

山区多联装配式梁桥高墩偏位成因分析与纠偏施工技术研究

刘海宽^{1,2*}, 宋粉丽², 于品德²

¹郑州大学土木工程学院, 河南 郑州

²河南省交通科学技术研究院有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2025年4月9日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月12日

摘要

随着公路里程增长, 桥梁基础设施维护面临的挑战日益凸显, 尤其是西南山区。本文分析了高墩偏位的多种影响因素, 如外荷载、温度、支座安装、桥下填土及初始几何缺陷等。结合实际桥梁案例分析表明, 支座安装不当是导致桥墩偏位的关键原因。提出以主梁提供反力的墩柱纠偏新方法, 详细阐述反力架安装与滑动面建立、顶推计算及施工控制等技术要点。依托实际桥梁, 对偏位的桥墩实施纠偏, 并通过有限元模拟与现场监测, 对该纠偏方法进行验证。结果表明, 该方法有效提升纠偏效率与安全性, 控制精度高, 为解决桥墩纠偏难题提供了可靠方案, 对保障桥梁运营安全具有重要意义。

关键词

装配式梁桥, 高墩偏位, 主梁反力, 墩柱纠偏, 有限元模拟, 施工监测

Research on the Causes Analysis and Rectification Construction Technology of High Pier Deviation of Multi-Span Prefabricated Beam Bridges in Mountainous Areas

Haikuan Liu^{1,2*}, Fenli Song², Pinde Yu²

¹School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan

²Henan Transportation Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou Henan

*通讯作者。

文章引用: 刘海宽, 宋粉丽, 于品德. 山区多联装配式梁桥高墩偏位成因分析与纠偏施工技术研究[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1020-1034. DOI: 10.12677/hjce.2025.145110

Received: Apr. 9th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 12th, 2025

Abstract

With the increase in the mileage of highways, the challenges faced in the maintenance of bridge infrastructure have become increasingly prominent, especially in the mountainous areas of Southwest China. This paper analyzes various influencing factors of the deviation of high piers, such as external loads, temperature, bearing installation, filling under the bridge, and initial geometric defects. The analysis combined with actual bridge cases shows that improper bearing installation is the key cause of pier deviation. A new method for rectifying pier column deviation by using the main beam to provide reaction force is proposed, and the technical key points, such as the installation of the reaction frame, the establishment of the sliding surface, jacking force calculation, and construction control, are elaborated in detail. Relying on an actual bridge, the deviation of the piers is rectified, and the rectification method is verified through finite element simulation and on-site monitoring. The results show that this method can effectively improve the rectification efficiency and safety, with high control precision. It provides a reliable solution to the problem of pier rectification and is of great significance for ensuring the safe operation of bridges.

Keywords

Prefabricated Beam Bridge, Deviation of High Piers, Reaction Force of Main Beam, Rectifying Pier Column Deviation, Finite Element Simulation, Construction Monitoring

Copyright © 2025 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. 引言

中国西南地区地貌地质条件复杂,高山险滩遍布,为改善交通状况,道路建设修建了大量桥梁[1]。装配式梁桥因施工便捷、工程造价低等优势,成为公路常见桥型[2]-[4]。装配式桥梁上部结构的空心板桥、T梁桥、小箱梁各具特点,适用于不同的地形和地质条件。山区多联长跨桥梁为适应温度变化产生的变形,常采用分联设计,一般不超过200m设置一联,通过联端伸缩缝释放温度变形[5]-[7]。山区桥梁上部结构多采用30~50m跨径装配式T梁或箱梁。由于山区地形高差较大,桥墩多为高墩。墩高40m以下多采用柱式墩,墩高40~50m时,多采用刚度较大的实心薄壁墩,墩高大于50m时,一般采用空心薄壁墩或双肢薄壁墩[8]。受温度变化、汽车制动力、地质变化等因素影响,桥梁高墩易出现墩身倾斜或偏位等病害。偏位不仅会改变墩柱受力状态,降低其承载力,引发应力集中、不均匀沉降,还会致使伸缩缝失效,增加维护成本,严重时致桥墩失稳、倒塌,造成较大的社会影响和经济损失[9]-[13]。随着公路桥梁数量的增加和使用年限的增长,桥梁病害逐渐显现,为保证桥梁在设计使用年限内正常运行,除在设计 and 施工阶段进行理论和技术研究外,成桥后的定期检修、保养和维护工作也极为重要[14][15]。

近年来,针对桥墩偏位问题,国内外学者提出多种纠偏方法,并在实际工程中应用。按纠偏原理,现有方法可分为主动顶推法、卸载调整法、地基加固法和预应力加固法等[16]-[21]。主动顶推法通过施加外部顶推力强制纠正墩柱偏位,具有施工速度快、适用范围广的特点,但需精准计算顶推力与位移量,以防造成二次损伤。然而,在复杂山区桥梁高墩纠偏中,现有方法仍面临反力体系构建困难、施工安全风险高等难题。因此,针对山区高墩研发适应性强、安全性高的纠偏工法,具有重要工程意义。本文围

绕装配式梁桥高墩偏位问题,研究墩柱偏位产生原因和纠偏施工方法。具体内容包括:首先,展开了高墩偏位原因分析,从荷载因素、施工因素以及桥位地质等方面,结合具体案例,深入分析荷载和温度效应、支座安装不平、桥梁施工初始缺陷、桥下填土及滑坡等因素对高墩偏位的影响。然后,提出了一种以主梁提供反力的墩柱纠偏施工方法,对施工工艺中的滑动面建立、顶推力计算、监测指标、控制原则等关键技术展开研究。最后,依托某桥梁墩柱纠偏施工实例,采用有限元模拟进行施工过程仿真分析,确定关键部位应变及位移控制指标,组建监测系统,并通过分析监测数据,验证施工安全性与监测方法的可行性。

2. 桥梁高墩偏位的影响因素分析

2.1. 外荷载与温度的影响

桥梁运营期间,受车辆、风、地震等动态外荷载作用,易导致桥墩产生累积变形[22]。对于重载车辆频繁通行的桥梁,受持续较大冲击与震动影响,极易引发桥墩局部应力集中,进而诱发偏位。另外,活载分布不均或超载,也会打破桥墩受力平衡,加大偏移风险。温度变化促使桥梁结构热胀冷缩,若支座或伸缩缝设计不合理,桥跨结构自由变形受阻,便会产生额外荷载[23]。如夏季高温时,梁体伸长挤压桥墩;冬季低温时,收缩易拉裂支座连接部位。在这种长期反复作用下,桥墩易发生偏移。

