

[文章编号] 1003—4684(2019)02-0102-04

邹城市 30 m 桥转体系统优化研究

胡玉龙, 周金枝

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 邹城市 30 m 桥是目前世界上转体重量最重、球铰半径最大且采用单球铰转动的转体斜拉桥, 由于斜拉桥本身的强度和稳定性不占优势, 现针对其牵引系统和转体结构进行重新优化设计, 使球铰撑脚受力更加合理。再使用 Abaqus 有限元软件建立球铰模型, 分析新受力体系下球铰的受力和变形, 使优化设计后的球铰满足转体过程中的强度和变形要求。

[关键词] 转体斜拉桥; 球铰; 优化; 受力体系; 强度; 变形; 有限元

[中图分类号] U445.47

[文献标识码] A

在现代桥梁工程施工中, 转体施工因其便利性和经济性已经越来越多地被应用于山区和跨公、铁路的桥梁施工中。近些年来, 随着经济的发展, 国内在造桥技术方面已经有了卓越的进步, 转体吨位与球铰半径不断打破记录。越来越多的学者也开始致力于大吨位转体桥的研究, 在结合了国内外先进技术之后, 对大重量转体斜拉桥的施工工艺提出了新的创新和展望^[1]; 在转体结构方面也研究出了新的计算方法^[2]和有限元分析方法^[3]。平转斜拉桥在大跨度大吨位且桥下有公铁路的特殊情况下将自身优点很好地发挥了出来。但斜拉桥也有一些缺点, 在转体会因桥梁结构设计原因而使得强度和稳定性不足, 并且随着桥梁主体重量的增加, 会对转盘的安全性造成威胁^[4]。国内目前在大重量转体斜拉桥的转动体系研究方面还处于空白阶段, 本研究拟对原邹城市 30 m 桥设计转体系统进行优化改造, 并采用有限元软件建立模型, 结合改进后的设计方案对转体系统局部进行详细的受力分析, 来评估设计的合理性。

1 工程概况

邹城市 30 m 上跨铁路立交桥工程位于山东省邹城市, 为既有太平西路跨京沪铁路改建工程, 该项目位于市中部区域, 西起矿建路、东至铁山路, 连接邹城市京沪铁路两侧的中、西部城区, 共跨越 14 股道。桥梁全长 2762 m, 宽 22.5 m, 采用双向 4 车道,

其中主桥长 220 m, 在转体施工领域首次采用独塔双柱双跨平行双索面预应力混凝土斜拉桥设计。主桥采用转体法施工, 转体重量达 22400 t、转体长度 2×99 m、转体角度 97° 。转体结构由转体下转盘、平铰、上转盘、转体牵引系统、助推系统等组成^[5]。上转盘由上盘、转台和撑脚组成。转台直径 13.6 m, 高度 1.0 m。共设置 10 组撑脚。主梁整体为双边主梁截面, 主梁标准宽度 23.2 m, 边主梁最低点高度 2.6 m, 最高点 2.77 m。边主梁采用箱形断面, 箱室宽度为 3.1 m。箱高 2.6 m, 腹板厚度为 0.6 cm, 横梁位置外侧腹板加厚至 0.8 cm。

在使用混凝土材料的转体斜拉桥中, 30 m 桥无论是转体长度、重量、角度, 还是转盘直径、双塔转体等五个方面均位居世界第一。由于斜拉桥在强度和稳定性方面天生不足, 而本次桥梁转体施工难度又较大, 所以需要桥梁转体过程中的重点——转体系统进行具体的研究分析并提出一个可行的方案。

2 转体结构研究

2.1 牵引系统

本桥转体结构原设计采用环道与中心支撑相结合的转盘结构。转体系统的转体结构由下转盘、球铰、滑道、上转盘、转动牵引系统等组成。下转盘设于承台上, 其上固定钢筋混凝土球铰, 直径为 4.2 m。上转盘设 8 组钢管混凝土撑脚, 支撑于下转盘(承台)顶面混凝土上预埋的环道上。承台上设 6 组 12

[收稿日期] 2018—09—07

[第一作者] 胡玉龙(1994—), 男, 湖北钟祥人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向土木工程结构的力学特性

