

独柱墩高架桥抗倾覆加固技术研究

李红鸽¹, 吴志文¹, 贾铂杰², 滕仁栋³, 李南南⁴

- (1. 石家庄市道桥设施管护中心, 石家庄 050019; 2. 北京中铁装饰工程有限公司, 北京 100040;
3. 河北省建筑科学研究院有限公司, 石家庄 050021;
4. 石家庄市道桥建设总公司综合维护管理所, 石家庄 050091)

摘要: 为了提升独柱墩结构桥梁的抗倾覆安全水平, 解决其在运营阶段频繁发生倾覆事故、抗倾覆稳定性不足的关键工程难题, 降低事故引发的重大经济损失与人员伤亡风险。以三跨独柱墩连续梁桥这一典型结构形式为研究对象。通过有限元软件建立精细化数值模型, 模拟极端偏载工况 (单车超载 200%) 获取加固前支座变形及箱梁转角数据, 同时提出多种加固方案, 通过模型计算分析加固后相关参数的变化规律, 系统验证各方案的可行性、实操性及适用性。结果表明, 辅助墩与联端抗拉装置联合加固方案效果最优, 具备 2.59 倍安全储备, 可从根本上解决独柱墩连续梁桥在极端偏载作用下抗倾覆稳定性不足的问题。研究结果可为同类在役独柱墩连续梁桥的抗倾覆稳定性研究及加固工程设计、施工提供可靠的理论依据与技术支持。

关键词: 独柱墩连续梁桥; 抗倾覆稳定性; 有限元模拟; 加固方案; 极端偏载

中图分类号: U445.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 04-0134-10

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.020

Research on Anti-overturning Reinforcement Technology of Single-pillar Pier of Viaduct Bridge

LI Hongge¹, WU Zhiwen¹, JIA Bojie², TENG Rendong³, LI Nannan⁴

- (1. Shijiazhuang Road & Bridge Facilities Management and Maintenance Center, Shijiazhuang 050019, China;
2. Beijing China Railway Decoration Engineering Co., Ltd., Beijing 100040, China;
3. Hebei Academy of Building Research Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China;
4. Comprehensive Maintenance Management Office of Shijiazhuang Road & Bridge Construction Corporation, Shijiazhuang 050091, China)

Abstract: In order to improve the anti-overturning safety level of single-column pier structural bridges, solve the key engineering problems of frequent overturning accidents and insufficient anti-overturning stability in the operation stage, and achieve the goal of reducing the risk of major economic losses and casualties caused by accidents. The specific research is carried out in the typical structural form of three-span single-column pier continuous beam bridge. Through the finite element software, a refined numerical model is established to simulate the extreme partial load condition (200 % overload of single

项目来源: 2020 年住房和城乡建设部科学技术计划立项项目 (编号 2020-K-148)。

作者简介: 李红鸽 (1971—), 女, 硕士, 正高级工程师, 研究方向: 市政桥梁养护管理。

通信作者: 滕仁栋 (1983—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向: 结构加固改造。

收稿日期: 2026-03-19

vehicle), collect the data of bearing deformation and box girder rotation angle before reinforcement, and put forward a variety of reinforcement schemes. The variation law of relevant parameters after reinforcement is analyzed by model calculation, and the feasibility, practicality and optimal applicability of each scheme are systematically verified. The research shows that the combined reinforcement scheme of auxiliary pier and joint end tensile device has the best effect, with 2.59 times safety reserve, which can fundamentally solve the problem of insufficient anti-overturning stability of single-column pier continuous beam bridge under extreme eccentric load. The research results can provide reliable theoretical basis and technical support for the anti-overturning stability research and reinforcement engineering design and construction of similar in-service single-column pier continuous girder bridges.

Key words: single column pier continuous beam bridge; anti-overturning stability; finite element simulation; reinforcement scheme; extreme partial load

0 引言

独柱墩桥梁凭借造型简洁、桥下空间利用率高、施工便捷等优势,在城市高架桥、互通立交桥等交通枢纽工程中得到广泛应用。近年来,因极端偏载、超载问题导致的独柱墩桥梁倾覆事故频发,造成严重损失。因此,开展独柱墩桥梁抗倾覆相关研究,对解决工程实际难题、保障桥梁安全运营具有重要的理论意义与工程实践价值。

在独柱墩桥梁抗倾覆稳定性研究领域,诸多学者已开展系统性研究并取得研究成果。彭卫兵等^[1]系统总结了独柱墩梁桥倾覆过程中的4种潜在破坏模式,建立了适用于工程实践的独柱墩梁桥抗倾覆实用计算方法,为该类桥梁的抗倾覆验算提供了重要理论参考;孙士尧等^[2]通过对比随机性与确定性分析模型,发现基于随机性分析模型计算得到的抗倾覆稳定性系数更贴合工程实际,可更精准地评估独柱墩梁桥的抗倾覆性能及安全储备;庄冬利^[3]的研究指出,桥梁设计过程中需合理确定横向整体倾覆稳定系数,避免横向整体倾覆失稳先于竖向强度破坏发生;宫亚峰等^[4]针对三跨独柱曲线连续箱梁桥的研究表明,当中墩支座连线作为倾覆轴时,桥梁的抗倾覆稳定系数最小,为该类桥梁的倾覆轴识别提供了理论依据;李盼到等^[5]提出,在计算独柱墩桥梁倾覆效应时,应将汽车荷载加载总量作为主要控制指标,进一步完善了独柱墩桥梁抗倾覆荷载计算体系;叶鹏飞等^[6]以最不利倾覆轴为前提,计算了不同曲率半径下独柱墩结构的自重抗倾覆安全系数,发现其随曲率半径增大呈先减小后增大的变化趋势;黄书考等^[7]重点研究了独柱墩梁桥抗倾覆验

