

# 独柱墩桥梁加固拉索参数化分析及优化

崔鑫

(上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 201108)

**摘要:** 独柱墩桥梁因结构简洁、景观协调等特点被广泛应用,但在偏载作用下的抗倾覆稳定性不足问题日益凸显。针对某高速公路独柱墩曲线桥的倾覆隐患,提出增设拉索加固的设计方案,并通过有限元模型的参数化分析方法研究拉索角度、预紧力等参数对桥梁抗倾覆稳定性的影响规律。结果表明,拉索索力增加可显著提升抗倾覆系数(30 t至100 t时系数提升28.6%),而墩高变化(3.5 m至20 m)对抗倾覆稳定性影响较小,但需大幅增加拉索尺寸以保持刚度。优化建议提出优先提升索力、控制墩高范围及结合弯桥特性调整加固策略。

**关键词:** 独柱墩桥梁;加固拉索;抗倾覆;有限元;参数分析

**中图分类号:**

**文献标志码:**

**文章编号:** 1009-7716(2026)09-0218-04

## Parametric Analysis and Optimization of Reinforcement Cables for Single-column Pier Bridges

CUI Xin

(Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** Single-column pier bridges are widely used due to their simple structure and coordinated landscape, but the problem of insufficient anti-overturning stability under unbalanced loads is becoming increasingly prominent. A design scheme to add cable reinforcement is proposed for the overturning hazard of a single-column pier curved bridge on an expressway, and the influence of cable angle, pre-tension force and other parameters on the anti-overturning stability of the bridge is studied through the parametric analysis method of finite element model. The results show that increasing the tension of the cable can significantly improve the anti-overturning coefficient (28.6% increase at 30 t to 100 t), while the change in pier height (3.5 m to 20 m) has a small impact on stability, but a significant increase is required in cable size to maintain stiffness. The optimization suggestions are put forward for giving priority to enhancing the cable force, controlling the range of pier height, and adjusting the reinforcement strategy in combination with the characteristics of the curved bridge.

**Keywords:** single-column pier bridge; reinforcement cable; anti-overturning; finite element method; parameter analysis

## 0 引言

独柱墩桥梁因结构体系简洁、施工工序简便、工程造价低且地形适应性强,在城市桥梁和农村道路桥梁建设中得到了大量应用<sup>[1]</sup>。这类桥梁能有效规避地形、水文条件及土地利用等因素的限制,施工周期短、后期维护便捷,具备较高的综合性价比<sup>[2-4]</sup>。

但随着我国交通运输量的持续增长,独柱墩在偏载作用下的抗倾覆稳定性不足问题日益凸显,发生了多起桥梁倾覆事故(见图1),如2007年内蒙古包头高架桥倾覆事故<sup>[5]</sup>、2009年京津高速公路匝道桥梁倾覆事故、2011年上虞高架桥侧翻事故<sup>[6]</sup>、2012

年哈尔滨市三环路高架匝道桥倾覆事故<sup>[7]</sup>等。这类事故事前无明显表征,猝然发生,危害极大,给人们的出行造成严重威胁<sup>[8]</sup>。



图1 桥梁倾覆事故

独柱墩桥梁倾覆隐患的主要原因在于旧的桥梁设计规范中,对桥梁的抗倾覆没有明确的指导设计方法,导致这块的设计存在一定的缺陷。此外,由于经济发展较快,桥梁承载负担越来越重,放大了这方面的隐患。

收稿日期: 2026-03-02

作者简介: 崔鑫(1989—),男,硕士,高级工程师,研究方向为桥梁与隧道工程检测、监测和智慧运维。

对于已投入运营的独柱墩桥梁,增大支座布设间距或增设支座数量的方式,能够有效增强结构的横向抗倾覆性能,进而提升整体抗倾覆稳定系数<sup>[9-11]</sup>。但在实际工程实施过程中,受独柱墩自身结构尺寸的制约,若采用上述两种加固方式<sup>[12]</sup>,往往需要配套增设钢盖梁、钢立柱等构件,不仅会增加工程建设成本,还会大幅提升对现场施工空间的占用率<sup>[13]</sup>。对于有些空间和造价受限的区域,可采用轻型加固形式,如拉索加固<sup>[14-16]</sup>。拉索的加固效果受布设角度、预紧力等参数影响显著,下文通过有限元模型进行分析,明确各参数对其影响规律,以指导合理设计。

