

T型刚构水平转体桥称重研究

杨 可, 郭新新, 张廷磊, 曲峰俊, 王 迅

(青岛理正建设科技有限公司, 山东 青岛 466000)

摘要: 跨铁路桥转体施工作为一种快速高效的桥梁施工方式, 深受设计和施工单位的青睐, 为了保证转体过程的顺利、安全、平稳进行, 转体施工前桥梁的整体平衡就成了至关重要的一环, 需要对桥梁进行称重试验, 求出整个桥梁的重心位置, 当偏心严重时需要通过增加配重的方式将重心调整至球铰中心位置。文章依托济宁跨新兗铁路立交桥水平转体过程施工监控项目, 研究水平转体桥称重试验的原理和实际操作, 通过在墩顶两侧施加支撑力的方式, 观察力与位移的关系曲线, 求出转动体的受力状态和偏心情况。结果表明: 转体桥左右幅不平衡力矩均小于球铰静摩阻力矩, 且偏心距较小, 满足转体施工要求。

关键词: 转动体; 称重试验; 不平衡力矩; 球铰摩阻力矩; 偏心距

中图分类号: U445.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)08-0020-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.08.100

Weighing research of T-type rigid frame horizontal rotating bridge

YANG Ke, GUO Xinxin, ZHANG Tinglei, QU Fengjun, WANG Xun

(Qingdao Lizheng Construction Technology Co., Ltd., Qingdao 466000, Shandong, China)

Abstract: As a fast and efficient bridge construction method, the rotating construction of trans-railway bridge is favored by design and construction units. In order to ensure safe and smooth progress of the rotating process, the overall balance of the bridge before the rotating construction becomes a crucial part. It is necessary to carry out weighing tests on the bridge and find out the center of gravity position of the whole bridge. When the eccentricity is serious, it is necessary to adjust the center of gravity to the center position of the ball hinge by increasing the counterweight. Based on the construction monitoring project of horizontal rotation process of Jining cross-xinyan railway vertical bridge, this paper studies the principle and practical operation of horizontal rotation bridge weighing test. By applying supporting force on both sides of pier top, the relationship curve between force and displacement is observed, and the stress state and eccentricity of rotating body are obtained. The results show as follows: The unbalance moment of the left and right amplitude of the rotating bridge is less than the static friction moment of the ball hinge, and the eccentricity is small, which meets the requirements of the rotating construction.

Key words: rotating body; weighing test; unbalance moment; friction moment of ball hinge; eccentricity

随着人们对交通需求的日渐提高, 跨越公路、铁路的桥梁日渐增多, 但由于公路、铁路每天通行压力大, 线路繁忙, 无法长时间封闭施工, 因此水平转体桥梁应运而生。这种水平转体桥梁通常选择在地势平坦的公路、铁路旁架设支架预先完成大部

分主梁浇筑施工, 利用桥梁结构本身的对称性, 在桥墩处设置球铰, 拉动预设的牵引绳转动桥体, 将提前建设好的桥梁通过球铰转动到预设位置^[1-2], 具有减少高空作业风险, 施工速度快、造价成本低、不长期影响通行的优点, 实现短时、高效的桥

收稿日期: 2023-11-17

作者简介: 杨 可(1992—), 女, 工程师, 从事桥梁检测方面的研究。

梁建设, 是桥梁施工技术的一项大突破。但水平转体施工难度大, 精度高, 对结构平衡性要求严格, 因此在转体前, 要对桥梁进行称重试验, 保证结构在转动过程中的安全可靠。

国内学者针对转体桥的称重试验进行了一些研究。鲁建生等^[3]通过分析保阜高速公路跨 107 国道和京广铁路分离立交桥的荷载位移变化曲线, 为该桥提供了配重方案。于纪森^[4]通过对天津解放桥进行 3 次不同角度的称重, 计算出该桥的重量和重心, 为桥梁的顺利开启提供了保障。王旭^[5]对预应力混凝土斜拉桥主跨转体前进行了不平衡分析, 得出该桥的理论配重方案, 为配重施工提供了理论依据。

