

文章编号: 1674-599X(2021)03-0035-06

## 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆实用计算方法研究

吕毅刚<sup>1,2</sup>, 饶攀<sup>2</sup>, 韩伟威<sup>3</sup>, 吴攀<sup>2</sup>

(1.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;

2.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南长沙 410114;

3.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南长沙 410114)

**摘要:**独柱墩曲线箱梁桥倾覆事故时有发生且其抗倾覆计算方法较为复杂。为探讨该类桥梁抗倾覆计算的简易方法, 基于力学原理, 提出了稳定效应的实用计算方法, 并结合实例采用Midas Civil有限元计算结果进行验证。研究表明: 2种方法的计算结果之比在0.953~0.991之间, 验证了该方法具有较好的适用性。采用该实用计算式对实例进行了计算, 其稳定系数之比在0.978~1.000之间, 也验证了该方法的计算结果具有较高的精度。可为独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定系数的计算提供借鉴。

**关键词:**桥梁工程; 稳定性; 计算方法; 独柱墩; 抗倾覆

中图分类号: U441.2

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.006

## Research on the practical calculation method of anti-overturning of the curved box girder bridge with single column pier

LYU Yi-gang<sup>1,2</sup>, RAO Pan<sup>2</sup>, HAN Wei-wei<sup>3</sup>, WU Pan<sup>2</sup>

(1. Hunan Province Engineering Laboratory for Bridge Structure Safety Control, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

3. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In recent years, the overturning accident of the curved box girder bridge with single column pier occurred frequently. However, the anti-overturning calculation method was complicated. In order to improve the design and calculation method of curved box girder bridge with single column pier, a practical calculation method considering the stability effect was carried out based on the principles of mechanics. That was then verified using the Midas Civil finite element. The results show that, the ratio of two methods is changing from 0.953 to 0.991, indicating that the method has satisfactory applicability. The case analysis was then performed, the ratio of the stability coefficient changes from 0.978 to 1.0, indicating that the practical calculation formula has high precision. Therefore, the suggested method has remarkable engineering practical value to calculate the overturning stability coefficient of curved box girder bridges with single pedestal piers.

**Key words:** bridge engineering; stability; calculation method; single column pier; anti-overturning

近年来, 已发生多起独柱墩曲线箱梁桥倾覆事故<sup>[1-2]</sup>, 引起了国内外学者的高度重视。彭卫兵等人<sup>[3-4]</sup>通过对上虞春晖大桥倾覆事故的研究, 总

结出桥梁倾覆破坏的4种模式, 提出了抗倾覆承载力实用计算方法。刘杰等人<sup>[5]</sup>基于可靠度反分析理论, 提出了大跨度连续梁桥悬臂施工整体抗倾覆

收稿日期: 2020-11-04

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)

作者简介: 吕毅刚(1978—), 男, 长沙理工大学讲师, 博士。

稳定安全系数计算方法。熊文等人<sup>[6]</sup>对哈尔滨阳明滩大桥已发生倾覆事故的独柱墩梁桥部分进行抗倾覆分析,提出了倾覆临界状态判断值的计算方法。鲁圣弟等人<sup>[7]</sup>以三跨连续独柱墩曲线梁桥作为研究对象,分析了桥型布置对独柱墩曲线梁桥抗倾覆性能的影响。庄冬利<sup>[8]</sup>以近年来箱梁桥倾覆事故实例为对象进行研究,认为在箱梁桥抗倾覆分析中,应综合考虑桥梁竖向强度的可靠指标。聂载东等人<sup>[9]</sup>以事故车辆施救工况独柱墩匝道桥倾覆稳定性进行研究,提出了事故车辆施救时桥梁稳定性分析方法和对施救车辆开展工作的建议。Dan等人<sup>[10]</sup>提出了实桥抗倾覆分析的潜在倾覆风险评估方法。Deng等人<sup>[11-12]</sup>分析了引起桥梁倾覆事故的各种潜在因素,建立了桥梁倾覆的数学模型。陈得良等人<sup>[13]</sup>通过建立有限元模型,分析了梁体转速对车-桥耦合系统动力响应的影响,研究结果表明:桥梁上部结构发生相对水平转动时,转动角速度的大小对梁桥振动响应影响较大。何雄君等人<sup>[14]</sup>以中间墩采用独立柱单支座的曲线连续梁桥为研究对象,分析曲率半径、约束体系对桥梁稳定性的影响。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)<sup>[15]</sup>,采用支座失效法分析桥梁抗倾覆稳定性,通过有限元软件计算出稳定效应和倾覆效应对应的支座反力,再结合支座间距得到抗倾覆稳定系数。在已有的独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆计算方法中,一般需借助于有限元软件,但计算过程较复杂。因此,为简化独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆系数的计算,作者基于力学原理,拟提出独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆系数的实用计算方法,以期为该类型桥梁的加固设计提供借鉴。