[通信作者] 周金枝(1965—), 女, 湖北武汉人, 湖北工业大学教授, 研究方向土木工程结构的力学特性

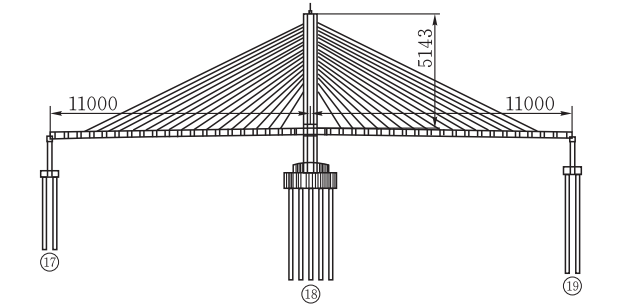


图 1 邹城市 30 m 桥上跨铁路立交桥桥型布置图

个助推反力座、两个牵引反力座,上转盘上设 2—31 \varnothing S15.2 钢绞线,埋入混凝土内 4 m 以上,自由端用 QDCLT3500-400 型连续转体千斤顶牵引。原设计助推系统结构为助推反力座+助推千斤顶+反力架的形式。

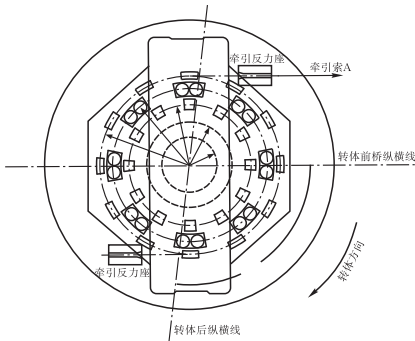


图 2 原设计转体系统平面布置图

2.2 牵引系统优化

桥梁的平转在配重好并且设定好适当的摩擦系数后,多采用千斤顶助推使桥梁启动,然后利用自身自重带来的不平衡力矩与偏心矩完成合拢对接。但因为千斤顶行程短的问题,所施加的推力不大,所以多适用于主桥重量较小或者桥梁强度很高的转体桥^[6]。

邹城市上跨铁路立交桥不同于多数转体桥,采用的是独塔双柱双跨平行双索面斜拉桥设计,这样整个主桥进行旋转时只有一个转体轴作为平衡柱与支撑,而且相对于其他桥型来说,斜拉桥本身强度和稳定性就要相对逊色,而与采用常用常规施工的斜拉桥相比,转体时桥梁的边界条件要复杂很多,转体结构偏心,悬臂长度,结构刚度和容重偏差等内在因素很容易导致桥体失稳的现象。所以对转体时的平衡性要求十分高,就不能再采用以往的常规转体助力方法,需要设计选择一个合适的牵引系统。

在对原设计受力结构体系进行研究后,决定对转体系统结构进行重新设计,使其受力更加合理,具体思路为对助推系统进行优化及转体结构受力理论进行分析,确保转体顺利实施。助推系统主要用于克服转体施工中静摩擦力与动摩擦力之间的差值而

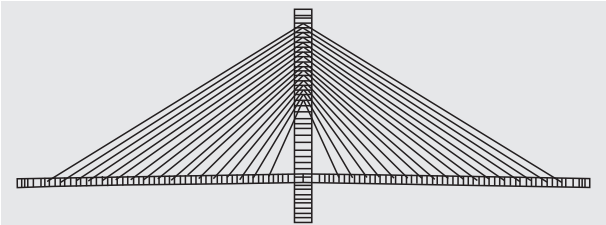


图 3 桥梁简图

使整个转体部分启动。如表 1 所示,在对助推系统与助拉系统仔细对比分析后,发现助拉系统比助推系统更加合适,于是将牵引系统改为助拉。

表 1 牵引系统比选表

系统	助推系统	助拉系统
便利性	安拆困难。转体施工前,需在下转盘滑道处狭小的空间安装、拆除助推千斤顶及反力架,操作空间有限无法用吊机辅助作业,仅靠人工进行安装	安装简便。仅需预先在转台预埋助拉牵引束,在牵引反力座设一个直径 20cm 的预留孔,在牵引反力座安装助拉千斤顶即可
操作性	操作不连续。转体启动后,需要迅速拆除助推系统,造成转体停顿,无法连续转体	操作连续。转体启动后,仅需停止助拉千斤顶供油即可,不用拆除助拉顶,不造成转体停顿
效率	转体过程出现意外停顿,需要重新启动时,因反力座与撑脚位置冲突,无法迅速再次启动	提供更多操作空间,节省投入。不需要设置助推反力座,提供更多转盘施工操作空间,方便转盘及体系转换等施工