虽然已有学者对转体桥进行了诸多研究, 但大部分研究针对的是单幅主跨转体项目。本文将在单幅转体桥的基础上, 研究左右幅同时转动桥梁的称重试验和数据分析, 以期可为日趋多样的结构形式桥梁转体工程研究提供参考。

1 工程概况

济宁跨新兗铁路立交桥采用左右分幅设置, 左幅包含 30 m 预应力简支小箱梁 + 2 × 70 m 预应力混凝土 T 型刚构, 右幅包含 2 × 70 m 预应力混凝土 T 型刚构 + 30 m 预应力简支小箱梁。左幅桥梁位于铁路北侧, 右幅桥梁位于铁路南侧, 两幅桥之间设置隔离带, 宽度为 0.5 m, 桥梁横断面宽度为 36.9 m, 桥面双向八车道布置, 未设置人行道。预应力混凝土 T 型刚构桥主梁采用单箱双室变高度箱梁, 转体桥主墩位置处梁高度为 7.6 m, 悬臂端梁高度为 3 m, 梁高及底板厚度采用二次抛物线变化。主墩采用双肢薄壁墩。主墩单肢纵横向尺寸为 1.6 m × 12.2 m。承台共分 3 层, 厚度依次为 3.0、1.65、4.0 m。基础采用 16 根 1.8 m 钻孔灌注桩基础。

本项目采用墩顶平转施工方法, 主墩 T 构两端悬臂长度均为 67 m, 左右幅桥梁同时逆时针转动 52.5°, 转盘半径为 5.5 m。转体施工示意图如图 1 所示。

2 水平转体施工的实现

2.1 水平转体施工的关键环节

水平转体施工是一项施工难度大、施工精度

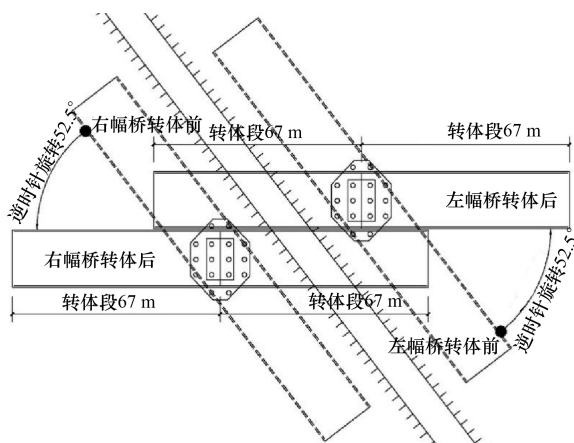


图 1 T 型刚构桥水平转体施工示意

高、转体过程快的技术, 尽管转体施工的原理简单, 技术也日渐成熟, 但对转体前的施工准备工作要求高。为了保证桥梁转体过程安全平稳进行, 承载整个转动体重量转动球铰和转动体本身的平衡就是最关键的环节^[6]。其中球铰静摩擦系数越小, 转动时所需要的牵引力越小, 不平衡力矩越小, 说明桥梁的自平衡性越好, 转动体两端的重量越接近, 两者对转体过程的成功与否有决定性作用。为了达到球铰两端的重量基本一致, 不至于引起梁体倾斜转动的目的, 在桥梁转体之前要对梁体进行称重试验, 计算出转动体的不平衡力矩以及球铰静摩擦系数, 根据计算结果对梁体进行配重^[7]。