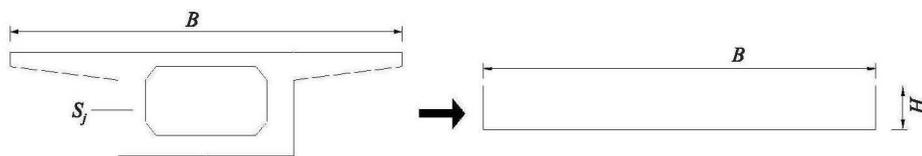


图1 等效厚度计算

Fig. 1 Calculation diagram of equivalent thickness

矩形截面的等效厚度 $H$ 为:

$$H = S_j / B. \quad (2)$$

式中: $S_j$ 为箱形截面积; $B$ 为桥面宽度。

将箱形截面近似等效为等厚度的矩形截面后,独柱墩曲线箱梁桥的主梁自重(不考虑墩台处主梁横隔板)近似为沿桥面均匀分布的面荷载:

## 1 基于倾覆轴理论的抗倾覆计算方法

倾覆轴理论认为:当汽车荷载产生的倾覆效应大于桥梁结构自重产生的稳定效应时,桥梁上部结构将绕某一侧支点(倾覆轴线)发生旋转,进而发生倒塌。基于该理论,对独柱墩曲线箱梁桥进行分析,得到抗倾覆稳定系数<sup>[16-17]</sup>:

$$k_{qr} = \frac{M_w}{M_q} = \frac{\sum R_{G_i} x_i}{(1+u)(q_k \Omega + P_k e)}. \quad (1)$$

式中: $M_w$ 为结构自重产生的稳定效应; $M_q$ 为汽车荷载产生的倾覆效应; $R_{G_i}$ 为结构自重作用下各支座的竖反力; $x_i$ 为支座与倾覆轴线的间距; $u$ 为汽车冲击系数; $\Omega$ 为偏载车道中心线与倾覆轴线围成的面积; $e$ 为偏载车道中心线到倾覆轴线的最大垂直距离; $q_k$ 和 $P_k$ 分别为《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)<sup>[18]</sup>中车道荷载的均布荷载和集中荷载大小。

因式(1)需要通过有限元软件计算稳定效应,但计算过程较复杂,所以需要对该计算方法进行简化,方便工程使用。

## 2 抗倾覆实用计算方法研究

### 2.1 稳定效应简化计算公式推导

在独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性分析中,为了简化计算,假设箱形截面梁自重(首先不考虑墩台处主梁横隔板)沿整个桥面具有良好的均匀分布性,即根据面积相等的原则,近似地将箱形截面等效为等厚度的矩形截面,如图1所示。

$$p = \lambda_1 H = \lambda_1 S_j / B. \quad (3)$$

式中: $\lambda_1$ 为箱梁的混凝土容重。

独柱墩曲线箱梁桥的主梁自重(不考虑墩台处主梁横隔板)对倾覆轴线所产生的稳定效应,可以转化为按照均布面荷载 $p$ 对倾覆轴线取矩的方法进行计算,如图2所示,大小可按式(4)计算:

