

水平 T 构转体桥梁结构抗倾覆稳定性分析

郑元勋¹, 陈义涵¹, 贾方毅², 张文明³, 梁 川³, 张帅杰^{1,4}, 白立伟³

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001; 3. 中铁七局集团郑州工程有限公司, 河南 郑州 450003; 4. 中国铁路太原局集团有限公司, 山西 太原 030013)

摘 要: 转体桥梁结构抗倾覆稳定性是转体桥梁施工安全控制的核心问题。基于沿太行高速公路某跨线转体桥项目, 通过称重试验推导了大、小偏心工况下的力学平衡方程, 量化了球铰摩阻力矩与结构不平衡力矩的关系, 并分析了转体结构抗倾覆机理。通过探究不同工况下转体桥梁结构的受力特性, 揭示了不平衡力矩与不平衡牵引力对水平 T 构桥梁结构稳定性的影响规律。结果表明: 在所提项目条件下, 当不平衡力矩超过 25 600 kN·m 或牵引力达到 6 600 kN 时, 结构位移骤增, 球铰应力显著集中, 抗倾覆稳定系数降至 1.00 以下, 引发桥梁结构倾覆失稳。基于现场实测数据与力学响应分析, 研究量化得出转体桥梁结构的临界不平衡力矩和临界牵引力分别为 29 822.6 kN·m 和 6 689.0 kN, 揭示了结构抗倾覆失稳的临界状态判据, 为转体桥梁的安全设计和施工管理提供科学依据。

关键词: 转体桥梁; 抗倾覆稳定性; 不平衡力矩; 临界分析; 数值模拟; 牵引力

中图分类号: U443.4

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2027.01.004

随着中国交通路网的加密, 跨越既有繁忙铁路干线的新建桥梁工程日益增多。转体施工技术凭借其对于铁路运营干扰小、安全性高等优势, 已成为跨铁路线路建设的首选方案^[1-3]。在转体施工过程中, 水平 T 构桥梁通过中心球铰支撑全部重量, 结构处于“单点支撑、悬臂受力”的瞬态平衡体系, 其抗倾覆稳定性对偏心荷载、风荷载及施工扰动极度敏感。一旦施工过程中的不平衡力矩超过临界阈值, 极易引发梁体倾覆事故, 造成灾难性后果。因此, 明确转体结构的力学行为边界, 量化抗倾覆稳定性的关键控制指标, 是保障此类工程安全的核心课题。

转体过程的安全与稳定是决定 T 构转体桥梁建设成功的关键, 转体结构自身的不平衡因素将会对转体的稳定性产生影响。在非对称转体施工研究方面, 马行川^[4]通过在转体结构长臂端设置辅助支撑, 将结构重心调整到球铰的中心, 以提高转体施工的稳定性。邱志军等^[5]提出了一墩双 T 不平衡配重转体法, 即采用“一拉一顶”的方法, 以确保施工阶段梁体的平衡, 可以提升桥梁转体施工的安全系数。

但以往研究主要聚焦配重调整, 未系统分析不平衡力矩的影响。转体施工中球铰是实现桥梁安全、顺利转体的关键。球铰结构优化通过材料改进如超高性能混凝土^[6]和功能设计如自定心滑道^[7]增强了抗倾覆能力, 但摩阻力矩与不平衡力矩的量化关系仍需深化研究。称重试验^[8]作为关键环节, 可量化不平衡力矩^[9], 但现有研究较少结合数值模拟分析临界状态, 缺乏基于具体复杂工程实测数据的临界失稳参数量化研究。大多文献仅给出定性的安全范围, 对于大吨位、大偏心工况下的具体临界倾覆力矩阈值缺乏精确的数据支撑。因此, 需要深入探讨不平衡力矩和不平衡牵引力对转体结构稳定性的影响。

本文以沿太行高速公路某跨线转体桥为依托工程项目。该项目位于铁路线与高速公路相交处, 全线为双幅设计, 主桥桥型为 T 构转体桥, 主梁采用 2×80 m 变截面预应力混凝土箱梁, 转体部分跨径为 2×75 m, 转体重量为 16 000 t。右幅 35 号墩和左幅 42 号墩为关键墩位(转体桥主墩), 以右幅为例的主桥示意图见图 1。本文基于该转体桥梁的转体称重

收稿日期: 2026-06-01; 修订日期: 2026-07-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52279144)

作者简介: 郑元勋(1978—), 男, 河南驻马店人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事结构检测、监测及加固理论与技术研究, E-mail: yxzheng@zzu.edu.cn。

试验、抗倾覆机理以及不平衡力矩与不平衡牵引力对转体结构稳定性的影响展开研究。通过理论分析和数值模拟相结合的方法,揭示了不同工况下转体桥梁结构的受力特性与影响规律,为相关工程的安全设计和施工管理提供科学依据。

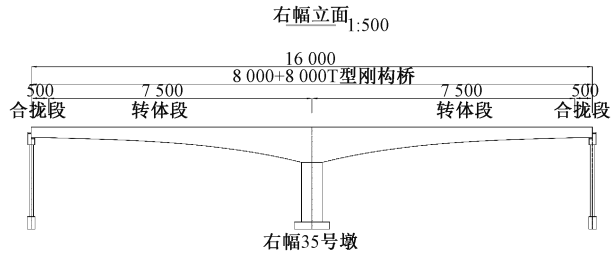


图 1 主桥示意图(单位:cm)