2.2. 支座安装不当的影响

在桥梁建设的支座安装环节,任何细微偏差都可能引发一系列严重问题,对桥梁结构的稳定性构成威胁。当支座安装存在位置偏差时,将会导致结构受力状态偏离设计目标。同时,若施工人员对垫石标高把控不严,使得垫石实际标高与设计存在较大误差,这将直接导致支座在安装后无法处于水平状态。再加上钢板尺寸不符,无法与支座及垫石精准适配,这些因素相互影响,致使支座难以均匀地将上部结构传来的荷载传递至桥墩。在桥梁投入使用后,一旦支座出现脱空或半脱空状况,情况将变得更为严峻。此时,上部结构的反力无法均匀分散,而是高度集中于局部区域。这种不均匀的受力状态,使得桥墩各个部位所受应力差异显著,极易引发桥墩偏位。随着偏位程度的不断增大,桥墩的受力性能逐渐恶化,结构安全面临极大挑战。

2.3. 桥下填土与滑坡影响

在桥梁工程中,桥墩周边填土及滑坡对其稳定性影响重大[21][24]。若填土时未分层夯实,且排水不佳,土体含水量过高,孔隙水压力难消,就会出现固结沉降不一致的情况。不同区域土体沉降有差别,内部产生应力差,从而对桥墩产生侧向土压力。随着时间推移,压力不断累积,易导致墩身倾斜。软土地基区域的问题更为复杂。软土压缩性高、强度低、透水性差,填土后沉降大,沉降差异显著。这会在桥墩底部形成不均匀受力,易引发桥墩水平位移。当桥墩位于滑坡体范围内时,其风险更大。滑坡发生时,土体滑动产生强大推力,直接作用于桥墩基础。滑坡推力一般远超桥墩承载能力,更易导致桥墩基础位移、墩身偏位,极端情况下甚至造成桥墩结构断裂,桥梁垮塌,危及行人和车辆安全。

2.4. 初始几何缺陷的影响

在桥墩施工过程中,若质量把控不严,则极易引发严重问题。例如在放样环节,哪怕只是细微误差,都会使得墩柱的定位偏离设计位置[13]。模板安装工序中,一旦模板发生偏斜,墩柱在浇筑成型时,其外观形态与设计便会产生偏差,这将直接影响墩柱的垂直度。而混凝土浇筑时,若振捣不均匀,部分区域混凝土密实度不足,或者出现离析现象,在硬化后,墩柱各部分的强度与刚度就会出现差异。这些因素综合作用,导致墩柱的初始轴线与设计位置出现偏离。设计阶段若未充分考虑桥墩初始偏心,或材料非线性特性,结构在运营期可能因微小缺陷发展为明显偏移。初始偏位会改变桥墩屈曲临界荷载,降低整

体稳定性。

3. 某山区多联装配式梁桥高墩偏位检测与成因分析

3.1. 桥梁概况

桥梁左右分幅布置，上部结构均采用先简支后连续装配式预应力混凝土 T 梁。左幅桥跨布置为(4 × 30 + 4 × 30 + 4 × 30 + 4 × 30 + 4 × 30) m，共 6 联；右幅桥跨布置为(4 × 30 + 4 × 30 + 4 × 30 + 4 × 30 + 4 × 30 + 3 × 30) m，共 6 联。桥梁下部结构采用双柱墩、实体方墩配桩基础；0#台采用 U 型台配扩大基础，左幅 24#台、右幅 23#台分别采用承台分离式、桩柱式桥台配桩基础。桥梁全景照片见图 1，横断面布置见图 2。



Figure 1. Panoramic photo of the bridge
图 1. 桥梁全景照片

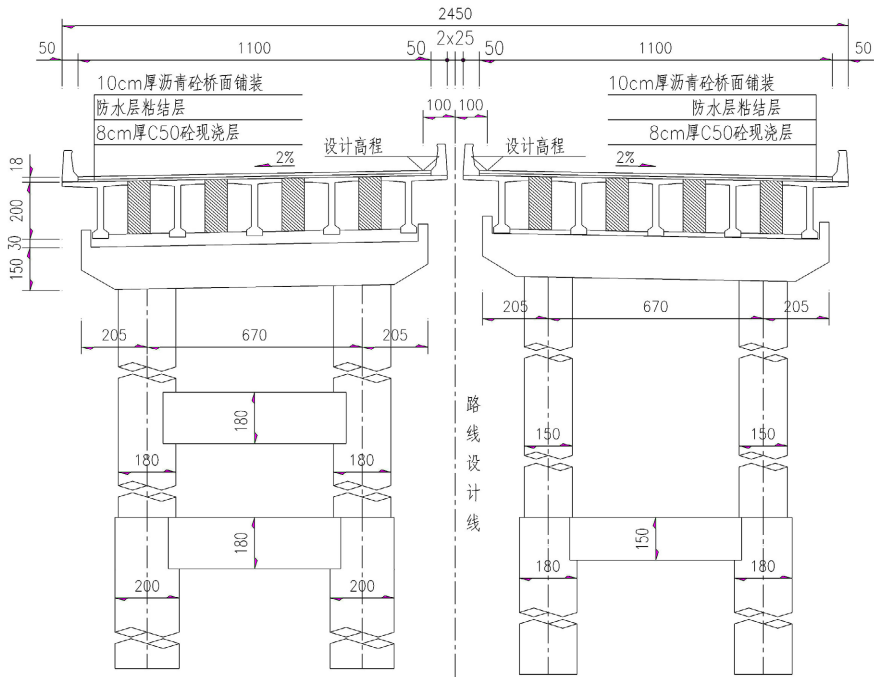


Figure 2. Cross-sectional diagram of the bridge (Unit: cm)
图 2. 桥梁横断面图(单位: cm)

本桥平面位于直线段、A = 380 右偏缓和曲线及 R = 1000 m 右偏圆曲线，纵断面位于 3.4% 的上坡段。桥面采用沥青混凝土铺装，桥台处伸缩缝型号为 D80 型梳齿板伸缩缝，其余墩顶伸缩缝型号为 D160 型梳齿板伸缩缝。全桥采用盆式橡胶支座。桥梁伸缩缝和支座照片分别如图 3 和图 4 所示。



(a) D80 型伸缩缝



(b) D160 型伸缩缝

Figure 3. Photo of the bridge expansion joints
图 3. 桥梁伸缩缝照片



(a) 单向活动支座



(b) 固定支座

Figure 4. Photo of the bridge bearing
图 4. 桥梁支座照片

3.2. 桥梁高墩偏位测量结果

在桥梁的日常巡查中发现部分桥墩存在倾斜偏位的可能，因此对桥梁高墩偏位情况进行了专项检查。如图 5 所示，采用高精度全站仪，基于免棱镜模式，通过三维坐标测量方法，对桥墩进行垂直度检测。定义纵桥向倾斜，向大桩号倾斜为正、小桩号倾斜为负；横桥向面向大桩号方向，左手侧倾斜为正，右手侧倾斜为负。

