

跨既有铁路线T构桥称配重方案优化分析

宋振海¹, 郑学秋¹, 张 奔^{2,3}, 苏文明^{2,3}

¹山东省交通运输工程定额站, 山东 济南

²山东高速工程检测有限公司, 山东 济南

³桥梁结构大数据与性能诊治提升交通运输行业重点实验室, 山东 济南

收稿日期: 2021年11月27日; 录用日期: 2021年12月11日; 发布日期: 2021年12月28日

摘 要

某转体桥为60 + 60 m T型刚构桥, 采用转体施工。桥梁转体前需要对主梁进行称重试验, 文章对主梁的不平衡力矩、摩擦系数等转体参数的试验原理进行分析, 通过理论分析和实测数据计算分析, 转体墩转动体纵向不平衡力矩 M_G 为3825 kN·m, 球铰摩阻力矩 M_Z 为20,825 kN·m, 静摩阻系数0.021, 偏心距 e 为4.5 cm, 桥梁的偏心距比较小, 可不进行配重, 从而验证转体称重试验及平衡配重方案的可行性, 为类似工程提供相应的思路和借鉴。

关键词

转体, 跨既有铁路, T构, 称重

Optimization Analysis of Weighing Scheme for T-Structure Bridge across Existing Railway Line

Zhenhai Song¹, Xueqiu Zheng¹, Ben Zhang^{2,3}, Wenming Su^{2,3}

¹Shandong Province Transportation Engineering Quota Station, Jinan Shandong

²Shandong Hi-Speed Engineering Testing Co., Ltd., Jinan Shandong

³Key Laboratory for Bridge Structure Big Data, Performance Diagnosis and Treatment Improvement of Transportation Industry, Jinan Shandong

Received: Nov. 27th, 2021; accepted: Dec. 11th, 2021; published: Dec. 28th, 2021

Abstract

A swivel bridge is a 60 + 60 m T-shaped rigid-frame bridge, which adopts swivel construction. Before the bridge is rotated, the main girder needs to be weighed. The article analyzes the test prin-

ciples of the main girder's unbalanced moment, friction coefficient and other rotating parameters. Through theoretical analysis and calculation and analysis of measured data, the rotating body of the rotating pier is longitudinally unbalanced. The balance moment M_G is 3825 kN·m, the spherical joint frictional moment M_Z is 20,825 kN·m, the static friction coefficient is 0.021, and the eccentricity e is 4.5 cm. The eccentricity of the bridge is relatively small, and counterweight is not required to verify the weight of the rotating body. The feasibility of testing and balancing counterweight schemes provides corresponding ideas and references for similar projects.

Keywords

Rotating, Across Existing Railway, T Structure, Weighing

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 项目概况

某转体桥与铁路交叉右偏角 83° ，上跨结构为 $60\text{ m} + 60\text{ m}$ 整幅转体 T 构，转体结构由上下承台及转动体系组成。下承台截面设计为矩形，尺寸为： $17.4\text{ m} \times 13\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ ；上承台尺寸为 $11\text{ m} \times 11\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ ；下承台与上承台之间设置转动体系，其结构由下转盘、球铰、上转盘、转体牵引系统、助推系统、限位装置、滑道、撑脚等部件组成。

其中转体长度均为 $(55 + 55)\text{ m}$ ，逆时针转体 85° 就位，转体重量约 8586 t，转体采用平转法施工，平转角速度 $\leq 0.02\text{ rad/min}$ 。上部结构采用单箱双室直腹板箱形截面，中支点中心梁高 6.1 m，端部中心梁高 2.9 m，梁底线形按 1.8 次抛物线变化。顶板宽 16.2 m，底板宽 10.2 m。箱梁两侧悬臂板长 3.0 m。中支点处对应墩身设置一道中横梁，厚度为 4.0 m；端部支点处端横梁厚度 1.6 m。

转体桥范围内铁路路基高度约 2.5 m，轨道标高 41.49 m，回流线标高 48.436 (48.494) m，采用自动封闭，11#墩承台距离回流线最短平面距离为 13.56 m，主墩承台距离回流线最短平面距离 19.35 m，转体前梁体外边缘距离回流线最短平面距离为 13.85 m，合龙段距离回流线最短距离为 9.66 m。