Figure 1 Main bridge schematic diagram (unit: cm)

1 桥梁转体称重试验

桥梁水平转体时,理想状态是转体支撑系统与结构重心重合,但实际中因球铰安装误差和质量差异,会导致不平衡力矩产生,进而引发转动趋势,球铰接触面因此存在摩阻力矩以平衡此趋势。称重试验采用球铰转动法,将转体结构视为刚体,通过静摩擦向动摩擦转变建立平衡方程。试验中分小偏心和大偏心两种情况^[8],以量化力矩关系。

(1)球铰摩阻力矩 M_z 大于不平衡力矩 M_G (小偏心情况)如图 2 所示。记录顶升力与位移的变化情况^[9]。

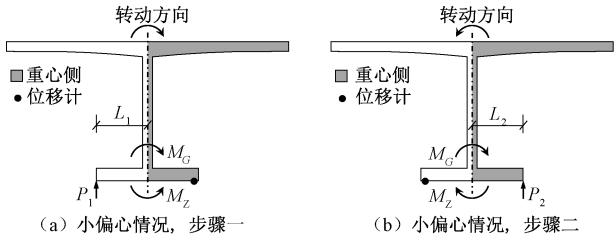


图 2 转体桥梁称重试验结构顶升示意图(小偏心情况)

Figure 2 Schematic diagram of structural jacking for rotating bridge load-bearing test (small eccentricity condition)

当顶升力逐渐增加到使球铰发生微小转动的瞬间,分别记录顶升力为 P_1 和 P_2 ,因此可得平衡方程:

$$P_1 L_1 + M_G = M_z; \quad (1)$$

$$P_2 L_2 = M_G + M_z. \quad (2)$$

联立式(1)、(2)可得

$$M_G = \frac{P_2 L_2 - P_1 L_1}{2}; \quad (3)$$

$$M_z = \frac{P_1 L_1 + P_2 L_2}{2}. \quad (4)$$

式中: P_1 和 P_2 分别为非重心侧和重心侧的顶升力; L_1 和 L_2 分别为顶升力 P_1 和 P_2 对于球铰中心的力臂。

小偏心情况下力与位移关系曲线^[10-12]如图 3 所示。

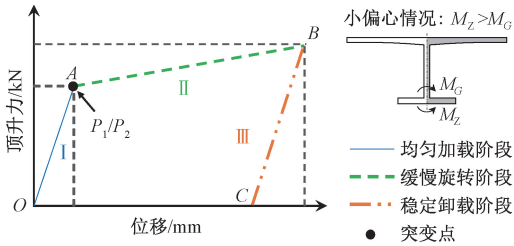


图 3 小偏心情况下力与位移关系曲线

Figure 3 Curve of force-displacement relationship under small eccentricity

(2)球铰摩阻力矩 M_z 小于不平衡力矩 M_G (大偏心情况),如图 4 所示。

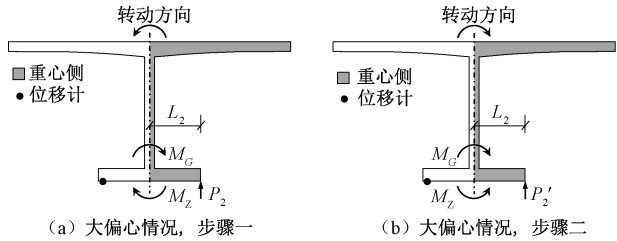


图 4 转体桥梁称重试验结构顶升示意图(大偏心情况)

Figure 4 Schematic diagram of structural jacking for rotating bridge load-bearing test (large eccentricity condition)

当位移计读数出现明显变化时,记录顶升力大小为 P_2 ,然后使千斤顶回落,当体系发生反向滑动时,记录顶升力的大小为 P'_2 ,可得平衡方程^[9]为

$$P_2 L_2 = M_G + M_z; \quad (5)$$

$$P'_2 L_2 + M_z = M_G. \quad (6)$$

联立式(5)、(6)可得

$$M_G = \frac{P_2 L_2 + P'_2 L_2}{2}; \quad (7)$$

$$M_z = \frac{P_2 L_2 - P'_2 L_2}{2}. \quad (8)$$

式中: P'_2 为重心侧反向滑动时的顶升力。

大偏心情况下力与位移关系曲线^[10,13]如图 5 所示。

称重试验测得右幅 35 号墩与左幅 42 号墩的顶升力与位移关系曲线,如图 6 所示。可以看出,左右幅桥梁均属于小偏心情况,相关测试结果如表 1 所示。

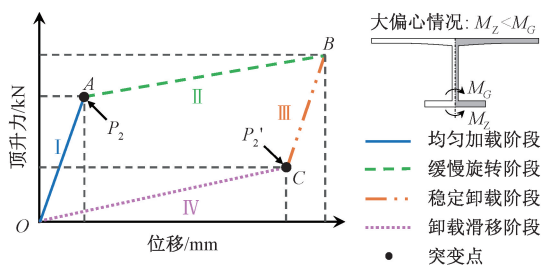


图5 大偏心情况下力与位移关系曲线
Figure 5 Curve of force-displacement relationship under large eccentricity