1 研究对象

某高速公路一立交匝道中一联弯道处加固箱梁,跨径 3×20 m,桥面总宽 7.5 m,横向布置形式为 0.50 m(分隔带)+6.5 m(行车道)+0.5 m(防撞护栏),连续箱梁支座采用盆式支座。连续箱梁中墩采用独柱墩,墩身高 3.5 m。其余为二柱式桥墩,桥面系采用沥青混凝土铺装,采用型钢伸缩缝,两侧栏杆为混凝土防撞墙。匝道桥正面效果图如图 2 所示。匝道桥立面、平面、横断面布置分别如图 3、图 4、图 5 所示。



图2 匝道桥正面

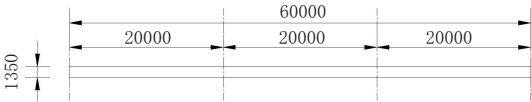


图3 匝道桥立面布置

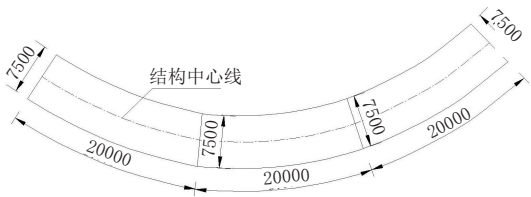


图4 匝道桥平面布置

主梁中支点独柱墩位置设置加固拉索,拉索两侧分别通过锚板锚固到腹板和立柱底部,如图 6 所示。

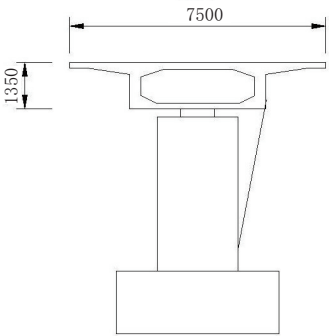


图5 匝道桥横断面布置

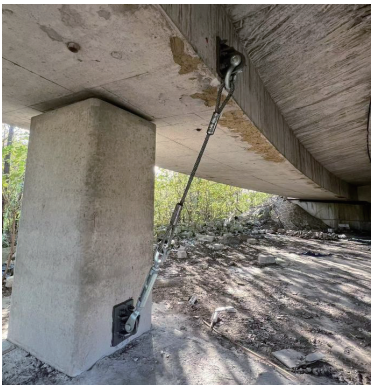


图6 拉索加固

2 研究方法

2.1 抗倾覆计算基本原理

抗倾覆计算的核心是通过计算结构的稳定效应与失稳效应的比值来评估桥梁的抗倾覆能力<sup>[17]</sup>。通常采用以下公式进行计算:

抗倾覆稳定性系数= $\sum S_{\text{稳定}} / \sum S_{\text{失稳}}$ <sup>[18]</sup>  
式中: $\sum S_{\text{稳定}}$ 表示使结构稳定的效应设计值(如结构自重、预应力等); $\sum S_{\text{失稳}}$ 表示使结构失稳的效应设计值(如汽车荷载、风荷载等)。

现行规范如《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)提供了基于支座反力的抗倾覆验算方法:

特征状态一:验算支座是否受压。若支座反力为正值,则满足要求。

特征状态二:计算稳定效应与失稳效应的比值。需考虑最不利荷载布置,如汽车荷载的偏载形式。

实际工程中常使用有限元软件(如 MIDAS Civil)进行抗倾覆分析。通过建立桥梁模型,模拟不同工况下的荷载作用,计算支座反力和稳定性系数。

2.2 有限元模型

有限元模型如图 7 所示。在结构分析中,主梁通过梁单元进行模拟,弹性索通过索单元来模拟,弹性索的直径暂定为 40 mm。此外,支座的模拟采用弹

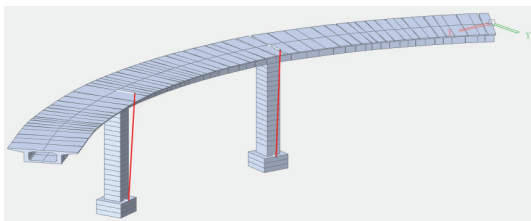


图7 有限元模型

性连接方式。

2.3 荷载概况

车道考虑护栏宽度和车宽,布置在外侧,荷载等级采用公路-I级<sup>[19]</sup>,采用包络计算。车道位置如图8所示。

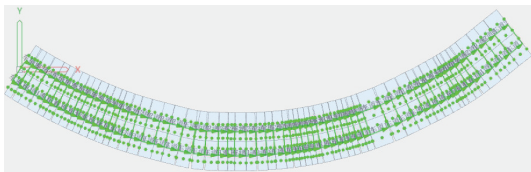


图8 车道位置

索力采用预拉力加载至拉索单元,默认索力为300 kN,如图9所示。

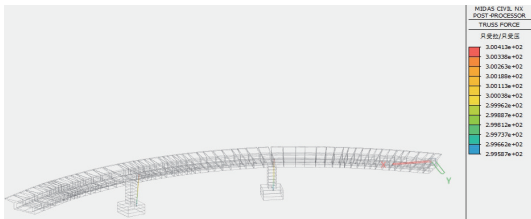


图9 拉索索力

2.4 抗倾覆系数计算结果

依据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)4.1.8条进行抗倾覆验算,结果如图10所示(反力负数为受压,正数为受拉)。可以看出,当增设拉索时,该桥的抗倾覆系数显著提高,可以有效增加该桥的抗倾覆冗余度。