2. 称重试验分析

转体时所需要的牵引力矩的大小由转动球铰的摩擦系数决定，转体桥梁在桥梁纵轴线的竖平面内，由于球铰体系的制作误差，梁体质量分布差异以及预应力张拉程度差异，可能导致桥梁两端悬臂段质量分布不同以及刚度不同，从而产生不平衡力矩[1]。转体前主墩处于临时固结状态，在拆除主墩临时固结，主桥体系发生改变时，若主桥两侧产生不平衡受力，极大的影响施工过程中的安全性，因此需要在转体前进行不平衡配重的称重试验，并根据试验结果进行配重。

称重试验在上部构造箱梁施工完毕，转动系统临时固结完全解除后和试转前进行，测试工作内容包括：

- 1) 转动体部分的不平衡力矩；
- 2) 转动体部分的偏心距；
- 3) 转体球铰的摩阻力矩及摩擦系数；
- 4) 提出转体梁的配重建议实施方案。

2.1. 球铰摩擦力矩和转动体不平衡力矩计算

采用球铰转动法进行不平衡称重。此方法视转动体系为刚体结构，通过牵引设备顶推球铰，记录过程中产生的顶推力及球铰转动所产生的位移值，得到推力 - 位移曲线，当其由静摩擦转入动摩擦的过程中，位移发生突变，从而建立力的平衡方程，计算出球铰的摩擦力矩[2]。

