

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202204112024081978

文章编号:1674-599X(2024)04-0085-08

引用格式:吕毅刚,王翠,饶攀,等.基于墩柱增设的独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆研究[J].交通科学与工程,2024,40(4):85-92.

Citation: LYU Yigang, WANG Cui, RAO Pan, et al. Research on anti-overturning of curved box girder bridge with single column pier based on adding pier and column[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(4): 85-92.

基于墩柱增设的独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆研究

吕毅刚^{1,3}, 王翠^{1,4}, 饶攀¹, 韩伟威^{2,3}, 李星¹, 乔杰¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;
3.长沙理工大学 桥梁结构安全控制湖南省工程实验室,湖南 长沙 410114;4.远东幕墙(珠海)有限公司,
广东 珠海 519090)

摘 要:近年来,独柱墩曲线箱梁桥整体侧翻倾覆事故时有发生,开展抗倾覆分析及加固对策的研究具有重要的工程价值。以某匝道桥为工程背景,考虑其抗倾覆稳定性,使用支座失效法并结合有限元分析软件Midas/Civil建立柔性梁格有限元模型,对独柱墩曲线箱梁桥加固前后的抗倾覆稳定性和动力特性进行了对比分析。研究表明:加固前该桥曲线箱梁的一阶振型为扭转振动,在4号墩处,易发生扭转,可能导致支座脱空,此时该桥抗倾覆稳定系数最小为1.97,不满足规范中抗倾覆稳定系数不小于2.50的要求。采用墩柱增设法对4号墩进行加固后,该桥曲线箱梁的一阶振型为纵向弯曲振动,抗倾覆稳定系数最小为4.31,抗倾覆能力得到显著提升。通过现场抗倾覆稳定性静载试验,对加固效果进行了实桥验证,效果较好。

关键词:独柱墩;曲线箱梁桥;墩柱增设法;抗倾覆稳定系数

中图分类号:U441

文献标志码:A

Research on anti-overturning of curved box girder bridge with single column pier based on the addition of piers and columns

LYU Yigang^{1,3}, WANG Cui^{1,4}, RAO Pan¹, HAN Weiwei^{2,3}, LI Xing¹, QIAO Jie¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Hunan Province Engineering Laboratory for Bridge Structure Safety Control, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 4. Far East Facade (Zhuhai) Co., Ltd., Zhuhai 519090, China)

Abstract: In recent years, overturning accidents involving curved girder bridges with single-column piers have occurred frequently, underscoring the critical engineering significance of conducting anti-overturning analysis and developing effective reinforcement strategies. This study focused on a specific ramp bridge, evaluating its anti-overturning stability by using the bearing failure method and finite element analysis software Midas/Civil. A flexible girder lattice finite element model was established to compare and analyze the anti-overturning stability and dynamic characteristics of the curved girder bridge before and after reinforcement. The results indicate that, prior to reinforcement, the first-order mode of the curved box girder of the ramp bridge exhibited torsional vibration, particularly prone to torsion at pier 4, potentially leading to bearing voids. The minimum anti-overturning stability

收稿日期:2022-04-11

基金项目:湖南省教育厅科学研究一般项目(20C0063);湖南省教育厅科学研究创新平台开放基金项目(20K005);长沙理工大学桥梁结构安全控制湖南省工程实验室开放基金资助项目(14KD13)

通信作者:吕毅刚(1978—),男,讲师,主要从事混凝土材料的长期性能和耐久性能等方面的研究工作。E-mail:andrew@csust.edu.cn

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

coefficient was found to be 1.97, failing to meet the required minimum of 2.50, thus indicating insufficient anti-overturning capacity. Post-reinforcement, with the application of additional piers and columns to pier 4, the first-order mode of the curved box girder shifted to longitudinal bending vibration, and the minimum anti-overturning stability coefficient increased to 4.31, demonstrating a significant enhancement in anti-overturning capacity. The efficacy of the reinforcement was further validated through an on-site static load test, which confirmed the positive impact of the implemented measures.

Key words: single column pier; curved box girder bridge; application of additional piers and columns; anti-overturning stability factor