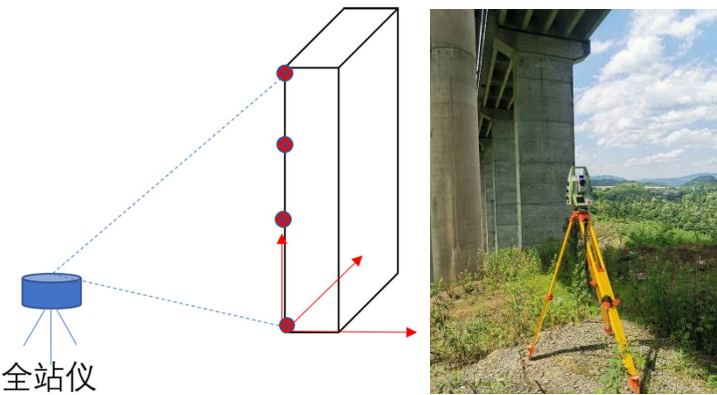


Figure 5. Diagram of pier deviation measurement
图 5. 桥墩偏位测量图示

左幅桥墩检测发现的主要问题有：(1) 5#墩、7#墩存在 9~13 cm 的纵向偏位，且均偏向大桩号方向，较为严重；22#墩中 22-1 墩柱偏位接近 10 cm，22-2 立柱偏位 1 cm；(2) 8#墩、9#墩和 19#墩存在 5 cm 左右的偏位，其余墩台偏位量较小；(3) 从测量数据来看，沿墩高方向，在系梁处偏位较为明显。右幅桥墩检测发现的主要问题有：(1) 4#墩、7#墩、12#、13#墩、15#墩和 17#墩存在 5 cm 左右偏位，其余墩台偏位较小；(2) 从测量数据来看，沿墩高方向，系梁处偏位较为明显，个别双柱墩存在一个立柱偏位较大，一个立柱偏位很小的状况。

现行公路桥涵施工技术规范[25]，对桥梁墩身偏位限定不得超过墩身高度的 0.1%，同时绝对数值不得大于 10 mm，以此确保施工过程中桥墩的垂直度满足要求。现行公路工程质量检验评定标准[26]，根据墩高度不同，在验收环节制定了详细标准：当桥墩高度不超过 5 m 时，垂直度偏差不得大于 5 mm；当桥墩高度处于 5 m 到 60 m 区间，偏差不得超过桥墩高度的 1/1000，且最大不超过 20 mm；当桥墩高度大于 60 m 时，偏差不得超过其高度的 1/3000，最大为 30 mm。对比规范要求，该桥部分桥墩垂直度严重超出允许值。

3.3. 引起高墩偏位的原因分析

3.3.1. 外荷载及温度影响分析

桥位所在地区为温热地区，最高温度取 34℃，最低温度取 -3℃ [27]。采用 MIDAS/Civil 有限元软件建立桥梁左幅第 2 联有限元模型进行分析。依据图纸确定桥梁尺寸，在软件中用梁单元模拟，按实际截面计算惯性矩等特性。混凝土、钢材等材料弹性模量、泊松比、密度和强度等力学参数按设计输入。活载根据设计荷载等级考虑车道或车辆荷载；风、温度等荷载则按设计施加。最后核查模型，检查几何、材料、边界、荷载等信息，进行初步分析，查看自振频率、振型等结果是否合理，对模型进行修正。

如图 6 所示，在设计荷载和整体升温作用下，梁体以 6#墩为中心向两侧伸长，4#墩侧伸长较大、8#伸长较小；4#墩侧梁体伸长 23.2 mm，8#墩侧梁体伸长 22.9 mm。如图 7 所示，在外荷载和整体降温作用下，以 6#墩为中心对称缩短，4#墩侧梁体缩短 26.2 mm，8#墩侧梁体缩短 23.8 mm。有限元分析结果表明，外荷载和梁体整体升降温引起的纵向变形较小，且变形一般可在荷载消失或温度恢复后消失。但是，如果桥梁纵坡较大，梁底支座安装不水平时，支座受偏压作用类似“楔形块”，升温桥梁易向上坡方向变形伸长，降温后梁体收缩导致“楔形块”逐渐楔紧，不易恢复变形。长时间温度周期作用将导致桥梁高墩的累计位移。

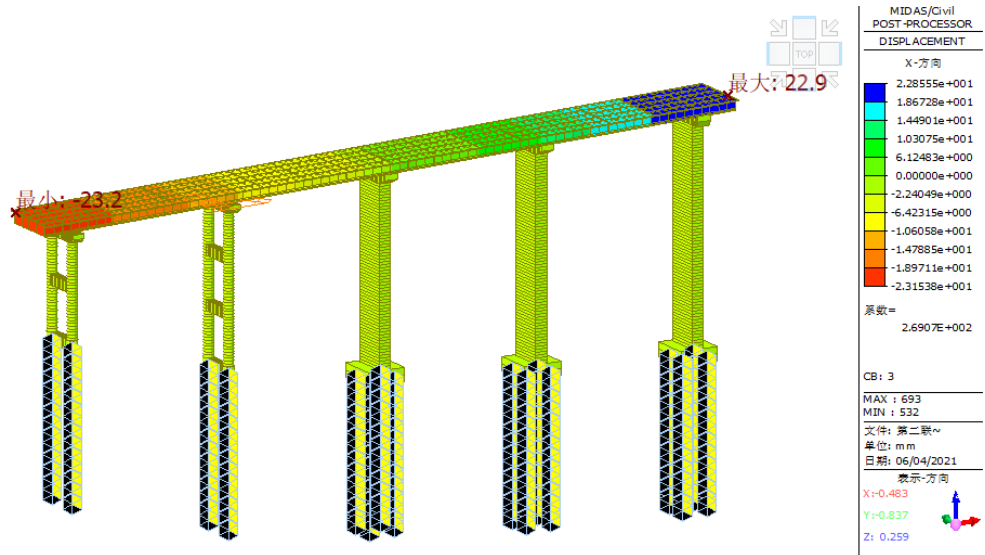


Figure 6. Longitudinal deformation cloud diagram of the bridge after temperature rise
图 6. 升温后桥梁纵向变形云图

