

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.08.015

基于拉压杆的独柱墩抗倾覆加固结构及设计方法研究

周健民¹, 吴文明², 王辰杰²

(1. 唐山高速公路集团有限公司, 河北 唐山 063099; 2. 北京公科固桥技术有限公司, 北京 100088)

摘要:独柱墩桥梁倾覆过程的最主要表现形式是主梁刚体转动, 而汽车荷载偏载产生的倾覆力矩和主梁自重产生的抗倾覆力矩分别是杠杆的动力和阻力。为提高独柱墩桥梁结构的抗倾覆稳定性, 确保独柱墩桥梁在运营过程中具有足够的抗倾覆安全储备, 避免主梁的横桥向倾覆, 使梁体达到静止的平衡状态, 抗倾覆力矩应具有足够的抵抗效应。在杠杆原理基础上, 提出了基于拉压杆的独柱墩抗倾覆加固新型结构, 该新型加固结构是将主梁腹板两侧与桥墩通过钢拉杆连接, 当主梁有倾覆的趋势时, 产生拉压杆效应, 为有倾覆趋势的主梁提供了一个附加的反向力矩, 以抵抗主梁的倾覆力矩, 同时提高了主梁的抗倾覆能力。基于拉压杆效应的力学原理, 在现行规范公式基础上建立了该类结构的抗倾覆稳定系数计算方法。该新型加固结构构造简单、受力明确、加固效果好、设计与施工方便。工程应用实例表明: 该加固结构能将桥梁抗倾覆稳定系数提高1.5倍以上, 抗倾覆稳定系数大幅增加, 加固效果显著; 实桥监测期间未见明显位移突变导致支座脱空, 左右侧梁体位移并未出现较大的反差, 并且呈现一致的变化规律。监测结果也验证了该加固结构的有效性和可行性, 该加固结构及其设计方法可为类似桥梁结构加固提供借鉴和参考。

关键词:桥梁工程; 独柱墩; 抗倾覆; 加固; 设计方法

中图分类号: U446.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2021) 08-0110-06

Study on Anti-overturning Reinforcement Structure and Design Method of Single-pillar Pier Based on Strut-and-tie

ZHOU Jian-min¹, WU Wen-ming², WANG Chen-jie²

(1. Tangshan Expressway Group Co., Ltd., Tangshan Hebei 063099, China;

2. Beijing Gongke Bridge Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: The main manifestation of the overturning process of the bridge is the rigid body rotation of the main girder, and the roll moment generated by the vehicle partial load and the anti-overturning moment generated by dead weight of the main girder are the power and resistance of the lever. In order to improve the anti-overturning stability of the single-pillar pier bridge structure and ensure that the bridge has sufficient anti-overturning safety reserve in operation process, to avoid the main girder lateral overturning, and make the girder reach a static equilibrium state, the anti-overturning moment should have sufficient resistance effect. Based on the principle of leverage, a new type of anti-overturning reinforcement structure for single-pillar pier based on strut-and-tie is proposed. This new type of reinforcement structure connects both sides of the main girder web with bridge piers through steel tie rods. When the main girder tends to overturn, the strut-and-tie effect is generated, which provides an additional reverse moment for the main girder with overturning tendency to resist the overturning moment of the main girder, and improves the anti-overturning ability of the

收稿日期: 2021-06-07

作者简介: 周健民 (1963-), 男, 河北玉田人, 高级工程师. (tssglxh@126.com)

main girder is improved. Based on the mechanical principle of strut-and-tie effect, the calculation method of anti-overturning stability coefficient of this structure type is established based on the current code formula. The new reinforced structure has simple structure, clear stress, good reinforcement effect and convenient design and construction. The engineering application examples show that (1) the reinforced structure can increase the bridge anti-overturning stability factor by more than 1.5 times, the anti-overturning stability coefficient is greatly increased, and the reinforcement effect is significant; (2) during the real bridge monitoring, there is no obvious displacement mutation that caused the support to vacate, and the displacements of the of the girder at both sides have not show a large contrast, and shows a consistent change pattern. The monitoring result also verified the effectiveness and feasibility of the reinforced structure. The reinforced structure and its design method can provide a reference for the reinforcement of similar bridge structures.