2.2 本项目水平转体原理介绍

本项目采用设置球铰 - 撑脚相结合的转动方案^[8], 主梁底部设置上球铰, 桥墩上方设置下球铰。主梁的所有重量集中到上球铰上, 接着上球铰通过上下球铰间的滑块涂抹层将主梁重量传递给下球铰进而传递到桥墩上。但因为球铰两侧梁体重量达不到绝对相等, 转动体重心会向一侧偏移, 就会对转体体产生不平衡弯矩 (M_G)^[9-10], 而上下球铰间, 受到制作和材质影响, 无法达到绝对光滑状态, 因此在转动过程中会因摩擦对转动体产生球铰摩阻力矩 (M_Z)^[11]。

3 转体梁平衡称重原理

3.1 当转动体不平衡力矩小于转动体球铰摩阻力矩时

当转动体不平衡力矩 (M_G) 小于转动体球铰摩阻力矩 (M_Z) 时, 摩阻力矩制约转动体的不平衡力

矩,达到结构受力平衡状态,转动体不会发生转动^[12-13]。

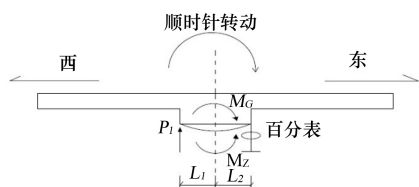


图 2 称重试验 a

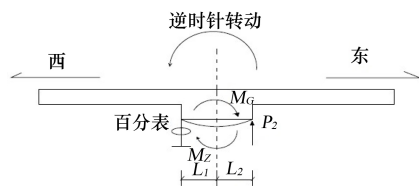


图 3 称重试验 b

如图 2 称重试验 a 所示,假设转动体重心位于东侧,则在西侧这边墩顶承台上施加支撑力 P_1 ,当向上的支撑力施加到使球铰发生微小转动的时候,千斤顶停止工作并卡死阀门,这时候有^[14]:

$$P_1 L_1 + M_G = M_Z \quad (1)$$

式中: M_G 为转动体不平衡力矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; M_Z 为转动体球铰摩阻力矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; P_1 为西侧支撑力, kN ; L_1 为西侧千斤顶至球铰中心距离, m 。

如图 3 称重试验 b 所示。假设转动体重心位于东侧,此时在东侧施加支撑力 P_2 ,当支撑力 P_2 施加到使球铰发生微小转动时,千斤顶停止工作并卡死阀门,这时候有:

$$M_G + M_Z = P_2 L_2 \quad (2)$$

式中: P_2 为东侧支撑力, kN ; L_2 为东侧千斤顶至球铰中心距离, m 。

联立得,不平衡力矩:

$$M_G = (P_2 L_2 - P_1 L_1) / 2 \quad (3)$$

摩阻力矩:

$$M_Z = (P_2 L_2 + P_1 L_1) / 2 \quad (4)$$

3.2 当转动体不平衡力矩大于转动体球铰摩阻力矩时

当转动体不平衡力矩(M_G)大于转动体球铰摩阻力矩(M_Z)时,此时不平衡力矩过大,球铰摩阻力矩无法抵抗,所以当解除球铰临时固结后,转动体会发生轻微转动。但这种转动不是持续的,在转动体转动过程中悬空的撑脚会落入预设的滑道,撑脚开始参与结构的受力体系,此时转动体的整体平衡由不平衡力矩、摩阻力矩和撑脚 3 种

力共同维持。如图 4,假设转动体重心位于东侧,此时在东侧墩顶一侧施加支撑力 P_3 ,随着支撑力的缓慢增加,撑脚开始慢慢离开滑道面,直到支撑力的施加到使转动体发生轻微转动时,记录此时的支撑力 P_3 ,这时候就有:

$$P_3 L_3 = M_G + M_Z \quad (5)$$

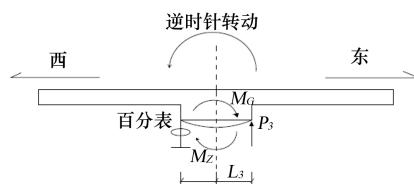


图 4 称重试验 c

式中: P_3 为撑脚侧支撑力, kN ; L_3 为撑脚侧千斤顶至球铰中心距离, m 。

当记录支撑力 P_3 数据后,开始降低千斤顶支撑力。当千斤顶支撑力在下降的过程中使球铰也发生微小转动时记录此时的千斤顶支撑力为 P'_3 ,这时候就有:

$$P'_3 L_3 = M_G - M_Z \quad (6)$$

式中: P'_3 为球铰发生微小转动时撑脚侧支撑力, kN 。

不平衡力矩:

$$M_G = (P_3 L_3 + P'_3 L_3) / 2 \quad (7)$$

摩阻力矩:

$$M_Z = (P_3 L_3 - P'_3 L_3) / 2 \quad (8)$$

3.3 摩阻系数及偏心距 e

称重试验时,通过计算转动体球铰静摩擦系数和偏心距 e 的大小,进而求出结构配重多少才能达到绝对平衡。转动球铰摩擦面上每个微面积的摩擦力对球铰中心竖转法线的力矩之和,就是球铰静摩阻力矩^[15-16],如图 5 所示。

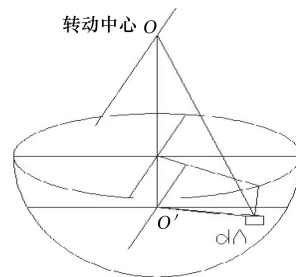


图 5 转动体球铰绕转动中心轴转动静摩擦系数计算示意

根据诸多学者的大量工程理论和实践研究^[17],普遍认为使用四氟乙烯板并填充黄油的球铰竖向转动时的静摩阻系数可表示如下。

球铰静摩阻系数:

$$\mu_z = \frac{M_z}{0.98 RN} \quad (9)$$

式中: μ_z 为球铰静摩阻系数; R 为球铰转盘半径, m; N 为转动体总重, kN。

转动体偏心距^[18]:

$$e = \frac{M_G}{N} \quad (10)$$

式中: e 为转动体偏心距, m。

3.4 配重计算

在重心偏离的反方向进行配重, 达到配重对球铰竖轴线形成的弯矩与转动体不平衡弯矩相等的基本原则进行转动体配重计算, 配重计算公式如下。

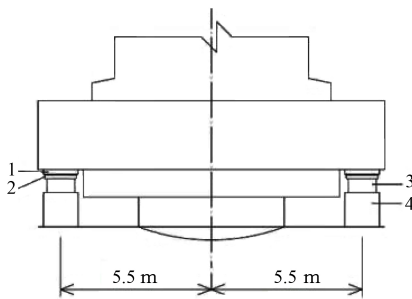
$$G_1 = \frac{M_G}{L_0 - l} \quad (11)$$

式中: G_1 为配重重量, kN; L_0 为转动体悬臂长度, m; l 为配重距悬臂梁端的距离, m。

4 转体梁平衡称重试验与分析

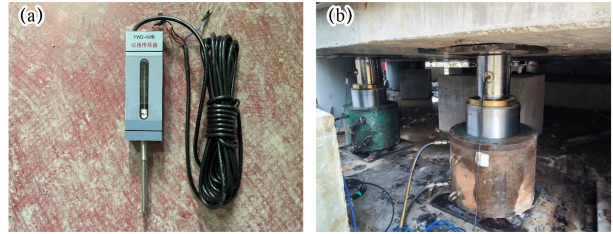
4.1 试验设备和测点布置

通过监控千斤顶力和位移两个参数的实时变化情况, 得到千斤顶力和位移的变化曲线, 找到转动体由静止到转动的临界点, 这是称重试验的关键。根据本桥的转体施工项目特点和要求, 我们选择通过千斤顶顶升球铰转动的测试方法来测试不平衡力矩。称重试验前, 预先在承台底面布置 4 台 480 t 千斤顶、4 个位移计(量程为 ± 25 mm, 精度为 1/100)和 4 个压力传感器, 其中千斤顶用于施加向上的支撑力, 位移计测量撑脚位移、压力传感器用于监控千斤顶支撑力的大小。纵桥向称重试验现场千斤顶布置位置如图 6 所示、采用设备如图 7 所示。