随着我国交通运输的发展和城市现代化脚步的不断加快,独柱墩桥梁在高速公路的互通式立交桥和城市交叉口的立交匝道桥中得到了广泛应用。独柱墩桥梁虽具有样式美观、占地空间小、地形适应性强等优点,但因原设计规范中设计荷载较小,且大部分工程师对桥梁抗倾覆的设计理论认识不足,近年来全国各地相继出现了多起独柱墩桥梁整体侧翻倾覆事故,造成了严重的经济损失和恶劣的社会影响^[1-3],尤其是独柱墩曲线箱梁桥,在偏心活载和梁体内外侧偏心恒载的作用下,桥梁连接墩或桥台处位于曲线内侧的双支座可能会出现负反力,甚至出现支座脱空的现象,导致桥梁上部结构产生整体失稳和倾覆破坏^[4]。因此进行独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性的研究具有重要意义。DAN等^[5]提出了实桥抗倾覆风险的评估方法;何雄君等^[6]发现曲线半径的取值、车辆荷载的交通管控及曲线桥的支座布置形式等均对大跨度小半径曲线梁桥的抗倾覆稳定性有较大的影响;熊文等^[7]对哈尔滨阳明滩大桥已发生倾覆事故的独柱墩梁桥段进行抗倾覆分析,提出了倾覆临界值;吕毅刚等^[8]基于力学原理,用均布面荷载或集中力对倾覆轴线取矩的方法计算了自重作用产生的稳定效应,提出了稳定效应的简化计算方法,该方法无需借助有限元软件便可获得较准确的抗倾覆稳定系数;宫亚峰等^[9]对三跨独柱连续曲线梁桥的抗倾覆稳定系数进行了测算,并将其与使用规范公式计算出的结果进行对比;甘世泽^[10]采用有限元软件建立桥梁仿真模型,研究了不同支承距离和支承方式下的独柱墩箱梁桥的抗倾覆稳定性变化规律;陈勇等^[11]基于桥梁抗倾覆性能验算评估方法和桥梁倾覆机理,研究了独柱墩桥梁抗倾覆加固的一些改造方案。

本文依托某座独柱墩曲线箱梁桥加固改造工程,结合有限元分析软件Midas/Civil,对独柱墩曲线

箱梁桥加固前后的抗倾覆稳定性和动力特性进行了对比分析,并通过现场抗倾覆稳定性静载试验,对加固效果进行实桥验证,旨在为独柱墩曲线箱梁桥的抗倾覆稳定性研究提供参考。

1 工程概况

以某大桥的D匝道桥为研究对象。D匝道桥为5×16.00 m连续曲线箱梁桥,曲率半径为150.0 m,桥跨总长为86.0 m,匝道桥第5跨与主线桥的桥墩以牛腿方式相接。D匝道桥总宽11.0 m,桥面布置为:0.25 m(护栏)+7.25 m(行车道)+3.50 m(人行道及护栏)。桥梁下部采用重力式桥台,桥墩采用桩柱式桥墩,基础采用桩基础,柱径为1.30 m,桩径为1.50 m。D匝道桥三维示意图和立面图分别如图1、图2所示。

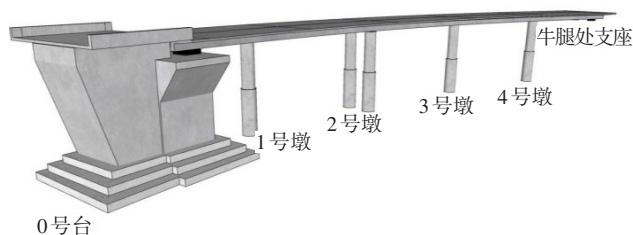


图1 D匝道桥三维示意图

Fig. 1 Three-dimensional schematic diagram of D ramp bridge

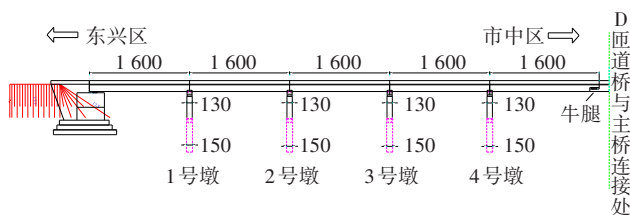


图2 D匝道桥立面示意图(单位:cm)

Fig. 2 Elevation view of D ramp bridge (unit: cm)

跨中截面的细部截面尺寸如图3所示,D匝道桥主梁采用1.20 m等高的箱梁,现行荷载等级为公路-I级。

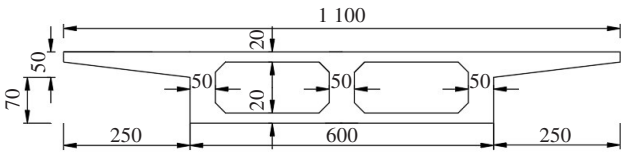


图3 D匝道桥主梁跨中截面细部尺寸图(单位:cm)

Fig. 3 Detailed dimensions of the midspan cross-section of the main girder of D ramp bridge (unit:cm)

2 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性计算分析

2.1 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性计算方法

国内常用的抗倾覆稳定性计算方法主要包括支座失效法和倾覆轴理论计算法两种。本文采用支座失效法进行独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性研究^[12]。抗倾覆稳定系数的计算公式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum S_{bk,i} = \sum R_{Gki} l_i \\ \sum S_{sk,i} = \sum R_{Qki} l_i \\ \frac{\sum S_{bk,i}}{\sum S_{sk,i}} = k_{qf} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: l_i 为第*i*个桥墩处失效支座中心与有效支座中心的间距; R_{Gki} 为第*i*个桥墩处失效支座的永久作用支反力; R_{Qki} 为第*i*个桥墩失效支座的可变作用支反力; $\sum S_{bk,i}$ 为使上部结构稳定的效应设计值; $\sum S_{sk,i}$ 为使上部结构失稳的效应设计值; k_{qf} 为横向抗倾覆稳定系数,要求不应小于2.50。