Key words: bridge engineering; single-pillar pier; anti-overturning; reinforcement; design method

0 引言

中小跨径独柱墩曲线桥既能使桥型布置很好地适应环境要求,也能改善桥梁外观,减少土地占用,以及节约材料^[1],此外,其独柱布置形式也比常规的双柱墩桥梁较多地减少对周围环境的破坏。因此,独柱墩桥梁广泛应用于高速公路匝道桥、城市高架桥及城市立交桥上^[2-4]。但在车辆偏载作用下,独柱墩桥梁联端支座容易出现脱空的现象,致使主梁支承体系发生改变,而其特殊的结构体系对桥梁结构的抗倾覆稳定性明显不利。近年来,国内相继发生的独柱墩桥梁整体倾覆事故造成了严重人员伤亡和经济损失,引起社会的广泛关注^[5-7]。虽然2012年之后我国新建桥梁中,基本采用双柱墩或三柱墩的结构形式代替此类型桥梁,但是仍然存在为数众多的在役独柱墩桥梁^[8-10],所以必须对采取有效的加固措施,以提高既有独柱墩桥梁结构的抗倾覆稳定性。目前对于独柱墩桥梁抗倾覆加固措施主要有3类:第1类增设盖梁,将单支座改为双支座^[11-12];第2类取消支座,将墩梁固结,改变结构支承体系^[13-14];第3类增大双支座间距,提高双支座抗扭能力^[15-16]。但这些加固措施在构造设计与施工上均存在一定的困难,由于结构构造所限,支座间距增加不明显,且本质上并未改变桥梁整体倾覆翻转线,因此加固后的效果不明显,难以确保桥梁在运营过程中具有足够的抗倾覆安全储备。本研究在杠杆原理基础上,提出了一种基于拉压杆的独柱墩抗倾覆加固结构及其设计方法,该加固结构构造简单、受力明确、加固效果好、设计与施工方便,可为类似桥梁结构加固提供借鉴和参考。

1 倾覆过程及受力机理

独柱墩桥梁倾覆是由于桥面汽车荷载达到抗倾覆临界值时,桥梁两端位于汽车荷载另一侧的支座产生负反力,引发支座脱空,导致主梁发生翻转倾覆^[17-18],见图1。

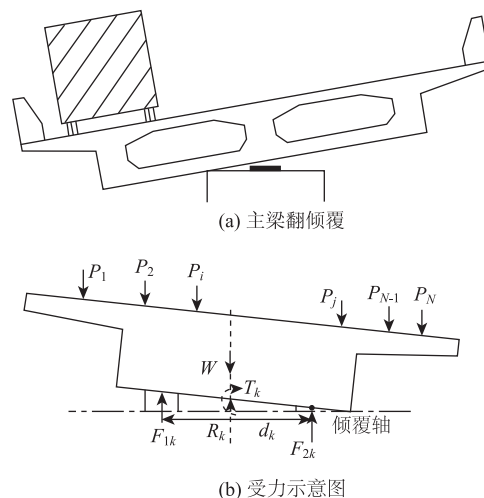


图1 独柱墩桥梁主梁整体倾覆

Fig. 1 Overall overturning of main girder of single-pillar pier bridge

独柱墩桥梁典型的倾覆过程可以表现为:单向受压支座产生负反力,正常受压的受力状态消失,导致支座不再为上部主梁结构提供有效的支承,上部主梁结构扭转变形达到临界值、横向失稳,引发支座及下部桥墩结构损坏^[19],如图2所示。

因此,独柱墩桥梁倾覆存在2个明确的受力特点:(1)桥梁单向受压支座脱空,并不再受压;(2)桥墩上一对双支座构成的抗扭支承体系,由于其中一个支座的脱空,导致未脱空的支座仅提供扭矩约束,而双支座提供的扭转变形约束失效,不再为主梁提供有效的抗扭

