

小半径钢箱梁温度梯度作用下抗倾覆影响分析

高 辉

(上海市市政工程设计研究总院集团浙江市政设计院有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘 要: 对温度梯度作用下小半径钢箱梁的抗倾覆效应进行参数影响分析,并提出了一种基于公路桥梁规范的抗倾覆计算公式修正方法。研究结果表明:温度梯度作用下,增大支座间距和曲线半径对提高钢箱梁的抗倾覆稳定性具有显著效果;同时发现现行规范中的抗倾覆计算方法未对汽车作用和非汽车作用的失稳效应进行区分,若直接采用将可能导致设计过度保守。

关键词: 抗倾覆;小半径;钢箱梁;梯度温度

中图分类号: U443.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0128-04

Analysis of Influence on Anti-overturning of Small-radius Steel Box Girders under Action of Temperature Gradient

GAO Hui

(SMEDI Zhejiang Municipal Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: The parameter influence on the anti-overturning effect of small-radius steel box girder under the action of temperature gradient is analyzed, and a correction method for the anti-overturning calculation formula based on highway bridge codes is proposed. The study results indicate that under the action of temperature gradient, the increase of support spacing and curve radius has the significant effect for enhancing anti-overturning stability of steel box girders. Additionally, it is found that the instability effects of automotive action and non-automotive action are not distinguished in the anti-overturning calculation method in the current codes, which may lead to overly conservative design if adopted directly.

Keywords: anti-overturning; small radius; steel box girders; gradient temperature

0 引 言

弯箱梁桥因其独特的曲线美感、优越的适应性和卓越的跨越能力,在城市立交桥匝道桥的建设中得到了广泛应用。与直桥相比,弯桥在自重和移动荷载的作用下,其主梁承受的扭矩更大,易引起匝道桥倾覆事故^[1]。例如:2007年10月内蒙古自治区包头市民族东路高架桥倾覆;2009年7月京晋高速公路连续独柱墩A匝道桥发生倾覆事故;2012年底哈尔滨市南岗区三环路洪湖路分离式立交匝道突然倾覆。桥梁上部结构一旦发生倾覆倒塌,将对人民经济财产造成巨大损失。

为应对此类问题,2018年发布的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)(以下简称“18规范”)对桥梁的抗倾覆设计方

法作出了详细规定,涵盖了计算方法和设计标准。《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)(2019年版)(以下简称“19城市桥梁规范”)确定了抗倾覆计算的原则和要求,但未明确具体的验算方法。这使得在实际工程应用中,人们普遍按照18规范进行抗倾覆验算。

相较公路桥梁而言,城市桥梁经常受到用地限制等因素影响,小半径钢箱梁较为常见。这种钢箱梁的支座反力受温度影响较大^[2],同时自重较轻。考虑到这些差异,本文将针对小半径钢箱梁,重点研究18规范抗倾覆计算中温度作用的影响,同时探讨其抗倾覆计算方法,以为后续相关工程提供技术参考。

1 工程概况

杭州西站枢纽位于杭州城西未来科技城核心片区北侧,是城西科创大走廊的重要组成部分。桥梁工程主要包含高架快速进站匝道及落地匝道共16条,为了兼顾桥梁快速化施工以及桥梁景观的要求,曲线小半径匝道桥梁形式采用钢箱梁形式。

收稿日期: 2024-08-19

作者简介: 高辉(1992—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

本文以其中 1 联小半径钢箱梁为研究对象。桥梁跨径布置为 2 跨(跨径 $L=54\text{ m}$)连续钢箱梁,曲线半径 $R=110\text{ m}$,宽 8.5 m ,梁高 2.5 m 。下部结构墩柱采用双支座独柱墩形式,基础采用钻孔桩基础。桥梁平面布置图、横断面布置图见图 1、图 2。

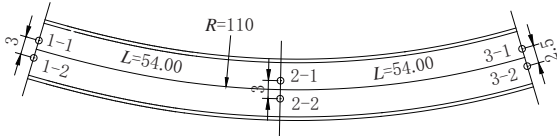


图 1 桥梁平面布置图(单位:m)

