

大跨径桥梁临时转体墩系统力学性能模拟研究

包龙生,刘欣然,冯欣然,于玲

(沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 为减少大跨径桥梁施工对既有公路、铁路线运营的影响,达到缩短工期,节约成本的目的,提出一种临时墩体外转体法。方法 利用 Midas Fea 软件建立转体球铰有限元模型,分析在匀速转动阶段、加速转动阶段和不平衡荷载下转体系统局部应力及位移。结果 在匀速转动阶段,上、下球铰最大应力分别为 39.79 MPa、49.34 MPa,满足强度要求;加速转动阶段,角加速度超过 0.711 rad/s^2 时,球铰最大应力超过设计值,角加速度超过 0.716 rad/s^2 时,球铰最大剪切应力超过设计值;在不平衡荷载作用下,转体球铰强度均满足设计要求,球铰边缘各点最大高差均小于加工规定限值。结论 临时墩体外转体法可实现在最大偏心距下进行转体,施工完成后,球铰仍满足质量标准,可回收利用。

关键词 临时转体墩;转体系统;体外预应力;有限元分析;转体球铰

中图分类号 U445.4

文献标志码 A

引用格式:包龙生,刘欣然,冯欣然,等.大跨径桥梁临时转体墩系统力学性能模拟研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(4):690-696. (BAO Longsheng, LIU Xinran, FENG Xinran, et al. Simulation research on mechanical properties of temporary swivel pier system of long-span bridge[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(4): 690-696.)

Simulation Research on Mechanical Properties of Temporary Swivel Pier System of Long-span Bridge

BAO Longsheng, LIU Xinran, FENG Xinran, YU Ling

(School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to reduce the influence of long-span bridge construction on the operation of highway and railway lines, shorten the construction period and save the cost, a temporary pier external rotation method is proposed. The finite element analysis model of the swivel spherical hinge is established by Midas Fea software, and the local stress of the swivel system under the uniform rotation stage, the accelerated rotation stage and the unbalanced load is analyzed. In the uniform rotation stage, the maximum stress of the upper and lower spherical hinges is 39.79 MPa and 49.34 MPa respectively, which meets the strength requirements. In the accelerated rotation

收稿日期:2023-08-05

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC0809600, 2018YFC0809606);沈阳市科技计划项目(23-407-3-19)

作者简介:包龙生(1971—),男,教授,主要从事桥梁工程结构等方面研究。

stage,when the angular acceleration exceeds 0.711 rad/s^2 , the maximum stress of the spherical hinge exceeds the design value. When the angular acceleration exceeds 0.716 rad/s^2 , the maximum shear stress of the spherical hinge exceeds the design value. Under the action of unbalanced load, the strength of the swivel spherical hinge meets the design requirements,and the maximum height difference of each point at the edge of the spherical hinge is less than the processing limit. The external rotation method of temporary pier can realize the rotation under the maximum eccentricity. After the construction is completed,the spherical hinge still meets the quality standard and can be recycled.

Key words: temporary swivel pier; swivel system; external prestressing; finite element analysis; spherical hinge for rotation

随着我国交通的快速发展,拟建的公路、铁路桥梁不可避免会与既有的公路、铁路等线路发生相互交叉、彼此跨越。在这些桥梁建设中主要施工方法包括现浇法、悬臂施工、顶推施工等^[1-2]。当需要在现有道路或河流上建造新桥时,由于施工环境的限制,转体法成为首选,该方法具有对原线路运行干扰小等优点,其中包括常规转体、墩顶转体等^[3-4],转体法的研究也越来越多,相关的分析有球铰参数分析^[5]、BIM 控制管理、密封散装混凝土水化热等^[6]。现有的桥梁在转体施工时,基本都是在永久支墩上进行,在转体完成后固封转盘,同时也将转体球铰埋入转盘之中,球铰没有取出,整个转体系统充当了下部结构的一部分。因此,为了提高工程材料的利用率,尽可能降低工程成本,笔者在常规转体方法的基础上,使用一种新型的转体方法——临时墩体外转体法,即利用临时转体墩进行转体,当转体完成后,将临时转体墩拆除以回收转体球铰^[7-9];以某跨铁路双匝道桥左线转体部分为背景,使用临时墩体外转体法,利用 Midas Fea 分析软件对转体系统进行模拟仿真分析,研究转体球铰在匀速转动、加速转动、以及不平衡荷载情况下的受力效应,计算出球铰的各项参数指标。

