

## 连续弯箱梁桥抗倾覆稳定性影响因素的有限元分析

张 玥,魏永杰\*,杨庆嵘,许有俊

内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010

**摘要:** 针对平面线形为圆曲线的弯箱梁桥,以《公路桥涵通用图》中(20+32+20)m连续箱梁桥为例,通过引入倾覆临界曲率半径这一参数,运用Midas进行计算机仿真计算,模拟分析桥梁孔径、曲率半径、支座间距及预偏心等多个因素对临界半径和抗倾覆稳定性的影响。结果表明,桥梁孔径、曲率半径、支座间距及预偏心等多个因素的改变能够对临界曲率半径有明显的影响;当桥梁的实际曲率半径接近或等于临界曲率半径时,其抗倾覆稳定性最小;对各因素合理的取值可以有效避开临界曲率半径,提高桥梁的抗倾覆稳定性。临界曲率半径可以作为设计阶段初步判断连续箱梁发生整体翻转可能性的一個简单实用的量化指标。

**关键词:** 连续弯箱梁桥; 稳定性; 影响因素

**中图法分类号:** TB24

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2017)04-0540-05

## Finite Element Analysis on Influential Factors of Structural Stability of Continuous Curved Beam Box-Bridge

ZHANG Yue, WEI Yong-jie\*, YANG Qing-rong, XU You-jun

School of Civil Engineering/Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China

**Abstract:** On account of box girder bridge whose horizontal alignment is circular curve, this paper takes (20 + 32 + 20) m continuous box girder bridge in the general highway bridge graph as an example to calculate with Midas software by means of introducing the parameter of capsized critical curvature radius to analyze the influences of bridge aperture, curvature radius, distance between bearing, pre-eccentric and other factors on critical radius and stability against overturning. The results showed that the changes of the above factors had significant effects on the critical radius of curvature; when the actual radius of curvature of the bridge was equal or close to the critical radius of curvature, it had the minimum stability against overturning; the reasonable evaluation of various factors could effectively avoid the critical radius of curvature and improve the stability against overturning. The critical radius of curvature could be used as a simple and practical quantitative indicator to preliminarily estimate the possibility of overall overthrow of the continuous box girder.

**Keywords:** Continuous curved beam box-bridge; stability; influential factors

独柱墩箱形梁桥具有桥下净空大、适应地形能力强、外形美观、结构轻巧等优点,但由于采用独柱墩,墩顶宽度较窄,桥墩支座间距较小,采用单支座布置形式,在密集车辆组偏载作用下,对主梁整体倾覆稳定性会产生不利的影響。近些年,这种桥梁结构形式已经发生了多起主梁倾覆事故,根据以往发生的倾覆事故总结得到桥梁倾覆主要发生如下破坏形式:主梁发生整体翻转;支承体系发生破坏。

在这二种破坏中第一种破坏属于稳定问题,第二种破坏属于强度问题。我国现行公路桥梁设计规范对于横向侧倾稳定性没有做出明确的规定<sup>[1]</sup>,《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD62-2012)(讨论稿)对独柱墩梁桥整体抗倾覆稳定性的计算要求等问题也没有作明确的规定。这样就使桥梁满足设计规范的要求,但在一定的超载车辆作用下发生了倾覆事故,因而桥梁工程师在设计时应当注重独柱墩桥梁的结构形式<sup>[3]</sup>,要重视主梁的整体抗倾覆能力以及盖梁的承压能力和墩柱的抗剪能力,从而确保桥梁有足够的抗倾覆稳定性。

本文仅结合主梁第一种破坏形式,借用《公路桥涵通用图》<sup>[5]</sup>中(20+32+20)m连续箱梁桥作为工程实例,运用Midas civil建立不同曲率半径以及支座布置形式的梁格模型,以研究主梁整体翻转倾覆为基础,引入临界曲率半径,根据独柱墩连续弯箱梁桥倾覆稳定临界状态,通过综合考虑桥梁孔径、曲率半径、支座间距及预偏心等几何参数对桥梁临界曲率半径大小的影响,分析各种因素

**收稿日期:** 2016-11-03

**修回日期:** 2016-11-26

**基金项目:** 内蒙古自治区高等学校科学技术研究(NJZY14167)

**作者简介:** 张 玥(1968-),男,硕士,副教授,硕士研究生导师。研究方向:道路与桥梁与隧道工程设计/检测。E-mail:yuezhang-zy@163.com

**\*通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:weiyongjiestudy@163.com

对桥梁抗倾覆稳定性的影响。通过上述研究分析，希望能够为桥梁设计阶段的抗倾覆稳定性分析提供参考和借鉴。

### 1 有限元模型的建立

以跨径为(20+32+20)m，桥面净宽 2×0.5 m 防撞墙+净 11.0 m，桥面铺装 10 cm 厚 C50 混凝土；桥墩为独柱墩，设单支座，桥台设双支座，横向间距 6.5 m；主梁 C50 混凝土，单箱双室截面梁桥为工程背景进行分析。跨中截面尺寸如图 1 所示。采用 Midas civil 软件建立梁格模型，共建立 342 个梁单元，如图 2 所示。

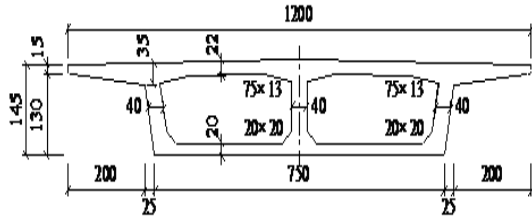


图 1 主梁跨中截面(单位:cm)

