

桥梁水平转体球铰接触应力分析

傅贤超 周高旗 李鹏东

中铁西南科学研究院有限公司 四川成都 611731

摘要: 桥梁转体施工技术凭借其独特优势在现代桥梁建设中应用广泛,球铰作为该技术的核心部件,其接触应力状态对桥梁转体施工安全及结构长期性能至关重要。本文基于有限元分析软件,建立精细化球铰模型,全面分析不同工况下球铰的接触应力分布规律,并结合工程实例,对比理论计算与实测数据,验证分析方法的准确性,深入探讨影响球铰接触应力的关键因素,为桥梁转体球铰的优化设计与施工提供坚实的理论依据与实践指导。

关键词: 桥梁转体;球铰;接触应力;有限元分析

引言

桥梁转体施工是一种将桥梁结构在非设计轴线位置浇筑或拼装,再通过转动体系使其就位的施工方法^[1]。该技术能有效解决在复杂地形、交通繁忙地段的桥梁建设难题,具有施工干扰小、工期短、安全性高等优点。球铰作为转体结构的关键承重与转动部件,承受着桥梁上部结构的巨大荷载,并在转体过程中协调结构的转动,其力学性能直接关系到转体施工的成败与桥梁运营阶段的安全。准确分析球铰接触应力,对保障桥梁转体顺利实施、优化球铰设计、确保桥梁结构长期可靠服役意义重大。近年来,随着桥梁建设向大跨径、复杂环境发展,对球铰力学性能研究的需求日益迫切。

一、桥梁转体球铰结构与工作原理

1.1 球铰结构组成

桥梁转体球铰通常由上球铰、下球铰、四氟乙烯滑片、销轴等部件组成。上球铰与桥梁上部结构相连,下球铰固定于基础(承台)之上。上球铰的凹球面与下球铰的凸球面相互配合,形成转动副。四氟乙烯滑片置于上下球铰之间,可显著降低转动摩擦系数;销轴则用于限制球铰的水平位移,确保转动过程的稳定性。不同类型的球铰,如普通钢球铰、混凝土球铰等,在结构细节与材料选用上有所差异,但基本组成与功能相似。

作者简介: 傅贤超,性别:男,出生年月:1984.09,籍贯(省市-人):江西省吉安市永丰县,民族:汉,学历:硕士,已有职称:正高级工程师,研究方向:桥梁工程设计与施工技术。

1.2 工作原理

在桥梁转体施工过程中,球铰承担着上部结构的全部竖向荷载、水平荷载以及转动过程中的不平衡力矩。竖向荷载通过上下球铰的接触面传递至基础,水平荷载与不平衡力矩则由球铰的抗剪结构(如销轴、键槽等)抵抗。转体时,在牵引系统作用下,上球铰绕下球铰的球心转动,四氟乙烯滑片减小摩擦阻力,使转动更加顺畅。球铰在施工阶段与运营阶段的受力状态不同,施工阶段主要承受转体过程中的动态荷载,运营阶段则主要承受桥梁恒载与活载产生的静态荷载,其工作性能需满足不同阶段的力学要求。

二、球铰接触应力分析方法

2.1 理论计算方法

2.1.1 赫兹接触理论

赫兹接触理论基于弹性力学,适用于分析两个弹性体在小变形、无摩擦条件下的点、线接触问题。对于球铰接触,可将其简化为两个球体或球与平面的接触^[2]。根据赫兹理论,接触应力分布呈椭圆状,最大接触应力位于接触面中心。其计算公式为:

$$\sigma_{\max} = \frac{3F}{2\pi ab}$$

其中, $\sigma_{\max}$ 为最大接触应力, F 为接触力, a 、 b 分别为接触椭圆的长半轴与短半轴。但该理论未考虑球铰实际结构的复杂性,如接触面的粗糙度、材料非线性等,计算结果与实际存在一定偏差,常用于初步估算。

2.1.2 弹性力学解析法

弹性力学解析法通过建立球铰的力学模型,运用弹

性力学基本方程求解接触应力。对于球铰的轴对称问题,可采用柱坐标或球坐标进行分析,考虑材料的弹性常数、几何形状及边界条件,推导出应力分布表达式。此方法能更准确地反映球铰的力学特性,但因求解过程复杂,仅适用于简单几何形状与边界条件的球铰模型,对于实际工程中复杂结构的球铰,应用受限。