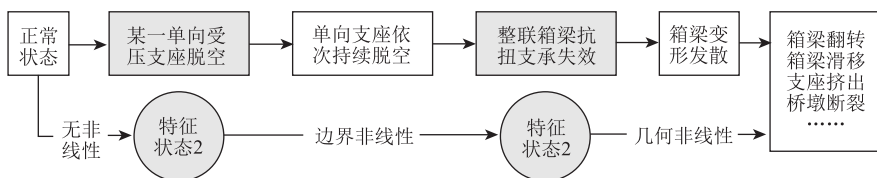


图2 独柱墩桥梁典型倾覆过程

Fig. 2 Typical overturning process of single-pillar pier bridge

支承,此时主梁处于受力临界平衡或者是扭转变形失效的极限状态,进而引发了桥梁倾覆破坏。

2 抗倾覆加固力学原理与构造

根据独柱墩桥梁倾覆过程及受力机理可以知道,独柱墩桥梁倾覆过程的最主要表现形式是主梁绕荷载作用侧最外侧支座连线方向转动,即主梁的刚体转动。根据杠杆原理,汽车荷载偏载产生的倾覆力矩和主梁自重产生的抗倾覆力矩分别是杠杆的动力和阻力。为避免主梁的横桥向倾覆,使梁体达到静止的平衡状态,抗倾覆力矩应具有足够的抵抗效应。同理,对于桥梁结构如果将主梁腹板两侧与桥墩通过某种方式连接,当主梁有倾覆的趋势时,主梁腹板两侧的连接开始发挥作用,产生拉压杆效应,该拉力和压力为有倾覆趋势的主梁提供了一个反向力矩 M ,以抵抗主梁的倾覆力矩 T ,这样就可以提高主梁的抗倾覆能力,如图3所示。

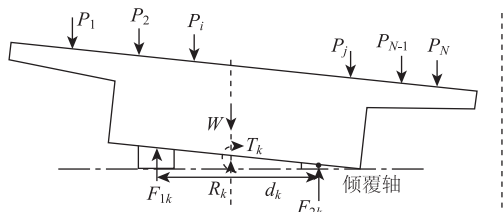


图3 独柱墩桥梁抗倾覆加固力学原理

Fig. 3 Mechanical principle of anti-overturning reinforcement of single-pillar pier bridge

此类在主梁两侧增设拉压杆的方式进行抗倾覆加固的结构构造为:在主梁腹板两侧以及相应的墩顶位置埋入钢板,并在钢板上焊接耳板固定装置,然后将主梁及墩顶上的耳板通过钢拉杆连接,形成主梁两侧的拉压杆加固结构。当桥面汽车荷载达到抗倾覆临界值造成主梁有倾覆趋势时,主梁两侧的钢拉杆连接即产生拉压杆效应,以抵抗主梁的倾覆力,如图4所示。

3 抗倾覆稳定系数计算方法

现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设

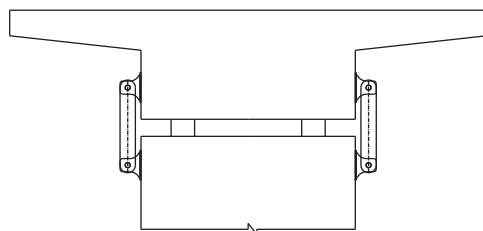


图4 拉压杆抗倾覆加固结构

Fig. 4 Anti-overturning reinforcement structure of strut-and-tie

计规范》(JTG 3362—2018)^[19]第4.1.8条规定按作用标准值进行组合时,整体式截面简支梁和连续梁的作用效应应符合下式要求:

$$\frac{\sum S_{bk,i}}{\sum S_{sk,i}} \geq k_{qt}, \quad (1)$$

式中, k_{qt} 为横桥向抗倾覆稳定系数,取 $k_{qt} = 2.5$; $\sum S_{bk,i}$ 为使上部结构稳定的效应设计值; $\sum S_{sk,i}$ 为使上部结构稳定的效应设计值。