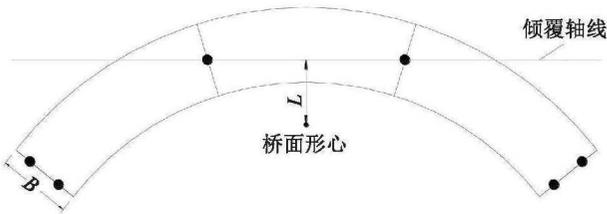


图2 独柱墩曲线箱梁桥平面计算示意

Fig. 2 Plane calculation diagram of curved box girder bridge with single column pier

$$M_{wz} = pSL = \lambda_1 S_j SL/B. \quad (4)$$

式中:  $M_{wz}$  为主梁自重(不考虑墩台处主梁横隔板)产生的稳定效应;  $S$  为桥面面积;  $L$  为桥面形心与倾覆轴线的垂直距离。

二期恒载的桥面铺装、护栏自重所产生的稳定效应, 也等效为均布面荷载对倾覆轴线取矩的方法进行计算:

$$M_{we} = \lambda_2 S_h SL/B + \lambda_3 hSL. \quad (5)$$

式中:  $M_{we}$  为二期恒载产生的稳定效应;  $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  分别为护栏和桥面铺装的材料容重;  $S_h$  为护栏横断面总面积;  $h$  为桥面铺装厚度。

$M_{we}$  计算示意如图3所示。

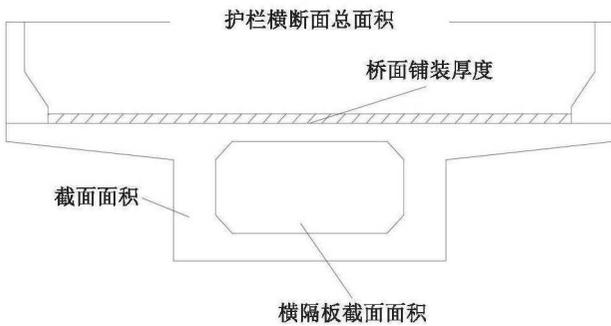


图3  $M_{we}$  计算示意

Fig. 3 Calculation diagram of the  $M_{we}$

墩台处主梁横隔板自重产生的稳定效应, 以一个作用在横隔板形心位置的集中, 对倾覆轴线取矩的方法进行计算:

$$M_{wk} = \sum \lambda_1 S_k B_i L_i. \quad (6)$$

式中:  $M_{wk}$  为墩台处主梁横隔板自重产生的稳定效

应;  $S_k$  为  $i$  号墩台处横隔板截面面积(截面空心部分面积);  $B_i$  为  $i$  号墩台处横隔板长度;  $L_i$  为  $i$  号墩台处横隔板形心与倾覆轴线间距。

$M_{wk}$  计算如图4所示。

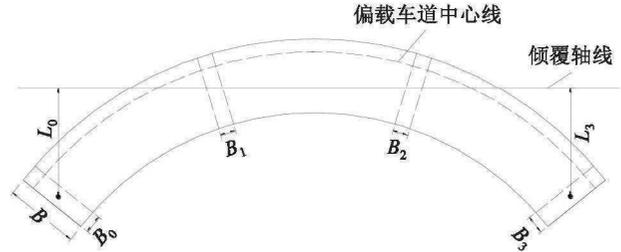


图4  $M_{wk}$  计算示意

Fig. 4 Calculation diagram of the  $M_{wk}$

则结构自重产生的稳定效应为:

$$M_{wy} = M_{wz} + M_{we} + M_{wk} \\ = \lambda_1 S_j SL/B + \lambda_2 S_h hSL + \lambda_3 hSL + \sum \lambda_1 S_k B_i L_i. \quad (7)$$

若采用式(7)计算的稳定效应  $M_{wy}$  替换式(1)的稳定效应  $M_w$ , 则不需要建立复杂的弯桥有限元模型进行分析计算。

### 2.2 稳定效应简化计算公式适用性分析

考虑箱梁的高度与宽度2个因素对独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性的影响, 组合构建4种具有代表性的箱形截面。截面1为宽高组合截面, 截面2为窄高组合截面, 截面3为宽矮组合截面, 截面4为窄矮组合截面。采用 Midas Civil 有限元软件, 分别建立曲率半径为 50、100、200、500、1 000 m 的 3×30 m 独柱墩曲线箱梁桥有限元梁格法模型, 对比分析有限元软件计算的稳定效应  $M_w$  和式(7)计算的稳定效应  $M_{wy}$ , 分析式(7)的适用性。在曲线箱梁桥设计中, 等截面箱梁的梁高与跨径之比一般在 1/15~1/25 之间, 箱梁高度取 1.2 m 和 2.0 m; 翼缘板宽度一般为腹板间距的一半, 取 1.6 m, 具体的箱形截面如图5~8所示。2种方法计算的稳定效应结果见表1。