解除主墩临时固结措施后，主梁的平衡状态有两种情况，如图 1、图 2、图 3 所示。

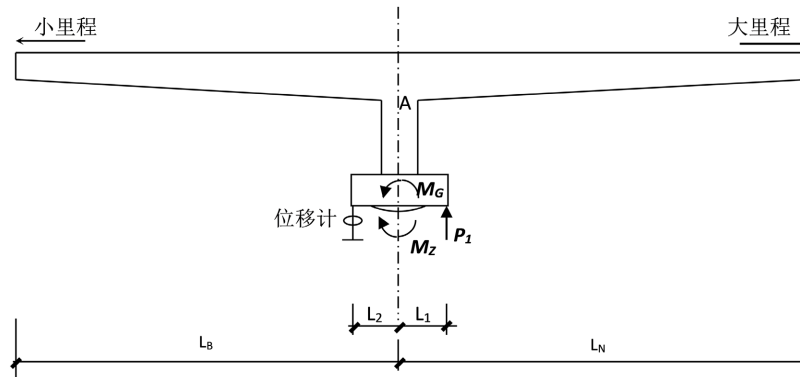


Figure 1. $M_Z > M_G$ working condition
图 1. $M_Z > M_G$ 工况

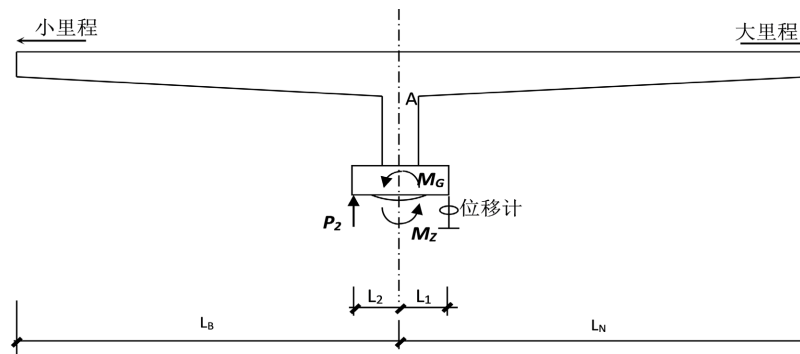


Figure 2. $M_Z > M_G$ working condition
图 2. $M_Z > M_G$ 工况

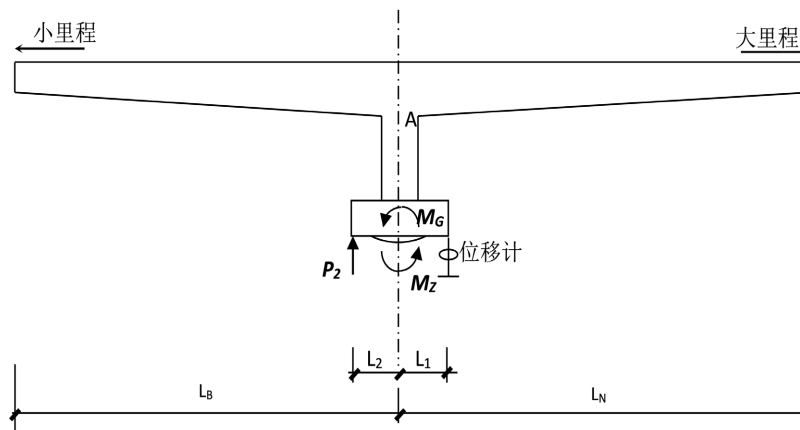


Figure 3. $M_Z < M_G$ working condition
图 3. $M_Z < M_G$ 工况

1) 当球铰的摩阻力矩大于不平衡力矩时, 此时主桥不会发生刚体转动。此时转动桥重心可能偏向小、大里程侧, 若在小里程布置位移计, 大里程通过顶升装置施加 P_1 (如图 1 所示), P_1 随时间逐级增大, 直至位移发生突变时, 有:

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

同理, 在大里程侧则有:

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

联立方程(1)和(2), 有

$$\text{不平衡力矩: } M_G = \frac{P_2 \cdot L_2 - P_1 \cdot L_1}{2}$$

$$\text{摩阻力矩: } M_Z = \frac{P_2 \cdot L_2 + P_1 \cdot L_1}{2}$$

2) 当球铰的摩阻力矩小于不平衡力矩时, 主梁会绕着球铰发生转动, 由于撑脚的设置, 此时需考虑撑脚对球心的力矩。若重心在小里程侧, 在小里程布置位移计, 大里程通过顶升装置施加 P_2 (如图 4 所示), P_2 随时间逐级增大, 直至位移发生突变时, 有:

$$P_2 \cdot L_2 = M_G + M_Z \quad (3)$$

接着对顶升装置进行回表, P'_2 为在回表过程中球铰发生位移的力, 有

$$P'_2 \cdot L_2 = M_G - M_Z \quad (4)$$

联立方程(3)和(4), 得到,

$$\text{不平衡力矩: } M_G = \frac{P_2 \cdot L_2 + P'_2 \cdot L_2}{2}$$

$$\text{摩阻力矩: } M_Z = \frac{P_2 \cdot L_2 - P'_2 \cdot L_2}{2}$$

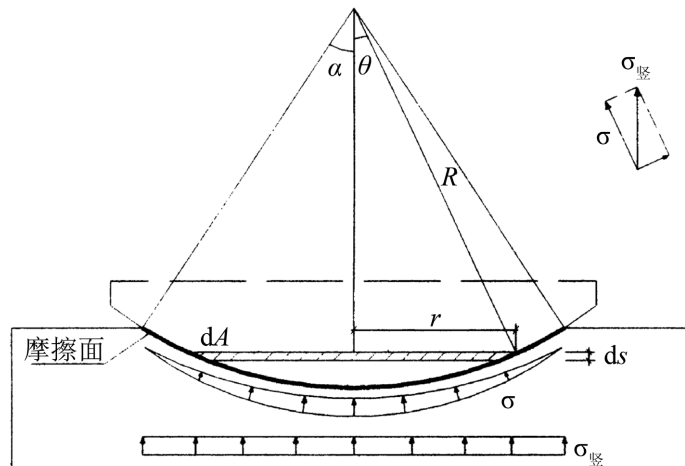


Figure 4. Schematic diagram of calculation of friction coefficient of rotating body spherical hinge around Z axis
图 4. 转动体球铰绕 Z 轴转动摩擦系数计算示意图