1 工程概况

1.1 临时转体墩

临时转体墩桥全长为 $66\text{ m} \times 2$,其中 T

型结构转体部分为 $50.5\text{ m} + 50.5\text{ m}$,宽为 12 m ;梁高 $2\,665\text{ mm}$,由 9 根直径 630 mm 、壁厚 12 mm 钢管柱构成,钢管柱之间采用直径 250 mm 、壁厚 8 mm 钢管相连。临时转体墩构造如图 1 所示。

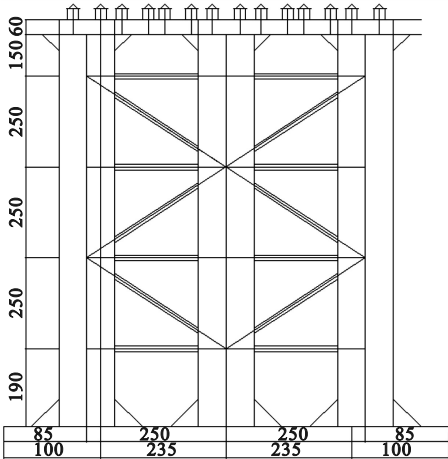


图 1 临时转体墩构造图

Fig. 1 Structural drawing of temporary swivel pier

1.2 转动系统

转体结构由下转盘、转体球铰、上转盘、撑脚与滑道、转动牵引系统组成^[10-11](见图 2)。

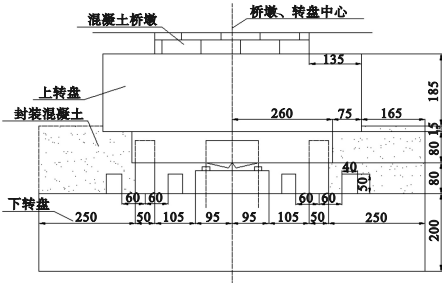


图 2 转体系统构造示意图

Fig. 2 Structural drawing of rotating system

2 临时墩转体系统有限元分析

2.1 试验设计

球铰是转体系统的核心结构,上转盘和下转盘材质均为 C50 混凝土,下转盘长宽高为 6 700 mm×6 700 mm×2 000 mm,上转盘直径为 5 200 mm、高为 800 mm;上球铰和下球铰材质均为 Q345-A 型钢,直径为 1 350 mm、球面角度为 29.1°、球面半径为 2 686.8 mm、上下两片球铰的厚度均为 50 mm。钢材抗弯、抗拉、抗压强度设计值 f 均为 290 MPa,抗剪强度设计值 $f_v = 165$ MPa。

在 Midas Fea 软件中,通常采用罚函数来建立节点和接触面之间的关系。在上、下接触面上的节点之间形成罚弹簧,通过乘以刚度调整系数,可由程序自动计算罚弹簧刚度大小。在定义主、从接触面时,需要在两个接触面之间设定接触搜索^[12],这种方法不仅可以使主、从接触面之间不会发生互相穿透,还可以使压力和摩擦力在主、从接触面之间传递。主接触面与从接触面划分见表 1^[13]。

表 1 主、从接触面划分准则

Table 1 Division criteria of master and slave contact surfaces

序号	主接触面	从接触面
1	平面、凹面	凸面
2	网格划分精度低的面	网格划分精度高的面
3	刚度大的面	刚度小的面
4	面积大的面	面积小的面
5	高阶单元面	低阶单元面

由此,利用 Midas Fea 软件建立转体系统有限元模型,模型中各部件均采用 3D 实体单元。为了避免结构之间的接触部位出现节点不耦合问题,在进行网格的划分时,首先使用布尔运算处理接触部位^[14-16],根据主、从接触面划分准则将结构的从接触面印刻在主接触面上,选用范梅塞斯本构模型进行材料非线性分析。

2.2 转体系统模型

利用 Midas Fea 软件建立转体系统有限元模型。3D 模型共计 387 864 个单元,415 795个节点,其转动系统模型如图 3 所示。考虑到在单一节点处施加较大的点荷载容易造成应力集中,因此将点荷载对称施加在转台两侧的多个节点处来模拟牵引力的作用;同理,在转体上盘边缘处施加点荷载的形式来模拟不平衡力矩的作用。