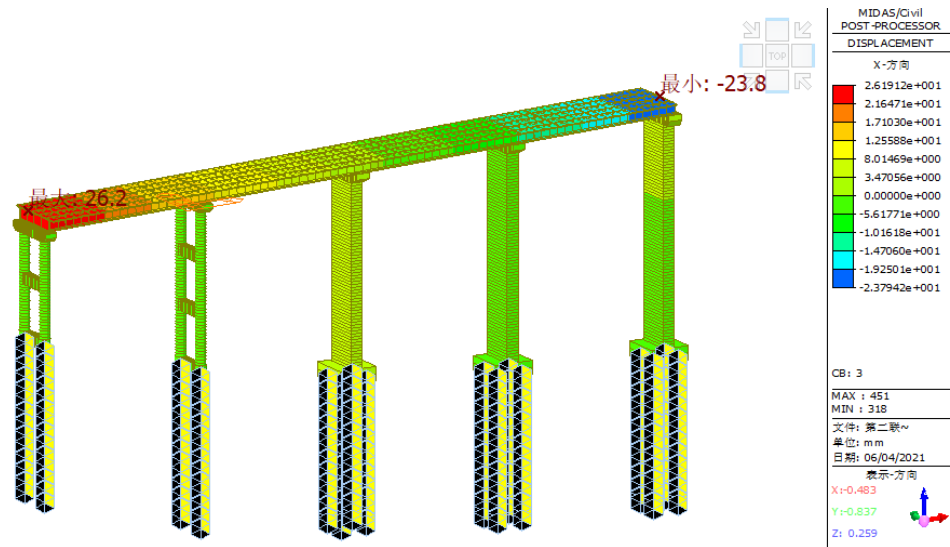


Figure 7. Longitudinal deformation cloud diagram of the bridge after temperature drop
图 7. 降温后桥梁纵向变形云图

3.3.2. 支座安装不当的影响分析

如果支座合理布置，且梁底楔形块安装正确，墩顶便能实现理想竖向受力，避免墩顶偏位。如果墩顶支座未按要求设置楔形块，则无法达到均匀受力状态。此时，支座顶面与梁底接触不均匀，支座顶面无法全面受力，处于偏压状态。墩柱会因局部受力，在水平或斜向力作用下产生水平位移，造成偏位。如图 8 所示，由于支座安装不当，主梁与支座顶面仅部分接触，导致支座受力不均产生斜向力 F ，该力在 x 、 y 两个方向产生分力，其中水平分力 F_x 会推动墩顶，导致墩顶偏位。受温度变化影响，梁体热胀冷缩，升温时伸长，降温时缩短。理想状态下，桥墩随梁体伸缩产生偏移，温度恢复时偏移恢复。但实际中，墩柱受梁体自重影响，偏移值无法完全复原，存在残余变形。随着残余值不断累积，最终造成墩顶较大累计偏位。

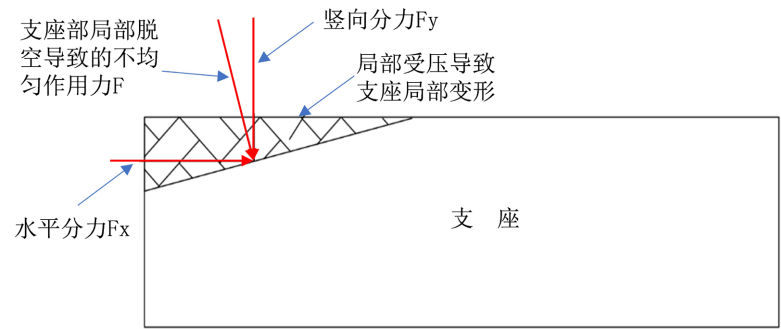


Figure 8. Diagram of uneven force bearing of bridge bearing
图 8. 桥梁支座不均匀受力图示

现场对发生偏位的桥墩支座检查，发现支座横桥向安装位置并不在一条直线上，部分支座安装位置靠近盖梁边缘，部分支座顶板中心与垫石中心不重合，导致上部结构荷载产生额外偏心，并改变了支座容许滑移量。支座顶板安装不水平，导致支座滑动面倾斜。这是因为梁底预埋钢板未通过楔形块实现水平安装，而是直接预埋于梁底。在支座安装时又未进行调平，将支座上钢板直接与梁底预埋钢板焊接，进一步加剧了支座滑动面的不水平状况。这种安装方式不仅限制了支座的自由滑动，还易引发累计位移。

该桥过渡墩处支座纵向均不同程度向大桩号变形，可能与此有关。

3.3.3. 桥下填土或滑坡的影响分析

如图 9 所示，桥梁建成后，在桥梁第 2 联桥下约 120 m 范围内进行了弃土填方(具体填筑时间不详)，弃土可能对桥墩产生侧向压力和地基附加应力，引起桥墩倾斜。堆土荷载对桥梁墩台的影响包括两个方面：一是堆土荷载对桥墩桩基础产生侧向压力，致使桥墩桩基础产生内力与变形，当桩体所受侧向压力大于桩侧土体抗力时，桩侧土体受到破坏，导致桥墩桩基倾斜；二是地表弃土较为松散，在受到雨水，河流冲刷之后，易产生滑坡，滑动产生的推力作用在桥墩桩基础上，加上土体的侧向压力作用，对桥墩桩基础的受力与变形产生进一步影响。



Figure 9. Diagram of the filling soil range under the bridge
图 9. 桥下填土范围图示

为了分析左幅第二联桥下填土对墩身偏位产生的影响，采用 MIDAS/Civil 有限元软件对桥梁进行计算分析。模型考虑桩土之间的相互作用，按照弹性地基梁理论“M”法计算土弹簧刚度系数。如图 10、图 11 所示，在堆土荷载和恒载作用下，5#墩纵向最大位移为 16.9 mm，横向最大位移为 3.9 mm。与实测 5#墩纵向最大偏位 103.3 mm 相比，堆土附加荷载效应引起的偏位较小，且土体卸载后墩身未见明显复位。因此，可以判断桥下填土或填土引起的滑坡并非引发桥墩偏位的主要原因。