2.2 加固前独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性分析

2.2.1 加固前箱梁桥有限元模型构建

目前桥梁抗倾覆的有限元建模方法主要有三种,即柔性梁格法、单根线单元法、实体单元法。柔性梁格法不仅能进行纵桥向受力分析,还能进行横桥向受力分析。同时,其工作量较少、计算结果较精确,因此是目前较常用的方法。为研究加固前D匝道桥的抗倾覆稳定性能,利用有限元分析软件Midas/Civil,采用柔性梁格法建立了加固前D匝道桥的计算模型,如图4所示。为更好地传递车辆在最外侧边缘行驶时所产生的最不利偏载作用,本文将单箱双室的主梁截面以箱室中心为基准划分为三部分,并使用容重为零且刚度适中的虚拟横梁来连接中间及外侧。

2.2.2 加固前箱梁桥抗倾覆稳定性分析

采用支座失效法分析桥梁抗倾覆稳定性时,主要包括支座脱空计算和抗倾覆稳定系数计算。加

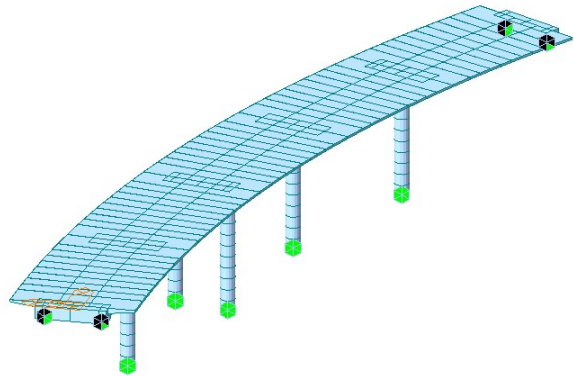


图4 加固前D匝道桥计算模型

Fig. 4 Finite element model of D ramp bridge before reinforcement

固前D匝道桥的约束体系如图5所示。在进行资料调研和现场踏勘,并核对D匝道桥的各项计算要素后,采用Midas/Civil软件对加固前D匝道桥的各支座反力进行计算。根据计算结果,采用表1所示的公式对其抗倾覆稳定性进行验算,包括支座反力的验算(特征状态1)和抗倾覆稳定系数的验算(特征状态2),计算结果如表1所示。

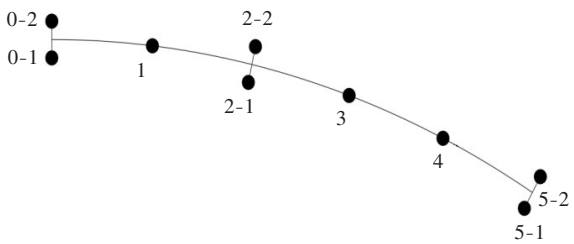


图5 加固前D匝道桥约束体系示意图

Fig. 5 Diagram of the constraint system of D ramp bridge before reinforcement

表1 加固前D匝道桥抗倾覆稳定性分析结果

Table 1 Anti-overturning stability analysis results of D ramp bridge before reinforcement

项目	公式	最小值	结论
支座反力的验算(特征状态1)	$1.0R_{Gki} + 1.4R_{Qki, 0-1}$	30.90 kN	不满足
	$1.0R_{Gki} + 1.4R_{Qki, 2-1}$	-41.50 kN	
	$1.0R_{Gki} + 1.4R_{Qki, 4}$	353.40 kN	
	$1.0R_{Gki} + 1.4R_{Qki, 5-1}$	-192.90 kN	
抗倾覆稳定系数的验算(特征状态2)	$\sum R_{Gki} l_i / \sum R_{Qki, 0-1} l_i$	3.89	不满足
	$\sum R_{Gki} l_i / \sum R_{Qki, 2-1} l_i$	1.97	
	$\sum R_{Gki} l_i / \sum R_{Qki, 4} l_i$	7.09	
	$\sum R_{Gki} l_i / \sum R_{Qki, 5-1} l_i$	2.77	

由表1可知,在特征状态1验算中,支座反力存在负值,最小值为-192.90 kN,表明曲线内侧支座出现脱空现象,桥梁处于失稳状态,不满足规范要求。

在特征状态2验算中,抗倾覆稳定系数最小值为1.97,不满足规范中横向抗倾覆稳定系数不小于2.50的规定。因此,加固前D匝道桥的抗倾覆能力不足,应采取相应加固措施提高其稳定性。