1—钢板; 2—工具锚; 3—压力传感器;
4—千斤顶; 5—位移计

图 6 称重试验仪器设备布置



(a); (b)

图 7 位移计和千斤顶

4.2 右幅桥纵桥向位移测试与结果分析

通过观察转动体在拆除沙箱、释放球铰转动能力后, 撑脚与滑道的位置关系来判断不平衡力矩与摩阻力矩的大小。根据现场实测, 撑脚未接触到滑道, 判定右幅桥转动体的不平衡力矩小于球铰摩阻力矩^[19]。

在右幅桥大里程方向(东侧)、小里程方向(西侧)分别施加千斤顶顶力, 监测压力传感器和位移计的数值变化, 千斤顶力-位移监测结果如图 8、9 所示。

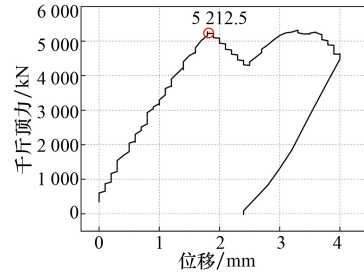


图 8 右幅桥大里程方向称重试验的千斤顶力-位移曲线

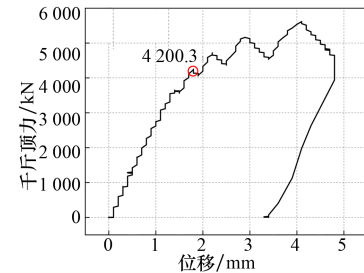


图 9 右幅桥小里程方向称重试验的千斤顶力-位移曲线

由加载情况下的千斤顶力-位移变化表明: 当大里程方向(东侧)荷载小于 5 212.5 kN、小里程方向(西侧)荷载小于 4 200.3 kN 时, 千斤顶顶力处于阶梯状持续上升状态, 位移变化较小, 千斤顶力-位移曲线呈正相关线性变化, 说明千斤顶力对球铰中心产生的力矩小于球铰静摩阻力矩和不平衡力矩的合力; 当荷载大于此值后, 出现位移持续增加, 而千斤顶力却首次出现阶梯状下

降的状态,说明千斤顶力对球铰中心产生的力矩大于球铰静摩阻力和不平衡力矩的合力。通常认为,推动物体需要克服的静摩擦力要高于动摩擦力,这种力的下降变化状态恰恰表明球铰的静摩擦力矩转变为动摩擦力矩。由此判别,当 $P_1 = 5\,212.5\text{ kN}$ 、 $P_2 = 4\,200.3\text{ kN}$ 时,球铰处于由静止到转动的瞬时变化状态。

根据 $P_1 = 5\,212.5\text{ kN}$ (东侧) $> P_2 = 4\,200.3\text{ kN}$ (西侧),可判定重心偏向右幅桥大里程方向(东侧)一侧,根据公式(1)~(4)、(9)~(11)计算求出称重试验结果,相关计算参数和结果分别列于表 1、2。

根据结果可知,纵桥转动体不平衡力矩($2\,783.55\text{ kN}\cdot\text{m}$)小于球铰静摩阻力矩($25\,885.2\text{ kN}\cdot\text{m}$),静摩阻系数为 0.018 87,偏心距 e 为 1.988 cm,转动体重心偏向右幅桥大里程方向(东侧)。如果配重需在右幅桥小里程方向(西侧)配重,距离桥墩中心线 62 m 处配重 44.90 kN。由于右幅桥转体梁偏心距 1.988 cm 满足设计单位对转体施工前调整结构偏心值最大值(0.1 m)的要求,可不进行配重。