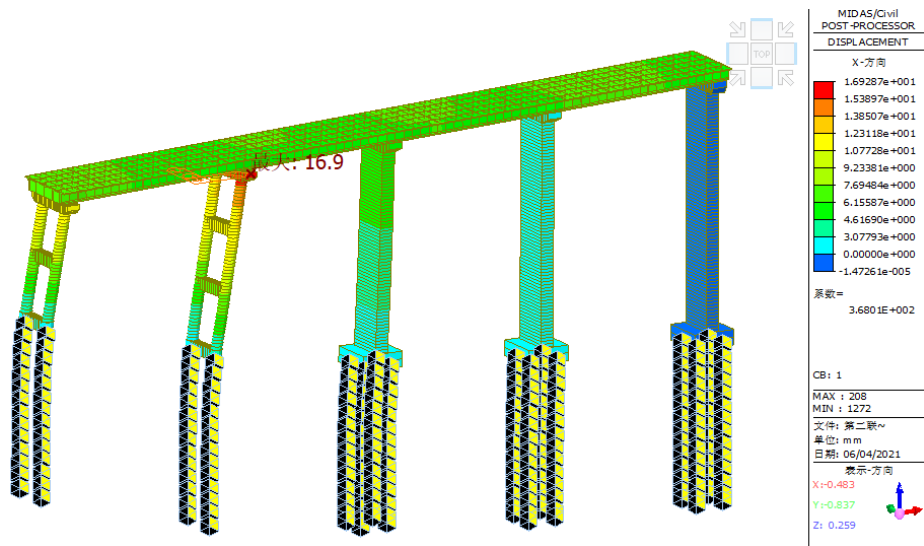


Figure 10. Longitudinal deformation cloud diagram of the bridge
图 10. 纵桥向变形云图

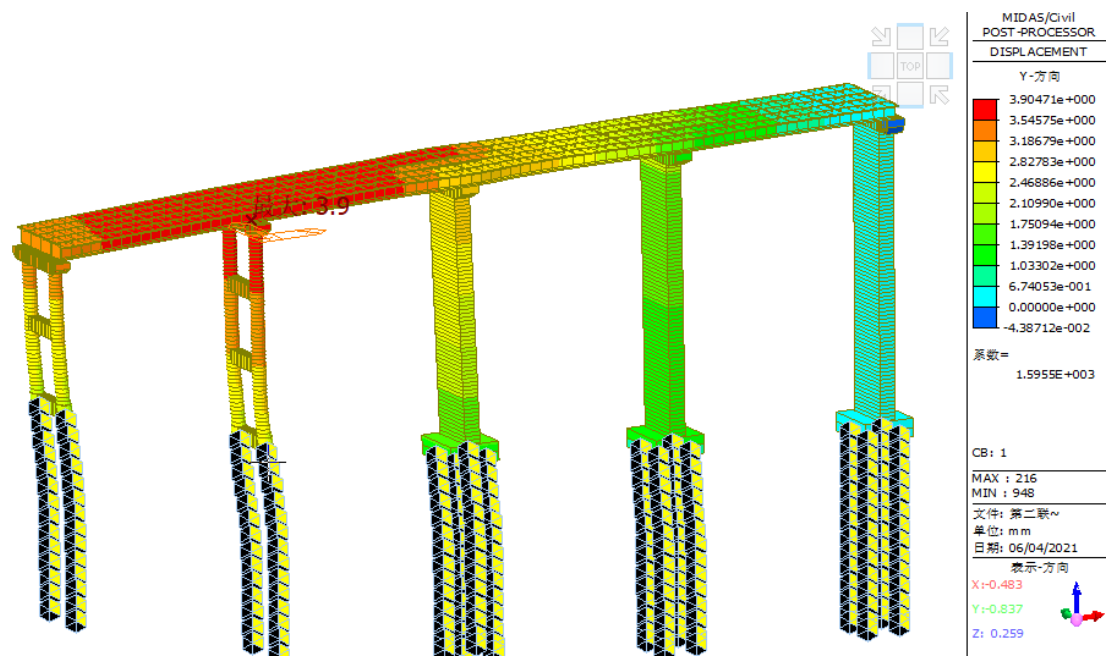


Figure 11. Transverse deformation cloud diagram of the bridge
图 11. 横桥向变形云图

3.3.4. 初始几何缺陷的影响分析

桥墩的初始几何缺陷通常表现为墩身施工过程中的初偏位或初弯曲，这种偏差不是规律性的，往往表现为随机性。从该桥梁桥墩测量结果来看，部分桥墩存在初始施工偏差，如左幅 5#墩、7#墩，也有局部偏位，且局部偏位无明显规律。从测量数据的绝对值来看，这种随机偏差的数值均较小，且不超过规范允许值。因此，对于该桥而言，初始几何缺陷并非造成墩身过大偏位的主要原因。

4. 以主梁提供反力的墩柱纠偏施工方法及应用研究

4.1. 桥梁墩柱纠偏施工方法概述

目前，桥墩纠偏方法主要包括外力纠偏法、基底掏土纠偏法、堆载或卸载纠偏法等[18]-[20][28]-[31]。外力纠偏法需要在倾斜结构附近恰当位置设置锚桩、锚碇等抗拔结构，借助支承千斤顶或卷扬机对结构施加作用力，以此促使倾斜的桥墩复位，该方法对于施工场地要求较高，需提前勘探并精准设置抗拔结构，过程较为复杂。基底掏土纠偏法适用于均质黏土或砂土浅埋基础的纠偏工作，施工人员可采用人工挖掘或水力冲掏的方式，不过其适用地质条件较为单一，遇到复杂地质便难以发挥作用。堆载或卸载纠偏法适用于软弱地基且纠偏量不大的浅埋基础，通过调整基础周边荷载实现纠偏，但是对纠偏量的把控要求极高，若操作不当易引发新的问题。

外力纠偏法常采用拖拽施工工艺，即以桥梁墩台基础或专门设置的锚桩作为反力支撑点，利用钢丝绳作为加力载体，借助卷扬机或者手拉葫芦等设备施加拉力，拉动墩顶产生位移从而实现纠偏。此方法施工时，需要先依据桥墩的具体情况，包括偏位程度、结构特点等，确定纠偏方向与钢丝绳拖拽位置，而后搭设拖绳系统以保障稳定性与施力效果，在纠偏过程中还需不断调整拖绳的力量和方向。该方法虽具备施工操作简单、成本低廉的优势，但也存在纠偏效率低下、施工中安全风险比较高以及纠偏效果不稳定等明显缺点。总体而言，现有纠偏方法或是前期准备工作复杂，或是适用场景受限，又或是在施工效率、安全保障与最终效果方面存在不足，亟待进一步优化改进，以更好地应对桥墩纠偏这一工程难题。