算的两种核心方法——支座反力法与稳定系数法,明确了两种方法的适用场景与计算要点。此外,在桥梁极限承载力及加固技术研究方面,李勇等^[8]通过实桥破坏试验发现,运营多年且存在典型病害、开裂显著的T梁桥,其真实极限承载力远高于理论计算值及常规试验评定值;栗勇等^[9]的研究表明,在边墩设置抗倾覆构造措施,相较于中墩加固,更能有效提高结构的横向倾覆稳定性;甘世泽^[10]指出,在保证桥梁结构合理设计的前提下,适当增大支承间距可显著提升桥梁的抗倾覆稳定性。在加固方案实践方面,刘国权^[11]通过对旧桥抗倾覆稳定性验算,提出了墩顶布置钢抱箍斜向支撑体系、增设钢盖梁及支座系统的综合加固方案;龙胜^[12]构建了独柱墩桥梁抗倾覆性能评估模型,可准确评估加固后在役独柱墩桥梁的抗倾覆能力;彭松^[13]采用增设钢盖梁的方法对独柱墩桥进行加固,加固后桥梁抗倾覆能力较加固前理论值提高1.91倍;张志成^[14]提出设置钢盖梁、用墩梁固结替换单向支座两种加固方法,均能有效提升桥墩抗倾覆性能;陶戴邦^[15]基于抗拉支座结构模型,提出采用增设弹性索的方式对独柱墩桥梁进行加固;刘鸿博等^[16]验证了“钢结构横向联系”这一柔性构造作为墩间联系的合理性。这些研究成果从不同角度为独柱墩桥梁抗倾覆稳定性研究及加固实践提供了重要的理论与技术支撑。

现有研究多数侧重于独柱墩桥梁抗倾覆稳定性的理论分析与单一加固方法探讨,鲜有研究针对典型在役独柱墩连续梁桥进行精细化数值模拟及多加固方案对比验证并探究极端偏载工况下加固方案的可行性、实操性及最优适用性。针对上述研究短板,

道桥技术

以三跨独柱墩连续梁桥结构为研究对象,通过有限元软件构建精细化数值模型模拟极端偏载工况,提出多种抗倾覆加固方案,通过有限元计算分析加固后结构力学响应规律,系统验证各方案综合性能并确定最优方案,为同类在役独柱墩连续梁桥抗倾覆加固工程提供具体理论依据与技术支持。

1 模型建立

1.1 桥梁基本参数

采用有限元软件建立模型,以三跨独柱墩连续梁桥为研究对象,桥梁布置为 3×20 m,桥面全宽 8.76 m,横向布置为 0.63 m (防撞护栏) + 7.5 m (机动车道) + 0.63 m (防撞护栏),梁高为 1.2 m 的单箱单室箱梁截面。梁体采用 C50 混凝土,其弹性模量 $E_c = 3.45 \times 10^4$ MPa,泊松比 0.2,容重为 25 kN/m^3 。建模时,不考虑梁体截面的翘曲和畸变,支座与主梁之间采用弹性连接中的刚性,支座的边界情况采用弹性连接中的一般连接,通过设置弹性刚度来模拟。对于直线型桥来说,倾覆轴线的选择为联端外侧支座的连线。桥梁基本参数如图 1 所示。

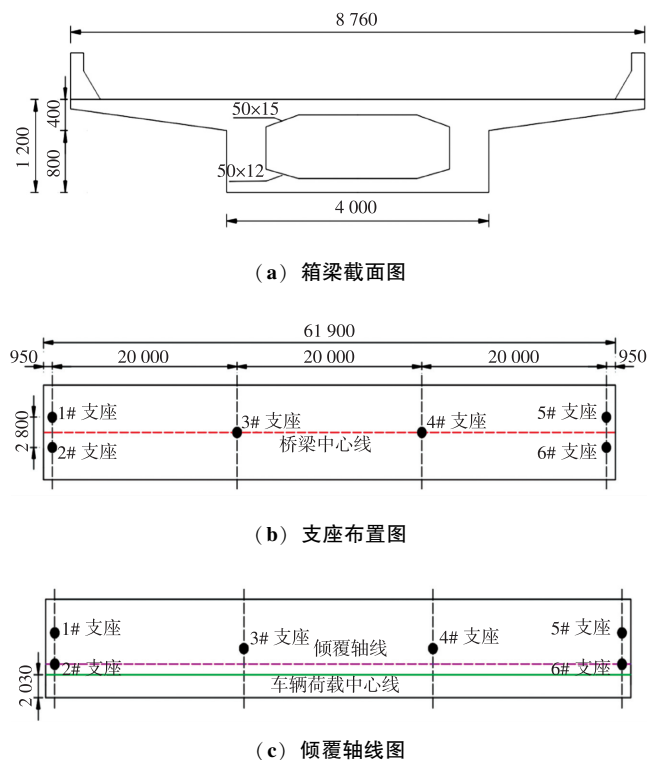


图 1 桥梁基本参数 (单位: mm)

Fig. 1 Basic parameters of bridge

1.2 建模参数的确定

独柱墩连续梁桥在超载汽车的偏载作用下容易发生横向侧翻,采用有限元软件考虑接触非线性以及几何非线性进行模拟。独柱墩桥梁倒塌时,梁体最先发生转动,当转动角度达到一定程度时,梁体将发生滑移,导致桥墩受力不均匀,由轴心受压情况逐渐变成偏心受压,从而使梁体将桥墩推倒,箱梁落地后局部发生断裂,然而在倾覆倒塌过程中梁体整体性较好,梁体并未出现局部破坏现象。因此对于箱梁截面进行建模时采用弹性模型,对梁体分析时不考虑材料破坏对结构的影响。