2.2.3 加固前箱梁桥动力特性分析

运用Midas/Civil软件中的特征值分析功能,可获得加固前D匝道桥在第1~3阶的频率计算结果和第1阶振型图,如表2和图6所示。

表2 加固前D匝道桥频率

Table 2 Frequency of D ramp bridge before reinforcement

阶数	频率/Hz
第1阶	5.899
第2阶	8.440
第3阶	8.838

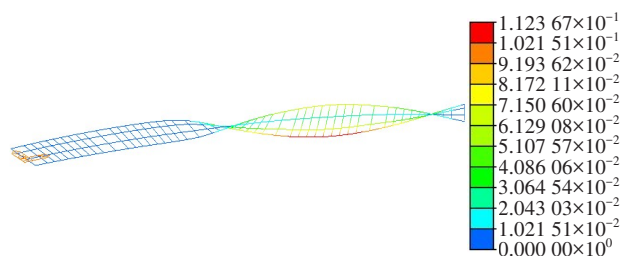


图6 加固前D匝道桥第1阶振型图

Fig. 6 First-order mode shape diagram of D ramp bridge before reinforcement

由图6可知,该桥第1、2跨箱梁较稳定,第3~5跨箱梁第1阶振型为扭转振动,箱梁易在第4、5跨的4号墩位置发生扭转而导致支座脱空,使结构稳定性较差。该独柱墩曲线箱梁桥在加固之前整体扭转刚度较小,横向稳定性不足,易出现桥梁侧翻倾覆的现象,这也从动力特性角度说明该桥的抗倾覆稳定性不满足规范的要求。

2.3 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆加固对策研究

独柱墩曲线箱梁桥常用的抗倾覆加固方法有盖梁增设法、墩梁固结法、墩柱增设法等。为确定D匝道桥的加固设计方案,设计人员结合该桥的交通状况、地质条件等因素对不同加固对策进行了比选,考虑到D匝道桥的地理位置和桥下交通状况,最终采用墩柱增设法进行加固,即在D匝道桥4号墩横向增设2个150.0 cm×120.0 cm的矩形墩柱,新增的两个墩柱的中心间距为5.0 m,使4号墩的支撑条件由独立支撑转化为三支撑,具体布置如图7所示。

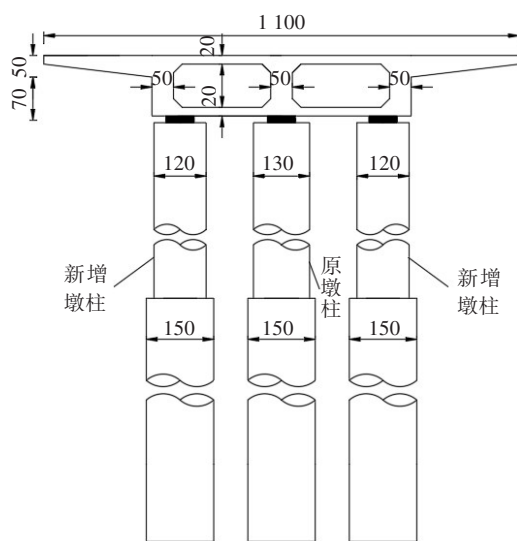


图7 加固后D匝道桥横向新增墩柱示意图(单位:cm)

Fig. 7 Diagram of transversely added piers of D ramp bridge after reinforcement(unit: cm)

2.4 加固后独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性分析

2.4.1 加固后箱梁桥有限元模型构建

利用有限元分析软件Midas/Civil,采用柔性梁格法建立加固后D匝道桥的计算模型,如图8所示。

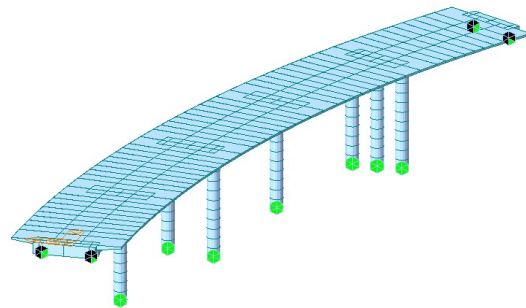


图8 加固后D匝道桥计算模型

Fig. 8 Finite element model of D ramp bridge after reinforcement

2.4.2 加固后箱梁桥抗倾覆稳定性分析

加固后,在4号墩处新增支座4-1和4-2,并使用Midas/Civil软件进行分析。加固后D匝道桥约束体系如图9所示,抗倾覆稳定性分析结果如表3所示。

由表3可知,在特征状态1的验算中,支座反力最小值为7.20 kN,未出现负值,表明支座不会发生脱空现象,满足规范要求。在特征状态2的验算中,抗倾覆稳定系数最小值为4.31,满足规范中横向抗倾覆稳定系数不小于2.50的规定。因此,用桥墩增设法加固后D匝道桥的抗倾覆能力显著提高,结构稳定性较好。

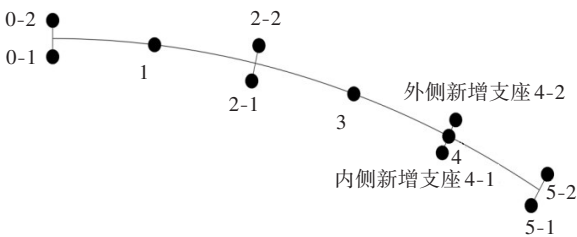


图9 加固后D匝道桥约束体系示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the restraint system of the D ramp bridge after reinforcement