3 受力分析

3.1 球铰受力状态

不采用传统设计的多撑脚受力体系,以往撑脚对数过多时,在采用不平衡重转体时由于受力的撑脚不明确而无法对转体结构进行准确的受力分析^[7]。

现将原本的 12 个撑脚精简到 6 个,采用三点受力体系。即在主桥体转动时由球铰与对应方向的其中 2 撑脚共同受力。

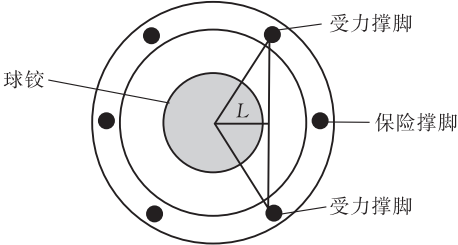


图 4 三点受力系统理论示意图

转体竖向反力由三点支撑,即球铰中心与其中两个撑脚承载转体重量,其他撑脚作为保险撑脚防止倾覆。则撑脚竖向反力 $R_1 = G \cdot e / L$ (其中 G 为

转体结构总重量、 e 为转体结构重心偏离球铰中心的距离、 L 为两个受力撑脚中心的连线距球铰中心的水平距离),球铰竖向反力 $R_2 = G - R_1$ 。然后根据球铰摩擦系数、撑脚与滑道间摩擦系数分别计算球铰及撑脚的摩擦阻力矩,可以准确求出转体牵引力。

3.2 计算球铰接触面应力

根据弹性力学中求解空间问题中的接触应力理论,建立球铰在实际转体过程中的受力模型。

桥梁转动过程中,球铰除了受到桥体重量带来的压应力以外,因牵引力直接施加于上转盘之上,产生的扭矩会导致上下球铰接触的部位生成摩擦力,使接触面产生切应力。当最大牵引力时产生的静摩擦力为 μ_s 时,接触面的最大切应力为 $\mu_s \sigma_z$ ^[8]。考虑到球铰受牵引力扭矩的影响,将上下球铰接触部分局部抽象为按均布应力作用的半空间体,并计算半空间体接触面的接触应力 q 。

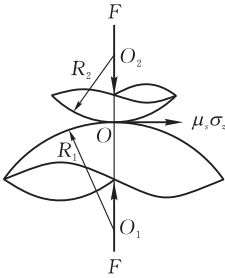


图 5 球铰接触面简图

由弹性力学接触问题中空间应力状态下的球面与凹球面接触理论可知:当泊松比 $\mu = 0.3$ 时,最大接触应力

$$q = 0.388 \left[\frac{F E^2 (R_1 + R_2)^2}{R_1^2 R_2^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

式中: E 为接触材料的弹性模量; F 为球铰上部结构的重力; R_1, R_2 分别为下球铰和上球铰球体半径,对于转体施工桥梁球铰结构特征, R_1 取负值, R_2 取正值。根据此公式可以算出球铰接触面应力^[9]。

4 计算分析

转体结构是决定整个桥梁是否能成功转体的关键。在精简撑脚个数并对转盘系统的受力结构进行优化后,为分析处于新受力体系下的球铰是否满足强度要求,使用 Abaqus 建立优化后的球铰三维有限元模型来进行计算分析,在分析球铰强度是否符合施工要求时,不考虑上转盘牵引力与接触面摩擦力,仅考虑接触面接触应力^[9]。

球铰被预先安装在上、下转盘的连接处,分为上下 2 片,上球铰固结在上转盘上,为凸形“球冠”,相当于磨身;下球铰安装在下转盘上,成凹形“球缺”

状,相当于石磨的底座,厚度均为 5.5 cm,球面直径为 8 m,平面投影直径 4.2 m。插在上下球铰中心的球铰中心轴则相当于石墨的磨心轴,转动中心轴采用 $\varnothing 315$ mm 钢棒^[5]。上转盘选用 C50 混凝土,弹性模量 3.45×10^4 MPa,泊松比 0.2,密度 2.5 T/m³。球铰为钢制球铰,使用材料为 Q235,材料质量密度 7850 kg/m³,泊松比 0.2,摩擦系数 0.3,上下球铰建立接触面,总划分实体单元 97 586 个,球铰单元 14 848 个。不考虑球铰的偏心,给上转盘施加均布荷载,预设转体总重量的 22 400 kN。

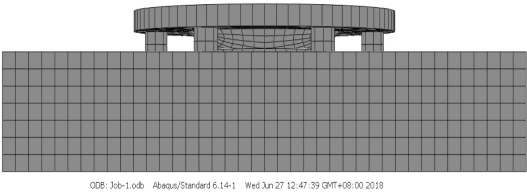


图 6 球铰有限元模型

建出转动系统的有限元模型之后,再来对模型进行应力和变形有限元分析,图 6 为球铰的等效应力云图,图 7 为球铰的位移计算结果。

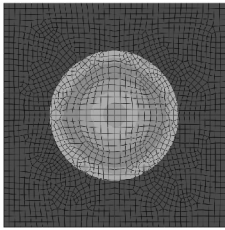
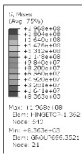