4.2. 以主梁提供反力的纠偏方法

4.2.1. 实现方法概述

考虑到既有纠偏手段用于多联高墩桥梁时存在局限，本研究提出一种依托主梁提供反力的墩柱纠偏新方法。此方法借助主梁输出纵向反力，针对待纠偏的桥墩施加纵向顶推力，促使端梁出现相对位移，进而达成复位桥墩的目标。如图 12 所示，以 4 跨一联桥梁为示例，首先将桥梁联端位置伸缩缝填塞临时固定，然后通过安装于梁底的反力架提供反力。以主梁提供反力的墩柱纠偏施工法，通过梁体将反力传递给远处的固结墩和桥台，提升了操作安全和稳定性。与钢丝绳拖拽不同，它无需强制拉拽桥墩，避免了因强力位移引发的桥墩变形与意外事故。在施工效率与成本方面，该方法优势显著，能在短时间内完成顶推纠偏，降低施工成本。凭借梁体的反向支撑，纠偏控制精度和安全性大幅提高，有效规避墩身受损风险，克服了以往施工方法的不足。此外，该方法施工条件灵活，在现场作业时，对狭窄场地等复杂环境的适应能力强，不受空间限制。

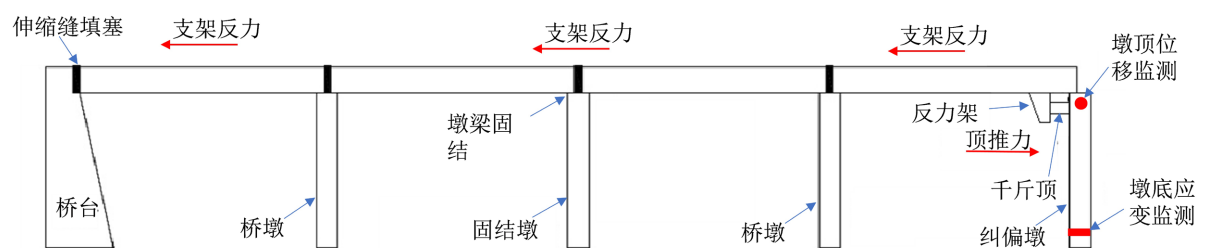


Figure 12. Diagram of deviation correction by providing reaction force from the main girder
图 12. 以主梁提供反力的纠偏图示

4.2.2. 反力架和滑动面的建立

以主梁提供反力的墩柱纠偏施工法需要在主梁上安装反力架，并在墩梁间构建滑动面。如图 13 所示，反力架作为主要受力与传力装置，是整个纠偏体系中的关键结构。将纵向水平千斤顶设置于反力架和盖梁之间，以盖梁侧面为受力点，借助主梁与固结墩的协同作用，推动桥梁墩柱顶推复位。因反力架需植筋安装于梁体下方，安装过程中需借助钢筋探测仪，仔细排查梁底板纵横向钢筋位置，防止与梁内钢筋发生冲突。

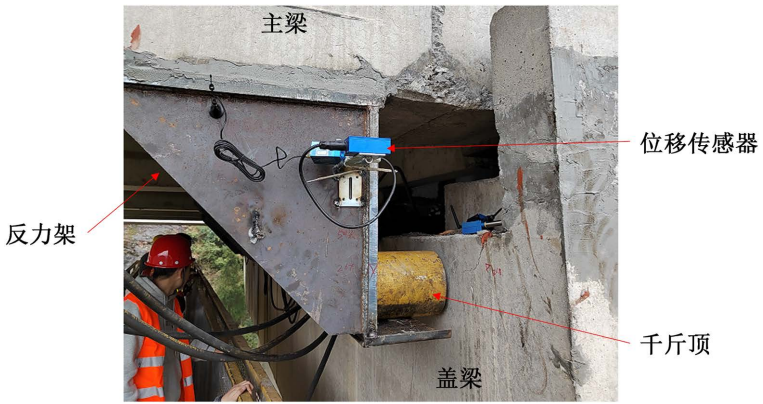


Figure 13. Photo of the installation of the reaction frame
图 13. 反力架安装照片

除了安装反力架，还需在原桥梁支座位置建立滑动面，以减小顶推纠偏时墩梁相对位移的摩擦阻力。

如图 14 所示, 可选用四氟滑板和钢板建立滑动面, 将其安装在支座垫石上, 通过竖向千斤顶将原支座承担的竖向力托换至滑动面上。滑动面高度按照维持原桥面高程的原则设定, 即与支座高度等同。滑动面的具体构造为: 底层是 45 mm 厚的下钢垫板, 接着涂抹硅油润滑剂, 再铺设 5 mm 厚的四氟滑板, 然后再次涂抹硅油润滑剂, 最上层为 45 mm 厚的上钢垫板。在墩柱纠偏完成后, 对桥梁原支座调平处理, 然后通过竖向千斤顶将主梁托换至桥梁支座并拆除滑动面。

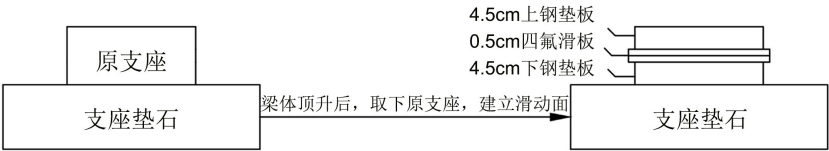


Figure 14. Diagram of the establishment of the sliding surface
图 14. 滑动面建立图示

4.2.3. 顶推计算分析与施工控制

顶推纠偏作业开展前, 首要工作是计算顶推力并选择合适吨位的顶推千斤顶, 确保能够克服滑动面的摩擦阻力。计算时, 考虑 1.5 倍的超荷载系数, 依据滑动面的摩擦试验选取合适的摩擦系数, 分别算出摩阻力 f 以及千斤顶能够输出的顶推力 F 。当千斤顶提供的推力 F 大于摩阻力 f 时, 即可推动结构进行纠偏。

纠偏顶推施工中结构受力呈动态变化, 施工前需借助有限元分析方法展开计算分析。实际操作时, 应依据结构的受力特性和设计要求确定合适的控制阈值, 在保障施工安全的前提下实现纠偏目标。同时, 充分考量施工中可能出现的意外及突发事件, 制定相应应急措施, 有效预防和应对潜在危险与事故。对于纠偏后发生较大反弹的墩柱, 考虑在墩梁之间设置限位措施。整个施工期间, 各类工程技术人员与现场施工人员需紧密配合, 严格依照控制阈值操作, 切实确保施工安全。

施工监测能够动态反映结构的受力和位移变化, 是纠偏反馈控制的重要手段。纠偏施工过程中, 墩柱顶端位移与墩底应变是关键监测指标。监测墩顶位移, 可判断阶段施工中墩顶是否达设计预设位置; 监测墩底应变, 能掌握施工中墩底的应变变化, 避免桥墩开裂风险。此外, 主梁提供的支反力会反向作用于其他联梁体与桥墩, 因此, 对提供反力的梁体和桥墩进行监测, 也是一项重要内容。

4.3. 以主梁提供反力的纠偏案例分析

4.3.1. 桥梁概况及桥墩偏位



Figure 15. A highway bridge in a mountainous area of Guizhou Province
图 15. 贵州某山区高速公路桥梁

