

大跨度连续梁桥转体球铰受力分析

刘佳¹, 李栋², 张朋³, 汪辰⁴, 陈志军⁵

(1. 中交城市投资控股有限公司, 广东 广州 511466; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 3. 武汉华中科大检测科技有限公司, 湖北 武汉 430074; 4. 中信建筑设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010; 5. 华中科技大学 土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 桥梁平转法以其施工方便、快捷、对既有线路影响小的特点在跨越既有线路桥梁建设中应用越来越广泛。桥梁转体施工的关键在于下部的球铰结构, 球铰结构在桥梁转体过程中承受较大的压应力。为了研究转体结构在转体施工时的受力情况, 通过弹性力学理论分析以及有限元数值分析对转体球铰结构最大压应力进行了对比计算分析, 并详细分析了转体结构各部分的应力分布。结果显示: 理论分析表明下部球铰最大压应力为 15.54 MPa, 有限元分析最大主压应力为 15.40 MPa, 二者吻合较好; 有限元分析结果显示上、下球铰压应力总体处于较大的压应力水平, 呈现出中间小、边缘大的特点。

关键词: 大跨度连续梁; 平转法; 转体球铰; 理论分析; 有限元法

中图分类号: U448.22; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0260-05

Force Analysis of Rotating Spherical Hinges in Long-span Continuous Beam Bridges

LIU Jia¹, LI Dong², ZHANG Peng³, WANG Chen⁴, CHEN Zhijun⁵

(1. CCCC URBAN Investment Holding Company Limited, Guangzhou 511466, China; 2. Central and Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 3. Wuhan Huazhong Science and Technology University Testing Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 4. CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 5. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The flat turning method of bridges is increasingly widely used in the construction of bridges spanning existing lines due to its characteristics of convenient and fast construction and minimal impact on existing lines. The key to the construction of bridge rotation lies in the lower spherical hinge structure, which is subjected to considerable compressive stress during the bridge rotation process. In order to study the force conditions of rotating structures during rotating construction, the maximum compressive stress of the rotating spherical hinge structure is comparatively calculated and analyzed through the analysis of elastic mechanics theory and finite element numerical analysis, and the stress distribution of each part of the rotating structure is analyzed in detail. The results show that the theoretical analysis indicates that the maximum compressive stress of the lower ball hinge is 15.54 MPa, and the maximum principal compressive stress of the finite element analysis is 15.40 MPa. The two match well. The finite element analysis results show that the compressive stress of the upper and lower ball hinges is generally at a relatively large compressive stress level, presenting the characteristics of being small in the middle and large at the edge.

Keywords: long-span continuous beam; flat rotation method; rotating ball hinge; theoretical analysis; finite element method

0 引言

随着我国立体交通网络的逐步完善, 新建桥梁

往往需要跨越既有交通线路, 新桥梁的施工往往对正常交通造成影响。传统的支架现浇或悬臂拼装法在此类环境下施工, 存在安全风险高、交通干扰大、经济效益差等问题。桥梁转体法施工技术应运而生, 它成功地将“桥上施工”转变为“桥旁施工”, 最终通过“转体就位”完成跨越, 完美地解决了上述难题。经过数十年的发展, 该技术(见图1)已成为中国桥梁

收稿日期: 2025-11-11

作者简介: 刘佳(1992—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事有限元仿真分析工作。

通信作者: 陈志军(1969—), 男, 博士, 教授, 从事土木与水利教学研究工作。电子信箱: chenzy@hust.edu.cn

建设领域的“国家名片”之一^[1-3]。

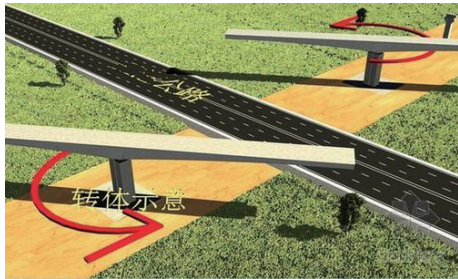


图1 平转施工示意图

转体施工是利用转动系统辅助施工的一种技术方法,桥梁转体施工法以其对现有交通影响小、施工安全等优点应用越来越广泛。早期转体法多为无平衡重平面转体,技术相对简单,但适用范围有限。如今已发展成熟,广泛应用于跨越铁路、高速公路、河流峡谷以及城市立交的预应力混凝土桥、钢桥、拱桥乃至大型屋盖结构中。从早期的平衡转体到不平衡转体,从水平转体到竖向转体,其技术不断创新,转体吨位纪录不断被刷新(目前已超过数万t),充分展示了我国在复杂条件下基础设施建设的技术实力^[4-6]。