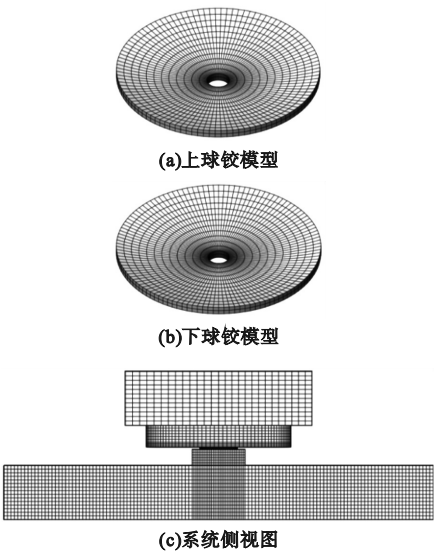


图 3 转体系统模型

Fig. 3 Rotating system model

该转体系统模型的边界条件设置图 4 所示。

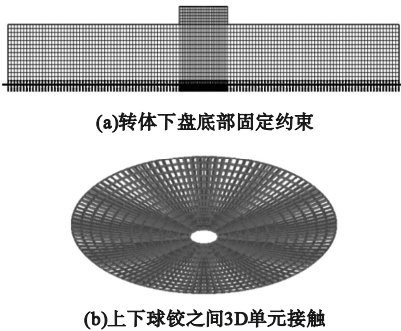


图 4 边界条件

Fig. 4 Boundary conditions

①固定约束。转体下盘与地面之间所有节点采用固定约束,约束三个方向的平动自由度 T_1 、 T_2 、 T_3 和三个方向的转动自由度 R_1 、 R_2 、 R_3 。

②接触模拟。上、下球铰接触面静摩擦系数为0.1,面面接触组的刚度比例因子为1.0。

2.3 转体系统局部应力分析

2.3.1 匀速转动阶段计算分析

对钢球铰的受力状态进行分析^[17],得到

球铰的范式等效应力和位移结果。图5为匀速转动阶段球铰应力云图。由图5可知,上、下球铰球铰的最大应力分别为39.79 MPa、49.34 Mpa,均未超过球铰所用钢材强度的设计值290 MPa。

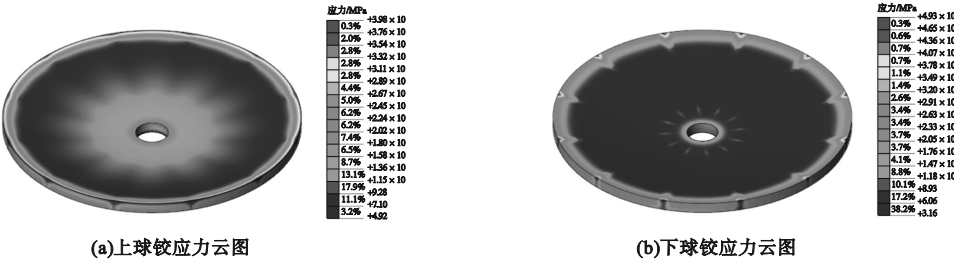


图5 匀速转动阶段球铰 Von Mises 应力云图

Fig. 5 Von Mises stress plots of spherical hinge under constant speed state

转体球铰竖向位移结果如图6所示。由图6可知,上球铰最小、最大竖向位移分别为0.225 mm、0.281 mm,高差0.056 mm;下球铰最小、最大竖向位移为0.207 mm、

0.234 mm,高差0.027 mm,最大高差发生在上球铰位置,其影响可忽略不计。因此,在匀速转动阶段,球铰外缘高差几乎无变化。

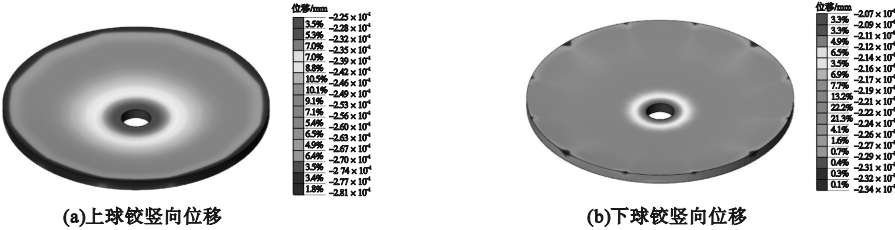


图6 匀速转动阶段球铰位移

Fig. 6 Spherical joint displacement under constant speed state

2.3.2 加速转动阶段计算分析

由转体质量 $G=13\ 650\ \text{kN}$,牵引索所在转盘半径 $R=5.2\ \text{m}$,可得转体系统的转动惯量, $J=4.71\times10^6\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

根据不同角加速度设定6组模拟工况,代入转体牵引力计算公式得出动牵引力 $T_0=118.13\ \text{kN}$,以此为基准,求出不同工况下对应的外力矩及牵引力大小(见表2)。