如图 15 所示, 某山区高速桥梁位于贵州省某高速公路上, 上部结构采用 $(5 \times 30 + 5 \times 30 + 5 \times 30)$ m 预

应力混凝土装配式 T 梁, 先简支后连续。桥梁共有三联, 0#、15#桥台设 D80 伸缩缝, 5#、10#桥墩设 D160 伸缩缝; 0#、15#桥台以及 5#、10#桥墩处设 GCPZ (II)-1500 型盆式橡胶支座, 1-4#墩、14#桥墩设 GCPZ (II)-2500 型盆式橡胶支座, 其余桥墩均为墩梁固接。下部构造桥墩为双柱墩配桩基础, 桥台是 U 型桥台配扩大基础。

该桥梁左幅 5#墩和 10#墩在 2021 年的偏位测量结果显示:

(1) 5#墩的 5-1#墩柱纵桥向偏位值为 73 mm, 相较于 2020 年的 41 mm 有明显上升; 5-2#墩柱纵桥向偏位值变为 58 mm, 较 2020 年的 34 mm 同样呈上升趋势, 整体上 5#桥墩偏位值持续增大。

(2) 10#墩的 10-1#墩柱纵桥向偏位值为-110 mm; 10-2#墩柱纵桥向偏位值为-155 mm。桥梁 5#墩和 10#墩的纵桥向偏位远超规范允许值, 且有持续发展的趋势。因此, 为了保证桥梁的运营安全, 需要对桥墩采用纠偏并采取偏位控制措施。

4.3.2. 桥墩纠偏实施方案

采用以主梁提供反力的纠偏方法对 5#、10#桥墩进行纠偏, 实施梁体顶升、滑动面建立以及桥墩顶推纠偏操作, 同时密切观察墩身偏位的恢复状况。具体步骤如下:

(1) 反力架安装: 在 5#墩、10#墩处 T 梁底位置安装反力架, 采用 8.8 级 M16 × 240 mm 化学锚栓固定于梁底, 每个反力架植入 8 根锚栓。5#墩小桩号侧反力架纵向与盖梁相距 6 cm, 大桩号侧反力架纵向距盖梁为 19 cm。10#桥墩小桩号侧反力架纵向与盖梁相距 14 cm, 大桩号侧反力架纵向距盖梁为 11 cm。

(2) 滑动面建立: 在 5#墩、10#墩顶安装竖向千斤顶, 采用四氟滑板和钢支撑建立滑动面, 每个支座位置对应安装一个滑动装置, 然后将梁端顶起将主梁托换至滑动面上。

(3) 梁端和伸缩缝顶紧: 桥梁上部结构是预应力混凝土 T 梁, 为了在纵桥能够有效传递顶推力, 将两跨梁之间的间隙用钢板填塞挤紧, 在操作时需留意避开 T 梁的普通钢筋和预应力钢束。

(4) 试顶推调试: 将纠偏顶推千斤顶安装在反力架上, 连接油管和泵站控制柜, 同时安装结构位移和受力监测传感器, 进行试顶操作。通过位移传感器监测各千斤顶的同步性, 并进行调试。

(5) 分级顶推纠偏: 根据设计纠偏控制阈值, 分级进行纠偏顶推。根据设计要求, 5#桥墩纠偏控制值为 30 mm~35 mm, 纠偏顶推分 4 级进行; 10#桥墩纠偏控制值为 50 mm~55 mm, 纠偏顶推分 5 级进行。每一级加载完成后, 持续监测数据变化情况, 当数据稳定后, 进行下一级顶推, 直至达到纠偏控制目标。

(6) 安装限位装置: 在 5#墩、10#墩纠偏完成后, 按设计要求在墩梁之间安装限位挡块。

4.3.3. 桥墩纠偏监测结果分析

在 5#墩顶推纠偏过程中, 墩顶位移监测结果见下表 1。从表中可以看出, 顶推过程中 5#墩顶两侧位移基本一致, 最大顶推位纠偏移量为 31.0 mm, 桥墩纠偏结果满足设计要求。5#墩应变监测结果如表 2, 纠偏过程中 5#墩底压应变增量最大为-119.0 $\mu\epsilon$, 拉应变增量为 92.4 $\mu\epsilon$, 均不超过最大控制 126 $\mu\epsilon$ 。施工过程中墩底未发现裂缝, 纠偏过程未对桥墩产生不利影响, 结构受力安全。

Table 1. The displacement monitoring results of Pier No. 5
表 1. 5#墩位移监测结果

顶推分级	测点位移(mm)		实际顶推力(kN)
	5-1#	5-2#	
第 1 级	6.2	6.0	460
第 2 级	18.2	18.8	540
第 3 级	27.5	26.8	580
第 4 级	31.0	30.8	640

Table 2. The strain monitoring results of Pier No. 5
表 2. 5#墩应变监测结果

顶推分级	测点应变增量($\mu\epsilon$) (正值为拉, 负值为压)			
	5-1#	5-2#	5-3#	5-4#
第 1 级	21.0	23.3	-20.3	-19.2
第 2 级	53.4	59.1	-59.8	-64.0
第 3 级	78.0	80.2	-99.8	-103.6
第 4 级	92.4	92.0	-115.0	-119.0

在 10#墩顶推纠偏过程中, 墩顶位移监测结果见下表 3。从表中可以看出, 实际顶推力与理论计算基本一致, 顶推过程中 10#墩顶两侧位移基本一致, 最大顶推位纠偏量为 54.0 mm, 桥墩纠偏结果满足设计要求。10#墩应变监测结果如表 4, 纠偏过程中 5#墩墩底压应变增量最大为-101.0 $\mu\epsilon$, 拉应变增量为 79.6 $\mu\epsilon$, 均不超过最大控制 130 $\mu\epsilon$ 。施工过程中墩底未发现裂缝, 纠偏过程未对桥墩产生不利影响, 结构受力安全。

Table 3. The displacement monitoring results of Pier No. 10
表 3. 10#墩位移监测结果

顶推分级	测点位移(mm)		实际顶推力(kN)
	10-1#	10-2#	
第 1 级	11.1	8.8	450
第 2 级	20.8	18.5	480
第 3 级	34.8	33.6	520
第 4 级	46.2	46.8	560
第 5 级	52.5	54.0	600

Table 4. The strain monitoring results of Pier No. 10
表 4. 10#墩应变监测结果

顶推分级	测点应变增量($\mu\epsilon$) (正值为拉, 负值为压)			
	10-1#	10-2#	10-3#	10-4#
第 1 级	-12.1	-8.0	10.1	10.9
第 2 级	-23.0	-19.2	21.2	22.8
第 3 级	-34.2	-39.2	39.8	45.0
第 4 级	-60.2	-67.8	55.3	59.2
第 5 级	-92.1	-101.0	75.8	79.6