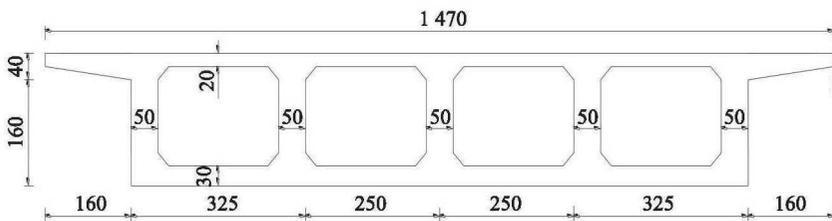


图5 截面1(单位: cm)

Fig. 5 Section 1(unit: cm)

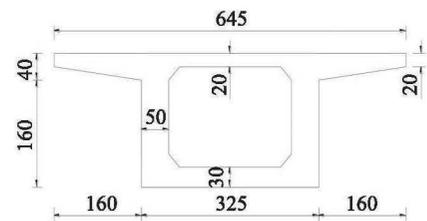


图6 截面2(单位: cm)

Fig. 6 Section 2(unit: cm)

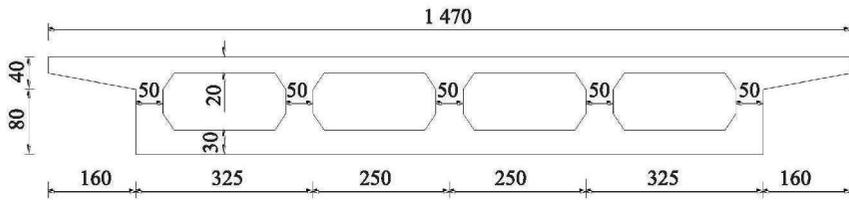


图7 截面3 (单位: cm)

Fig. 7 Section 3(unit: cm)

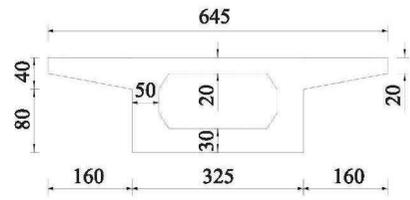


图8 截面4 (单位: cm)

Fig. 8 Section 4(unit: cm)

表1 稳定效应  $M_{w_j}$  与  $M_w$  对比表

Table 1 Comparison table of stability effect the  $M_{w_j}$  and the  $M_w$

截面	曲率半径/m	$M_{w_j}$	$M_w$	$M_{w_j}/M_w$	截面	曲率半径/m	$M_{w_j}$	$M_w$	$M_{w_j}/M_w$
截面1	50	122 141	123 881	0.986	截面2	50	46 539	46 944	0.991
	100	63 667	64 645	0.985		100	24 318	24 549	0.991
	200	55 623	57 239	0.972		200	12 293	12 411	0.990
	500	110 646	115 891	0.955		500	4 932	4 980	0.990
	1 000	128 546	134 944	0.953		1 000	7 207	7 391	0.975
截面3	50	91 228	92 675	0.984	截面4	50	35 575	35 902	0.991
	100	47 487	48 348	0.982		100	18 575	18 760	0.990
	200	42 621	43 544	0.979		200	9 388	9 484	0.990
	500	87 411	89 869	0.973		500	3 766	3 805	0.990
	1 000	101 982	104 925	0.972		1 000	5 656	5 748	0.984

由表1可知,  $M_{w_j}$  与  $M_w$  两者比值在 0.953~0.991 之间, 表明采用式(7)计算独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆的稳定效应具有较高的精度; 式(7)计算的稳定效应随着曲率半径增大的发展趋势与有限元计算结果的发展趋势一致, 均为先减小后增大, 表明采用式(7)对不同曲率半径的独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆的稳定效应进行计算具有较好的适用性。