1.3 模型建立

1.3.1 创建部件

采用 ABAQUS 自带的建模功能通过拉伸的方法创建箱型截面梁体,其中混凝土及支座的部件类型为三维可变形实体。独柱墩连续梁桥的有限元模型如图 2 所示。支座选用橡胶支座,对于橡胶材料的变形行为可以用弹性模型、剪切模量、体积模量以及泊松比来进行定义。橡胶块与梁底板及墩顶之间采用接触的连接方式,混凝土与橡胶支座表面、梁体与车轮之间的摩擦系数均设置为 0.3。



图 2 ABAQUS 有限元实体模型图
Fig. 2 ABAQUS finite element solid model diagram

1.3.2 车辆荷载施加

荷载分成两个分析步进行加载设置,在 ABAQUS 的荷载模块中选用集中荷载的施加方式。一般情况下,六轴车额定货物重量约 40 t,加上车辆自身重量,车货总重约 55~70 t。但引发独柱墩桥梁倾覆倒塌的重载车辆质量均在 100~180 t,约为车辆正常使用额定车货总重的 2~3.5 倍,重载车辆单车本身就存在极端运输的现状;即使单车车辆超载不严重,但若多辆不超载车辆组成的车队,如果行驶间距较小造成密集行车状态,且当前的行车规则大多要求靠最外侧车道行驶,在偏心重载车队作用下,独柱墩桥梁发生事故的概率也会大大增加。通过各轴重汽车抗倾覆稳定性系数之间的对比,选择以六轴车

车队（轴间距 3m）作为极端偏载模型。车辆荷载的施加如图 3 所示。



图 3 车辆荷载施加模型图

Fig. 3 Model diagram of vehicle load application

1.4 典型抗倾覆加固技术模拟

1.4.1 增设辅助墩加固方法

增设辅助墩的加固方法主要是在原有独柱墩连续梁桥中墩的两侧横向各增设一根钢管混凝土柱，并在其上增加新的支座，通过增设支座可以起到增加约束、减少自由度，从而提高独柱墩桥梁的横向抗倾覆稳定性，进而将单支座体系通过加固后变成多支座体系。

在原有模型基础上，对中墩两侧增加 Q235 的钢管混凝土柱（钢管外径 508 mm，厚 12 mm），有限元模型如图 4 所示。

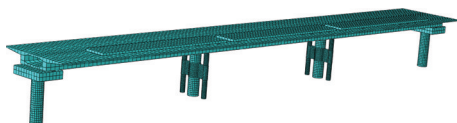


图 4 辅助墩加固有限元模型图

Fig. 4 Finite element model of auxiliary pier reinforcement

1.4.2 墩顶设置钢盖梁加固方法

墩顶设置盖梁的加固方法对桥下净空要求较低，仅需满足新增钢盖梁的尺寸要求以及满足施工空间即可。当独柱墩梁桥为直线桥时，应在需要进行加固的独柱墩横桥向两侧对称加设钢盖梁；若独柱墩梁桥为曲线桥时，则只在需要加固的独柱墩横桥向曲线外侧加设钢盖梁进行加固。该加固方法把独柱墩处的单支座形式变成双支座或者多支座的形式，能有效改善桥梁在偏载作用下的受力状态，减小扭矩的作用，从而降低非偏载侧支座脱空的可能性，进而提高独柱墩桥梁的整体抗倾覆性。其不足之处，是由于钢构件整体刚度远小于混凝土构件，这对于其上新加的支座受力影响较为明显，且钢构件造价高、易腐蚀、维护成本较高。

对三跨独柱墩连续梁桥的中墩采用增设 Q235 钢盖梁的加固形式。钢盖梁构件如图 5 所示，有限元模型如图 6 所示。

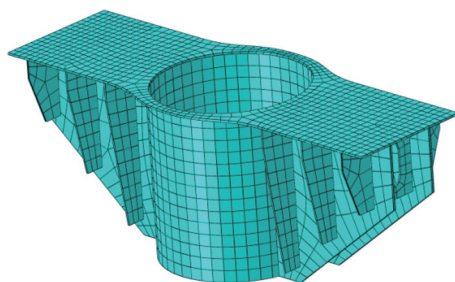


图 5 钢盖梁图

Fig. 5 Steel cap beam diagram



图 6 钢盖梁加固有限元模型图

Fig. 6 Finite element solid model of steel cap beam reinforcement

1.4.3 联端增设抗拉装置加固方法

在三跨独柱墩连续梁桥联端设置抗拉装置，阻止支座脱空现象，提高梁体的整体稳定性，在一定程度上降低独柱墩连续梁桥的倾覆垮塌风险。联端增设抗拉装置（钢构件为 Q235、销轴采用 40Cr 钢材）有限元模型如图 7 所示。

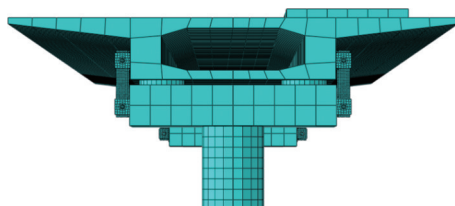


图 7 联端抗拉装置加固有限元模型图

Fig. 7 Finite element solid model diagram of joint end tensile device reinforcement

1.4.4 辅助墩和抗拉装置联合加固方法

辅助墩和联端抗拉装置联合加固法模型如图 8 所示。

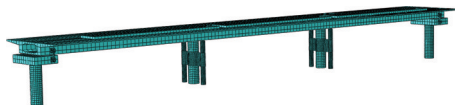


图 8 辅助墩及抗拉装置联合加固的精细化模型图

Fig. 8 Refined model diagram of auxiliary pier and tensile device combined reinforcement