4.3 左幅桥纵桥向位移测试与结果分析

通过观察转动体在拆除沙箱、释放球铰转动能力后,撑脚与滑道的位置关系来判断不平衡力矩与摩阻力矩的大小。根据现场实测,撑脚未接触到滑道,判定左幅桥转动体的不平衡力矩小于球铰摩阻力矩。

在左幅桥大里程方向(东侧)、小里程方向(西侧)分别施加千斤顶顶力,监测压力传感器和位移计的数值变化,千斤顶力-位移监测结果如图 10、11 所示。

由加载情况下的千斤顶力-位移变化表明:当大里程方向(东侧)荷载小于 3 164.8 kN、小里

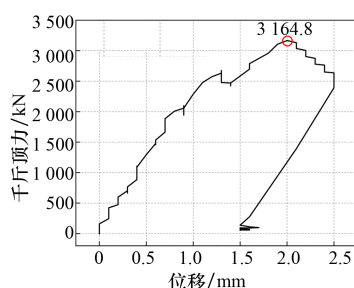


图 10 左幅桥大里程方向称重试验的千斤顶力-位移曲线

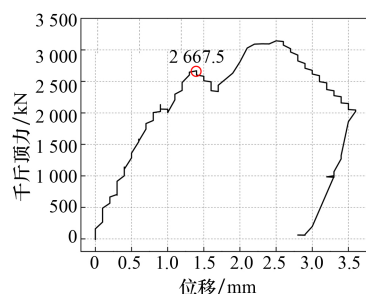


图 11 左幅桥小里程方向称重试验的千斤顶力-位移曲线
程方向(西侧)荷载小于 2 667.5 kN 时,千斤顶力呈现阶梯状持续上升状态,千斤顶力-位移总体呈正相关线性变化;当荷载大于此值后,出现千斤顶力阶梯状大幅度持续下降趋势,千斤顶力-位移呈负相关线性变化,这种千斤顶力持续不断减小而位移却依然在增加的状态表明球铰摩擦力矩和不平衡力矩的合力变小,千斤顶力开始主导球铰的转动,球铰的静摩擦力矩转为动摩擦力矩,由此可知,当 $P_1 = 3\,164.8\text{ kN}$ 时,球铰处于由静止到转动的瞬时变化状态。

由于 $P_1 = 3\,164.8\text{ kN}$ (东侧) $> P_2 = 2\,667.5\text{ kN}$ (西侧),可以判定转动体重心偏向左幅桥大里程方向(东侧)一侧。根据公式(1)~(4)、(9)~(11)计算求出称重试验结果,相关计算参数和结果分别列于表 3、4。

表 1 右幅桥不平衡力矩、球铰摩阻力矩计算参数

东侧支撑力/kN	西侧支撑力/kN	东侧千斤顶至球铰中心距离/m	西侧千斤顶至球铰中心距离/m	球铰转盘半径/m	转动体总重/kN	配重距离梁端距离/m
5212.5	4200.3	5.5	5.5	10	140 000	5

表 2 右幅桥不平衡力矩、球铰摩阻力矩、静摩阻系数以及偏心距结果

不平衡力矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	摩阻力矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	静摩阻系数	偏心距/m	需在右幅桥小里程方向(西侧)配重/kN
2 783.55	25 885.2	0.018 87	0.019 88	44.90

表 3 左幅桥不平衡力矩、球铰摩阻力矩计算参数

东侧支撑力/kN	西侧支撑力/kN	东侧千斤顶至球铰中心距离/m	西侧千斤顶至球铰中心距离/m	球铰转盘半径/m	转动体总重/kN	配重距离梁端距离/m
3 164. 8	2 667. 5	5. 5	5. 5	10	140 000	5

表 4 左幅桥不平衡力矩、球铰摩阻力矩、静摩阻系数以及偏心距结果

不平衡力矩/(kN·m)	摩阻力矩/(kN·m)	静摩阻系数	偏心距/m	需在右幅桥小里程方向(西侧)配重/kN
1 367. 58	16 038. 8	0. 011 69	0. 009 77	22. 06