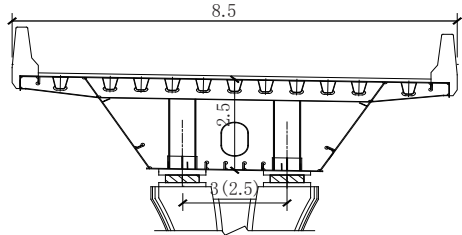


图 2 桥梁横断面布置图(单位:m)

2 18 规范抗倾覆验算

关于桥梁抗倾覆的验算,19 城市桥梁规范规定

“正常使用极限状态下,单向受压支座应保持受压状态;承载能力极限状态下,结构应具有足够的抗倾覆性能”。该规范确定了抗倾覆计算的原则和要求,但未明确具体的验算方法。18 规范规定“在作用基本组合下,单向受压支座始终保持受压状态;按作用标准值进行组合时抗倾覆稳定系数不小于 2.5”,且在规范条文说明中明确了具体计算方法。由此可知,后者规范对支座受压状态的要求较高且明确了具体的倾覆稳定系数计算方法,因此,该工程采用 18 规范作为抗倾覆计算的依据。

计算中,考虑的失稳效应工况包括:风荷载(考虑声屏障)、支座不均匀沉降、汽车荷载、温度梯度作用、均匀温度作用;其中钢梁截面温度梯度参考英国桥梁规范 BS5400 施加,汽车荷载等级为城—A 级。为满足抗倾覆计算要求,需进行支座调偏和压重,支座向外调偏距离分别为 30、5、15 cm;支点压重范围长度分别为 10、13、10 m。部分主要作用的抗倾覆计算结果见表 1。

表 1 抗倾覆计算结果

项目			支座编号					
			1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
失效支座与有效支座间距 l_i/m			3.0	0	3.0	0	2.5	0
自重			1 473	2 528	5 010	4 000	1 360	2 672
支座竖向力 工况/kN	失效支座对应最不利汽车荷载的 标准效应	1-1	-667	1 322	139	646	87	-183
		2-1	-5	-8	-248	1 405	-126	210
		3-1	93	-198	-46	848	-617	1 263
	失效支座对应最不利温度梯度的 标准效应	1-1	-127	377	-1 655	1 158	-211	458
		2-1	-127	377	-1 655	1 158	-211	458
		3-1	-127	377	-1 655	1 158	-211	458
特征状态 1 验算	基本组合	1-1	240	4 930	3 350	6 262	1 132	3 012
		2-1	1217	3 047	2 487	7 585	885	3542
		3-1	1 330	2 776	3 102	6 532	113	5 070
验算结论			满足要求					
稳定效应/(kN·m)			4 420	0	15 031	0	4 080	0
特征状态 2 验算	失稳效应/(kN·m)	1-1	2 806	0	5 124	0	761	0
		2-1	758	0	6 908	0	1 288	0
		3-1	526	0	5 681	0	2 871	0
	稳定系数	2.71			2.63			2.59
验算结论			满足要求					

由表 1 可知,特征状态 1 的基本组合支座未出现负反力,特征状态 2 抗倾覆稳定系数均大于 2.5,满足抗倾覆要求。计算过程中发现,由于钢箱梁中温度梯度产生的负反力较大,本联中温度梯度负反力已远大于汽车荷载产生的负反力。各荷载作用所占失稳效应比例计算结果见表 2。

由表 2 计算结果可知,在本联钢箱梁的抗倾覆计

表 2 各荷载作用所占失稳效应比例计算结果				单位: %
支座位置	汽车荷载	温度梯度	其他荷载	
1-1	15.2	68.8	16.0	
2-1	12.7	66.8	20.5	
3-1	18.8	65.9	15.3	