1.4.5 钢盖梁和抗拉装置联合加固方法

钢盖梁和联端抗拉装置联合加固法模型如图 9 所示。

道桥技术



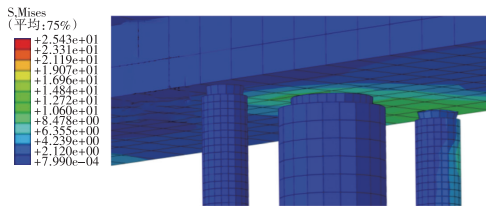
图 9 钢盖梁和抗拉装置联合加固精细化模型图
Fig. 9 Refined model diagram of combined reinforcement of steel cap beam and tensile device

2 结果分析

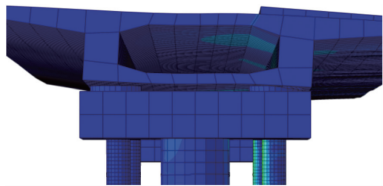
2.1 增设辅助墩加固方法

2.1.1 变形情况

桥上汽车采用极端偏载模型，且单车超载情况均为 200%，支座变形情况如图 10 所示。



(a) 中墩梁底及支座变形

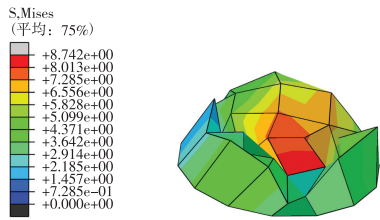


(b) 边墩箱室及支座变形

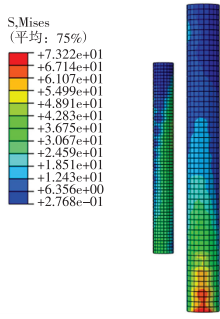
图 10 辅助墩加固桥梁变形图

Fig. 10 Deformation diagram of auxiliary pier reinforced bridge

相较于未加固情况，梁桥在极端偏载作用下，抗倾覆效果明显提升，且对于梁底受力具有明显的改善效果，对于增设的钢管混凝土柱，其最大应力为 25.43 MPa，远低于 Q235 钢材的屈服强度。虽然中墩辅助墩支座已出现较为明显的变形，但梁底混凝土以及钢管混凝土的受力情况良好，具备较好的安全储备，且桥梁整体性较好。随着继续增大桥上荷载直至精细化模型计算终止，此时增设的钢管混凝土柱，其最大应力为 73.22 MPa，远低于其 Q235 钢材的屈服强度，仍然具备较高的安全储备，而支座却出现了严重的变形情况，说明由于支座出现了严重的非线性行为导致其自身网格出现严重畸变现象，最终导致精细化有限元模型分析过程中出现计算不收敛，偏载侧支座及辅助墩的变形情况如图 11 所示。



(a) 支座



(b) 辅助墩

图 11 辅助墩及支座变形图

Fig. 11 Auxiliary pier and bearing deformation diagram

2.1.2 箱梁转角情况

由图 12 可知，采用辅助墩加固后，梁体转角下降显著，当桥上车队荷载为 5 596.15 kN（此时单车荷载为 1 865.05 kN）时，对于未加固情况梁体已经达到转动滑移临界状态（梁体转角为 16.7°），此时如果继续增加车辆荷载，桥梁将会发生倾覆倒塌；而对于采用辅助墩加固后，梁体转角变至 1.74°，下降了 89.58%，且具备较高的安全储备。

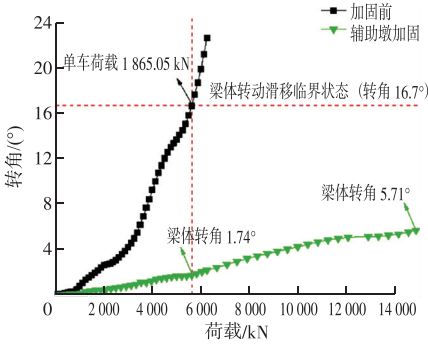


图 12 辅助墩加固箱梁倾覆过程转角变化图

Fig. 12 Angle change diagram of auxiliary pier reinforced box girder overturning process

2.2 墩顶设置钢盖梁加固方法

2.2.1 变形情况

桥上汽车采用极端偏载模型，且单车超载情况

均为 200%。变形情况如图 13 所示。

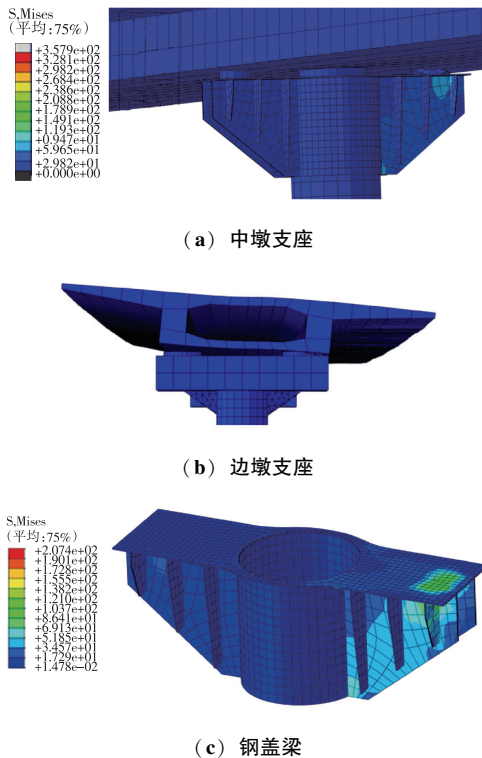


图 13 钢盖梁加固桥梁变形图

Fig. 13 Deformation diagram of steel cap beam reinforced bridge

采用钢盖梁加固后钢盖梁加载侧新增支座出现非常严重的变形，梁体出现明显的转动情况，联端支座也已脱空，但是相较于未加固情况，在极端偏载荷载作用下，梁桥偏载侧支座由于挤压变形，导致钢盖梁偏载侧受力情况较为明显，但钢盖梁整体受力情况较好，还未达到 Q235 钢材的屈服强度，具备一定的安全储备。随着继续增大桥上荷载直至精细化模型计算终止，支座内部出现严重非线性行为导致自身出现严重畸变，此时钢盖梁左右两侧受力差异越来越明显，且偏载侧部分钢板已经达到屈服强度，但钢盖梁整体受力及变形情况良好，对桥梁横向抗倾覆性能仍有一定贡献，偏载侧支座及钢盖梁的变形情况如图 14 所示。