表3 加固后D匝道桥抗倾覆稳定性分析结果

Table 3 Anti-over turning stability analysis results of D ramp bridge after reinforcement

项目	公式	最小值	结论
支座反力的验算 (特征状态1)	$1.0R_{Gki} + 1.4R_{Qki, 0-1}$	7.20 kN	满足
	$1.0R_{Gki} + 1.4R_{Qki, 2-1}$	151.30 kN	
	$1.0R_{Gki} + 1.4R_{Qki, 4-1}$	518.50 kN	
	$1.0R_{Gki} + 1.4R_{Qki, 5-1}$	353.70 kN	
抗倾覆稳定系数的验算(特征状态2)	$\sum R_{Gki} l_i / \sum R_{Qki, 0-1} l_i$	5.56	满足
	$\sum R_{Gki} l_i / \sum R_{Qki, 2-1} l_i$	4.31	
	$\sum R_{Gki} l_i / \sum R_{Qki, 4-1} l_i$	5.68	
	$\sum R_{Gki} l_i / \sum R_{Qki, 5-1} l_i$	9.27	

2.4.3 加固后箱梁桥动力特性分析

对加固后的D匝道桥进行动力特性分析,探究D匝道桥加固后的实际工程效果,加固后D匝道桥在第1~3阶的频率计算结果和第1阶振型图分别如表4和图10所示。

对比表2和表4可知,加固后D匝道桥第1阶振型频率相比于加固前增大了2.541 Hz,表明加固后D匝道桥的动力刚度显著增大;对比图6和图10可知,加固后D匝道桥的第1阶振型由扭转振动转变为竖向弯曲振动,表明加固后D匝道桥的抗倾覆能力得到了显著的提升,这也从动力特性角度验证了该加固方法可有效提高该桥的抗倾覆能力。

3 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性静载试验研究

3.1 试验工况及荷载效率系数

由以上分析可知,加固前D匝道桥的箱梁易在4号墩位置发生扭转而导致支座脱空,且第4、5跨梁体易发生扭转倾覆现象。为研究加固后D匝道桥的

表4 加固后D匝道桥频率

Table 4 Frequency of D ramp bridge after reinforcement

阶数	频率/Hz
第1阶	8.440
第2阶	8.587
第3阶	8.952

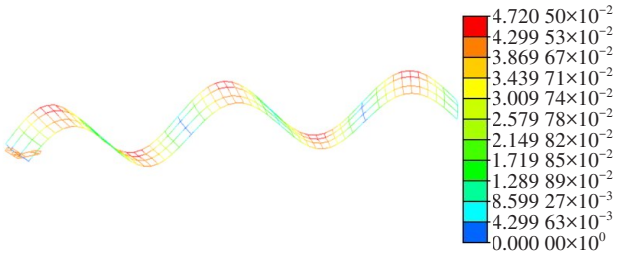


图10 加固后D匝道桥第1阶振型图

Fig. 10 First-order mode shape diagram of D ramp bridge after reinforcement

实际工程效果,对该桥进行抗倾覆稳定性静载试验,并设置了以下三种工况:

- 1) 工况一:4号墩的支座4-1的最大负反力,偏弯道外侧布载;
- 2) 工况二:第4跨箱梁最大正弯矩,偏弯道外侧布载;
- 3) 工况三:第5跨箱梁最大正弯矩,偏弯道外侧布载。

工况一检验了D匝道桥在外侧偏载作用下内侧支座是否发生脱空现象,据此衡量桥梁的抗倾覆稳定性;工况二和工况三检验了梁体在运营过程中的横向稳定性。试验过程中采用总重为30 t的后八轮汽车作为加载车,每种试验工况需使用4辆加载车,采用4级加载和2级卸载进行静载试验,抗倾覆稳定性静载试验的荷载效率系数见表5,静载试验平面布置图(以工况一为例)如图11所示。

表5 抗倾覆稳定性静载试验的荷载效率系数

Table 5 Load efficiency coefficient of static load test for anti-overturning stability

工况	加载车数量/辆	试验荷载效应值	设计荷载计算值	效率系数/%
工况一	4	668.14 kN	674.21 kN	99.10
工况二	4	2 715.30 kN·m	2752.18 kN·m	98.66
工况三	4	3 197.20 kN·m	3273.14 kN·m	97.68