### 2.3 抗倾覆稳定性实用计算公式推导

将式(7)的稳定效应  $M_{w_j}$  替换式(1)的稳定效应  $M_w$ , 则独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆性的稳定系数实用计算式为:

$$k_{qf} = \frac{SL(\lambda_1 S_j + \lambda_2 S_h + \lambda_3 hB)/B + \sum \lambda_i S_{k_i} B_i L_i}{(1+u)(q_k \Omega + p_k e)} \quad (8)$$

## 3 算例分析

采用式(8)对文献[20]的独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性的算例进行分析, 该算例的上部结构为 3×25 m 钢筋混凝土独柱墩曲线连续箱梁, 采用单箱双室截面, 截面的具体尺寸如图9所示。主梁

采用 C40 混凝土, 桥面为 10 cm 厚的水泥混凝土桥面铺装, 单侧护栏横断面面积为 0.48 m<sup>2</sup> (即线荷载 12.5 kN/m), 墩台处横隔板长度均为 2 m, 车道荷载的  $q_k$  和  $p_k$  分别取 10.5 kN/m 和 280 kN。文献[19]采用有限元软件计算的稳定系数  $k_{qf_1}$  和式(8)计算的稳定系数  $k_{qf_2}$  的结果见表2。

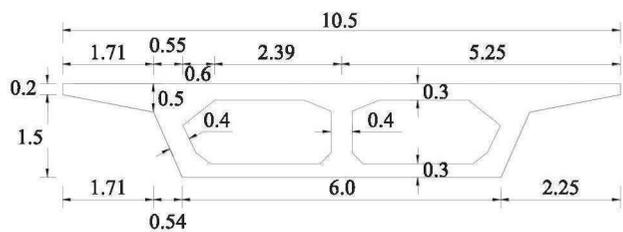


图9 单箱双室截面细部尺寸 (单位: m)

Fig. 9 Detailed dimensions of the cross-section of the single box with two rooms(unit: m)

表2 稳定系数  $k_{qf_1}$  与  $k_{qf_2}$  对比表

Table 2 Comparison table of stability coefficients  $k_{qf_1}$  and  $k_{qf_2}$

曲率半径/m	$k_{qf_1}$	$k_{qf_2}$	$k_{qf_1}/k_{qf_2}$
50	14.42	14.70	0.980
100	7.79	7.96	0.979
200	3.72	3.81	0.978
500	4.31	4.34	0.994
1000	8.57	8.56	1.000

由表2可知,  $k_{q1}$  与  $k_{q2}$  的比值在 0.978~1.000 之间, 表明采用式(8)计算独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆的稳定系数误差较小; 式(8)计算的稳定系数随着曲率半径增大的发展趋势与有限元计算结果的一致, 均为先减小后增大, 表明采用式(8)对不同曲率半径的独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定系数进行计算具有较高的精度。

## 4 结论

1) 在独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆计算中, 基于力学原理, 将上部结构的自重近似等效为均布面荷载或集中力, 并对倾覆轴线取矩形截面, 提出了结构自重作用产生的稳定效应简化计算方法。分别采用该简化计算方法和有限元软件, 对4种有代表性的箱形截面及不同曲率半径的独柱墩曲线箱梁桥的稳定效应进行了计算, 该方法与有限元软件计算的稳定效应结果吻合程度较高, 且随着曲率半径增大, 两者计算的稳定效应均呈现先减小后增大趋势, 该稳定效应简化计算方法具有较好的适用性。

2) 基于稳定效应简化计算方法, 在独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆计算中具有较好的适用性, 推导了独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定系数实用计算公式, 并采用该实用计算公式对实例进行了计算分析, 得到的稳定系数误差较小, 且随着曲率半径增大, 与有限元软件计算的稳定系数均为先减小后增大趋势, 表明: 该稳定系数实用计算公式具有较高的精度。

3) 采用该计算方法进行独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性分析时, 无需借助有限元软件便能获得较准确的抗倾覆稳定系数, 简单方便, 具有较高的工程实用价值。