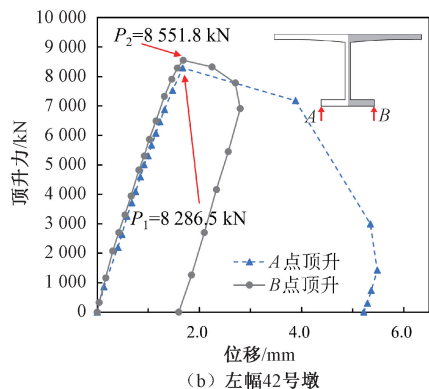
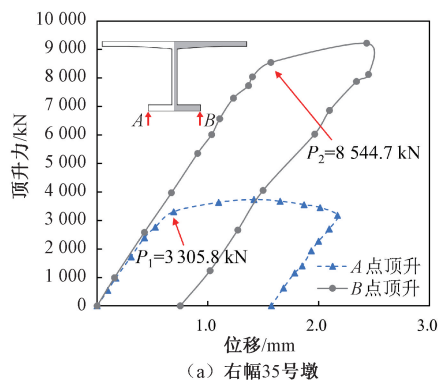


图6 顶升力与位移关系曲线
Figure 6 Curve of the relationship between lifting force and displacement

表1 转体桥称重试验测试结果

Table 1 Test results for rotating bridge weighing test

墩号	不平衡力矩/ (kN·m)	摩阻力矩/ (kN·m)	静摩擦 系数	转体偏 心距/m
右幅 35 号墩	13 490.0	30 515.0	0.024	0.084
左幅 42 号墩	682.9	43 358.6	0.035	0.004

2 转体结构抗倾覆机理

2.1 转体失稳方式

桥梁水平转体结构多为 T 构形式,在转体过程中处于伸臂状态,悬臂梁体与下部结构通过单点或多点接触受力,抗倾覆稳定性较差^[14]。在自身不平衡因素和外界荷载作用下,转体结构会发生偏转^[15-16],球铰处产生不平衡力矩,导致重心偏移;若

球铰摩阻力矩无法克服倾覆力矩,则桥梁发生倾覆。抗倾覆力矩主要由球铰摩阻力矩提供(撑脚未触地时),而当撑脚触地时,抗倾覆能力达到最大,撑脚成为关键保障环节。

桥梁在转体过程的平衡状态分单点支撑(撑脚不与滑道接触,球铰单独承重)和多点支撑(撑脚与滑道接触,球铰与撑脚共同承重)。结合转体过程中结构的受力状态,桥梁在水平转体时可能发生的倾覆主要有如图 7 所示的 3 种形式^[17]。

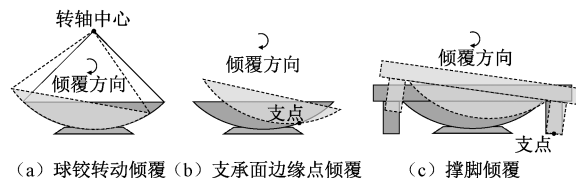


图7 转体结构倾覆失稳形式
Figure 7 Forms of overturning instability of rotating structures

上述 3 种倾覆形式中,图 7(a)为球铰转动倾覆,即上球铰相对下球铰发生转动,转动中心为球铰球面圆心;图 7(b)为支承面边缘点倾覆,即以支承面边缘点为转动中心的倾覆;图 7(c)为撑脚倾覆,即以撑脚为转动中心的倾覆,该失稳形式是极其危险的,在施工控制中应当杜绝发生。

2.2 结构稳定性评价指标

(1)球铰转动倾覆。转动系统的抗倾覆能力由球铰的摩阻力矩提供,而摩阻力矩又是由球铰接触应力的分布计算得出。因此,依据接触面应力求解公式可以推导球铰转动失稳的临界抗倾覆力矩 T_L ^[18] 为

$$T_L = \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} \sigma \mu R^2 \sin \theta \sqrt{(R \cos \theta)^2 + (R \sin \theta \cos \alpha)^2} d\alpha d\theta. \quad (9)$$

式中: α 为球铰接触边缘处点的径向角度; θ 为计算点的径向角度, R 为球铰半径。但公式(9)中积分计算较为复杂,难以精确求解,一般认为 T_L 满足以下公式:

$$\mu FR \leq T_L \leq f(\alpha) \mu FR. \quad (10)$$

式中: μ 为摩擦系数; F 为竖向力; $f(\alpha)$ 为球铰摩擦系数计算函数,一般 α 取值 $8 \sim 18^\circ$ 。通过计算并参照文献^[18-19],认为 $f(\alpha)$ 最大值接近 1.05,因此临界抗倾覆力矩的近似求解公式为

$$T_L \approx 1.05 \mu FR. \quad (11)$$

(2)支承面边缘点倾覆。支承面边缘点倾覆的临界抗倾覆力矩为

$$T_L = R_1 F. \quad (12)$$

式中: R_1 为球铰支承半径。

(3)撑脚倾覆。撑脚倾覆的临界抗倾覆力矩为

$T_L = R_h F。$ (13)