转体施工是先在旁边施工完部分桥体,然后再利用转体支承系统和转体牵引系统将施工完成的桥体转动就位的施工技术,转体支承系统结构由转体下转盘、球铰、上转盘组成,转体牵引系统主要是通过连续千斤顶拉动。转体过程中,球铰主要受压力作用,为了研究转体结构在转体施工时的受力情况,通过弹性力学理论分析以及有限元数值分析对转体支承系统的球铰结构最大压应力进行了对比计算分析,验证了理论计算方法的可行性,同时采用有限元详细分析了转体结构各部分的受力特点。

1 工程背景

1.1 桥跨布置

某市政跨线连续梁桥跨径为 90 m+150 m+90 m,采用变梁高单箱三室连续箱梁,梁高按 1.8 次抛物线变化,端支座处及边跨直线段和跨中处梁高为 3.5 m,中支点处梁高 10 m。箱梁顶板宽 42.9 m,厚 25 cm;底板宽 27 m,底板厚度由跨中的 28 cm 按抛物线变化至中支点梁根部 100 cm,中支点处加厚到 150 cm;悬臂长 7.95 m。顶板,腹板厚 70~90 cm,支点位置腹板加厚。桥梁整体布置见图 2。

考虑到工程施工对既有铁路运营的影响,该连续梁采用两个 2×71 m 连续梁转体施工,转体角度分

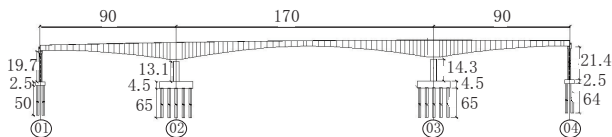


图2 桥梁整体布置图(单位:m)

别为 87.47°、80.25°,两个转体 T 构方向相同,单个转体结构总重量为 31 510 t,转体重量较大。转体完成后,依次支架现浇端部 18.92 m、中跨现浇合拢段 8 m。

1.2 转体系统

转体主墩为薄壁墩,顺向墩厚 6 m,横向墩顶宽 24 m,墩底宽 21 m,1、2 号主墩墩高分别为 11.4 m、12 m。上转盘长 22.6 m,宽 22.6 m,厚 2 m,转台直径 $\phi 21.3$ m,高 1.0 m。上、下转盘安装高度 0.9 m,在转体施工完成后现浇。下盘为支承转体结构全部重量的基础,转体完成后,与上转盘共同形成桥梁基础。下转盘上设置转动系统的下球铰、保险撑脚环形滑道及转体拽拉千斤顶反力座等。下转盘承台长 32.2 m,宽 26.4 m,高 5 m,其下布置有 30 根 $\phi 2.0$ m 的钻孔灌注桩,桩的中心距为 5.8 m,1、2 号主墩桩基桩长分别为 45 m、49 m。转体系统球铰平面半径为 2.6 m,滑道中心半径为 10.0 m,钢球铰球面半径为 8.0 m,定位钢柱直径为 0.50 m,下盘滑道宽度为 1.40 m,上盘撑脚直径为 1.0 m,整体转体系统球铰采用 C55 混凝土。转体系统下部结构见图 3。

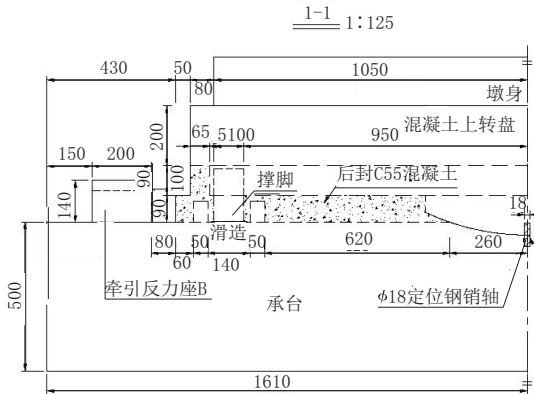


图3 转体系统总布置图(单位:mm)