### 参考文献(References):

- [1] Yi R Y, Zhou R F. Reason and risk of bridge collapse in recent 15 years[J]. Transportation Science & Technology, 2015(5): 61-64.
- [2] 彭卫兵,程波,史贤豪,等.独柱墩梁桥倾覆破坏机理研究[J].自然灾害学报,2014,23(5):98-106.(PENG Wei-bing, CHENG Bo, SHI Xian-hao, et al. Research on mechanism of overturning failure of single column pier beam bridge [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(5): 98-106. (in Chinese))
- [3] 彭卫兵,徐文涛,陈光军,等.独柱墩梁桥抗倾覆承载力计算方法[J].中国公路学报,2015,28(3):66-72.(PENG Wei-bing, XU Wen-tao, CHEN Guang-jun, et al. Calculation method for anti-overturning capacity of single column pier girder bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(3): 66-72. (in Chinese))
- [4] 彭卫兵,潘若丹,马俊,等.独柱墩梁桥倾覆破坏模式与计算方法研究[J].桥梁建设,2016,46(2):25-30.(PENG Wei-bing, PAN Ruo-dan, MA Jun, et al. Study of overturning failure modes and anti-overturning calculation methods for single-column pier beam bridges[J]. Bridge Construction,2016,46(2):25-30. (in Chinese))
- [5] 刘杰,杨吉新,董峰辉.大跨度连续梁桥悬臂施工整体抗倾覆稳定安全系数评估[J].中国公路学报,2018,31(3):89-95. (LIU Jie, YANG Ji-xin, DONG Feng-hui. Safety factors assessment of resistant overturning stability of long-span continuous girder bridges in cantilever construction[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018,31(3):89-95. (in Chinese))
- [6] 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 with single-column piers and applicability of design standards[J]. China Journal of Highway and Transport,2018,31(3):49-58. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 庄冬利.偏心作用下箱梁桥抗倾覆稳定问题的探讨[J].桥梁建设,2014,44(2):27-31.(ZHUANG Dong-li. Study on overturning stability issues of box girder bridges under action of eccentric load[J]. Bridge Construction, 2014,44(2):27-31. (in Chinese))
- [9] 聂载东,汪炳,丁勇,等.事故车辆施救工况独柱墩匝道桥倾覆稳定性研究[J].自然灾害学报,2019,28(5):86-95. (NIE Zai-dong, WANG Bing, DING Yong, et al. Research on the overturning stability of the single-pillar ramp bridge [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(5): 86-95. (in Chinese))

- under the conditions of accident vehicle rescue[J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(5): 86-95. (in Chinese))
- [10] 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.
- [11] Deng L, Wang W, Yu Y. State-of-the-art review on the causes and mechanisms of bridge collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(2): 04015005.
- [12] Kim E S, Kim J H. Evaluation of the structure stability of a plate girder bridge using MIDAS structure analysis[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, 2014, 38(4): 451-457.
- [13] 陈得良, 全俊. 基于大范围空间转动的车-桥耦合振动分析[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2018, 15(3): 48-53. (CHEN De-liang, QUAN Jun. Analysis of coupling vibration of vehicle-bridge system based on large range space rotation[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2018, 15(3): 48-53. (in Chinese))
- [14] 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. (HE Xiong-jun, LIU Xin, LIANG Ya-lan. 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. (in Chinese))
- [15] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362-2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018. (CCCC Highway Consultants CO., Ltd.. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362-2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese))
- [16] 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. (GONG Ya-feng, HE Yu-long, TAN Guo-jin, 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. (in Chinese))
- [17] Song G, Che D, Li M. Overturning Axis Selection in Curved Box-Girder Bridges with Single-Column Piers[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018, 2018: 1-9.
- [18] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (CCCC Highway Consultants CO., Ltd.. General code for design of highway bridges and culverts: JTG D60-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [19] 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 Zhi-cai, FENG Xi-xun. Analysis of overturning stability of straight and curved bridges with box sections [J]. Bridge Construction, 2014, 44(3): 69-74. (in Chinese))
- [20] 董学智. 城市独柱墩曲线梁桥抗倾覆稳定性分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2015. (DONG Xue-zhi. Analysis of urban single-column pier curved girder bridge overturning stability[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015. (in Chinese))