2.2. 摩阻系数及偏心距

转动体球铰静摩擦系数的分析计算称重试验时, 转动体球铰在沿梁轴线的竖平面内发生逆时针、顺

时针方向微小转动, 即微小角度的竖转[3]。摩阻力矩为摩擦面每个微面积上的摩擦力对过球铰中心竖转法线的力矩之和, 见图4。

由图4可以得到:

$$\begin{aligned}dM_z &= R \cos \theta dF, \\dF &= \mu_0 \sigma dA, \quad dA = 2\pi r ds, \\r &= R \sin \theta, \quad ds = R d\theta, \\ \sigma &= \sigma_{\text{竖}} \cos \theta, \quad \sigma_{\text{竖}} = N / (\pi R^2 \sin^2 \alpha) \\ \text{则 } dM_z &= 2\pi R^3 \mu_0 \sigma_{\text{竖}} \sin \theta \cos^2 \theta d\theta \\ M_z &= \int_0^\alpha dM_z = \frac{2(1 - \cos^3 \alpha)}{3 \sin^2 \alpha} \mu_0 N R\end{aligned}$$

根据本项目实际尺寸, 球铰球面半径 $R = 6 \text{ m}$; 球铰平面半径 $r = 1.35 \text{ m}$;

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{1.35}{6} \right) = 13.00^\circ$$

将球铰参数带入得: $\mu = \frac{M_z}{0.987RN}$

转动体偏心距: $e = \frac{M_G}{N}$

2.3. 施力方式及测点布置

根据设计, $N = 84,143 \text{ kN}$, $R = 6.0 \text{ m}$, 依据经验 $\mu_0 = 0.05$ 。得到设计静摩阻力矩为:
 $0.987 \times 84143 \times 0.05 \times 6.0 = 24914.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 千斤顶距圆形距离 $L = 4.25 \text{ m}$, 千斤顶所需要提供的顶升力
 $P = 24914.7 / 4.25 = 5862.3 \text{ kN}$, 采用 500 t 千斤顶, 考虑安全系数约用 2 台。

2.4. 平衡配重

为保证主梁转体时的安全性、平衡性和稳定性, 对转动体实施配重时可采用纵向略倾斜配重, 配重后偏心距可按下式计算:

$$e = \frac{M_G + FL}{N}$$

式中, e 为主梁配重后转体偏心距; F 为配重量; L 为配重距球铰数值轴距离; N 为配重后转动体的总重量[4]。

本项目因转体桥位于平曲线上且未设置横桥向的预偏心, 为此在临时固结拆除前进行预配重: 在 0# 块投影范围内, 横桥向曲线外侧(远离铁路侧)靠近防撞墙位置, 采用沙袋预配重 10.2 t , 严格按称重结果对梁体进行配重, 在预定位置设置配重, 确保梁体两端重量平衡。

2.5. 试验实施方案

称重方案实施前, 首先进行转动体平衡状态的判断, 布置位移计, 解除主墩固结, 测量观察主墩是否随着撑脚拆除下沉。

在方案设计截面位置布置相应的顶升装置和位移传感器, 在顶升力逐渐增大的过程中记录位移变化, 出现位移突变时停止施加顶升力, 若平衡状态为球铰的摩阻力矩小于不平衡力矩, 则进行千斤顶回落至

位移突变时顶力大小, 进行记录。根据试验结果, 进行计算确定不平衡力矩、摩阻力矩、摩阻系数、偏心矩; 按梁体纵向倾斜配重方案, 计算配重重量、位置及配重后的偏心矩[5]。

3. 称重试验结果

在小里程侧荷载小于 5800 kN 时, 力 - 位移曲线呈线性变化, 当位移大于 5800 kN 时, 位移发生突变, 此时处于临界状态; 在大里程侧荷载小于 4000 kN 时, 位移发生突变, 根据转动体刚性位移突变法原理, 通过理论分析和实测数据计算分析, 12#墩转动体纵向不平衡力矩 M_G 为 3825 kN·m, 球铰摩阻力矩 M_Z 为 20,825 kN·m, 静摩阻系数 0.021, 偏心距 e 为 4.5 cm, 桥梁的偏心距比较小, 可不进行配重。纵向不平衡测试力 - 位移的结果见表 1 所示, 12#墩纵向称重试验结果见表 2。