图 7 球铰等效应力 Pa

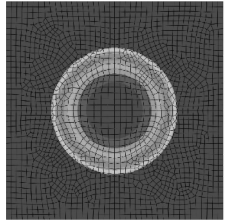
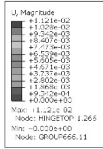


图 8 球铰位移 m

转动中不考虑球铰偏心时,图 7 和图 8 能够反应球铰的综合受力状态,但为了能够更加具体的分析球铰接触面的受力情况,从下球铰中心点开始选择三条由等距离节点组成的节点路径,并提取每个节点上的应力值,等效每条路径上的应力分布曲线,如图 9 所示。

由图 9 可知,下球铰接触面上在距球铰中心 2.5 m 处左右所受压应力最大,最大值不超过 120 MPa,而在球铰中心处应力值最小,为 40 MPa。球铰受力合理,应力满足需求,不会造成破坏。

接着选择其中一条路径进行单个节点径向位移和竖向位移的分析计算,提取数值绘制曲线图来具

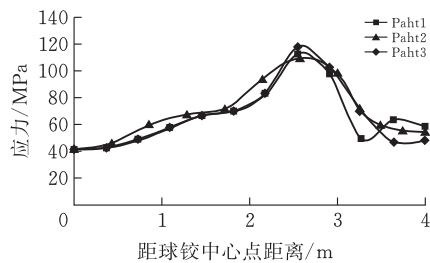


图 9 球铰接触面等效应力分布

体分析球铰的变形状态,如图 10 所示。

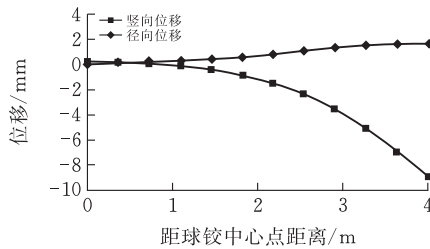


图 10 球铰接触面位移

根据图 10 可知:球铰的位移从中心处由内而外逐渐增大,竖向位移最大处不超过10 mm,径向位移最大处不超过 2 mm,下球铰整体变形较小,对转体施工中桥体的稳定性影响不大。

5 结论

- 1)对于较复杂结构转体桥,转体系统中的助力结构选用助拉系统相对于助推系统有很好的适用性和优越性。
- 2)精简撑脚个数,将多点受力体系优化为球铰和 2 个撑脚共同受力的三点受力体系,不但可以提高施工时的效率,在计算时也可以更加明确每个撑

脚的受力,能够进行更加精准的受力分析。

3)根据有限元计算出的结果,下球铰整体变形较小,转体过程中稳定性良好。在中心点处应力值最小,距球铰 2.6 m 左右应力值最大,且最大应力不超过材料的许用应力 235 MPa,满足强度条件,优化后的受力体系合理,结构安全。

[参 考 文 献]

[1] 杜嘉俊.桥梁转体法施工技术创新与展望[J].铁道建筑技术,2012(4):7-11.

[2] 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,2014,38(2):356-358.

[3] 颜毅,杜鹏,高英祚,等.桥梁施工过程分析在 ANSYS 中的实现方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2007(S1):18-21.

[4] 周艳,宋君超,潘瑞松.斜拉桥有限元建模及动力特性分析[J].中外公路,2011,31(1):78-80.

[5] 姜保利.2.24 万 t 转体施工斜拉桥设计研究[J].铁道建筑技术,2015(6):32-35,56.

[6] 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.

[7] 郭亚娟,李弘哲.邹城转体斜拉桥转盘结构受力分析[J].中外公路,2013,33(1):119-122.

[8] 徐升桥,刘永锋.北京市六环路斜拉桥设计关键技术[J].铁道标准设计,2009(11):52-55.

[9] 童激扬,郑舟军.武汉市姑嫂树路高架桥转体平台墩仿真计算[J].桥梁建设,2013,43(2):64-69.

A Study on the Optimization of the Thirty Meter Bridge Body System in Zoucheng City

HU Yulong, ZHOU Jinzhi

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: The thirty-meter bridge in Zoucheng City is the world's heaviest turning weight, whose the ball hinge radius is the largest and the single ball hinge rotates the rotating cable-stayed bridge. Because the cable-stayed bridge has its limitations on the strength and stability, this study aims to redesign its traction and rotating structures so as to make the force on the ball hinges more reasonable. Based on the ball hinge model established by using the Abaqus finite element software, the force and deformation of the ball hinge under the new stress system is analyzed. The optimized ball hinge could therefore meet the requirement of strength and deformation during the turning process.

Keywords: rotary cable-stayed bridge; spherical hinge; optimization; force system; strength; deformation; finite element method