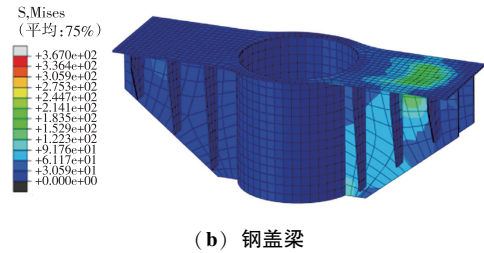
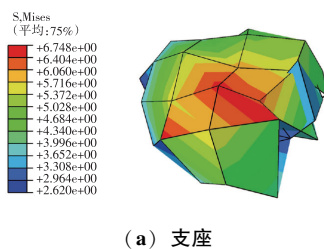


图 14 钢盖梁及支座变形图

Fig. 14 Deformation diagram of steel cap beam and bearing

2.2.2 箱梁转角情况

由图 15 可知，采用钢盖梁加固后，当桥上车队荷载为 5 596.15 kN（此时单车荷载为 1 865.05 kN）时，梁体转角变至 2.23°，下降了 86.65%。

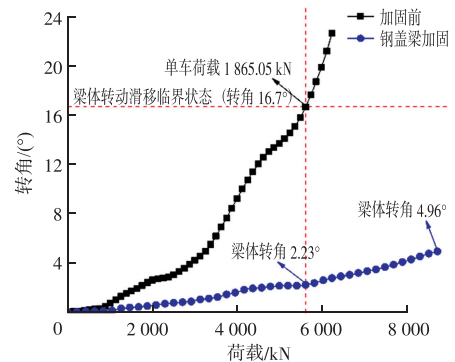


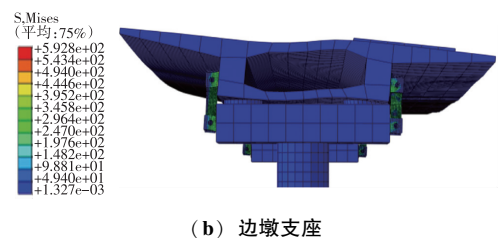
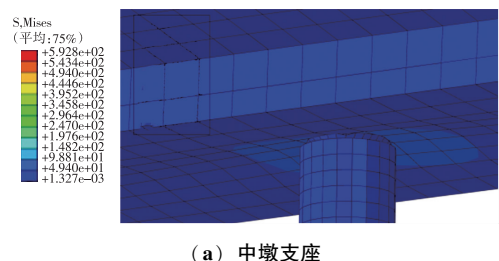
图 15 钢盖梁加固箱梁倾覆过程转角变化图

Fig. 15 Angle change diagram of box girder reinforced by steel capping beam during overturning process

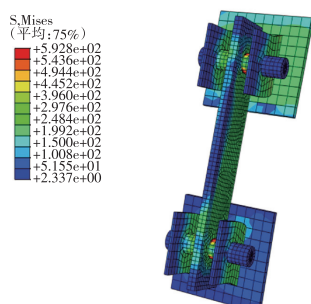
2.3 联端增设抗拉装置加固方法

2.3.1 变形情况

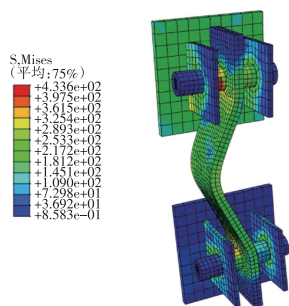
桥上汽车采用极端偏载模型，且单车超载情况均为 200%。支座变形情况如图 16 所示。



道桥技术



(c) 非偏载侧抗拉装置变形图



(d) 偏载侧抗拉装置变形图

图 16 联端抗拉装置桥梁变形图

Fig. 16 Bridge deformation diagram of joint end tensile device

相较于未加固情况,梁桥在极端偏载作用下,抗倾覆效果提升明显,非偏载侧支座未出现清晰的脱空现象,梁体整体性较好。采用联端抗拉装置加固,梁端支座在极端偏载下虽能保持整体稳定,但是联端箱室由于抗拉装置的存在,致使梁体左右侧受力不均匀,从而导致联端梁体出现较为明显的挤压变形。对于非偏载侧抗拉装置中的连接钢板和销轴均已趋近于自身的屈服强度,而销轴与连接板接触位置处的应力甚至已超过自身屈服应力;而对于偏载侧抗拉装置的连接板则出现明显的压弯现象,且销轴和连接钢板接触位置也已超过屈服应力。对于独柱墩处的箱梁底板则是出现了明显的挤压变形,即使桥梁不发生倾覆垮塌的风险,梁底也会由于桥上荷载过大从而导致底部受损。相较于增设辅助墩以及墩顶增设钢盖梁的加固方式,此加固方式并不能较好的改善独柱墩处的梁底受力形式。随着继续增大桥上荷载,联端抗拉装置出现严重的变形,导致构件连接处出现接触非线性现象,从而导致计算中断。