Table 1. Force-displacement of longitudinal unbalance test

表 1. 纵向不平衡测试的力 - 位移

小里程顶升		大里程顶升	
力 P_1 (kN)	位移(mm)	力 P_2 (kN)	位移(mm)
0	0	0	0
214.211	-0.25	198.654	-0.2
398.563	-0.36	412.645	-0.24
602.565	-0.47	604.563	-0.38
800.546	-0.45	802.482	-0.41
1003.377	-0.50	1008.468	-0.49
1203.458	-0.69	1204.417	-0.61
1405.166	-0.77	1399.495	-0.71
1603.417	-0.81	1598.541	-0.76
1798.169	-0.91	1802.494	-0.82
2002.645	-0.99	1998.169	-0.92
2201.941	-1.12	2198.667	-1.08
2400.655	-1.29	2414.984	-1.22
2606.498	-1.27	2604.224	-1.28
2814.336	-1.25	2802.456	-1.31
3005.814	-1.31	2999.652	-1.41
3201.498	-1.41	3199.851	-1.50
3403.474	-1.50	3404.782	-1.61
3604.348	-1.53	3608.593	-1.62
3802.677	-1.71	3806.186	-1.77
4008.463	-1.76	4006.847	-1.80
4214.192	-1.81	65.324	-0.81
4405.658	-1.89		
4602.539	-2.09		
4802.544	-2.15		

Continued

5004.36	-2.21
5200.75	-2.31
5403.72	-2.41
5602.98	-2.50
5798.97	-2.59
65.215	-0.79

Table 2. 12# pier longitudinal weighing test results

表 2. 12#墩纵向称重试验结果

项目	参数	数值	
小里程顶升临界值	P_1	5800	kN
	L_1	4.25	m
大里程顶升临界值	P_2	4000	kN
	L_2	4.25	m
转动力矩 1	$P_1 \cdot L_1$	24650	kN·m
转动力矩 2	$P_2 \cdot L_2$	17000	kN·m
球铰空间半径	SR	12.0	m
转体重量	G	85860	kN
不平衡力矩	M_g	3825	kN·m
摩擦力矩	M_z	20825	kN·m
静摩擦系数	μ	0.021	
偏心距	e	0.045	m
偏心距方向		偏小里程方向	

根据称重试验结果及数据分析, 桥梁的偏心距比较小, 可不进行配重, 如现场具备条件, 可参考以下配重方案:

在纵桥向方向大里程侧距离 0# 节段中心 52 m 处采用混凝土预制块配重 7.4 吨。

4. 结论

本文依托实际工程, 对 T 构转体桥转体施工前称重试验进行研究, 得出如下结论:

1) 解除主墩临时固结措施后, 在转体之前, 要先进行转动体平衡状态的判定, 计算出转体部分的纵向、横向不平衡力矩和纵向、横向偏心矩、转体球铰的摩阻力矩及静摩擦系数等参数, 确定转体的不平衡配重, 保证转体的顺利实施。

2) 转体墩转动体纵向不平衡力矩 M_G 为 3825 kN·m, 球铰摩阻力矩 M_z 为 20,825 kN·m, 静摩阻系数 0.021, 偏心距 e 为 4.5 cm, 桥梁的偏心距比较小, 可不进行配重。

3) 梁顺利转体到预定位置, 桥梁顺利合龙, 充分说明配重方案的合理可行, 为类似工程提供相应的思路和借鉴。

参考文献

- [1] 王学彦, 秦立朝, 谭春腾. 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]. 四川建筑, 2019, 39(5): 64-66.
- [2] 姚曙光. 跨既有铁路连续梁转体施工技术研究[J]. 建筑技术开发, 2013, 40(12): 40-42.
- [3] 李秀东. 荣乌高速公路孤庄营跨线桥转体不平衡称重试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2012(4): 25-29, 76.
- [4] 董刚. 张呼铁路跨京包线铁路墩顶转体桥不平衡称重试验研究[J]. 价值工程, 2018, 37(33): 146-149.
- [5] 张伟刚. 温家窑跨京包铁路特大桥连续梁转体前平衡称重及配重技术[J]. 价值工程, 2018, 37(1): 117-121.