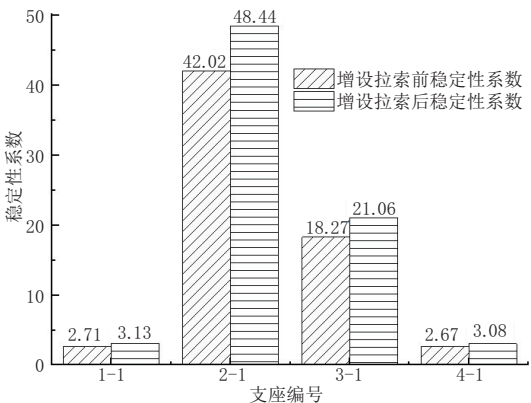


图10 增设拉索前后稳定性系数变化

从图中数据可知,增设拉索后,所有支座的抗倾覆稳定性系数均实现明显增长,4个支座(1-1、2-1、

3-1、4-1)的抗倾覆稳定性系数分别增长15.5%、15.3%、15.3%、15.4%。所有支座的提升比例均稳定在15%~16%之间,说明拉索对不同初始状态支座的加固效果均匀,直接提升了桥梁整体的抗倾覆冗余度,验证了拉索加固措施的有效性。

3 参数分析

采用上一节的计算方法进行不同参数下的抗倾覆计算。下面分别进行索力、墩高、转弯半径等参数对抗倾覆参数的影响。

3.1 索力的影响

采用和上一节相同的计算方法,分别给拉索设置30 t、50 t、100 t的初张力,其他参数不变,分别计算各自抗倾覆系数,计算结果如表1、图11所示。

表1 索力对抗倾覆系数的影响

| 索力/t | 抗倾覆系数 | 增长/%  |
|------|-------|-------|
| 30   | 3.08  | —     |
| 50   | 3.35  | 8.77  |
| 100  | 4.45  | 44.48 |

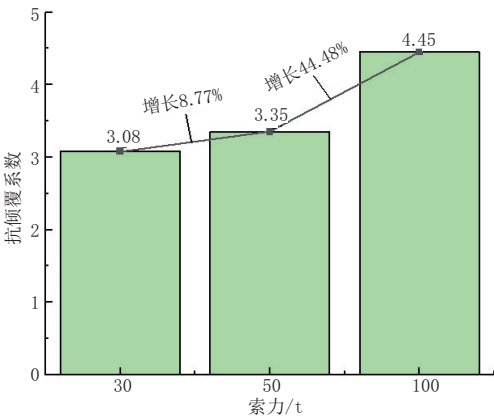


图11 索力对抗倾覆系数的影响

通过计算可以发现,拉索索力的增加可以显著增加抗倾覆系数,索力从30 t增加至50 t时,抗倾覆系数从3.08增加至3.35(增幅8.77%),当增加至100 t时,抗倾覆系数增加至4.45(增幅44.48%)。索力增加显著增强拉索的竖向分力,从而平衡偏载力矩。可结合曲率特征优化拉索布设角度,增强横向约束效果,同时同步校核桥墩在附加荷载下的受力状态。

3.2 墩高的影响

分别建立3.5、10、20 m三个不同墩高的模型,拉索索力保持为30 t,当墩高增加时,会影响拉索的角度,从而影响索力的竖向分力,间接影响抗倾覆系数。

通过计算可以发现,墩高的变化对于抗倾覆系数影响较小(见表2、图12)。这是由于一定范围内

表 2 墩高对抗倾覆系数的影响

| 墩高/m | 抗倾覆系数 |
|------|-------|
| 3.5  | 3.077 |
| 10   | 3.091 |
| 20   | 3.093 |