算中,失稳效应的主要来源是温度梯度,其效应约为汽车荷载的 4.3 倍。为满足抗倾覆稳定系数,全桥共

压重了长 33 m、840 t 的混凝土。

3 温度梯度作用下倾覆效应参数影响分析

由上述分析可知,温度梯度在小半径钢箱梁倾覆效应占比中起到了决定性作用。进行参数影响分析时,采用的模型截面如图 2 所示,桥宽为 8.5 m,桥墩处设置双支座。倾覆效应工况只考虑温度梯度作用,不考虑支座调偏和压重。根据不同参数条件,用桥博 V5.0 建立有限元模型进行计算分析。

3.1 跨数对温度梯度倾覆效应影响

分析跨数对温度梯度倾覆效应影响时,选择的参数为:跨径 $L=30\text{ m}$,曲线半径 $R=100\text{ m}$,桥宽为 8.5 m,支座间距为 2.6 m。从单跨简支梁到 4 跨连续梁的抗倾覆计算结果见表 3。

表 3 不同跨数温度梯度作用下抗倾覆计算结果				
计算项目	单跨	2 跨	3 跨	4 跨
稳定效应/(kN·m)	1 048	4 845	7 527	10 480
失稳效应平均值/(kN·m)		3 674	5 875	8 376
边支座稳定系数	无失稳效应	1.32	1.29	1.26
中支座稳定系数	无失稳效应	1.32	1.28	1.26

由表 3 可知,温度梯度作用下,简支梁是静定结构,温度梯度作用下无失稳效应;钢箱梁连续梁结构从 2 跨到 4 跨变化过程中,稳定效应和失稳效应均逐渐增大,两者比值抗倾覆稳定系数几乎相同(下降了 4.5%),同时边支座和中支座处稳定系数保持一致。

3.2 曲线半径对温度梯度倾覆效应影响

分析曲线半径对温度梯度倾覆效应影响时,选择的模型为:3×30 m 连续梁,桥宽 8.5 m,支座间距 2.6 m。考虑曲线半径变化范围为 60~500 m。

不同曲线半径温度梯度作用下抗倾覆稳定效应和稳定系数见图 3、图 4。

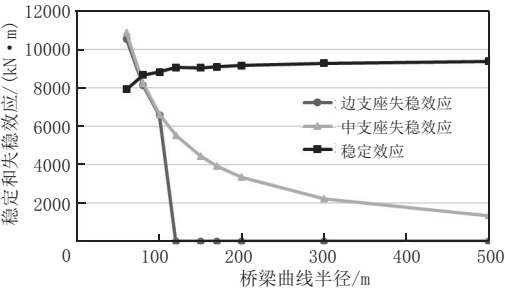


图 3 不同曲线半径温度梯度作用下抗倾覆稳定效应

由图 3 可知,稳定效应随着曲线半径的增大呈增大趋势,且逐渐趋向平缓;中支座失稳效应随着曲线半径的增大先急剧减小,然后逐渐趋于平缓;与中支座不同的是,边支座失稳效应在曲线半径大于 100 m 后突变为 0,无失稳效应。

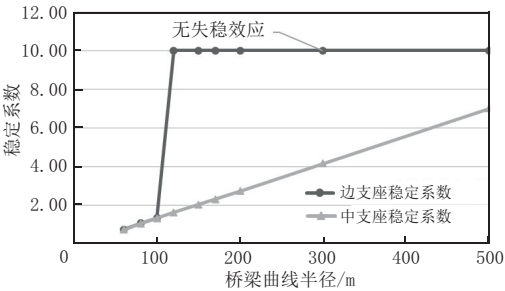


图 4 不同曲线半径温度梯度作用下抗倾覆稳定系数

由图 4 可知,中支座稳定系数随着曲线半径的增大而逐渐增大,且两者近似呈线性关系;边支座稳定系数变化规律与中支座相同,但在曲线半径大于 100 m 后突变为无失稳效应,稳定系数为无穷大(图 4 中表示为 10)。