2 理论分析

球铰受力计算:

球铰设计过程中,采用简化计算估算球铰平均应力水平时,球铰应按不考虑撑脚受力设计。考虑到转体过程中有不平衡荷载和偏心,球铰按小偏心受压构件计算^[7-10],根据材料力学计算公式,转心面积为圆形接触面积 $A = \pi R_1^2$,通过整体分析计算得到承载能力极限状态下最不利的弯矩和轴力组合,

代入下式:

$$\sigma_{\min} = \frac{F_1}{A} - \frac{M}{\pi r^4/4} \times r,$$

$$\sigma_{\max} = \frac{F_1}{A} + \frac{M}{\pi r^4/4} \times r,$$

$R_1=2.6$ m 时 $\sigma_{\max}=308\ 798/3.14/2.6^2 \times (1+4 \times 0.044\ 1/2.6)=15.54$ MPa

上述理论分析表明下部球铰最大压应力为 15.54 MPa。

3 有限元仿真分析

根据转体部分下部结构具体尺寸,根据圣维南原理,综合考虑计算精度和计算时间的平衡性,取下部桩基到上部桥墩的一部分,首先建立该部分结构的实体有限元模型。然后将整体分析得到的上部梁体结构的最大重量以均布荷载施加于承台顶面,将桩土共同作用的力施加于桩上,然后通过非线性接触模拟球铰的接触关系,最后求解得到该部分的有限元计算结果。

采用大型通用有限元软件 ANSYS 来建立转体系统结构有限元模型,其中转体支承部分的混凝土结构部分采用 Solid65 单元模拟,该单元类型能够较好地模拟混凝土的开裂、压碎及非线性行为,是 ANSYS 有限元软件中专用于模拟混凝土及钢筋混凝土结构的 8 节点三维实体单元,球铰钢结构部分由于厚度较小,属于典型的壳结构,因此采用 Shell181 单元模拟。转体过程中上、下球铰处于滑动状态,Conta174 和 Targe170 单元是 ANSYS 中用于模拟三维接触行为的关键单元类型,该单元类型能够很好地模拟上、下球铰之间接触与滑动的状态^[9]。桩基主要承受弯矩作用,同时为了梁单元和实体单元连接的方便性,采用 Beam189 单元模拟桩基,采用 Link8 单元模拟承台预应力钢筋,预应力钢筋和混凝土之间在划分网格之后采用耦合节点法连接在一起共同受力,转体结构采用的单元类型种类多,单元形式复杂,为了能使接触模拟分析更好的收敛,从而得到更精确的计算结果,采用映射法划分网格,在划分网格之前,将各部分几何体划分为规则的四面体或者六面体,并保证相交部分对齐。同时考虑到转体球铰受力的重要性以及该部分接触与几何尺寸的复杂性,在划分网格时适当加密该部分网格,从而提高该部分的计算精度^[11-16]。接触单元的计算关键在于接触单元参数的设置,为了消除初始渗透和初始缝隙,提升模拟精