3.2 测点布置和测试方法

在D匝道桥的4号墩位置布置了支座脱空观测

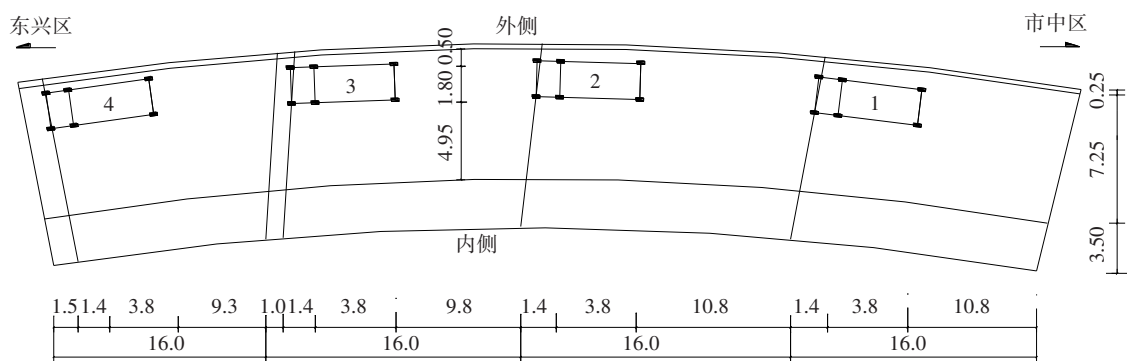


图11 工况一静载试验平面布置图(单位:m)

Fig. 11 Plan layout of static load test under working condition one (unit:m)

点1~3。如图12所示,采用高倍望远镜进行观测。同时,在第4、5跨箱梁的跨中截面布置了应变测试点和挠度测试点,分别粘贴外贴式电阻应变片并布置百分表测量应变和挠度,如图13~14所示。所有测点依次从弯道外侧往弯道内侧进行编号。

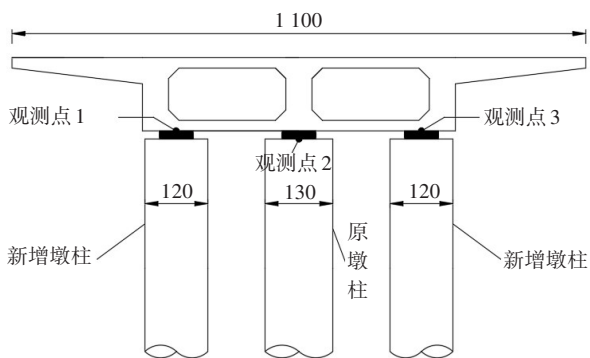


图12 4号墩的支座脱空观测点(单位:cm)

Fig. 12 Setting of observation point for bearing void at pier 4 (unit: cm)

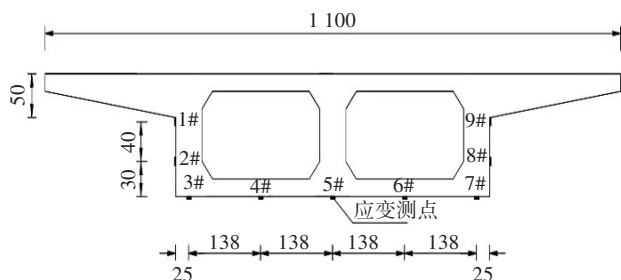


图13 跨中截面应变测试点布置(单位:cm)

Fig. 13 Setting of strain test points at the mid-span section (unit: cm)

3.3 试验结果分析

在工况一各级荷载的作用下,通过高倍望远镜可观测到改造后的D匝道桥未出现支座脱空现象。在工况二和工况三最后一级荷载的作用下,各截面的应变、挠度测试点的实测值与理论值分别如图15~18所示。

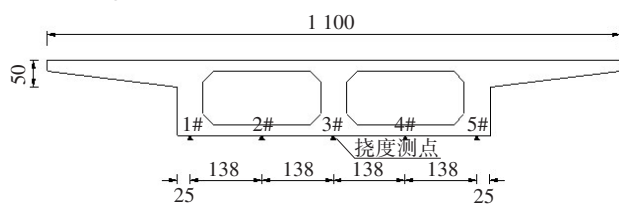


图14 跨中截面挠度测试点布置(单位:cm)

Fig. 14 Setting of deflection points at the midspan cross-section (unit:cm)

由图15可知,在工况二最后一级荷载的作用下,各测点的应变实测值为 $3 \times 10^{-6} \sim 72 \times 10^{-6}$,应变理论值为 $4 \times 10^{-6} \sim 105 \times 10^{-6}$,当控制截面各测点应变校验系数为0.65~0.74时,最大相对残余应变为0.13。

由图16可知,各测点的挠度实测值为0.58~2.76 mm,理论值为0.80~3.38 mm,控制截面各测点挠度校验系数为0.72~0.82,最大相对残余变形为0.12,满足规范要求。