2.1.3 规范简化算法

部分国家和行业规范针对球铰接触应力计算给出了简化方法。如我国公路桥梁施工技术规范中,对球铰接触应力计算采用平均应力法,即假设接触应力均匀分布,通过总荷载除以接触面积得到平均接触应力^[3]。该方法计算简便,但无法反映球铰接触应力的真实分布情况,偏于保守,可能导致设计不经济。

2.2 有限元数值模拟方法

2.2.1 有限元模型建立

利用通用有限元软件(如ANSYS等)建立球铰的三维实体模型。对于球铰的上下板、球体等部件,根据实际材料特性赋予相应的弹性模量、泊松比等参数。采用实体单元(如SOLID95、C3D8R等)对模型进行网格划分^[4],在接触区域细化网格,以提高计算精度。定义上下球铰之间的接触对,选用合适的接触算法(如罚函数法、拉格朗日乘子法等)模拟接触行为,设置接触刚度、摩擦系数等参数。同时,根据实际边界条件,约束下球铰底部自由度,在上球铰施加相应荷载。

2.2.2 材料本构模型选择

球铰材料早期采用混凝土,现多为钢材^[5]。钢材通常采用双线性随动强化模型(BKIN)或多线性等向强化模型(MISO),考虑其屈服特性与强化阶段。混凝土材料采用混凝土损伤塑性模型(CDP),该模型能较好地描述混凝土在受压、受拉状态下的非线性力学行为,包括开裂、损伤演化等特性,使模拟结果更符合实际。

2.2.3 接触算法与参数设置

接触算法直接影响计算结果的准确性与收敛性。罚函数法通过设置接触刚度来模拟接触力,计算效率高,但可能出现过约束问题;拉格朗日乘子法严格满足接触约束条件,结果更精确,但计算成本较高。实际应用中,常根据模型特点与计算要求选择合适算法。接触参数如摩擦系数,根据球铰表面材料及润滑条件取值,一般在0.03~0.08之间;接触刚度需根据材料特性与接触状态合理设置,以确保接触模拟的真实性。

三、不同工况下球铰接触应力分析

3.1 施工阶段工况

3.1.1 转体前自重作用

在转体前,球铰主要承受桥梁上部结构自重。有限元模拟结果显示,球铰接触应力分布呈中心小、边缘大的特征。这是由于球铰边缘处的应力集中效应,上部结构自重通过球铰边缘更集中地传递至基础。最大接触应力出现在球铰边缘靠近外侧区域,数值可达几十兆帕,需确保球铰在此阶段的强度满足要求,防止局部受压破坏。

3.1.2 转体过程动态荷载

转体过程中,球铰除承受自重外,还受到牵引系统的水平拉力、转动产生的离心力以及可能的风荷载等动态作用。水平拉力使球铰一侧接触应力增大,另一侧减小;离心力在转动速度较大时对接触应力分布有一定影响,使外侧接触应力进一步增加。风荷载虽为偶然荷载,但在强风地区不容忽视,其作用可能导致球铰接触应力分布不均加剧,甚至出现局部应力超限情况。通过时程分析可模拟转体过程中球铰接触应力的动态变化,为施工安全控制提供依据。

3.2 运营阶段工况

运营阶段,球铰主要承受桥梁恒载与活载。恒载作用下,球铰接触应力分布相对稳定,与转体前自重作用时类似,但数值因活载的叠加而增大。活载具有随机性,根据最不利荷载组合进行分析,车辆荷载在不同位置加载时,球铰接触应力分布会发生变化。温度变化会使桥梁结构产生伸缩变形,球铰作为连接部件也受到影响。当温度升高时,桥梁上部结构膨胀,球铰承受水平推力,导致接触应力增大;温度降低时,结构收缩,球铰可能出现局部脱空现象,改变接触应力分布。

四、工程实例分析

以济莱高铁济南东特大桥上跨济青高铁转体连续梁为例,主桥跨径布置为(66+128+66)m,采用平转法施工,转体重量约15000t,转体角度37°。球铰设计承载力为180000kN,上、下球铰直径均为4.5m,由铸钢制成。

4.1 球铰接触应力计算

分别采用赫兹接触理论、弹性力学解析法与规范简化算法对球铰接触应力进行计算,结果如表1所示。三种理论计算方法结果存在差异,规范简化算法结果相对较小,赫兹接触理论因模型简化与实际有偏差,弹性力学解析法较为接近实际但计算复杂。