2.3.2 箱梁转角情况

由图 17 可知,采用联端抗拉装置加固后,箱梁

转角由 16.7° 变为 3.34° ,下降了 80%。

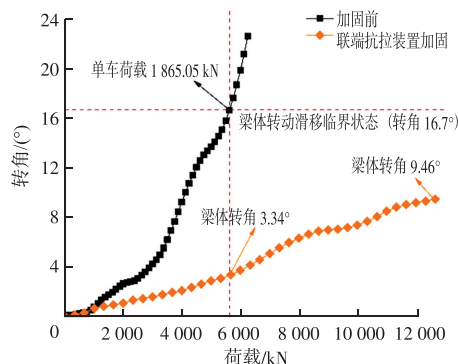


图 17 联端抗拉装置加固箱梁倾覆过程转角变化图

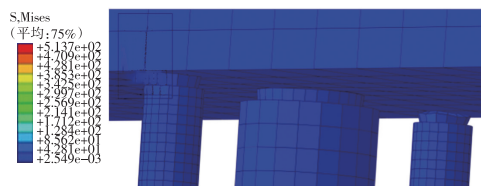
Fig. 17 Angle change diagram of box girder reinforced by joint end tensile device during overturning process

2.4 辅助墩和抗拉装置联合加固方法

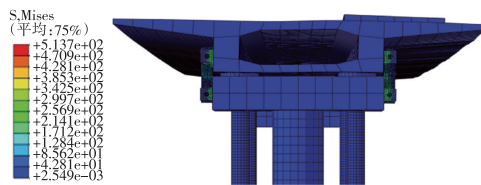
2.4.1 变形情况

采用极端偏荷载模型,各部件应力情况如图 18 所示。

相较于未加固情况,梁桥在极端偏荷载作用下,抗倾覆效果提升显著,辅助墩新增支座受力情况良好,梁底受力均匀,且联端偏载侧支座挤压情况较好。相较于只采用联端抗拉装置加固,采用此联合加固后,联端箱梁无明显变形情况,箱室不会因为抗拉装置的存在而产生左右箱室受力不均匀从而产生挤压变形的情况,非偏载侧抗拉装置中的销轴和连接钢板已趋近与自身的屈服强度,而偏载侧抗拉装置的连接板并未出现由于偏载而产生的压弯现象,左右两侧抗拉装置整体受力情况良好。

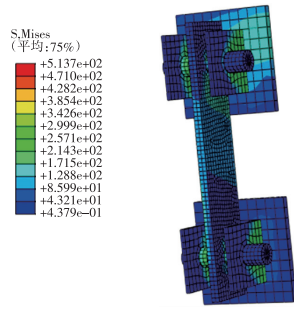


(a) 中墩支座

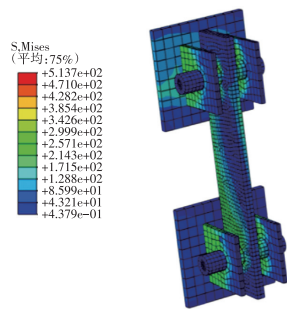


(b) 边墩支座

道桥技术



(c) 非偏载侧抗拉装置变形图



(d) 偏载侧抗拉装置变形图

图 18 辅助墩和抗拉装置联合加固下各部件应力云图

Fig. 18 Stress contour plots of each component under combined strengthening by auxiliary piers and tensile resistance devices

2.4.2 箱梁转角情况

由图 19 可知, 采用中墩增设辅助墩及联端抗拉装置联合加固的方法后, 极大的改善了梁体变形情况, 当桥上车队荷载为 5 596.15 kN (此时单车荷载为 1 865.05 kN) 时, 梁体转角下降至 0.81° , 下降率为 95.15%, 加固效果明显。在桥梁支座出现严重的几何非线性行为而终止计算时, 此时桥上荷载达到 16 077.24 kN (对应单车荷载 5 359.08 kN), 梁体转角为 4.05° , 相比于标准轴重 690 kN 的六轴车, 此

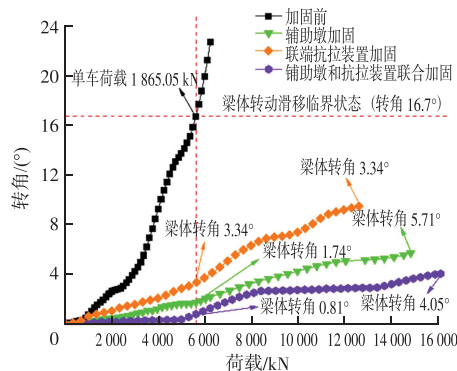


图 19 辅助墩和抗拉装置联合加固倾覆过程转角变化

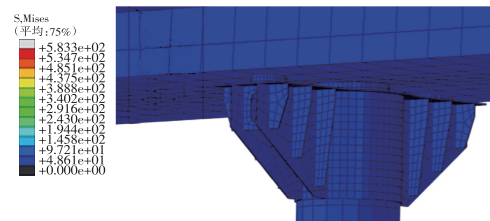
Fig. 19 Variation of rotation angle during overturning process under composite reinforcement with auxiliary piers and tension devices

三跨独柱墩连续梁桥具备 7.77 倍的安全储备, 而对于极端偏载荷载模型 (即标准轴重 690 kN 六轴车超载 200% 的情况), 此三跨独柱墩连续梁桥具备 2.59 倍的安全储备。相较于单一加固方式提升效果最好的增设辅助墩来说, 梁体转角由 5.71° 降至 4.05° , 桥上荷载由 14 791.65 kN 增加至 16 077.24 kN, 说明采用此联合加固方案对于桥梁横向抗倾覆提升效果显著。