将各工况对应的牵引力施加于转台上,对钢球铰的受力状态进行分析,得到球铰的范式等效应力和剪切应力计算结果。

(1) 范式等效应力计算结果

由于工况6的各项数值最大,若工况6

满足要求,其他工况均能满足,计算结果图7、表3所示。

表2 不同角加速度下各工况的外力矩和牵引力

Table 2 External torque and traction force corresponding to each working condition

工况	角加速度/ ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-2}$)	外力矩/ ($\text{kN}\cdot\text{m}$)	牵引力/ kN
1	0.1	2 428.5	467.02
2	0.2	4 242.7	815.91
3	0.4	7 871.2	1 513.69
4	0.6	11 499.6	2 211.46
5	0.8	15 128.0	2 909.24
6	1.0	18 756.5	3 607.02

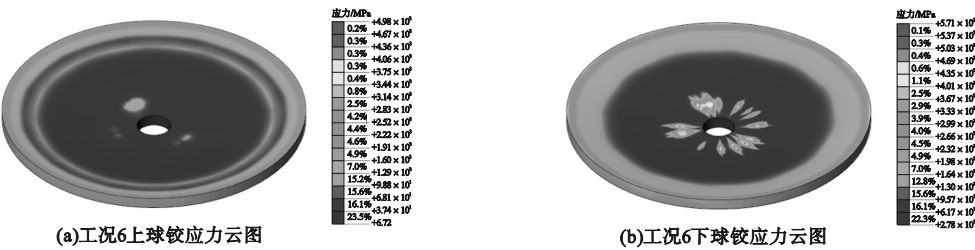


图7 加速转动阶段球铰 Von Mises 应力云图

Fig. 7 Von Mises stress plots of spherical hinge under accelerated state

表3 不同角加速度下的各工况球铰最大应力

Table 3 The maximum stress value of the ball joint corresponding to each working condition MPa

工况	上球铰	下球铰	工况	上球铰	下球铰
1	59.99	64.58	4	187.81	198.53
2	77.31	81.78	5	278.83	361.93
3	131.42	132.5	6	497.72	571.21

由表3可知,在加速转动阶段,上、下球铰 Von Mises 应力分布较均匀,球铰与加劲

肋之间的连接位置应力较大,最大应力在球铰边缘位置,应力值由外向内逐渐减小。拟合方程为 $y = 671.06x^2 - 189.74x + 85.949$ 。由此可得,当角加速度达到 0.711 rad/s^2 时,球铰最大应力超过球铰所用钢材的强度设计值,球铰处于屈服状态。

(2) 剪切应力计算结果

在加速转动阶段,工况6转体球铰剪切应力结果如图8、表4所示。

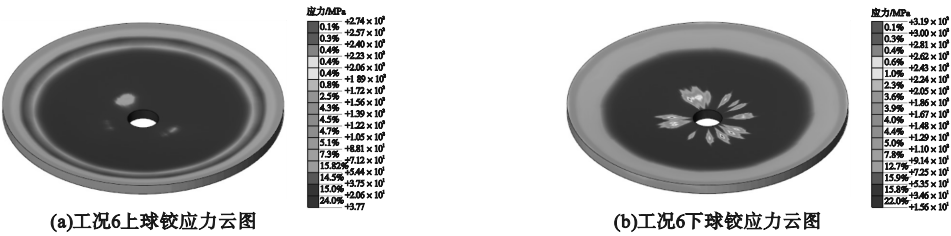


图8 加速转动阶段球铰剪切应力云图

Fig. 8 Shear stress plots of spherical hinge under accelerated state

表4 不同角加速度下的各工况的球铰最大剪力

Table 4 The maximum shear force value of the ball joint corresponding to each working condition MPa

工况	上球铰	下球铰	工况	上球铰	下球铰
1	31.26	35.19	4	101.93	110.03
2	40.92	45.04	5	156.97	205.81
3	71.28	73.46	6	273.62	318.71

由表4可知,在加速转动阶段,转体牵引力及摩擦力对转体球铰产生了剪切作用。上、下球铰的剪应力分布较为均匀,最大剪切应力出现在球铰最外缘,并且剪切应力值由外到内逐渐减小。在加速转动阶段,下球铰所受切应力大于上球铰所受切应力。关系拟合方程为 $y = 371.48x^2 - 100.01x + 46.215$ 。由此可知,当角加速度为 0.716 rad/s^2 时,最