3.3 边中跨比对温度梯度倾覆效应影响

分析边中跨比对温度梯度倾覆效应影响时,选择的模型为:桥宽 8.5 m,支座间距 2.6 m,3 跨 1 联连续梁,中跨固定为 40 m,考虑边跨跨径变化范围为 20~45 m,曲线半径 100 m。

不同边中跨比温度梯度作用下抗倾覆稳定效应和稳定系数见图 5、图 6。

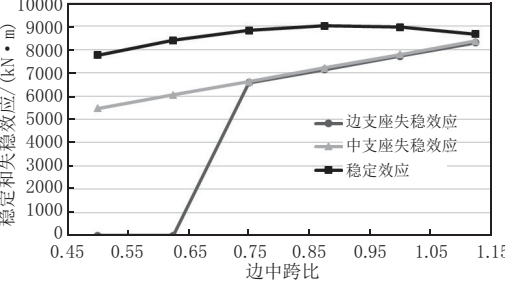


图 5 不同边中跨比温度梯度作用下抗倾覆稳定效应

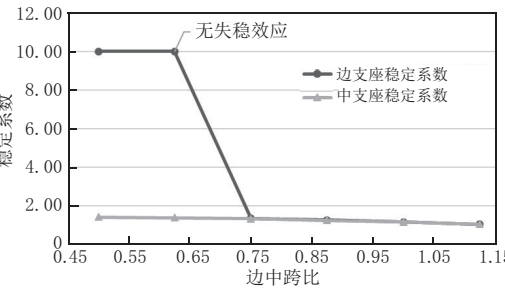


图 6 不同边中跨比温度梯度作用下抗倾覆稳定系数

由图 5 可知,中支座失稳效应与边中跨比近似为线性增大关系,稳定效应呈现先增大后减小的趋势。边支座失稳效应规律基本同中支座,但在边跨比小于 0.75 时,失稳效应急剧降为零。

由图 6 可知,当边中跨比从 0.5~1.125 变化过程中,中支座稳定系数逐渐降低,近似呈线性变化,降低趋势较平缓;边支座稳定系数变化规律基本同中支座,但在边跨比小于 0.75 时,失稳效应急

剧降为零。

3.4 支座间距对温度梯度倾覆效应影响

分析支座间距对温度梯度倾覆效应影响时,选择的模型为:3×30 m 连续梁,桥宽 8.5 m,曲线半径 100 m。考虑支座间距变化范围为 2.2~5.0 m。

不同支座间距温度梯度作用下抗倾覆稳定效应和稳定系数见图 7、图 8。

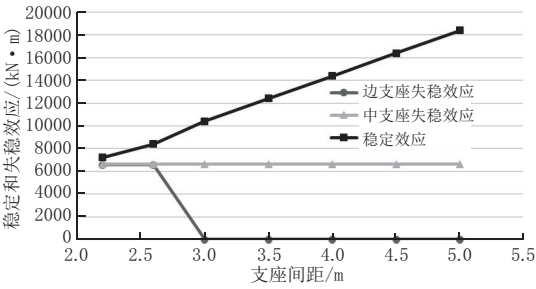


图 7 不同支座间距温度梯度作用下抗倾覆稳定效应

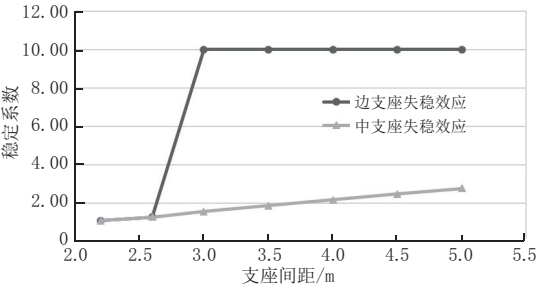


图 8 不同支座间距温度梯度作用下抗倾覆稳定系数

由图 7 可知,随着支座间距增大,稳定效应呈线性增大趋势,同时中支座失稳效应几乎不变。边支座失稳效应在支座间距大于 2.6 m 后急剧下降为零。

由图 8 可知,中支座稳定系数随着支座间距的增大呈线性增大趋势,支座间距从 2.2 m 增加到 5.0 m 时,稳定系数由 1.09 变为 2.78,增加为原来的 2.55 倍。边支座稳定系数变化规律基本同中支座,但在支座间距大于 2.6 m 后,失稳效应消失。

