

两跨独柱墩曲线连续钢箱梁抗倾覆设计方法

乔星昇¹,孙亚刚¹,孙虎平¹,杜善朋²

(1.西安市政设计研究院有限公司,陕西 西安 710000; 2.西安中交泰城路桥科技有限公司,陕西 西安 710000)

摘要:独柱墩曲线连续钢箱梁是城市立交匝道桥常用的结构形式,但因其存在支座间距小、内外侧支座支反力差别大、边墩支反力小以及钢箱梁自重轻等诸多缺点,所以抗倾覆性能差便成为此类桥型普遍存在的问题。近年来发生的数十起该类型的桥梁倾覆事故,造成了严重的社会影响及经济损失。依据相关规范中关于桥梁上部结构抗倾覆计算方法,以实际工程为例,对两跨独柱墩曲线连续钢箱梁抗倾覆性能进行计算分析,得出采用双支座并且给主梁边墩位置处配重的方法,并从特征状态1及特征状态2两方面给出了提高该类型桥梁的横桥向抗倾覆性能的设计方法。

关键词:桥梁工程;抗倾覆稳定性;独柱墩;曲线桥;连续钢箱梁

中图分类号: U442

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0091-04

0 引言

随着城市化建设的不断深入,国内经济全面发展,城市道路、交通建设不断攀升新高度。城市立交作为交通枢纽在城市经济发展中扮演着十分重要的角色。但是,城市立交由于各种用地限制,往往呈现层数多,匝道桥道路中心线半径小,上下层道路限界、净空、桥梁布跨相互制约等特点。除此之外,桥墩布置形式受地下管线、地面道路等因素影响,很难依据受力特点合理布跨。相比于双柱墩、多柱墩,独柱墩因其占用桥下空间小,对地面道路视距影响小,造型简洁、美观等优势,成为城市立交匝道桥常用的下部结构形式。然而,由于独柱墩墩顶尺寸有限、支座间距小,因而倾覆问题较为普遍。

钢箱梁因其工业化程度高、施工速度快、能适应小半径及异形桥跨等显著优势在城市立交中得到广泛应用。然而,钢箱梁又因其自重太轻,存在支座脱空、抗倾覆性能差等缺点。

自2000年以来,深圳、包头、天津、上虞、哈尔滨、河源等地相继发生多起匝道上部结构横向倾覆事故。经专家、学者分析研究,事故桥梁都存在如下特征:上部结构采用整体式箱梁;结构体系为连续梁,上部结构由单向受压支座支承;桥台或过渡墩采用双支

座或三支座,跨中桥墩全部或部分采用单支座^[1]。

2019年10月,江苏省无锡市锡港路132国道上跨桥发生倾覆事故,造成3人死亡、2人受伤。这次事故造成了严重的社会影响,国内各省市积极行动,对已建和在建独柱墩、单支座梁式桥开展抗倾覆验算,并采取相应抗倾覆措施^[2]。

1 计算理论

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)(下文简称《公路桥规》)通过对近年来桥梁倾覆案例的分析,总结出了倾覆桥梁的破坏机理:受压支座出现负反力,单向受压支座无法提供有效约束,箱梁扭转变形发散、梁体倾覆破坏,如图1所示^[1]。

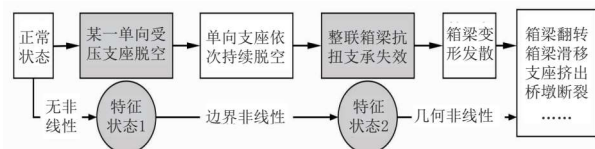


图1 典型破坏过程

倾覆破坏过程存在两个特征状态:一是支座出现负反力;二是梁体的抗扭支承全部失效^[1]。对这两个特征状态进行抗倾覆验算时,持久状况下,要求梁桥不应出现结构体系改变的情况,并应满足以下规定:

(1)作用基本组合时,单向受压支座不应出现负反力,即符合公式(1)要求

$$1.0R_{Gk} + 1.4R_{Qk} \geq 0 \quad (1)$$

收稿日期:2024-04-13

作者简介:乔星昇(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

式中: R_{Gki} 为永久作用标准值效应; R_{Qki} 为失效支座对应最不利汽车荷载的标准值效应。

(2)作用标准值组合时,整体式截面的简支梁及连续梁的作用效应在横桥向上应符合公式(2)的要求:

$$\frac{\sum S_{bk,i}}{\sum S_{sk,i}} \geq k_{qf} \tag{2}$$

式中: k_{qf} 为抗倾覆整体稳定性系数,取 $k_{qf}=2.5$; $\sum S_{bk,i}$ 为维持梁体稳定的效应; $\sum S_{sk,i}$ 为破坏梁体稳定的效应。

作为曲线钢箱梁,支反力对温度梯度比较敏感,抗倾覆计算时引入温度梯度效应,特征状态1的验算公式(1)可化为式(3):

$$1.0R_{Gki} + 1.4(R_{Qki} + 0.75R_{Tki}) \geq 0 \tag{3}$$

式中: R_{Tki} 为温度梯度的标准值效应。

特征状态2验算时,使上部结构失稳的效应设计值 $\sum S_{sk,i}$ 中计入温度梯度产生的不利效应。

2 工程实例

2.1 工程实例

本文根据一个工程实例,采用《公路桥规》中的计算方法对两跨独柱墩曲线连续钢箱梁横桥向抗倾覆设计方法进行研究、分析。

该工程为3层互通城市立交,其中,D匝道桥道路中心线位于R-62 m及A-80 m的平曲线上,桥下为相交道路主线,如图2所示。

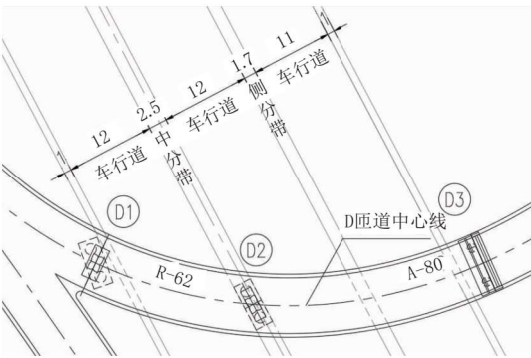


图2 D匝道桥总体平面布置图(单位:m)

受地下管线及地面道路影响,该桥上部结构采用22.127 m+32 m的两跨连续钢箱梁,上部结构在D1#墩处接C匝道桥,在D3#台处接地面。受地面道路断面形式限制,D2#墩只能设置在地面道路中央分隔带中,若D2#墩盖梁与D匝道上部结构正交,则桥墩盖梁侵入地面道路限界,地面道路净空得不到保证。受各种条件限制,D2#墩有以下3种方案:方案一,D2#墩设置成独柱墩,不设盖梁,采用单支

座,箱梁横隔板与道路曲线正交,钢箱梁加工简便(见图3);方案二,D2#墩设置成双支座,受地面道路限界及净空限制,盖梁方向顺应地面道路,中墩(D2#墩)盖梁与匝道桥上部结构斜交57.7°,钢箱梁横隔板与道路曲线斜交角度不一,箱梁加工难度大(见图4);方案三,在方案二的基础上,为了增加抗倾覆稳定性,又提出了额外的抗倾覆措施,即主梁边墩局部范围配重(见图5)。

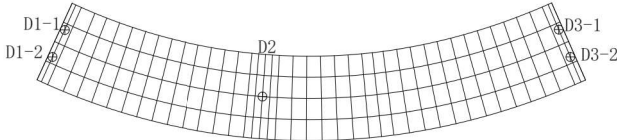


图3 中墩单支座(方案一)

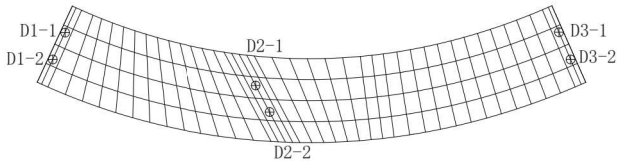


图4 中墩双支座(方案二)