大剪切应力超出球铰所用钢材的强度设计值,转动球铰处于屈服状态。

2.3.3 不平衡荷载下计算分析

根据配重方案可知,偏心距介于 $50 \sim 150 \text{ mm}$,不平衡力矩介于 $682.5 \sim 2\,047.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。基于以上分析,设置匀速转动下8种不平衡荷载的模拟工况,如表5所示。

表5 基于不平衡荷载模拟工况设计

Table 5 Simulation condition design based on unbalanced loads $\text{kN}\cdot\text{m}$

工况	不平衡力矩	工况	不平衡力矩
1	0	5	800
2	100	6	1 200
3	200	7	1 600
4	400	8	2 000

(1) 范式等效应力计算结果

由于工况 8 的不平衡力矩最大,如工况 8 满足要求,则所有工况均能满足要求,工况 8 应力计算结果如图 9 所示。

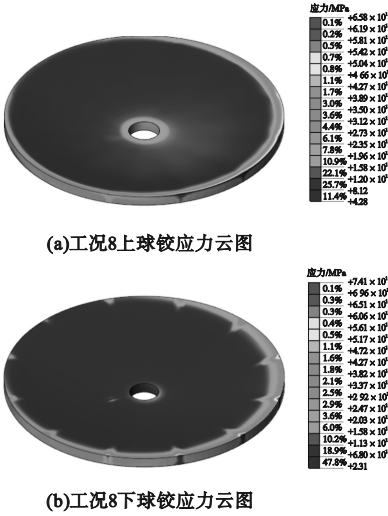


图 9 不平衡荷载下球铰 Von Mises 应力云图

Fig. 9 Von Mises stress plots of spherical hinge under unbalanced loads

表 6 为不平衡荷载作用下转体球铰应力计算结果。

表 6 球铰应力最大值

Table 6 The maximum stress value of the ball joint MPa

工况	上球铰		工况	下球铰	
	上球铰	下球铰		上球铰	下球铰
1	39.8	49.37	5	48.9	59.77
2	40.89	50.63	6	54.11	65.13
3	42.04	51.95	7	59.44	69.83
4	44.31	54.55	8	65.17	74.09

由表 6 可知,在不平衡荷载作用下,随着荷载的增加,上、下球铰应力呈不均匀分布状态,偏心侧应力值偏大,下球铰应力略大于上球铰,转体球铰在各不平衡荷载工况下,应力均未超过所用球铰所用钢材强度设计值 290 MPa,转体球铰强度满足要求。

(2) 位移结果

工况 8 的球铰竖向位移结果如图 10 所示,上下球铰位移结果如表 7 所示。

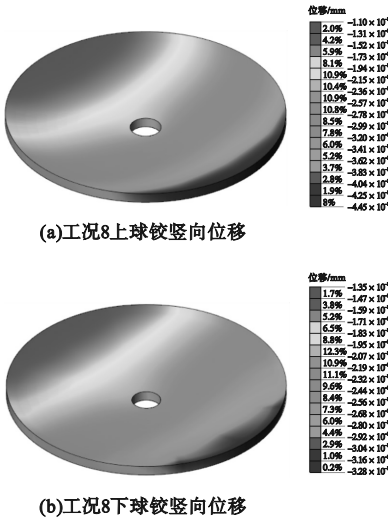


图 10 不平衡荷载下球铰竖向位移

Fig. 10 Vertical displacement of spherical hinge under unbalanced loads

表 7 上、下球铰竖向位移结果

Table 7 Vertical displacement results of upper spherical hinge mm

工况	上球铰			下球铰		
	Z _{max}	Z _{min}	Δh	Z _{max}	Z _{min}	Δh
1	0.281	0.225	0.056	0.234	0.207	0.027
2	0.288	0.225	0.063	0.239	0.207	0.032
3	0.296	0.224	0.072	0.243	0.207	0.036
4	0.311	0.223	0.088	0.253	0.202	0.051
5	0.342	0.210	0.132	0.271	0.186	0.085
6	0.374	0.179	0.195	0.290	0.169	0.121
7	0.407	0.147	0.260	0.309	0.152	0.157
8	0.445	0.110	0.335	0.328	0.135	0.193

由表 7 可知,随着荷载的增加,上、下球铰两侧竖向变形未发生明显变化,上、下球铰的最大高差均小于 0.5 mm,竖向变形较小,且上球铰的高差 Δh 大于下球铰。当偏心距为 150 mm 时,上球铰的最大高差为 0.335 mm,下球铰的最大高差为 0.193 mm,均未超过球铰最大高程差的规定限值 1 mm。