基于拉压杆效应的抗倾覆加固结构力学示意如图5所示,根据力学示意图,可以得到该加固结构的抗倾覆稳定系数。

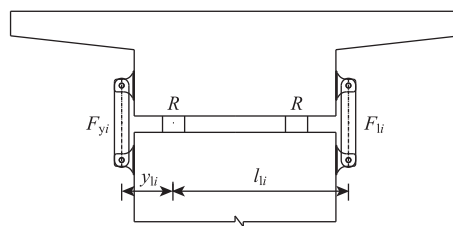


图5 拉压杆抗倾覆加固结构力学示意图

Fig. 5 Mechanical diagram of anti-overturning reinforcement structure

加固后上部结构稳定效应(考虑拉杆+压杆):

$$\sum S_{bk,i} = \sum R_{Gki} l_{li} + \sum F_{li} l_{li} + \sum F_{ri} l_{ri}, \quad (2)$$

式中, F_{li} 为在可变作用下,第 i 个桥墩拉杆提供的抗倾覆拉力; l_{li} 为第 i 个桥墩拉杆与有效支座的距离; l_{ri} 为第 i 个桥墩压杆与有效支座的距离;加固后倾覆稳定性验算系数:

$$\frac{\sum S_{bk,i}}{\sum S_{sk,i}} = \frac{\sum R_{Gki}L_i + \sum F_{li}l_{li} + \sum F_{ri}l_{ri}}{\sum S_{sk,i}} \geq k_{qf} = 2.5。$$

(3)

4 工程应用实例

4.1 工程概况

某互通立交桥由 1 条主线及 10 条匝道组成, 与地面道路形成 4 层立体交叉, 如图 6 所示。各匝道桥基本为曲线桥梁, 主梁结构形式钢筋混凝土箱梁或预应力混凝土箱梁, 桥墩结构形式为花瓶式独柱墩, 设置小间距双支座, 如图 7 所示。



图 6 互通桥梁鸟瞰图

Fig. 6 A bird's eye view of interchange

由于该桥交通量较大, 日常运营中经常发生堵

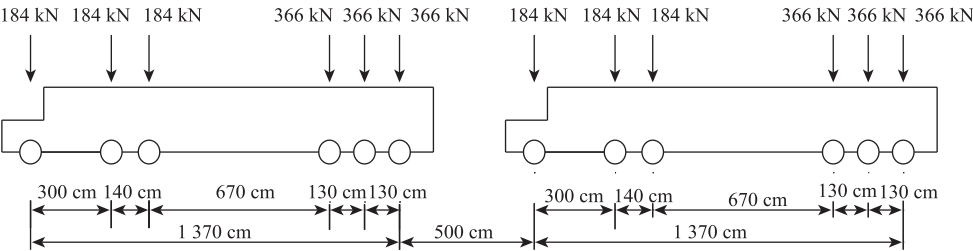


图 8 车队荷载布置

Fig. 8 Layout of vehicle loads

根据计算结果, 在抗倾覆控制荷载重载车队作用下, 部分桥梁的抗倾覆安全系数均小于规范值, 不能满足要求。

表 1 抗倾覆安全系数计算结果

Tab. 1 Calculation result of anti-overturning safety coefficient

桥梁编号	跨径组合/m	倾覆系数
第 A 联	2 × 18. 454	1. 263
第 B 联	17. 8 + 22 + 17. 9	1. 147
第 C 联	18. 7 + 23 + 18. 7	1. 271
第 D 联	18. 547 + 18. 546	1. 289
第 E 联	17. 57 + 17. 57	0. 946

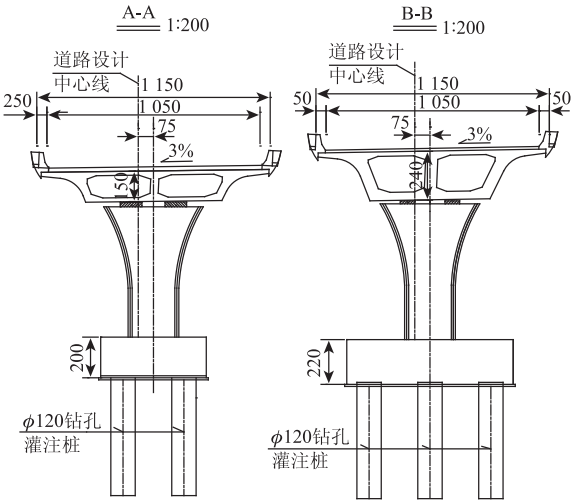


图 7 横断面布置 (单位: cm)

