by surface percolation[J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 64-72.
- [25] HOANG T, ALLEMAN J, CETIN B, et al. Sand and silty-sand soil stabilization using bacterial enzyme-induced calcite precipitation (BEICP) [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(6): 808-822.
- [26] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. Geomicrobiology Journal, 2007, 24(5): 417-423.

(责任编辑 吴亮)

采用接触算法的有限元计算结果表明,原吊耳结构能够满足钢箱梁结构的吊装安全,但对于拱肋结构,在吊耳孔内壁、加劲肋板上部、环板下缘均出现了高应力区,不能满足安全要求,需要进行加固设计。本文提出的加固方案能够很好地抵抗因面外分力而引起的弯矩,减小尺寸变化处的应力集中,能够满足吊装安全要求。

[参 考 文 献]

- [1] 邢启风, 邢硕. 施工现场用起重吊点的设计与应用[J]. 机械工程师, 2019(12): 129-131.
- [2] 阎慧杰, 李军, 段帅师, 等. 一种弹体吊具的结构设计与强度分析[J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57(3): 41-43.
- [3] 钟杰华, 史锐, 李晶, 等. 一种箭体吊具的结构强度有限元分析[J]. 机械, 2017, 44(7): 58-61.
- [4] 景玉, 黄勇, 毛立青. 有限元分析在吊耳设计中的应用[J]. 石油工程建设, 2021, 47(4): 61-63, 80.
- [5] 肖文勇, 余凯. 吊耳局部有限元建模技术分析[J]. 船舶工程, 2009, 31(增刊1): 94-97.
- [6] 王俊然, 程市, 曾超, 等. 基于有限元仿真的发动机吊耳强度分析[J]. 内燃机与动力装置, 2020, 37(6): 13-17.
- [7] 周齐齐, 袁正, 常亮. 重箱吊具力学性能有限元分析与研究[J]. 机械工程师, 2011(5): 76-78.
- [8] 朱成诚, 赵建平. 大型设备顶部板式工装吊耳的分析设计[J]. 压力容器, 2015, 32(7): 41-46.
- [9] 孙田鸽, 牛忠荣, 肖俊俊, 等. 窄基角钢输电塔结构力学性能研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(2): 232-238.
- [10] 李兆峰, 牛忠荣, 吴健安. 超高层建筑高位转换层型钢混凝土转换节点强度分析与加固[J]. 建筑结构, 2020, 50(24): 61-68.
- [11] XU W L, WANG L C. Simplified model for static stress analysis of straight eccentric lug subjected to cosine distribution pressure[J]. Structures, 2021, 34: 2077-2086.
- [12] 陈跃. 大跨径钢管混凝土拱吊装施工技术研究[J]. 公路, 2021, 66(7): 165-169.
- [13] 赵凯, 庆光蔚. 一种多翼型吊具结构强度的分析及试验验证[J]. 工程机械, 2022, 53(8): 38-42.
- [14] 杨扬, 完海鹰, 高鹏, 等. 合肥新桥机场航站楼钢结构拼装桁架段施工仿真分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2011, 34(10): 1524-1527.
- [15] NICOLAE A, DORIN L B. An application to calculate the factors which are used to determine the tensile rupture load of a lug under axial, transverse or oblique loading[J]. INCAS Bulletin, 2013, 5(1): 19-28.
- [16] CHOI K S, KIM J J, CHOI J J. A study on the structural integrity of lifting lug without appendage[J]. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 2021, 20(11): 108-114.
- [17] 顾程磊, 王文龙, 刘晓欢. 方管接头吊耳结构设计方法讨论及规范比较[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(10): 81-83.

(责任编辑 吴亮)