3 结 论

(1) 由有限元模型分析可知,当角加速度为 0.711 rad/s² 时,最大 Von Mises 应力达

到球铰所用钢材的强度设计值;当角加速度为 0.716 rad/s^2 时,最大剪切应力达到球铰所用钢材的强度设计值;在超过上述两个角加速度时,会发生转体系统破坏。

(2)在匀速、加速转动阶段和不平衡荷载下的转动阶段,球铰所受的应力与位移结果均满足规范值,该桥不仅可在最大偏心距下顺利转体,同时在转体完成后,球铰仍满足质量标准,具有可回收价值。

参考文献

- [1] 杨柳.大偏心平弯钢箱梁桥转体施工力学分析[D].长沙:长沙理工大学,2019.
(YANG Liu. Mechanics Analysis of rotation construction of large eccentric flat bending steel box girder bridge [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.)
- [2] 彭洪顺.转体桥施工监控及大悬臂状态安全性研究[D].北京:北京交通大学,2013.
(PENG Hongshun. The study of construction monitoring and security for large cantilever state [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.)
- [3] SU M, WANG J, PENG H, et al. State-of-the-art review of the development and application of bridge rotation construction methods in China [J]. Science China technological sciences, 2020, 64(6): 63 – 70.
- [4] SUN Q S, GUO X G, ZHANG D P, et al. Research on the application of horizontal rotation construction method with flat hinge in cable-stayed bridge construction [J]. Advanced materials research, 2011(255/260): 856 – 860.
- [5] ZHANG J, EI-DIRABY T E. Constructability analysis of the bridge superstructure rotation construction method in China [J]. Journal of construction engineering and management, 2006, 132(4): 353 – 62.
- [6] 胡玉龙.邹城市上跨铁路立交桥转体结构力学特性研究[D].武汉:湖北工业大学,2019.
(HU Yulong. Study on mechanical characteristics of swivel structure of zoucheng overpass railway bridge [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.)
- [7] JIA F X, CHEN D W, WU Y Y. Fine-analysis for the concrete upper rotation table and pier of a bridge using rotation construction method [J]. Applied mechanics & materials, 2014(638 – 640): 1099 – 1102.
- [8] HANSBO A, HANSBO P. A finite element

method for the simulation of strong and weak discontinuities in solid mechanics [J]. Computer methods in applied mechanics & engineering, 2004, 193(33/34/35): 3523 – 3540.

- [9] JIANG L, GAO R. Deformation monitoring during removal of the supporting of T-type rigid frame bridge constructed by rotation method [J]. Procedia engineering, 2010, 4(4): 355 – 360.
- [10] CHE X J, ZHANG X D. Fine force analysis of large tonnage ball joint for swivel construction bridge [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2013(6): 345 – 349.
- [11] TSUTA Z, AYVAZ Y. Overall cost optimization of prestressed concrete bridge using genetic algorithm [J]. KSCE journal of civil engineering, 2013, 17(4): 769 – 776.
- [12] 邹家南.地铁盾构隧道钢板衬加固效果的数值试验研究[D].广州:华南理工大学,2014.
(ZOU Jianan. Numerical study on reinforcement effect of metro shield tunnel reinforced by steel plates [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.)
- [13] 兰印龙.水平转体球铰力学分析与应用研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2018.
(LAN Yinlong. Mechanics analysis and application research of horizontal rotating spherical hinge [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.)
- [14] 郭威.转体桥球铰结构优化设计与转体状态评估及预警系统研究[D].长春:吉林大学,2021.
(GUO Wei. Optimum design of spherical hinge structure and rotation state evaluation of horizontal swivel bridge [D]. Changchun: Jilin University, 2021.)
- [15] 孟子清. T型刚构桥转体施工技术与施工过程控制[D].重庆:重庆大学,2015.
(MENG Ziqing. The rotational construction technology and the construction control of T-shaped rigid frame bridge [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.)
- [16] 李林.连续刚构转体桥大吨位整体球铰施工控制技术[J].科技创新与应用,2020(28): 143 – 144.
(LI Lin. Construction control technology of large tonnage integral ball hinge of continuous rigid frame swivel bridge [J]. Technology innovation and application, 2020(28): 143 – 144.)
- [17] KIM K S, LEE H S. Analysis of target configurations under dead loads for cable-supported bridges [J]. Computer & structures, 2001, 79(30): 2681 – 2692.

(责任编辑:王国业 英文审校:刘永军)