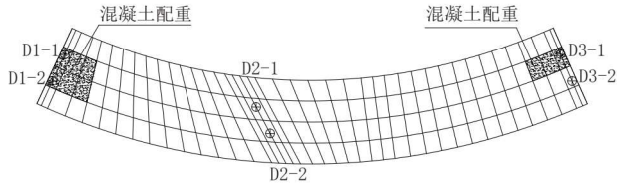


图5 中墩双支座+边墩配重(方案三)

2.2 有限元模拟

该桥钢箱梁顶板宽8.5 m、底板宽4.5 m、悬臂长2 m、支座间距3 m。使用有限元软件MIDAS Civil 2024进行建模分析,用梁单元模拟主梁,用弹性连接模拟支座刚度,用空间影响线加载法进行活载计算。模型共划分为57个单元、72个节点。

2.3 方案比选

抗倾覆性能关乎结构安全,是方案比选的关键,故对以上3种方案的抗倾覆性能展开定量分析。

2.3.1 支座脱空情况对比

在中墩单支座与中墩双支座两种支承形式下,各支座最小支反力结果见表1。

表1 各支座最小支反力结果 单位:kN

类型	对比项目	支座编号				
		1-1	1-2	2	3-1	3-2
单支座	支反力 R_i	-323	61	2 561	-327	704
	支反力差 ΔR_i	384	—	—	1 034	—
双支座	支反力 R_i	18	-151	887	1 497	-32
	支反力差 $\Delta R_i'$	169	—	—	753	—

表 1 中,1-1、1-2 分别表示 1 号墩位处的内、外支
座,3-1、3-2 分别表示 3 号墩位处的内、外支座。

由于结构本身的特点,曲线梁存在内、外侧支
座支反力不均衡的问题,内侧支座脱空问题突出。

通过对比全桥支反力可发现:相比于中墩双支
座支承,中墩单支座支承时,曲线内侧支座脱空现象
更为严重。

曲线桥内、外侧的自重差异以及移动荷载按最
不利工况偏载布置带来的内、外侧支座支反力不均
匀性,使同一桥墩内外侧两个支座的支反力存在差
异,这里称之为“支反力差”,用 ΔR_i 表示,可以用
 ΔR_i 来表征曲线因素的影响程度。

计算结果显示: $\Delta R_1 > \Delta R_1'$, $\Delta R_3 > \Delta R_3'$ 。这说
明中墩单支座的支承形式对曲线因素更为敏感。

2.3.2 横桥向抗倾覆稳定性对比

该匝道桥位于 R-62 m 及 A-80 m 的水平曲线
上,桥梁上部结构向曲线外侧倾覆的问题更突出,对
3 个方案的横桥向抗倾覆稳定性进行验算对比,计算
结果如图 6、图 7 所示。