式中: R_h 为球铰结构滑道半径。

支承面边缘点倾覆和撑脚倾覆两种情况属于极端低概率情况^[20],这在桥梁结构的设计阶段完全可以避免。因此,本文主要对球铰转动倾覆情况展开相关研究,结合转体结构的实际工况及其所受的荷载作用,对转体结构进行抗倾覆稳定性研究,为转体工程实践提供理论支撑。

3 不平衡力矩对结构稳定性的影响

受到施工误差及环境等影响,转体结构不可避免会产生不平衡力矩,将会影响桥梁结构的稳定性,进而引发失稳。因此,通过精确计算和控制不平衡力矩,可以确保转体施工的安全性和可靠性。转体桥梁不平衡力矩 M_c 与偏心距 e 存在以下关系:

$M_c = G \cdot e。$ (14)

式中: G 为转体重量,本文对应为 160 000 kN。

本文依托的转体桥分为左、右两幅,鉴于其结构具有相似性,后续数值模拟与力学响应分析均以右幅桥为例。通过现场称重试验测得,该右幅桥转动体偏心距为 8.4 cm,计算得到不平衡力矩为 13 490 kN·m,据此设置桥梁结构承受的不平衡力矩分别为 0,6 400,12 800,19 200,25 600,32 000 kN·m 共 6 种工况,转体过程角速度为 0.02 rad/min;通过单侧配重方式施加不平衡力矩,并在 0 号块以外单侧桥面布置均布荷载以减少应力集中,最终转体桥梁承受不平

衡力矩工况见表 2。基于右幅转体桥,运用 ABAQUS 软件建立有限元数值模型,上、下球铰采用“表面-表面”接触模拟以传递法向压力和切向摩擦力,上转盘与转台设置为绑定约束,下转盘底部完全固结,系统分析不平衡力矩对转体稳定性的影响。

表 2 转体桥梁承受不平衡力矩工况
Table 2 Rotating bridge under unbalanced moment conditions

工况	不平衡力矩/ (kN·m)	偏心距/cm	配重/kN	均布荷载值/ MPa
1	0	0	0	0
2	6 400	4	160	1.92×10^{-4}
3	12 800	8	320	3.85×10^{-4}
4	19 200	12	480	5.77×10^{-4}
5	25 600	16	640	7.70×10^{-4}
6	32 000	20	800	9.62×10^{-4}

3.1 结构位移响应分析

本研究提取了各种工况下转体桥梁的竖向位移云图,如图 8 所示。从图 8 可发现,桥梁位移随不平衡力矩增大而增大。当力矩超过 25 600 kN·m(偏心距大于 16 cm)时,梁体结构位移会发生较大变化(如 32 000 kN·m 时位移增量为 365.8 mm),表明梁体已经出现了明显的失稳倾覆现象。

随着不平衡力矩的增大,桥梁受力变得不均匀,在支撑点与转体中心之间产生应力集中,导致关键区域材料进入非线性状态或局部刚度降低,变形显

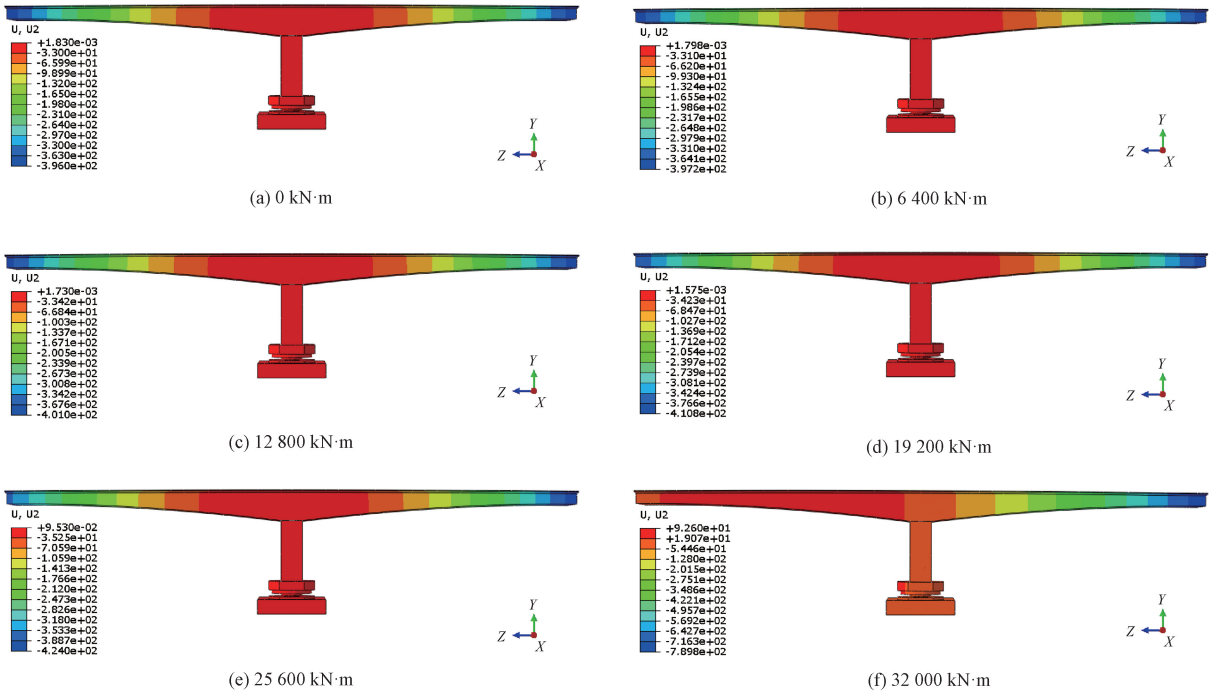


图 8 不平衡力矩作用下全桥的竖向位移云图

Figure 8 Vertical displacement cloud map of the entire bridge under the action of unbalanced moment