4 城市桥梁抗倾覆验算方法探讨

4.1 小半径钢箱梁抗倾覆计算中存在的问题

小半径钢箱梁为了抵抗温度梯度内力产生的失稳效应,往往需要有比抵抗汽车荷载更多的稳定措施。这种需要大量压重的方法降低了其经济效益。目前规范采用的抗倾覆计算理论基于弹性体倾覆理论^[3],然而,若基于刚体倾覆理论进行概念判断,则因钢箱梁的温度梯度是内力作用,对于刚体倾覆轴产生的整体倾覆效应为零,不存在失稳效应。这与当前规范计算结果差异较大。

18 规范中抗倾覆稳定系数为 2.5 的解释是:1.1

(结构重要性系数)×1.3(简化方法偏差系数)×1.8(重载车队安全系数)≈2.5(稳定系数),其中系数 1.8 是车辆密排条件下重车总荷载与车道荷载的比值,是为方便设计人员用车道荷载进行模型计算所考虑,实际汽车荷载的稳定安全系数为 1.1×1.3=1.43。实际计算中,将温度梯度这一占比较大的失稳效应直接归为 2.5 这一稳定系数,将存在稳定系数不一致的问题。

4.2 抗倾覆稳定系数计算方法修正

现有 18 规范的抗倾覆稳定系数计算公式为:

$$\frac{\sum R_{GKi} l_i}{\sum R_{QKi} l_i} \geq 2.5 \tag{1}$$

式中: R_{GKi} 为永久作用支反力; R_{QKi} 为可变作用支反力。

将稳定系数 2.5 进行分解并引入重载车队安全系数 μ_{Q1} ,得到下列公式:

$$\sum R_{GKi} l_i \geq 1.1 \times 1.3 \times (\mu_{Q1} \sum R_{Q1i} l_i + \sum R_{Q2i} l_i) \tag{2}$$

对式(2)进行适当变换得到:

$$\frac{\sum R_{GKi} l_i}{\gamma_0 \cdot (\mu_{Q1} \sum R_{Q1i} l_i + \sum R_{Q2i} l_i)} \geq 1.3 \tag{3}$$

式中: R_{GKi} 为永久作用支反力; R_{Q1i} 为汽车荷载支反力; R_{Q2i} 为除汽车作用外其余可变作用的支反力; l_i 为支座间距; γ_0 为重要性系数,在计算抗倾覆稳定系数时统一取值为 1.1; μ_{Q1} 为重载车队安全系数,取值 1.8。

4.3 规范公式修正后抗倾覆计算

对本文研究对象采用原 18 规范和修正后的抗倾覆公式进行抗倾覆稳定系数计算,结果见表 4。

表 4 2 种方法计算的抗倾覆稳定系数

计算方法	抗倾覆稳定系数	支座位置		
		1-2	2-2	3-2
原 18 规范	计算值	2.71	2.63	2.59
	最低限值	2.5	2.5	2.5
	超出限值比例/%	8	5	4
规范公式修正法	计算值	2.18	2.18	1.99
	最低限值	1.3	1.3	1.3
	超出限值比例/%	68	68	53

由表 4 可知,采用规范公式修正法计算后,与原 18 规范计算结果相比,抗倾覆稳定系数储备较高。主要原因是抗倾覆稳定系数 2.5 中考虑了 1.8 的重车安全系数,而在计算失稳效应时未对汽车作用和非汽车作用进行区分。原设计中桥梁压重纵向总长 33 m,总重 840 t,若采用规范公式修正法计算,则压
(下转第 147 页)