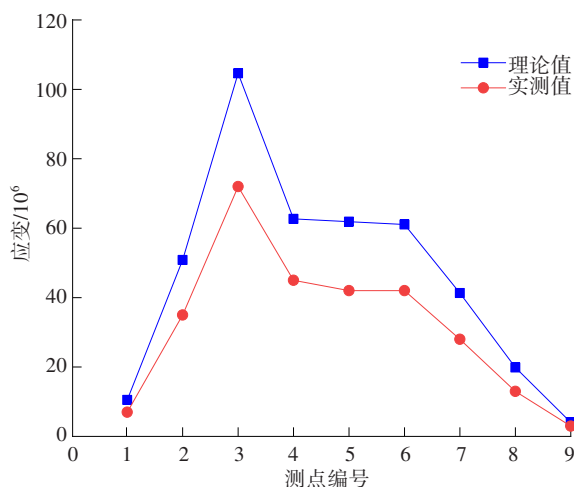


图15 工况二第4跨跨中截面实测与理论应变结果对比

Fig. 15 Comparison between tested and theoretical strain results at the midspan cross-section of span 4 under working condition two

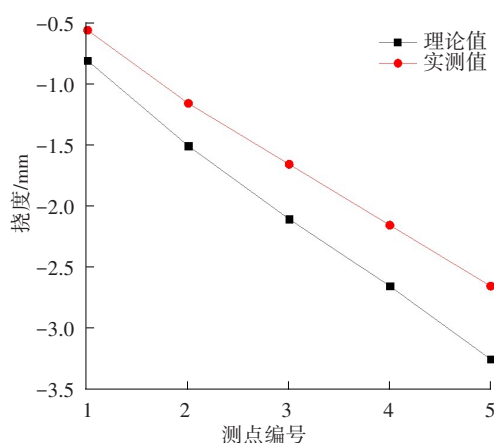


图16 工况二第4跨跨中截面实测与理论挠度结果对比

Fig. 16 Comparison between tested and theoretical deflection results at the midspan cross-section of span 4 under working condition two

由图 17 可知,在工况三最后一级荷载的作用下,各测点的应变实测值为 $4 \times 10^{-6} \sim 82 \times 10^{-6}$,理论值为 $6 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$,控制截面各测点应变校验系数为 0.64 ~ 0.74,计算出最大相对残余应变为 0.13,满足规范要求。

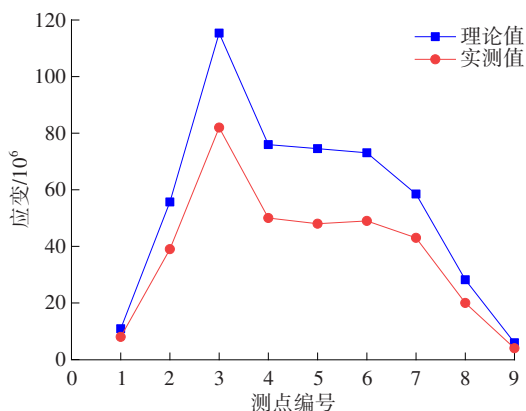


图17 工况三第5跨跨中截面实测与理论应变结果对比

Fig. 17 Comparison between tested and theoretical strain results at the midspan cross-section of span 5 under working condition three

由图 18 可知,各测点的挠度实测值为 1.38 ~ 2.45 mm,理论值为 1.77 ~ 3.46 mm,控制截面各测点挠度校验系数为 0.77 ~ 0.79,计算出最大相对残余变形为 0.10,满足规范要求。

综上所述,控制截面各测点应变校验系数为 0.64 ~ 0.74,各测点挠度校验系数为 0.72 ~ 0.82,计算得到最大相对残余应变和最大相对残余变形分别为 0.13 和 0.12,均满足规范要求。整个试验过程中,D 匝道桥的上部结构未出现横向失稳现象。

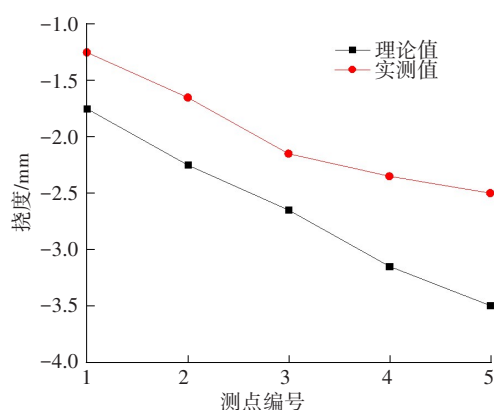


图18 工况三第5跨跨中截面实测与理论挠度结果对比

Fig. 18 Comparison between tested and theoretical deflection results at the midspan cross-section of span 5 under working condition three

根据上述抗倾覆稳定性静载试验结果可知,在现行设计荷载作用下,基于墩柱增设法加固后的 D 匝道桥的承载力及抗倾覆性能均满足使用要求,实际加固效果较好。

4 结论

独柱墩曲线梁桥在“弯-扭”耦合作用下,极易发生整体横向失稳,导致桥梁发生整体侧翻倾覆的事故。以某大桥的 D 匝道桥为工程背景,运用有限元分析软件 Midas/Civil 建立了桥梁柔性梁格有限元模型,开展了加固前后的独柱墩曲线箱梁桥的抗倾覆稳定性和动力特性对比研究,主要结论如下:

1) 采用支座失效法对加固前的 D 匝道桥的抗倾覆稳定性进行了测算,得出支座反力的最小值为 -192.90 kN,表明支座会发生脱空现象,抗倾覆稳定系数最小值为 1.97,不满足规范中抗倾覆稳定系数最小值为 2.50 的规定;采用有限元分析软件 Midas/Civil 对加固前的 D 匝道桥的动力特性进行了分析,得出加固前曲线箱梁的第 1 阶振型为扭转振动,在 4 号墩位置易发生扭转而导致支座脱空。加固前 D 匝道桥的抗倾覆能力不足,易出现桥梁侧倾事故,应采取相应加固措施提高其稳定性。

2) 采用墩柱增设法对 4 号墩进行了加固,加固后的 D 匝道桥的最小支座反力为 7.20 kN,支座不会发生脱空现象,抗倾覆稳定系数最小值为 4.31,满足规范的要求;加固后曲线箱梁的第 1 振型为纵向弯曲振动。通过现场抗倾覆稳定性静载试验,对加固效果进行了实桥验证,基于桥墩增设法加固后的 D 匝道桥的抗倾覆能力显著提高。

参考文献(References):

- [1] 曹景, 刘志才, 冯希训. 箱形截面直线桥及曲线桥抗倾覆稳定性分析[J]. 桥梁建设, 2014, 44(3): 69-74.
CAO Jing, LIU Zhicai, FENG Xixun. Analysis of overturning stability of straight and curved bridges with box sections[J]. Bridge Construction, 2014, 44(3): 69-74.
- [2] 刘四田. 连续箱梁独柱墩桥抗倾覆能力分析[J]. 公路, 2021, 66(4): 151-154.
LIU Sitian. Analysis of overturning resistance of continuous box girder single-column pier bridge [J]. Highway, 2021, 66(4): 151-154.
- [3] YI R Y, ZHOU R Y. Reason and risk of bridge collapse in recent 15 years [J]. Transportation Science & Technology, 2015(5): 61-64.
- [4] 王志浩. 独柱墩梁桥的抗倾覆分析及加固对策研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
WANG Zhihao. The research of anti-overturning and structural-reinforcement analysis on a girder bridge with single pedestal piers [D]. Xi'an: Changan University, 2014.
- [5] DAN D H, YU X W, YAN X F, et al. Monitoring and evaluation of overturning resistance of box girder bridges based on time-varying reliability analysis[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34 (1): 04019101. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001375.
- [6] 何雄君, 刘鑫, 梁亚兰. 大跨度小半径曲线梁桥抗倾覆性能研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 89-93. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.016.
HE Xiongjun, LIU Xin, LIANG Yalan. Research on the anti-overturning performance of long-span small-radius curved beam bridges [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 89-93. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.02.016.
- [7] 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.03.006.
XIONG Wen, LU Shengdi, 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2018.03.006.
- [8] 吕毅刚, 饶攀, 韩伟威, 等. 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆实用计算方法研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 35-40. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.006.
LYU Yigang, RAO Pan, HAN Weiwei, et al. Research on the practical calculation method of anti-overturning of the curved box girder bridge with single column pier[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 35-40. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.006.
- [9] 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(工学版), 2018, 48(1): 113-120. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20161241.
GONG Yafeng, HE Yulong, TAN Guojin, et al. Anti-overturning stability analysis for three-span continuous curved girder bridge with single column pier[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 113-120. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20161241.
- [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(6): 165-168. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2017.06.045.
GAN Shize. Analysis on the influence of bearing spacing and mode on overturning stability of box girder bridge with single column pier [J]. Highways & Automotive Applications, 2017 (6): 165-168. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2017.06.045.
- [11] 陈勇, 杨培伟. 独柱墩桥梁抗倾覆加固改造技术[J]. 施工技术, 2021, 50(8): 84-88. DOI: 10.7672/sjgs2021080084.
CHEN Yong, YANG Peiwei. Anti-overturning reinforcement technology of single column pier bridge [J]. Construction Technology, 2021, 50(8): 84-88. DOI: 10.7672/sjgs2021080084.
- [12] 唐雨生, 苏培东, 马云长, 等. 含软弱夹层的顺层岩质滑坡渐进破坏研究[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(6): 155-165. DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0617.
TANG Yusheng, SU Peidong, MA Yunchang, et al. Progressive failure of bedding rock landslide with weak interlayer [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(6): 155-165. DOI: 10.13577/j.jnd.2021.0617.
- [13] 袁翔, 滕伟福, 俞伟, 等. MICP技术对巴东组第三段软弱夹层土体的加固试验研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(5): 101-106, 130. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20210084.
YUAN Xiang, TENG Weifu, YU Wei, et al. Experimental study on reinforcement of weak intercalated layer in the third member of Badong Formation based on MICP technology [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(5): 101-106, 130. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20210084.

(责任编辑:薛仪;英文编辑:王佳)

(上接第64页)

(责任编辑:薛仪;英文编辑:冯硕)