表1 球铰理论接触应力计算结果

计算方法	球铰接触应力 (MPa)
赫兹接触理论	13.08
弹性力学解析法	16.45
规范简化算法	12.15

利用ANSYS软件建立球铰精细化有限元模型,模拟施工阶段与运营阶段工况。施工阶段转体前,球铰最大接触应力为18.12MPa,位于球铰边缘;转体过程中,考虑动态荷载,最大接触应力达到21.3MPa。运营阶段,在恒载与活载最不利组合作用下,球铰最大接触应力为19.45MPa,温度变化 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 时,接触应力变化范围为 $\pm 2.5\text{MPa}$ 左右。有限元模拟结果更全面地反映了球铰在复杂工况下的接触应力状态。

4.2 现场监测数据对比

在球铰关键部位布置应力传感器,对施工阶段与运营初期球铰接触应力进行现场监测。理论计算与现场实测如表2所示。现场监测数据与有限元模拟结果吻合良好,验证了有限元分析方法的准确性,也表明该球铰在实际工程中的受力性能符合设计预期。

表2 有限元计算与现场实测接触应力对比结果

工况	有限元计算 值L (MPa)	现场实测值 S (MPa)	理论误差 (L-S) / S
转体前(脱架后)	18.12	17.55	3.2%
动态转体过程	21.30	20.70	2.9%
运营阶段(恒载+活载)	19.45	19.13	1.7%

五、影响球铰接触应力的因素分析

5.1 球铰几何参数

球铰的直径、球面半径、球铰厚度等几何参数对接触应力有显著影响。增大球铰直径,可增大接触面积,降低单位面积上的接触应力;球面半径的变化会改变接触区域的曲率,影响接触应力分布,半径过大或过小均可能导致应力集中加剧。球铰厚度增加,其抗弯刚度提高,可减小因受力产生的变形,从而降低接触应力。通过参数化分析,可确定合理的球铰几何尺寸,优化球铰设计。

5.2 材料性能

球铰材料的弹性模量、屈服强度、泊松比等性能参数影响其力学响应。弹性模量较大的材料,在相同荷载下变形较小,接触应力分布更均匀;屈服强度决定了球

铰的承载能力,高屈服强度材料能承受更大的荷载而不发生塑性变形。材料的泊松比影响横向变形,进而对接触应力分布产生一定影响。在选择球铰材料时,需综合考虑材料性能与工程成本,确保球铰满足力学性能要求。

5.3 施工误差

施工过程中的误差,如球铰安装偏差、表面平整度误差、基础不均匀沉降等,会改变球铰的受力状态,导致接触应力分布不均。球铰安装偏差使荷载偏心作用,增大局部接触应力;表面平整度误差使接触点减少,应力集中现象加剧;基础不均匀沉降会使球铰承受额外的弯矩,严重影响球铰的安全性。严格控制施工精度,加强施工过程监测,可有效减小施工误差对球铰接触应力的不利影响。

结论

桥梁转体球铰接触应力分析方法多样,理论计算方法各有优缺点,有限元数值模拟能更真实地反映球铰在复杂工况下的力学行为,结合工程实例验证了有限元分析的准确性。不同工况下球铰接触应力分布规律明显,施工阶段转体前自重作用与转体过程动态荷载、运营阶段恒载与活载及温度变化均对球铰接触应力有显著影响,需针对各阶段特点进行设计与施工控制。球铰几何参数、材料性能与施工误差是影响接触应力的关键因素,合理设计球铰尺寸、选用合适材料、严格控制施工精度,对保障球铰力学性能至关重要。

参考文献

- [1]陈俊卿等.桥梁转体施工[M].北京:人民交通出版社,2001
- [2]桂水荣,杨勋春,王小庆,等.球铰设计参数对超大吨位转体球铰力学性能影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2025,41(01):1-9.
- [3]张琪峰.平转施工桥梁中球铰的设计与计算[J].城市道桥与防洪,2017,(11):84-87
- [4]刘涛.转体桥梁球铰设计[J].水科学与工程技术,2018,(03):78-80
- [5]张毅,孔瑞富,李鹏,等.某跨铁路大吨位转体斜拉桥球铰设计研究[J].公路,2021,66(04):97-102.