Fig. 7 Arrangement of cross-sections (unit: cm)

车现象, 且桥上行驶的 6 轴重车或拖挂车等重载大货车较多。而桥梁横向两个支座间距为 1.9 m, 相对于宽度为 9 m 的桥梁净宽来说偏小, 这些因素对桥梁结构的横向稳定性产生不利影响, 成为主梁倾覆的安全隐患。

依据结构类型、桥梁宽度、跨径布置及曲线半径等进行分类, 选取了具有代表性的联进行了计算分析。并参考独柱墩桥梁抗倾覆控制荷载重载车队的模型进行车队布载。单车为 6 轴车, 每辆车总重 165 t, 车辆间距 5 m, 其布置图如图 8 所示。

4.2 抗倾覆加固设计

如前文所述, 为避免主梁的横桥向倾覆, 将主梁腹板两侧与桥墩通过某种方式连接, 当主梁有倾覆的趋势时, 产生拉压杆效应, 为有倾覆趋势的主梁提供了一个反向力矩 M , 以抵抗主梁的倾覆力矩 T , 以提高主梁的抗倾覆能力。因此, 本桥采用在箱梁两侧增设拉杆的方式进行防倾覆处理, 如图 9 所示。在主梁腹板两侧以及墩顶附近植入高强螺栓, 布置钢板并在钢板上焊接耳板, 然后将主梁及墩顶上的耳板通过钢拉杆连接, 形成主梁两侧的拉压杆加固结构。

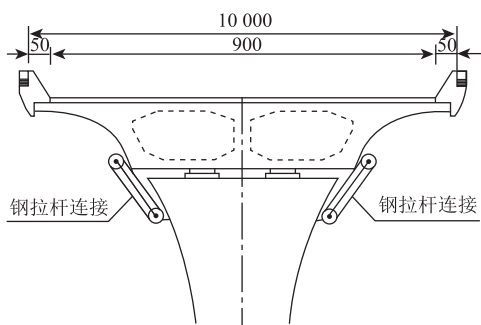


图9 桥梁加固方案 (单位: cm)

Fig. 9 Bridge reinforcement scheme (unit: cm)

计算结果表明, 加固后桥梁抗倾覆稳定系数大幅增加, 且满足规范要求。同时, 下部结构桥墩本身断面构造尺寸较大, 承载能力满足要求, 加固后关键受力截面为拉杆及其连接构件截面, 经计算拉杆与连接件强度也满足承载力要求。

表2 抗倾覆安全系数计算结果

Tab. 2 Calculation result of anti-overturning safety coefficient

匝道编号	加固前	加固后	提高比例
第A联	1.263	3.217	1.55
第B联	1.147	3.231	1.82
第C联	1.271	3.269	1.57
第D联	1.289	3.480	1.70
第E联	0.946	2.939	2.11

表3 防倾覆拉杆强度计算结果

Tab. 3 Calculation result of anti-overturning tie rod strength

项目	荷载效应	承载力	是否满足
拉杆轴向拉力/kN	531.3	1 500	满足
单块钢板锚固/kN	971.7	1 178	满足
螺栓承载力/kN	763.1	1 377	满足
耳板与钢板焊接/MPa	127.8	310	满足

4.3 倾覆稳定性监测

选定K匝道桥开展倾覆稳定性的监测, 监测断面为一联两段的伸缩缝墩顶处, 测点布置在近支座处竖向位移测点(图10)。图11、12表明, K匝道桥梁结构在运营荷载作用下, 一联伸缩端墩顶处梁底监测点竖向位移值均为负值(支座受压), 监测期间未见明显位移突变导致支座脱空, 左右侧梁体位移并未出现较大的反差, 并且呈现一致的变化规律, 表明K匝道桥被监测联在运营荷载作用下未出现明显的倾覆趋向, 表明基于拉压杆的抗倾覆加固结构的有效性。