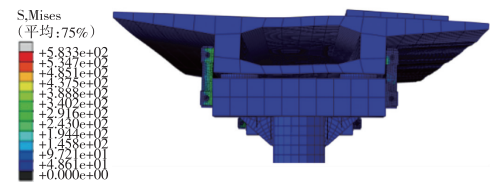
2.5 钢盖梁和抗拉装置联合加固方法

2.5.1 变形情况

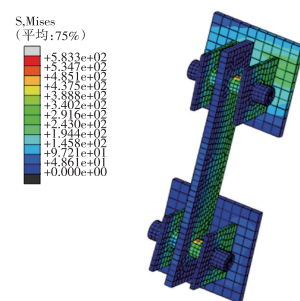
由图 20 可知, 相较于未加固情况, 采用钢盖梁和联端抗拉装置联合加固后, 梁桥在极端偏载荷载作用下, 梁体和新增支座变形均得到明显改善, 梁体几乎未出现转动情况和左右两侧受力不均匀现象, 抗倾覆效果提升显著。相较于仅采用钢盖梁加固情况, 盖梁新增支座变形情况得到较为明显改善, 盖梁整体未出现明显的左右两侧受力不均现象, 各钢板均未达到自身的屈服强度。对于仅采用联端抗拉装置加固情况, 偏载侧抗拉装置未出现明显的弯曲变形情况, 整体受力情况良好。



(a) 中墩支座



(b) 边墩支座



(c) 非偏载侧抗拉装置变形图

道桥技术

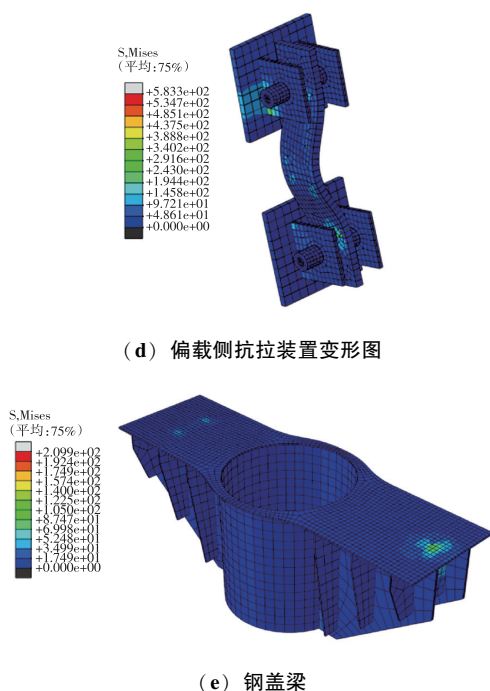


图 20 钢盖梁和抗拉装置联合加固下各部件应力云图 (单位: MPa)
Fig. 20 Stress cloud diagram of each component under the combined reinforcement of steel cover beam and tensile device

2.5.2 箱梁转角情况

由图 21 可知, 采用钢盖梁和联端抗拉装置联合加固的方法, 在极端偏载荷载模型作用下, 梁体转角由 16.7° 下降至 1.32° , 下降率为 92.1%, 加固效果显著。在桥梁出现严重的非线性行为时, 桥上荷载为 15 732.14 kN (此时单车荷载为 5 244.05 kN), 梁体转角为 6.22° , 相比于标准轴重 690 kN 的六轴车, 此三跨独柱墩连续梁桥具备 7.60 倍的安全储备, 而对于极端偏载荷载模型 (即标准轴重 690 kN 六轴车超载

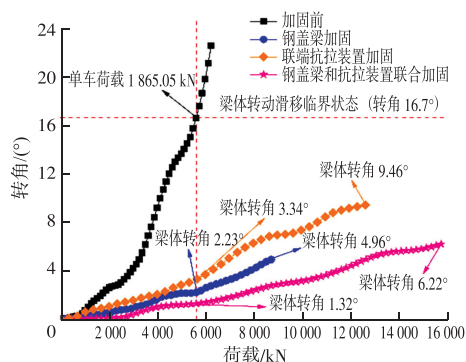


图 21 钢盖梁和抗拉装置联合加固倾覆过程转角变化
Fig. 21 Change of rotation angle in overturning process of steel cap beam and tensile device combined reinforcement

200%的情况), 桥梁具备 2.53 倍的安全储备。相较于单一加固方式提升效果较好的钢盖梁来说, 梁体转角由 4.96° 变为 6.22° , 桥上荷载由 8 694 kN 增加至 15 732 kN, 联合加固方式更优越。

3 结论

针对独柱墩桥梁传统抗倾覆设计与实际运营工况脱节、极端偏载作用下易发生倾覆事故、现有加固方案适用性不明确等核心问题, 以三跨独柱墩连续梁桥为依托, 建立的“抗倾覆理论分析-有限元精细化建模-工况模拟-多方案对比-效果验证”的研究流程, 贴合工程实际, 研究结论具有较强的实操性, 得出结论如下:

(1) 各加固方案对极端偏载工况作业下桥梁结构变形及受力状态的改善效果存在明显差异。增设辅助墩加固方案是单一加固方案中受力改善效果最优的类型; 联合加固方案可有效弥补单一加固方案的缺陷, 使桥梁结构受力状态更趋均衡, 能明显改善结构变形问题, 安全储备更佳。

(2) 各加固方案均能有效控制极端偏载工况下的梁体转动变形, 降低梁体转角。联合加固方案的转角控制效果整体优于单一加固方案, 其中辅助墩和联端抗拉装置联合加固方案的控制效果最为显著, 当桥上车队荷载达到 5 596.15 kN (此时单车荷载为 1 865.05 kN) 时, 梁体转角下降至 0.81° , 下降率为 95.15%。

(3) 辅助墩与联端抗拉装置联合加固方案为本研究确定的最优加固方案。该方案在极端偏载工况下, 可使梁体几乎无转动现象且无左右受力不均问题, 抗倾覆能力提升效果最为显著。对于极端偏载荷载模型 (即标准轴重 690 kN 六轴车超载 200%的情况), 此三跨独柱墩连续梁桥具备 2.59 倍的安全储备。

研究仍存在一定局限, 后续可围绕极端偏载工况下车辆荷载的动态分布规律、长期运营过程中加固结构的疲劳性能展开深入研究, 进一步优化加固方案, 提升加固效果的耐久性与可靠性, 为保障独柱墩桥梁的长效安全运行提供更完善的技术支撑。

(下转第 149 页)