度和稳定性,计算算法采用罚刚度算法,避免两个接触面之间的穿透,并在每一荷载子步中更新接触刚度。转体支承部分的有限元计算模型见图 4。

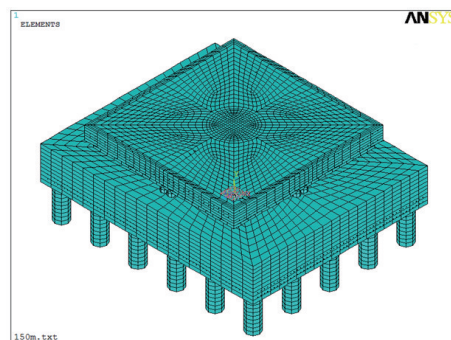


图4 转体结构有限元模型

4 有限元结果分析

4.1 转体系统变形分析

根据最不利工况计算得到转体结构竖向变形见图 5,由图 5 可知,转体结构竖向最大向下位移为 1.38 mm,转体过程竖向位移比较小,表明整个转体结构刚度比较大。

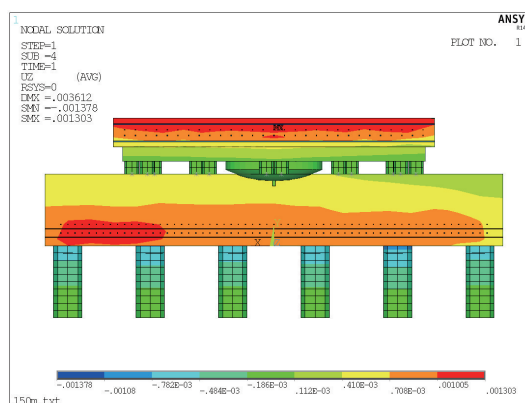
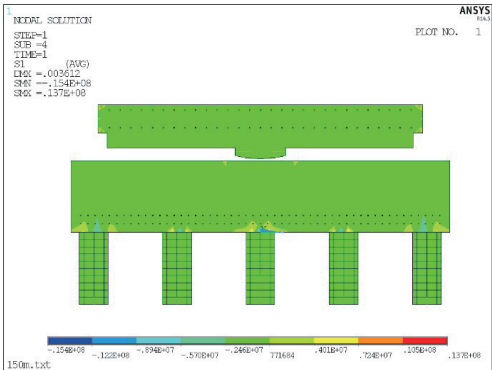


图5 转体结构竖向变形(单位:m)

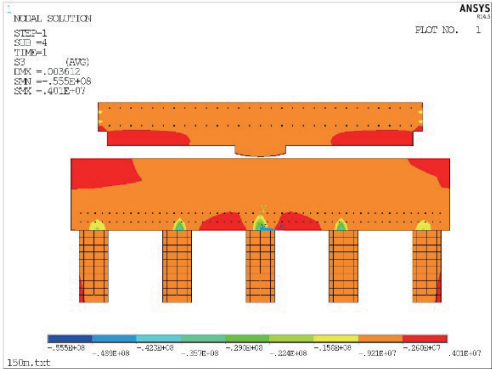
4.2 转体系统应力分析

图 6(a)和 6(b)分别给出了转体结构纵桥向立面第一和第三应力云图切片,图 6(c)和 6(d)分别给出了转体结构横桥向立面第一和第三应力云图切片。通过转体结构整体应力云图切片可知,转体结构最大主压应力为 15.40 MPa,最大主拉应力为 4.01 MPa,最大应力出现在下转盘球铰下表面附近区域,在球铰系统设计中应该加强此部分的构造设计,减小球铰的不平整度,避免应力集中。除部分应力集中点由于有限元模拟以及网格划分等问题外,整个转体结构整体处于受压状态。球铰压应力总体处于较大的压应力水平,且呈中间小、边缘大的特点,理论分析最大压应力和有限元分析最大压应力相差

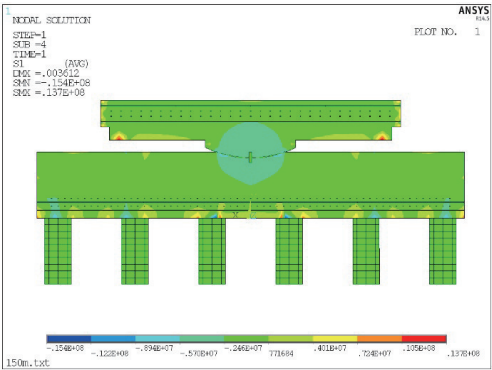
0.14 MPa,二者相差较小,表明有限元计算结果符合真实受力情况,转体系统在转体施工过程中满足受力要求。