5 结论

针对独柱墩桥梁倾覆过程的最主要表现形式是主梁绕荷载作用侧最外侧支座连线方向转动, 为限制主梁刚体转动, 在杠杆原理基础上, 将主梁腹板

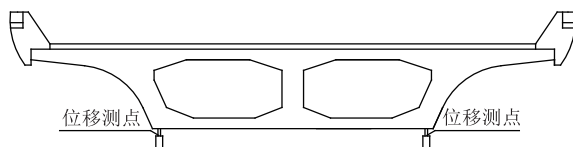


图10 竖向位移测点布置

Fig. 10 Layout of vertical displacement measuring points

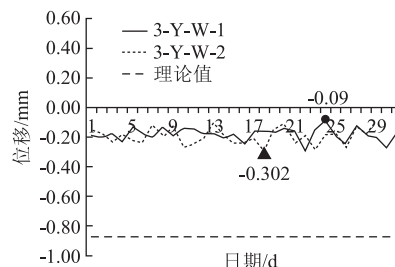


图11 桥3#墩处测点最大位移

Fig. 11 Maximum displacement of measuring point at pier No. 3 of bridge

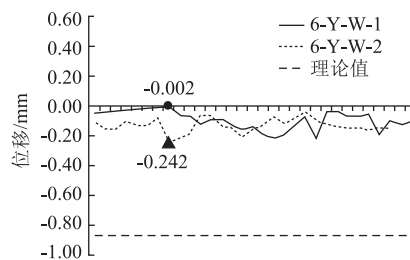


图12 桥6#墩处测点最大位移

Fig. 12 Maximum displacement of measuring point at pier No. 6 of bridge

两侧与桥墩通过钢拉杆连接, 形成抗倾覆力矩, 提出了基于拉压杆的独柱墩抗倾覆加固结构, 并在力学原理基础上建立了抗倾覆稳定系数计算方法。该加固结构构造简单, 受力明确, 加固效果好, 设计与施工方便。工程应用实例表明, 该加固结构能桥梁大幅增加抗倾覆稳定系数, 实桥监测结果也验证了加固结构的有效性和可行性, 可为类似桥梁结构加固提供借鉴和参考。

参考文献:

References:

- [1] 鲁圣弟, 熊文, 丁旭东, 等. 桥型布置对独柱墩曲线梁桥抗倾覆性能的影响 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (5): 95-101.
LU Sheng-di, XIONG Wen, DING Xu-dong, et al. Influence of Structure Arrangement on Anti-overturn Performance of Curved Beam Bridge with Single-column Piers [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (5): 95-101.
- [2] 刘二铭. 既有独柱墩连续弯桥抗倾覆稳定及其改善措