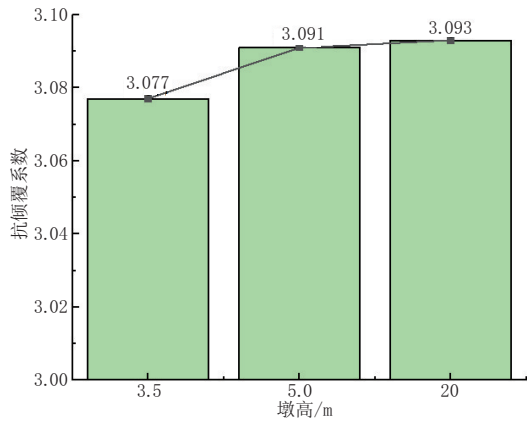


图 12 墩高对抗倾覆系数的影响

的墩高变化对于拉索角度影响有限,因此抗倾覆系数没有显著变化,但是要对高墩设置相同的索力,拉索的尺寸会显著变化,拉索的直径和索的重量计算如表 3 所示。

表 3 墩高对拉索尺寸的影响

| 墩高/m | 索直径/mm | 单根索重量/kg | 重量增加/%  |
|------|--------|----------|---------|
| 3.5  | 40     | 34.5     | —       |
| 10   | 68     | 281.7    | 716.5   |
| 20   | 96     | 1 126.8  | 3 166.1 |

墩高由 3.5 m 增至 20 m 时,抗倾覆系数变化不足 0.2%,但索直径需从 40 mm 增至 96 mm。高墩拉索重量增加 30 多倍,需综合考虑经济性与施工难度。

3.3 转弯半径的影响

直线窄桥因结构自重分布偏离侧翻轴更近,稳定效应不一定比弯桥更好。这里建立相同跨径、相同桥宽的直桥模型(见图 13)进行抗倾覆的计算。

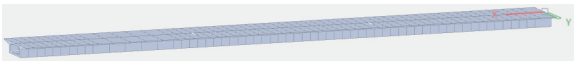


图 13 直桥模型

表 4 转弯半径的影响

| 转弯半径  | 抗倾覆系数 |      |      |
|-------|-------|------|------|
|       | 加固前   | 加固后  | 增加/% |
| 100 m | 3.08  | 3.35 | 8.7  |
| ∞     | 3.34  | 3.77 | 12.8 |

从以上结果可以看出,直线桥梁的抗倾覆系数比转弯半径 100 m 时的抗倾覆系数更高,增加拉索后抗倾覆系数也有显著提高(见表 4、图 14)。

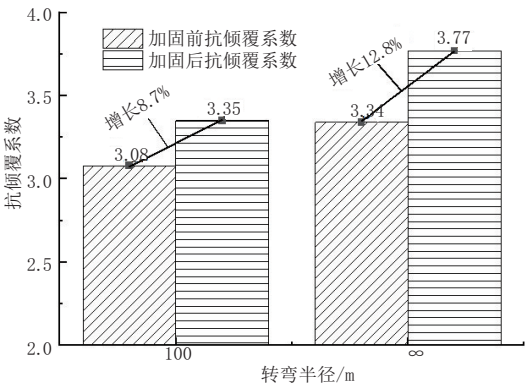


图 14 转弯半径的影响

4 结论及优化建议

4.1 结论

(1)拉索索力是抗倾覆性能的核心控制参数,索力提升能显著增大拉索竖向分力,平衡偏载倾覆力矩;索力从 30 t 增至 100 t 时,抗倾覆系数提升 44.37%,但索力提升会同步增大桥墩承受的附加水平力和向上作用力,需同步校核桥墩承载能力。

(2)一定范围内(3.5~20 m)的墩高变化对桥梁抗倾覆系数影响极小(变化不足 0.2%),但高墩需大幅增加拉索截面尺寸以保持加固效果,拉索重量随墩高显著增加,且附加荷载增大对桥墩受力更不利,经济性和施工难度均大幅提升。

(3)对于独柱墩窄桥来说,直桥与弯桥倾覆问题类似,均可采用拉索加固。

4.2 优化建议

(1)参数设计:优先提升索力至 50 t 以上,兼顾桥梁抗倾覆性能提升与工程经济性。确定设计索力时,需同步开展桥墩在原有荷载与拉索附加荷载共同作用下的承载能力验算,确保桥墩受力满足规范要求。

(2)墩高控制:拉索加固的形式适用于墩高不大于 10 m 的情况,否则施工难度较大和经济性较差。

(3)结合桥梁曲率半径优化拉索布设角度,曲线桥适当增大拉索横向约束分量,提升偏载抵抗能力;直桥与弯桥加固均需根据拉索参数合理设计桥墩锚固构造,保证传力可靠。

参考文献:

[1] 危强,张杰.独柱墩桥梁的安全风险分析[J].公路,2014,59(6): 105-108.  
[2] 王俊杰.独柱墩桥梁抗倾覆加固的钢盖梁设计及受力性能研究[D].南昌:南昌大学,2023.  
[3] 甘露,郭金生.墩梁协作受力加固技术在独柱墩桥梁抗倾覆中的