根据上表可知, 转体桥纵桥向平衡处于“转动体不平衡力矩小于球铰静摩阻力矩”的状态。纵桥向不平衡力矩 M_G 为 1367. 58 kN·m, 球铰摩阻力矩 M_Z 为 16 038. 8 kN·m, 静摩阻系数 0. 011 69, 偏心距 e 为 0. 977 cm, 偏向左幅桥大里程方向(东侧)。

如果配重需在左幅桥小里程方向(西侧)配重, 距离桥墩中心线 62 m 处配重 22. 06 kN。但因为左幅桥转体梁偏心距 0. 977 cm 满足设计单位对转体施工前调整结构偏心值最大值(0. 1 m)的要求, 所以可不进行配重。

5 结 语

本文以济宁跨新兖铁路立交桥(含 2×70 m 预应力混凝土 T 构)水平转体为项目背景, 通过测试转动体系不平衡力矩、球铰摩阻力矩、偏心距和摩阻系数等参数, 得出左右幅桥均处于“转动体不平衡力矩小于球铰静摩阻力矩”的状态, 偏心距较小, 无需配重的结果, 完成了桥梁转体的称重试验, 为其他类似水平转体项目提供了实践依据, 积累了 T 型钢构桥转体称重施工经验。

参考文献:

[1] 徐春东, 胡州, 关俊锋, 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(6): 54-60.

[2] 徐福杰. 桥梁工程转体施工关键技术[J]. 交通世界, 2023(24): 174-176.

[3] 鲁建生, 杨永宏, 刘继龙. 保阜高速公路跨京广铁路转体桥称重试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2009(5): 106-109.

[4] 于纪淼, 王成金, 陈焕新. 开启桥称重技术的研究

[J]. 天津建设科技, 2008(3): 47-50.

[5] 王旭. 菏泽丹阳立交桥转体斜拉桥称重及配重施工[J]. 江西建材, 2017(9): 218-219.

[6] 付琳. 箱型连续梁水平转体施工控制技术研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2021.

[7] 赵世超. T 型钢构桥转体施工关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.

[8] 李林翰, 李瑞. 桥梁转体施工工艺与关键技术研究[J]. 工程技术研究, 2021(24): 76-78; 115.

[9] 郭建明, 孙海波. 大型刚构桥转体施工称重技术研究[J]. 市政技术, 2021(12): 51-55.

[10] 孔旭光, 王守波, 傅朝丰, 等. 基于连续监测数据的转体梁桥精确称重方法[J]. 工程建设, 2022(3): 21-26.

[11] 庞建利, 彭晓菊. 预应力混凝土连续梁转体施工称重试验研究[J]. 中国建材科技, 2018(2): 56-59.

[12] 马盈盈, 尤忠义, 高成明, 等. 昆楚高速大德大桥转体施工称重与不平衡配重研究[J]. 公路, 2021(4): 102-106.

[13] 蔺伟. 桥梁水平转体建造关键技术及应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.

[14] 赵琳, 李梦微, 刘晓亮, 等. 重庆铁路转体桥不平衡称重称重与配重试验研究[J]. 河南城建学院学报, 2020(4): 8-14; 23.

[15] 张航. 连续梁桥墩顶水平转体施工监控技术研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.

[16] 任韶敏. 铁路连续箱梁水平转体施工及监控技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.

[17] 翟鹏程. 转体梁施工中的不平衡问题及风致振动研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.

[18] 王强. 高速公路跨铁路立交桥连续梁转体施工不平衡称重分析[J]. 交通世界, 2022(20): 156-158.

[19] 张付林, 汪东, 王银辉, 等. 小半径曲线连续钢构转体桥双向承重与配重方案[J]. 施工技术, 2023(18): 78-83.