- 施研究 [D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.
- LIU Er-ming. Research on Overturning Stability and Improvement Measures of Continuous Curved Bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [3] 马玉荣, 陈海波, 吕改锋, 等. 独柱墩桥梁上部结构抗倾覆稳定性分析 [J]. 太原科技大学学报, 2019, 40 (4): 316–322.
- MA Yu-rong, CHEN Hai-bo, LÜ Gai-feng, et al. Analysis of Anti-overturning Stability of Superstructure of Single Pier Bridge [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2019, 40 (4): 316–322.
- [4] 王铁. 独柱墩梁桥的稳定性及加固方法探讨 [D]. 长沙:长沙理工大学, 2016.
- WANG Tie. Stability and Reinforcement of Single-pillar Bridge [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2016.
- [5] 彭卫兵, 朱志翔, 陈光军, 等. 梁桥倾覆机理、破坏模式与计算方法研究 [J]. 土木工程学报, 2019, 52 (12): 104–113.
- PENG Wei-bing, ZHU Zhi-xiang, CHEN Guang-jun, et al. Research on Overturning Failure Mode of Beam Bridges and Applicability of Calculation Method [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52 (12): 104–113.
- [6] 蔡力. 独柱墩桥梁抗倾覆设计与加固方法研究 [D]. 重庆:重庆交通大学, 2020.
- CAI Li. Research on Anti-overturning Design and Strengthening Methods of Single-pillar Bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [7] 车德路. 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性研究 [D]. 郑州:郑州大学, 2017.
- CHE De-lu. Research on Anti-overturning Stability of Single-pillar Pier Curved Box Girder Bridge [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.
- [8] 苏宁. 独柱墩连续梁桥抗倾覆非线性分析 [D]. 西安:长安大学, 2018.
- SU Ning. Nonlinear Analysis of Single-pillar Pier Continuous Beam Bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [9] 程波. 曲线独柱墩梁桥抗倾覆承载力计算理论研究 [D]. 杭州:浙江工业大学, 2016.
- CHENG Bo. Theory of Anti-dumping Capacity of Curved Single-pillar Pier Beam Bridge [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [10] 殷一莉. 独柱墩桥梁抗倾覆分析及其加固研究 [D]. 天津:河北工业大学, 2015.
- YIN Yi-li. Anti-dumping Analysis and Reinforcement Research of Single-column Pier Bridges [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.
- [11] 付向荣. 独柱墩桥梁抗倾覆加固及同步顶升更换支座技术 [J]. 上海公路, 2020, 157 (2): 30–34, 53, 128.
- FU Xiang-rong. Anti-overturning Reinforcement and Synchronous Jacking Replacement Technology of Single Pier Bridge [J]. Shanghai Highways, 2020, 157 (2): 30–34, 53, 128.
- [12] 付武荣. 曲梁独柱墩增设钢盖梁数值模拟分析 [J]. 中国市政工程, 2020, 212 (5): 24–27, 113.
- FU Wu-rong. Numerical Simulation Analysis of Adding Steel Capping Beam to Curved Beam Single Column Pier [J]. China Municipal Engineering, 2020, 212 (5): 24–27, 113.
- [13] 郝桂冬. 津静立交独柱墩匝道桥抗倾覆分析及加固方法研究 [D]. 天津:河北工业大学, 2018.
- HAO Gui-dong. Anti-overturning Analysis and Reinforcement Method of Single-pillar Pier Ramp Bridge of Jin-jing Interchange [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.
- [14] 魏剑峰. 独柱墩曲线梁桥抗倾覆性能评估方法与加固方式研究 [D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2017.
- WEI Jian-feng. Evaluation Method and Strengthening Method of Single-pillar Pier Curve Beam Bridge [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2017.
- [15] 游科华. 独柱墩连续箱梁桥抗倾覆验算和加固设计 [J]. 城市道桥与防洪, 2020, 254 (6): 15, 82–84, 90.
- YOU Ke-hua. Anti-overturning Checking Calculation and Reinforcement Design of Single-pier Continuous Box Girder Bridge [J]. Urban Bridge and Flood Control, 2020, 254 (6): 15, 82–84, 90.
- [16] 林上顺, 叶世集, 林永捷, 等. 预应力混凝土连续箱梁桥抗侧翻设计关键参数 [J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19 (1): 102–106.
- LIN Shang-shun, YE Shi-ji, LIN Yong-jie, et al. Key Design Parameters of Prestressed Concrete Continuous Box Girder Bridge against Rollover [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19 (1): 102–106.
- [17] 朱汉兵. 现役独柱墩桥梁横向抗倾覆性能分析 [D]. 西安:长安大学, 2017.
- ZHU Han-bing. Analysis of Lateral Anti-overturning Performance of Active Single-pillar Pier Bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [18] 熊文, 鲁圣弟, 龚玄, 等. 独柱墩梁桥倾覆临界状态分析及规范法的适用性 [J]. 中国公路学报, 2018, 31 (3): 49–58.
- XIONG Wen, LU Sheng-di, GONG Xuan, et al. Critical Condition Analysis of Overturned Bridges with Single-column piers and Applicability of Design Standards [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (3): 49–58.
- [19] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
- JTG 3362—2018, Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S].