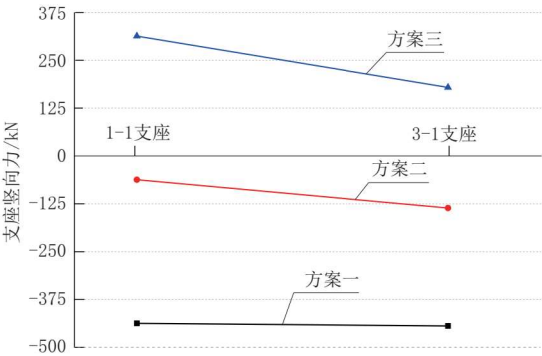


图 6 失效支座竖向力验算结果对比图

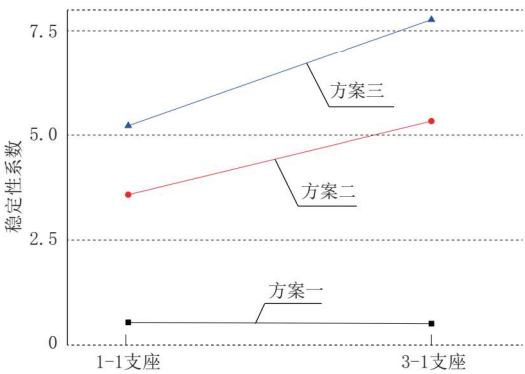


图 7 失效支座稳定性系数对比图

方案一的桥梁外倾验算结果见表 2。
表 2 中, l_i 表示第 i 个桥墩处失效支座与有效支
座的支座中心间距。

验算结果表明:方案一时,针对特征状态 1,作用
基本组合下,箱梁桥曲线内侧 1-1 支座及 3-1 支座

表 2 方案一桥梁外倾验算结果

项目		支座编号			
		1-1	2	3-1	
失效支座与有效支座中心间距 l_i /m		3	0	3	
R_{Gki} (永久作用标准值效应)		208	2 566	220	
支座竖向力 / kN	失效支座对应最不利汽车荷载的标准值效应	$R_{Qki,11}$	-458	958	-334
		$R_{Qki,21}$	336	-19	-55
		$R_{Qki,31}$	-361	944	-471
	温度梯度效应	$R_{T升i}$	-4	-6	-4
特征状态1 验算	$1.0R_{Gki}+1.4(R_{Qki,11}+R_{Tki})$		-437	3 901	-252
	$1.0R_{Gki}+1.4(R_{Qki,21}+R_{Tki})$		674	2 534	139
	$1.0R_{Gki}+1.4(R_{Qki,31}+R_{Tki})$		-304	3 881	-444
验算结论		1-1 支座及 3-1 支座验算结果不满足要求			
特征状态2 验算	稳定效应 $\Sigma R_{Gki} \cdot l_i$ /(kN·m)		624	—	867
	温度外倾失稳效应 $\Sigma R_{T升i} \cdot l_i$		-12	—	-12
	汽车荷载失稳效应 /(kN·m)	$\Sigma R_{Qki,11} \cdot l_i$	-1 373	—	-1 003
		$\Sigma R_{Qki,31} \cdot l_i$	-1 084	—	-1 414
	稳定性系数	k_{qf}	0.54	—	0.51
验算结论		不满足要求			

均出现负反力,支座脱空,不满足规范要求;针对特
征状态 2,1-1 支座、3-1 支座的稳定性系数分别为
0.54 及 0.51,均 < 2.5 ,不满足规范要求。

可见,对于该工程,中墩单支座方案的横桥向抗
倾覆稳定性在特征状态 1 及特征状态 2 时均不满足
规范要求,存在很大的倾覆风险。

中墩支座竖向力永久作用标准值效应 $R_{Gk2}=$
2 566 kN,占全部支座支反力总和的 63%,但无法提
供抗扭扭矩。稳定效应仅由占总支反力 37%的两个
边墩支座提供,导致稳定效应 $\Sigma R_{Gki} \cdot l_i$ 值太小,稳定
性系数无法满足规范要求。为了提高整联桥的稳定
效应,支反力较大的中墩必须贡献抗扭扭矩。

相比于中墩单支座方案,方案二的中墩双支
座对整联箱梁提供了足够的抗扭支承,显著提高了特
征状态 2 的稳定效应 $\Sigma R_{Gki} \cdot l_i$,各支座稳定系数达
到了横桥向抗倾覆要求。由此可见:在较大反力的
墩位处设置双支座,能够有效提高特征状态 2 的稳定
效应。

但是,中墩双支座依然无法解决两跨连续结构
边墩支反力小的问题,永久作用标准值效应时,中墩
支反力较大,边墩支反力很小且内外侧支座支反力
差 ΔR_i 较大,曲线内侧支座支反力太小,无法抵抗最