著增大。力矩增大使转体角度增加,进而加剧整体位移和变形;当超过稳定极限阈值时,引发结构失稳。

在工程实践中,通常将转体桥梁的偏心距限制在 15 cm 以内^[21],旨在确保桥梁的稳定性,避免因过大的不平衡力矩导致结构失稳。这一设计限制与模型计算结果相一致,也进一步验证了保持合理偏心距对确保转体桥梁安全性的重要性。

3.2 转体球铰应力响应分析

本研究汇总了不同不平衡力矩下的转体球铰的接触应力情况,如表 3 所示。由表 3 可知,力矩小于等于 25 600 kN·m 时应力变化平稳;超过后应力集中加剧(如 32 000 kN·m 时接触应力增量为 64.26 MPa),显示失稳风险。随着不平衡力矩的增大,力矩传递的方向和强度改变,导致球铰面应力分布不均匀,局部应力会发生突变。这表明了转体桥在较大不平衡力矩作用下潜在的失稳风险,在设计 and 施工过程中应特别关注球铰的承载能力和力学行为,以确保桥梁的稳定性和安全性。

表 3 不平衡力矩下对应的球铰接触应力

Table 3 Contact stress of the spherical hinge corresponding to the unbalanced moment

工况	不平衡力矩/ (kN·m)	最小接触 应力/MPa	最大接触 应力/MPa
1	0	5.43	58.94
2	6 400	5.42	59.61
3	12 800	5.39	61.67
4	19 200	5.30	67.01
5	25 600	5.18	72.26
6	32 000	1.64	123.20

不平衡力矩作用下桥梁抗倾覆稳定系数 K_g 计算公式为

$$K_g = \frac{M_{gw}}{M_g} \quad (15)$$

式中: M_{gw} 为不平衡力矩作用下的稳定力矩。

3.3 临界不平衡力矩的确定

从图 9 的桥梁抗倾覆稳定系数与不平衡力矩的关系曲线可以看出,桥梁抗倾覆稳定系数随不平衡力矩的增大而逐渐减小,二者拟合呈负相关,且相关性较好。由图 9 可见,当不平衡力矩在 29 440 ~ 30 080 kN·m 时,桥梁抗倾覆稳定性系数处在 0.98~1.01,在此区间范围内存在使桥梁抗倾覆稳定系数达到 1.00 的不平衡力矩值。通过数据拟合,计算出临界不平衡力矩为 29 822.6 kN·m;基于式(15)进行理论公式推导,得到球铰转动倾覆情况下的结构临界抗倾覆力矩为 32 256.0 kN·m;而通过

称重试验的工程现场实测,测得球铰真实的摩阻力矩为 30 515.0 kN·m。

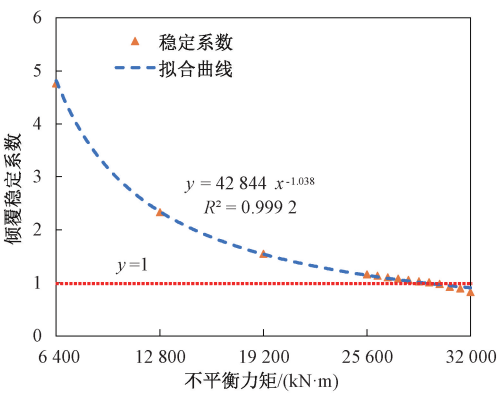


图 9 桥梁抗倾覆稳定系数与不平衡力矩的关系曲线

Figure 9 Relationship curve between the anti-overturning stability coefficient of the bridge and the unbalanced moment

可以发现,本研究通过数据拟合得到的临界不平衡力矩值略低于理论值与工程实际,相对分别减少了 7.5%和 2.3%,这表明了本研究所用方法的准确性与合理性,充分保障了转体桥梁结构稳定性分析的可靠性。

前述称重试验得到桥梁结构的不平衡力矩为 13 490.0 kN·m,依据拟合关系式得到其对应的稳定系数为 2.21,远大于相关规范^[22]中关于转动状态下结构抗倾覆稳定系数为 1.3 的规定,由此充分验证了在此不平衡力矩下,本文依托的转体桥梁将会保证足够的安全与稳定性。该研究通过对不平衡力矩与抗倾覆稳定性系数的量化关系进行了深入分析,验证了该转体桥梁在实际运行中具备较高的安全裕度,理论与实际数据有较好的一致性。

4 不平衡牵引力对结构稳定性的影响

在水平 T 构桥梁转体施工中,牵引系统不同步可能导致不平衡牵引力,过大的不平衡力会引发球铰滑移,进而导致桥梁倾覆失稳。基于已建立的有限元模型,重点探究不平衡牵引力对桥梁结构稳定性的影响,计算模型如图 10 所示。