层材料的使用要求。建议 FA、CS、矿渣粉、煤矸石最佳掺量分别为 9%、6%、5%、80%。

参 考 文 献

- [1] 刘泽, 段开瑞, 周梅, 等. 煤矸石在土木工程材料中的应用研究进展 [J]. 材料导报, 2024, 38 (10): 88-99.
- [2] 张承实, 姚贤华, 尉晓雪, 等. 煤矸石在公路路基工程中的应用研究进展 [J]. 河南科学, 2024, 42 (9): 1334-1345.
- [3] 史艳忠. 煤矸石粗骨料混凝土抗氯盐侵蚀性能影响分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 29-34.
- [4] 李明, 李昶, 郭雨鑫, 等. 水泥稳定碎石-煤矸石混合料性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (9): 2895 - 2901, 2909.
- [5] 王稷良, 郭文彬, 任中杰. 煤矸石特性及其对路面基层性能影响的研究现状 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (8): 109-116.
- [6] 李倩. 粉煤灰-煤矸石基地聚合物混凝土力学及耐久性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2026, 40 (3): 50-55.
- [7] 童彧斐, 严鹏飞, 张虎彪, 等. 水泥粉煤灰稳定炉渣煤矸石混合料抗冻试验 [J]. 中国科技论文, 2022, 17 (10): 1078-1083.
- [8] 阴琪翔, 院龙, 王海, 等. 全固废基层混合料路用性能研究

[J]. 精细化工中间体, 2025, 55 (5): 50-54.

- [9] 马璐璐, 张翥, 刘芳, 等. 赤泥-粉煤灰稳定煤矸石基层强度特性及机理 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26 (7): 762-770.
- [10] 崔邯龙, 付志东, 吴鸿飞, 等. 路面基层矿渣粉稳定全固废混合料力学性能试验研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2025, 42 (3): 60-66, 74.
- [11] 薛晓燕, 赵梦珍, 张佳, 等. 复合固化剂对粉煤灰-煤矸石混合料路用性能影响研究 [J]. 河北工业科技, 2025, 42 (1): 62-69.
- [12] 张建俊, 姚柏聪, 孙源骏, 等. 离子固化剂对水泥稳定煤矸石结合料耐久性能的影响 [J]. 煤炭学报, 2022, 47 (9): 3472-3482.
- [13] 李艳丽, 夏清, 王功浩, 等. 电石灰-粉煤灰稳定煤矸石混合料力学性能研究 [J]. 河南城建学院学报, 2025, 34 (4): 35-42.
- [14] 李永翔, 季奎良, 党彦. 地聚物稳定煤矸石混合料路用性能及机理探究 [J]. 内蒙古农业大学学报 (自然科学版), 2024, 45 (5): 28-36.
- [15] 张轩硕, 严鹏飞, 丁永发, 等. 水泥粉煤灰稳定炉渣-煤矸石混合料的收缩试验 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (8): 3325-3331.

(上接第 142 页)

参 考 文 献

- [1] 彭卫兵, 潘若丹, 马俊, 等. 独柱墩桥梁倾覆破坏模式与计算方法研究 [J]. 桥梁建设, 2016, 46 (2): 25-30.
- [2] 孙士尧, 周勇军, 王业路, 等. 基于目标可靠指标的独柱墩单点支撑桥梁整体倾覆稳定性 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (7): 121-132.
- [3] 庄冬利. 偏载作用下箱梁桥抗倾覆稳定问题的探讨 [J]. 桥梁建设, 2014, 44 (2): 27-31.
- [4] 宫亚峰, 何钰龙, 谭国金, 等. 三跨独柱连续曲线梁桥抗倾覆稳定性分析 [J]. 吉林大学学报, 2018, 48 (1): 113-120.
- [5] 李盼到, 马利君. 独柱支撑匝道桥抗倾覆验算汽车荷载研究 [J]. 桥梁建设, 2012, 42 (3): 14-18.
- [6] 叶鹏飞, 宋之舟, 周英浩, 等. 独柱墩弯桥抗倾覆与曲率半径的关系 [J]. 有色冶金设计与研究, 2025, 46 (6): 68-72.
- [7] 黄书考, 阳敏敏, 刘荣. 独柱墩梁桥抗倾覆稳定性分析及加固改造研究 [J]. 桥隧工程, 2023 (1): 90-92.
- [8] 李勇, 张劲泉, 余波. 钢筋混凝土 T 梁旧桥极限承载能力研究

[J]. 公路交通科技, 2017, 34 (4): 67-71.

- [9] 栗勇, 刘一平. 独柱支承梁式桥横向抗倾覆构造措施研究 [J]. 世界桥梁, 2014, 42 (1): 50-53.
- [10] 甘世泽. 支承间距及方式对独柱墩箱梁桥抗倾覆稳定性影响分析 [J]. 公路与汽运, 2017 (11): 165 -168.
- [11] 刘国权. 独柱墩弯梁桥抗倾覆加固措施分析 [J]. 交通世界, 2024 (33): 19-21.
- [12] 龙胜. 基于专项试验的独柱墩加固桥梁抗倾覆性能评估体系 [J]. 福建交通科技, 2025 (10): 142-148.
- [13] 彭松. 关于独柱墩箱梁桥加固后的抗倾覆性能分析 [J]. 交通工程, 2025, 25 (9): 74-79.
- [14] 张志成. 公路独柱墩桥梁加固方法及抗倾覆性能分析 [J]. 工程管理, 2025, 10 (18): 133-135.
- [15] 陶戴邦. 新型独柱墩桥梁加固技术研究 [J]. 桥梁工程, 2025, (7): 120-124.
- [16] 刘鸿博, 张己存. 公路独柱墩桥梁拼宽改造方法及抗震性能优化研究 [J]. 甘肃科技, 2025, 41 (8): 6-11.