5. 结论

(1) 外荷载、温度变化、支座安装不当、桥下填土或滑坡以及初始几何缺陷等, 均是导致桥梁高墩偏位的关键因素。虽然温度作用产生的纵向变形在理想状态下可恢复, 但实际中若梁底支座安装不水平, 会导致累计位移; 支座安装偏差致使上部构造荷载偏心、滑动面不水平, 限制支座自由滑动并引发偏位; 桥下填土或滑坡虽在部分案例中并非主因, 但仍会对桥墩受力变形产生影响。

(2) 本文提出的以主梁提供反力的墩柱纠偏方法,与传统纠偏手段相比,具有明显优势。其利用主梁提供纵向反力,并最终传给桥梁墩台,避免了对桥墩的强制拉拽,降低施工安全风险。该方法施工效率高、成本低,且能在复杂环境下灵活作业,有效克服现有纠偏方法的局限。

(3) 在施工工艺方面,安装反力架和建立滑动面是关键步骤。通过合理设置反力架、精确安装滑动面,能确保顶推纠偏顺利进行。顶推计算与施工控制中,考虑 1.5 倍超荷载系数、依据摩擦试验选取滑动摩擦系数计算顶推力,并利用有限元分析确定控制阈值,结合施工监测保障了施工安全与纠偏效果。

(4) 依托某山区高速桥梁 5#墩和 10#墩的纠偏案例,该方法在实际应用中取得了良好效果。纠偏后桥墩顶部位移和墩底应变均满足设计要求,墩底未出现裂缝,结构受力安全,验证了以主梁提供反力的墩柱纠偏方法在实际工程中的可行性与有效性。

参考文献

- [1] 马健,熊江东,苏官林,等.考虑不确定性的山区中小跨径桥梁抗震性能分析[J].科学技术与工程,2025,25(6): 2564-2577.
- [2] 郭洁,赵安,张悦杉.装配式混凝土 T 梁桥荷载横向分布系数预测[J].公路交通科技,2023,40(S2): 122-128.
- [3] 韩浩.中小跨径装配式钢混组合梁桥设计与快速建造关键技术研究[D]:[硕士学位论文].石家庄:石家庄铁道大学,2024.
- [4] 黄哲隽.山区高速公路装配式桥梁构件预制拼装技术[J].西部交通科技,2024(4): 192-194.
- [5] 许延祺,赵洁.山区高墩桥梁上部结构选型讨论[J].公路交通技术,2025,41(1): 110-117.
- [6] 胡承泽,罗冰,高洪波,等.装配式桥梁顶升调坡关键技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(12): 135-139, 161.
- [7] 韩雨,王开拓.山区大跨径桥梁细部结构设计及受力分析[J].科学技术创新,2024(18): 109-112.
- [8] Jin, L., Fu, J., Liang, J. and Liu, Y. (2025) Dynamic Response Analysis of a Long-Span Bridge with Thin-Walled High Piers in Valley Terrain under Combined Wind and Seismic Effects. *Thin-Walled Structures*, **212**, 113207. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113207>
- [9] 周帅伟.山区桥梁墩柱纠偏施工监测及控制研究[D]:[硕士学位论文].郑州:华北水利水电大学,2023.
- [10] 沈怀山.施工工程对既有桥墩的偏位影响及其影响因素研究[D]:[硕士学位论文].西安:长安大学,2024.
- [11] 夏宏宇,张正琦,程高,等.初始偏位梁式桥墩柱力学性能分析[J].公路工程,2021,46(1): 5-11, 28.
- [12] 马伟,林志春.堆载作用下的桥墩偏位分析及安全评估[J].建筑结构,2022,52(S2): 2635-2641.
- [13] 李鹏飞,陶小委.施工偏位对预应力连续梁桥墩身承载力的影响分析[J].河南科技,2023,42(3): 86-89.
- [14] Bencardino, F. and Cascardi, A. (2024) Revitalizing an Existing Reinforced Concrete Bridge: Deficiencies, Repair Techniques and the Role of FRPs. *Procedia Structural Integrity*, **62**, 972-982. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.130>
- [15] Gautam, D. and Rupakhety, R. (2024) Nonlinear Tree Based Regression Ensemble Modeling for Repair Cost Prediction in Earthquake Damaged RC Bridges. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **187**, Article 108947. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108947>
- [16] 周钧.连续曲线桥梁偏位成因分析及纠偏施工关键技术[D]:[硕士学位论文].郑州:郑州大学,2020.
- [17] Shen, B., Mao, D., Ding, Y., Wang, L. and Li, Z. (2023) A Numerical Analysis of Inclination and Rectification of Ramp-Bridge Piers Adjacent to Surcharge Load in Soft Clay Area. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 9614. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36737-6>
- [18] 闫生龙,姜玉刚.桥墩顶推纠偏技术在连续梁桥中的运用[J].工程建设与设计,2019(2): 106-107.
- [19] 徐承浩.高边坡条件下桥墩纠偏及加固技术研究[D]:[硕士学位论文].重庆:重庆交通大学,2019.
- [20] 王佳莲.掏土纠偏在混合结构中的应用研究[D]:[硕士学位论文].南京:东南大学,2019.
- [21] 程其瑜,邓泽城.基于填土堆载引起桥墩偏位的专项检测和仿真计算分析[J].中外公路,2019,39(6): 77-80.
- [22] Editorial Department of China Journal of Highway and Transport (2024) Review on China's Bridge Engineering Research: 2024. *China Journal of Highway and Transport*, **37**, 1-160.
- [23] 孙江波.混凝土桥梁温度裂缝的原因及控制分析[J].工程建设与设计,2025(5): 187-189.

- [24] 陈志铃. 三峡库区岸坡变形滑坡致损桥梁典型病害与综合加固方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2022
- [25] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T 3650-2020 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [26] 中华人民共和国交通运输部. JTG F80/1-2017 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [27] 中华人民共和国交通运输部. JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [28] 王景山. 桥梁纠偏复位控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2018.
- [29] 侍刚, 伍贤智. 某桥桥墩桩基偏位纠偏方案设计与实施[J]. 桥梁建设, 2015, 45(1): 97-102.
- [30] 徐飞, 潘梦. 连续弯桥墩柱纠偏技术研究[J]. 中外公路, 2015, 35(2): 147-150.
- [31] 张小兵. 黄土地区建筑掏土纠倾加固机理与工程应用研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东建筑大学, 2023.