不利加载时汽车荷载效应,出现了边墩曲线内侧单向受压支座脱空的情况,不满足特征状态1的抗倾覆要求。

依据公式(3)可知,影响特征状态1验算结果的主要因素有两个:支座竖向力永久作用标准值效应和失效支座最不利加载时汽车荷载标准值效应。对于布跨、桥宽、支座间距确定的情况,失效支座对应最不利加载的移动荷载效应是固定值,可通过边跨压重进而调整自重荷载效应的方式消除特征状态1时的支座脱空问题^[2]。边跨压重是增加边支座的永久作用标准值效应的有效途径。对D1#墩顶附近3m范围内道路中心线两侧各压重420kN,D3#墩顶附近3.1m范围内道路中心线左侧(曲线内侧)压重438kN。压重布置原则:增大边墩支反力且减小边墩曲线内、外侧两支座的反力差。

边跨压重后,失效支座对应最不利加载时移动荷载效应及梯度温度效应保持不变,仅箱梁自重荷载效应发生变化。

边墩增设配重能够有效增加永久作用标准值作用下的边墩支反力,作用基本组合下,箱梁桥所有支座均未出现负反力,消除了特征状态1时的支座脱空问题。

针对特征状态2:1-1#支座的稳定性系数为 $\sum R_{Gki} \cdot l_i / \sum R_{Qki,11} \cdot l_i = 5.22 (> 2.5)$;2-1#支座的稳定性系数为 $\sum R_{Gki} \cdot l_i / \sum R_{Qki,21} \cdot l_i = 5.17 (> 2.5)$;3-1#支座的稳定性系数为 $\sum R_{Gki} \cdot l_i / \sum R_{Qki,31} \cdot l_i = 7.77 (>$

2.5)。横桥向抗倾覆稳定性满足规范要求^[3]。

永久作用标准值作用下的支座支反力,也是特征状态2时稳定效应的关键指标,所以抗倾覆稳定性系数也得到较大提升。

可见,方案三,即全部桥墩采用双支座并且给主梁边墩位置处配重,能有效提高桥梁抗倾覆稳定性。

3 结 论

(1)两跨独柱墩曲线连续钢箱梁因其受力结构的特殊性,中墩单支座方案存在严重的上部结构横向倾覆风险。

(2)支反力较大的中墩采用双支座可以有效提高结构抗扭力矩,从而有效提升特征状态2的稳定性系数。

(3)曲线连续梁内外侧支座支反力差异大、边墩支反力小,是造成曲线梁边墩内侧支座脱空的直接原因。可以通过边跨压重,调节永久作用标准值效应下的支反力在各支座间均匀分布,以解决连续梁边墩曲线内侧支座脱空问题,从而提高箱梁桥抗倾覆稳定性。

参考文献:

- [1] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [2] 杨富光,李井辉.连续梁桥倾覆稳定性问题分析[J].河南科技,2019,29(4):119-122.
- [3] 王文龙,吴海军,董壮壮.支座布置形式对曲线梁桥抗倾覆能力的影响[J].中外公路,2015,5(4):197-200.

(上接第87页)

参考文献:

- [1] 王应良,高宗余.欧美桥梁设计思想[M].北京:中国铁道出版社,2008.
- [2] 魏明.节段预制拼装桥梁适用条件及若干关键技术研究[D].南京:东南大学,2016.
- [3] 申兆繁.广州地铁4号线节段拼装梁设计[J].铁道标准设计,2008(8):46-49.
- [4] 刘亚东,秦宗平,金卫兵.预制节段拼装连续梁桥设计要点和施工关

键技术[J].铁道建筑技术,2006(5):50-55.

- [5] JTG/T 3365—05—2022,公路装配式混凝土桥梁设计规范[S].
- [6] ASSHTO.2017. LRFD Bridge Design Specifications,8th Edition[S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- [7] 李国平.公路体外预应力混凝土桥梁设计指南(征求意见稿)[Z].上海:同济大学,中交公路规划设计院,2007.
- [8] 王华.预制节段拼装桥梁施工关键技术浅析[J].城市道桥与防洪,2018(6):174-177,377.