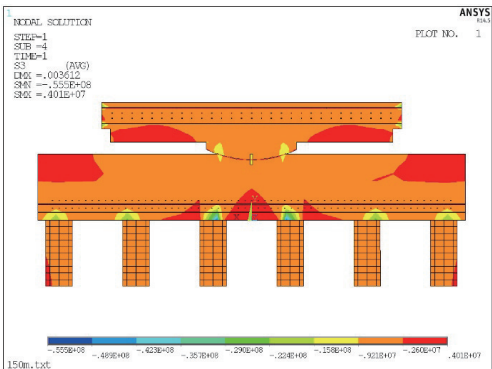
(a) 第一主应力切片立面图



(b) 第三主应力切片立面图



(c) 侧面第一主应力切片图



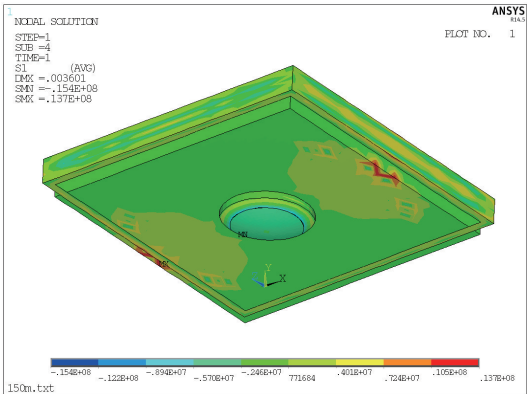
(d) 侧面第三主应力切片图

图 6 转体系统应力云图(单位:Pa)

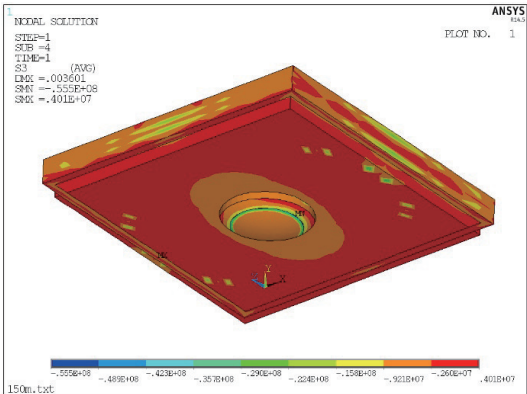
4.3 上转盘应力分析

桥梁转体过程中处于最不利状况下的上转盘第

一主应力和第三主应力云图见图 7(a)和 7(b),转体过程中转体系统上转盘部分位置出现了较大拉应力,拉应力超限部位主要位于撑脚与转盘连接处和预应力张拉端,为应力集中导致,应加强此部分的构造设计。从图 7(b)可以看出上转盘下表面出现较大拉应力。综合分析可知,转体结构上转盘主要以受压为主,最大压应力为 15.4 MPa,受力较好。



(a) 上转盘第一主应力云图



(b) 上转盘第三主应力云图

图 7 上转盘应力云图(单位:Pa)

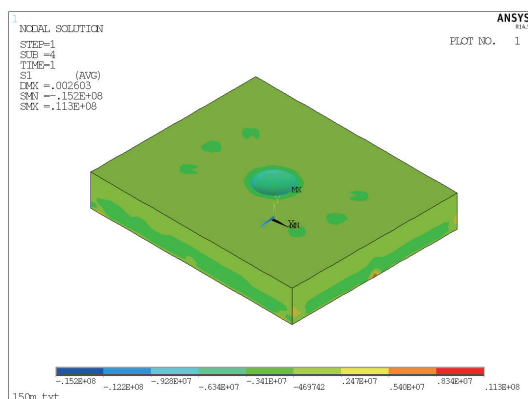
4.4 承台应力分析

桥梁 1 号墩转体过程中最不利状态下转体结构下部承台主应力云图见图 8,由图 8(a)和图 8(b)可以看出,除了预应力钢筋锚固端头出现部分应力集中点受拉,承台主要为受压状态,承台第一主应力最大压应力为 15.2 MPa,第三主应力最大拉应力为 0.88 MPa,最大拉应力小于 C55 混凝土施工状态下拉应力限值,转体过程中承台受力满足要求。

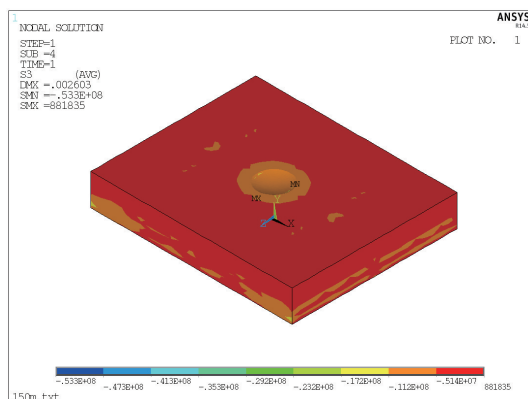
如图 8 所示,承台部分第三主应力绝大部分处于 20 MPa 以下,桩基与承台连接为应力集中部位,应力满足规范要求。