桥梁转体过程中受到不平衡牵引力的工况,可以等效为桥梁结构匀速转体过程中,受到横向力作用。在转台中心处设置一个节点 p ,将其与转台外圈表面设置为耦合约束。并在节点 p 处施加横向力,以模拟桥梁受到不平衡牵引力作用的状态。在现场称重试验中可知依托工程测得的球铰摩阻力矩为 30 515.0 kN·m,球铰静摩擦系数为 0.024。转台中心与球铰中心垂直距离为 6.0 m,可估算得到发生倾覆的不平衡牵引力为 5 085.8 kN,因此本研

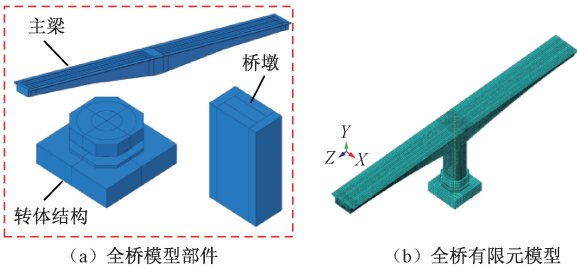


图 10 转体桥梁有限元模型
Figure 10 Finite element model of the rotating bridge

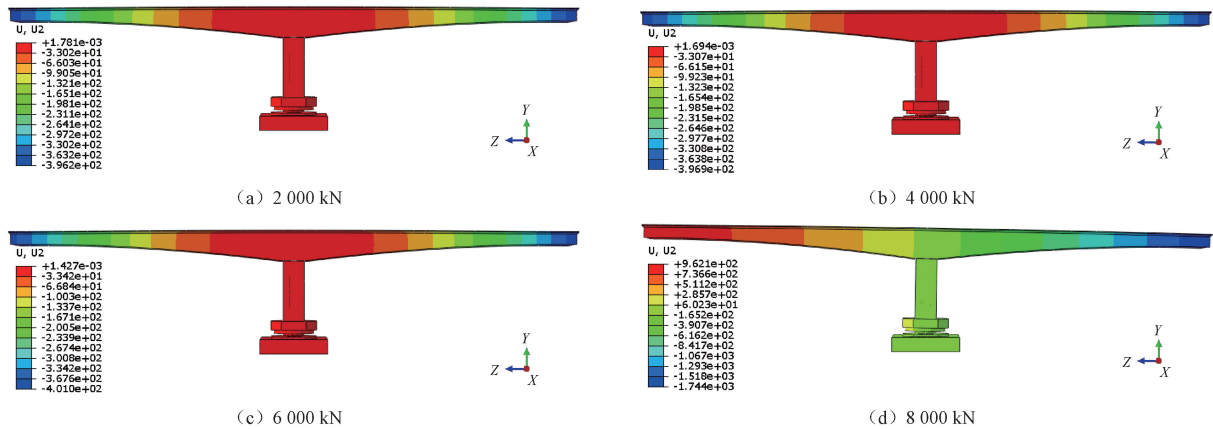


图 11 不平衡牵引力作用下全桥的竖向位移云图

Figure 11 Vertical displacement cloud map of the entire bridge under the action of unbalanced traction force

4.2 转体球铰应力响应分析

本文还提取了不同工况下的转体球铰所受的接触应力情况。由结果可知,牵引力低于 6 000 kN 时,接触应力的最大值出现在球铰外侧边缘,内部区域应力值总体较小;超过 6 000 kN 后,应力分布异常,如 8 000 kN 时最小接触应力为 0 MPa(见表 4),表明此时不平衡牵引力产生的倾覆力矩已经克服了球铰摩擦力矩,桥梁结构出现了倾覆现象。

表 4 不平衡牵引力下对应的球铰接触应力

Table 4 Contact stress of the spherical hinge under unbalanced traction force			
工况	不平衡牵引力/kN	最小接触应力/MPa	最大接触应力/MPa
1	2 000	5.43	56.69
2	4 000	5.42	57.49
3	6 000	5.43	58.71
4	8 000	0	59.53

4.3 临界不平衡牵引力的确定

由以上分析可知,本研究依托的转体桥梁发生倾覆时的临界不平衡牵引力介于 6 000~8 000 kN。不平衡牵引力作用下桥梁抗倾覆稳定系数 K_f 为

$$K_f = \frac{M_{fw}}{M_{fq}} \quad (16)$$

究设置了 2 000,4 000,6 000,8 000 kN 这 4 个不平衡牵引力工况,以探究不平衡牵引力对转体桥结构的稳定性影响。

4.1 结构位移响应分析

各工况下转体桥梁的竖向位移云图,如图 11 所示。可以发现,桥梁位移随不平衡牵引力增加而增大。当牵引力超过 6 000 kN 时,梁体结构位移剧增(如 8 000 kN 时增量达 1 343.0 mm),表明结构出现了明显的失稳倾覆现象。