4.5 钢球铰应力

转体过程中转体系统钢球铰应力见图 9,通过分析可知,钢球铰 Von Mises 应力介于 22.9~36.2 MPa 之间,钢球铰应力变化范围小,受力均匀。



(a) 承台第一主应力云图



(b) 承台第三主应力云图

图8 承台应力云图(单位:Pa)

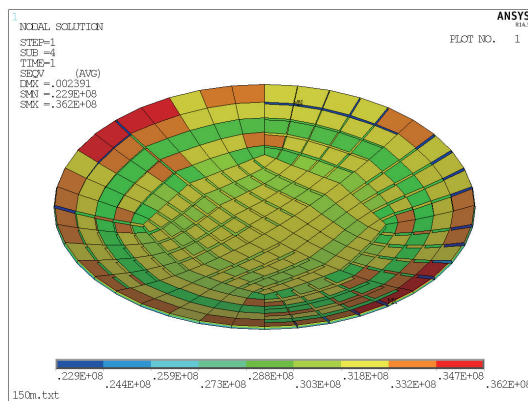


图9 钢球铰 Von Mises 云图(单位:Pa)

5 结 语

文章通过理论分析和有限元仿真分析计算了大跨度连续梁转体支承部分的球铰受力情况,根据理论分析和有限元仿真分析计算结果可以得出的结论如下:

(1)采用 ANSYS 软件对某市政跨线桥的转动系统进行有限元模拟分析,采用实体单元对转体结构进行精细化模拟,分析得到了转体过程中转体球铰

的应力分布规律。分析结果表明:上、下球铰主要呈现出受压状态,压应力分布呈现为中间小、边缘大的圆环状。

(2)最不利工况下最大主压应力为 15.4 MPa,局部应力集中处最大主拉应力为 4.01 MPa,在上转盘下表面附近区域,在转体球铰设计中应该加强此部分的构造设计,减小球铰的不平整度,减小应力集中。有限元仿真结果和理论分析结果最大压应力吻合较好,表明有限元仿真结果比较符合结构真实受力状况,转体结构受力基本良好。

(3)转体结构以受压为主,部分交界处出现拉应力,在转体结构设计过程中应该加强此部位的细节设计,同时在转体过程中加强对该部位的监控;为了防止墩底承台开裂,可以适当增加上转盘预应力筋。

参考文献:

- [1] 张联燕.桥梁转体施工[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 徐春东,胡洲,关俊峰,等.跨线铁路转体桥施工技术发展综述[J].华东交通大学学报,2021,38(6):54-60.
- [3] 程飞,张琪峰,王景全.我国桥梁转体施工技术的发展现状与前景[J].铁道标准设计,2011(6):67-71.
- [4] 桂业昆,邱式中.桥梁施工专项技术手册[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [5] 何俊.大跨度连续梁桥转体施工力学特性分析[D].兰州:兰州交通大学,2012.
- [6] 敏超.转体斜拉桥转体施工关键技术控制[J].北方交通,2008(9):59-61.
- [7] 董月龙.公跨铁 2×65 m T 构转体桥梁设计与荷载敏感性分析[J].工程建设与设计,2022,21(3):65-69.
- [8] 钱桂枫.沪杭高铁超大吨位转体施工拱桥建造技术[M].北京:中国铁道出版社,2012.
- [9] JTJ 041—2000 公路桥涵施工技术规范[S].
- [10] 曹悦,张筱薇.连续梁桥转体结构有限元分析[J].建材与装饰,2019(24):283-284.
- [11] 郑元勋,刘上,孙猛,等.大吨位转体桥梁不平衡力矩计算方法优化研究[J].世界桥梁,2024,52(6):64-70.
- [12] 杨丰聚.公路转体桥梁转体施工技术研究[J].建筑机械(上半月),2019(5):105-107.
- [13] 车晓军,周庆华,关林坤.转体施工桥梁大吨位球铰径向应力计算方法优化研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014(2):356-358.
- [14] 李卫平.桥梁转体施工过程中球铰应力研究[J].现代城市轨道交通,2020(2):26-31.
- [15] 蔡晓鹏.大跨度桥梁转体施工中接触面设计及计算分析[D].广州:华南理工大学,2019.
- [16] 刘宇.T 型刚构转体设计与力学性能分析[D].重庆:重庆交通大学,2015.