式中: M_{fw} 为不平衡牵引力作用下的稳定力矩; M_{fq} 为不平衡牵引力产生的倾覆力矩。

倾覆力矩 M_{fq} 即为不平衡牵引力作用力臂与作用力的乘积,本文桥梁结构的不平衡牵引力作用力臂为 6.4 m。为进一步探究桥梁结构发生倾覆失稳的临界不平衡牵引力,在 6 000~8 000 kN 每隔 200 kN 取 1 个不平衡牵引力。将不同工况下桥梁抗倾覆稳定系数与不平衡牵引力拟合得到如图 12 所示的关系曲线。

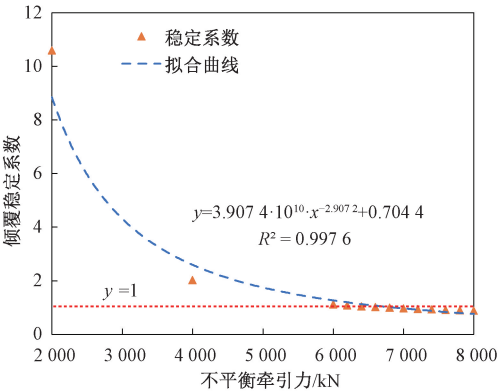


图 12 桥梁抗倾覆稳定系数与不平衡牵引力的关系曲线
Figure 12 Relationship curve between the anti-overturning stability coefficient of the bridge and the unbalanced tractive force

可以发现,桥梁抗倾覆稳定系数达到 1 对应的不平衡牵引力位于 6 600~6 800 kN(该区间内稳定系数为 0.99~1.01)。通过数据拟合,进一步求得该临界不平衡牵引力精确值为 6 689.0 kN。前述估算桥梁发生倾覆风险的不平衡牵引力为 5 085.8 kN,通过数值模拟得到该工况下的抗倾覆稳定系数为 1.36,依据相关规范^[22],在转动状态下结构抗倾覆稳定系数取 1.3,二者较为接近。由此可见,将不平衡牵引力作用对球铰中心产生的力矩估算作为转体桥梁发生倾覆的力矩的方法较为合理,工程上采用此方法估算转体桥梁克服摩阻力矩发生倾覆的临界不平衡牵引力较为稳妥准确。

5 结论

本文主要通过现场试验与数值模拟,系统分析了水平 T 构转体桥梁的抗倾覆稳定性,主要结论如下。

(1)通过开展桥梁转体称重试验与抗倾覆机理分析,阐明了大偏心和小偏心两种工况下的力学平衡演变规律;系统识别并划分了转体结构可能发生的 3 种倾覆失稳形式(球铰转动倾覆、支承面边缘点倾覆和撑脚倾覆),明确了各失稳模式的边界条件,为转体结构的力学行为边界分析提供了理论支撑。

(2)不平衡力矩的临界分析表明,当力矩超过阈值时,结构位移和应力骤增是普遍规律。本研究通过数值模拟得出临界值,但更重要的是一般性判断:抗倾覆稳定系数随力矩增大而减小,这为转体桥梁安全设计提供了通用方法。

(3)不平衡牵引力的影响规律相似,临界牵引力的确定验证了基于球铰摩阻力矩估算的工程方法。这一方法可推广至其他转体桥,强调在施工中控制牵引力同步性的重要性。

参考文献:

[1] Zheng Yuanxun, Kong Meng, Wang Boli, et al. Influence of bridge pre-camber on traffic comfort and adjustment of bridge deck alignment[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(2): 106-113. [郑元勋,孔孟,王博立,等.桥梁预拱度对行车舒适性的影响及桥面线形调整[J].郑州大学学报(工学版),2024,45(2):106-113.]

[2] Xu Chundong, Hu Zhou, Guan Junfeng, et al. Review on construction technology development of cross-line railway swivel bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 54-60. [徐春东,胡洲,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,2021,38(6):54-60.]

[3] Zheng Yuanxun, Zhang Shuaijie, Ma Junjie, et al. State-of-the-art review of contact and friction analysis with a spherical hinge and structural stability research on horizontal rotating bridges[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2025, 61: 101917.

[4] Ma Xingchuan. Design of auxiliary support system for horizontal rotation of asymmetric beam bridge [J]. Engineering and Technological Research, 2019, 4(17): 16-18. [马行川.不对称结构梁式桥水平转体的辅助支撑系统设计[J].工程技术研究,2019,4(17):16-18.]

[5] Qiu Zhijun, Chen Cai. Rotation of large-span continuous beam bridge with unbalanced counterweight and double T-beam structure [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35(5): 80-87. [邱志军,陈才.大跨径一墩双 T 不平衡配重连续梁的转体施工[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(5):80-87.]

[6] Wang Jiawei, Sun Quansheng. Experimental study on improving the compressive strength of UHPC turntable[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020(1): 3820756.

[7] 屈锦康,谷利雄,王荣辉.一种具有多滑道与自定心功能的转体球铰:CN201921542857.0[P].2020-08-18.

[8] He Shengjie. Research on contact analysis and balance control of ball hinge in flat rotation construction [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. [何圣杰.平转法施工球铰接触分析与平衡控制研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.]

[9] Yang Wei. Research on critical technique of synchronous rotation construction control with large angle for T-shape rigid frame bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. [杨伟.T型刚构桥大角度同步转体施工控制关键技术研究[D].成都:西南交通大学,2018.]

[10] Jiang Lanchao, Wang Haitao, Lian Xinzeng. Research on measurement methods and curves for rotational parameters of bridges[J]. Municipal Engineering Technology, 2021, 39(6): 38-42. [姜兰潮,王海涛,连新增.桥梁转体参数实测方法及测试曲线研究[J].市政技术,2021,39(6):38-42.]

[11] Wei Feng, Chen Qiang, Ma Lin. Analysis of experiment to weigh unbalanced weight of swing body in cable-stayed bridge on Beijing Fifth Ring Road[J]. Railway Engineering, 2005, 45(4): 4-6. [魏峰,陈强,马林.北京市五环路斜拉桥转动体不平衡重称重试验分析[J].铁道建筑,2005,45(4):4-6.]

[12] Zhou Yulin, Wu Haijun, Wang Zhibin, et al. A study of the joint weighing for the horizontally rotary construction of a large-tonnage cable-stayed bridge[J]. Traffic Engi-

neering and Technology for National Defense, 2019, 17(6): 61–64. [周玉林, 吴海军, 汪志斌, 等. 大吨位斜拉桥平转施工联合称重研究[J]. 国防交通工程与技术, 2019, 17(6): 61–64.]

[13] Gong Bo, Cao Zhideng, Zheng Xiaomao, et al. Quick weighing test of Changzhou DaMingLu rotary girder crossing Shanghai-Chengdu expressway [J]. Special Structures, 2019, 36(6): 68–71. [龚博, 曹志邓, 郑晓毛, 等. 常州大明路跨沪蓉高速转体梁快速称重试验[J]. 特种结构, 2019, 36(6): 68–71.]

[14] Wang Wei. Research on swivel construction monitoring and control technology for T-shape rigid frame bridge [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018. [王伟. T 型刚构桥转体施工监测与控制技术研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.]

[15] Li Sheng. Overall stability analysis of open thin-walled swivel arch bridge in construction stage [J]. Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition), 2006, 2(2): 108–110. [李盛. 开口薄壁转体拱桥施工阶段整体稳定性分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2006, 2(2): 108–110.]

[16] 李国豪. 桥梁结构振动与稳定[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.

[17] 钱桂枫, 程飞, 王景全, 等. 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.

[18] Feng Yu, Qi Jianan, Wang Jingquan, et al. Rotation construction of heavy swivel arch bridge for high-speed railway[J]. Structures, 2020, 26: 755–764.

[19] Zhang Qifeng. Design and erection technique for rotary system in heavy horizontal rotation construction of arch bridges[D]. Nanjing: Southeast University, 2012. [张琪峰. 大吨位平转施工拱桥的转体系统构造设计与施工技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.]

[20] Che Xiaojun, Zhang Xiedong. Anti-overturning in swivel process of large tonnage T-rigid frame bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(8): 66–72. [车晓军, 张谢东. 大吨位 T 形刚构桥转体过程抗倾覆性能[J]. 中国公路学报, 2014, 27(8): 66–72.]

[21] Li Chong. Study on eccentric magnitude setting of center of gravity for turn bridge with varied-width curved beam [J]. Transportation Science & Technology, 2016(4): 26–28. [李翀. 变宽曲线转体桥重心偏心量设置研究[J]. 交通科技, 2016(4): 26–28.]

[22] DB42/T 2249—2024 桥梁水平转体技术规程[S].

Anti-overturning Stability Analysis of Horizontal T-structure Rotating Bridge

ZHENG Yuanxun¹, CHEN Yihan¹, JIA Fangyi², ZHANG Wenming³, LIANG Chuan³, ZHANG Shuaijie^{1,4}, BAI Liwei³

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Sinohydro Bureau No. 11 Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Engineering Co., Ltd., of China Railway Seventh Engineering Group, Zhengzhou 450003, China; 4. China Railway Taiyuan Group Co., Ltd., Taiyuan 030013, China)

Abstract: The anti-overturning stability of a rotating bridge structure is a key factor in ensuring rotating bridge construction safety. Based on a cross-over rotating bridge project along the Taihang Expressway, the mechanical equilibrium equations were derived under large and small eccentricity conditions through load-bearing tests. The relationship between spherical hinge friction moments and structural unbalanced moments was quantified, and the anti-overturning mechanism of rotating structures was analyzed. By investigating the stress characteristics of rotating bridge structures under different conditions, the influence patterns of unbalanced moments and unbalanced traction forces on the stability of horizontal T-structure bridge structures were revealed. Results indicated that under the proposed project conditions, structural displacement increased abruptly when unbalanced moments exceeded 25 600 kN · m or traction forces reached 6 600 kN, which caused significant stress concentration at spherical hinges, reducing the overturning stability factor below 1.00 and triggering structural overturning instability. Based on field measurement data and mechanical response analysis, the critical unbalanced moment and critical traction force for the rotating bridge structure were quantitatively determined to be 29 822.6 kN · m and 6 689.0 kN, respectively. The critical state criteria for structural anti-overturning instability was revealed, providing a scientific basis for the safe design and construction management of rotating bridges.

Keywords: rotating bridge; anti-overturning stability; unbalanced moment; critical analysis; numerical simulation; traction force