Fig.1 The midspan section of girder

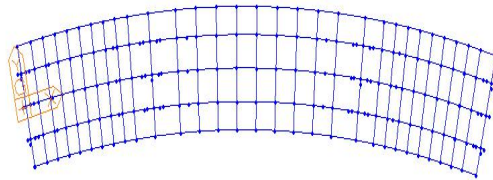


图 2 梁单元布置

Fig.2 The layout of girder element

根据软件计算的结构基频计算得出桥梁冲击系数 $\mu=0.24$ 。

汽车荷载沿曲线外侧车道布置，分二种工况：

工况一：公路-I 级车道荷载；工况二：总轴重 55 t 车辆荷载组成的密集车辆组，车辆荷载布置形式如图 3 所示：(图中尺寸单位为 m，荷载单位为 kN)

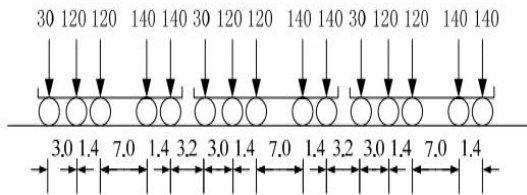


图 3 车辆布置

Fig.3 Arrangement of vehicles

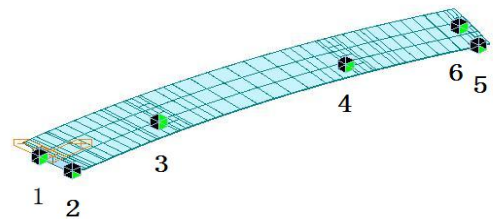


图 4 桥梁支座布置形式

Fig.4 The layout of bridge bearing

### 2 抗倾覆稳定性计算依据

计算独柱墩连续弯箱梁桥抗倾覆稳定系数时基于以下基本假定：

- 1) 桥梁上、下部结构有足够的强度与刚度，不会发生除整体翻转破坏以外的其它破坏形式。
- 2) 全桥支座都为只受压支座，并且忽略支座的具体尺寸(图 4)。

车道荷载和车辆荷载作用下的抗倾覆稳定系数 JTG D62-2012 中已有详细说明<sup>[2]</sup>，不再赘述。

JTG D62-2012 规定，采用车道荷载时，抗倾覆稳定系数应 $\geq 2.5$ ，而采用密集车辆荷载时，抗倾覆稳定系数按 $\geq 1.3$ 控制。工况一车道荷载作用下抗倾覆稳定系数计算简图如图 5，在工况二密集车辆组作用下抗倾覆稳定系数计算简图如图 6 所示：

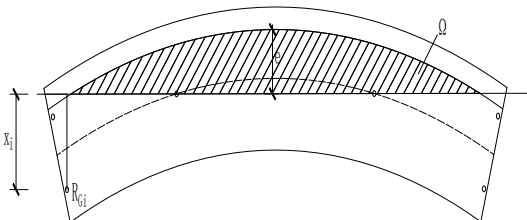


图 5 车道荷载作用下抗倾覆稳定系数计算简图

Fig.5 The drawing to calculate anti-dumping stability coefficients under lane load action

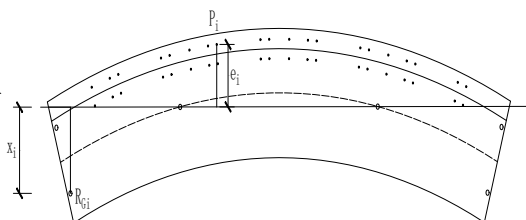


图 6 密集车辆组作用下抗倾覆稳定系数计算简图

Fig.6 The drawing to calculate anti-dumping stability coefficients under crowded vehicle team

55 t 密集车辆组作用下抗倾覆稳定系数的简化计算从图 6 可以看出需要人为的去确定车辆的位置，以及确定车轮到倾覆轴线的距离，从而确定最不利倾覆力矩。这种方式对于采用密集车辆组加载来说误差不大，但计算过程会很繁琐而且会大大增加计算所用时间，尝试用车辆荷载转化为车道

均布荷载的方式对计算公式进行简化, 得到均布荷载为:  $Q = \frac{550}{15+1} = 34.375 \text{ kN/m}$  (1)

据式 1 最终在密集车辆组作用下的抗倾覆稳定系数计算公式简化为:  $k_{gf} = \frac{\sum R_{Gi} x_i}{34.375 \Omega}$  (2)

### 3 抗倾覆稳定因素分析

#### 3.1 曲率半径对抗倾覆稳定的影响

3.1.1 倾覆临界半径计算 在多跨连续梁桥临界倾覆半径计算中, 以 3 跨连续梁为例, 推导出常用多跨连续梁临界半径的计算公式。在 3 跨连续梁中, 桥台外侧支座与中墩支座共线时, 支座反力提供的抗倾覆力矩最小, 这是上部结构倾覆稳定性最不利的几何条件<sup>[4]</sup>, 此时对应的曲率半径即为倾覆临界半径  $R_c$ , 设边跨、中跨的计算跨径分别为  $l_1$ 、 $l_2$ , 桥台或联端外侧支座至桥轴线距离为  $e_A$ , 中墩外侧支座至桥轴线距离或独柱墩单支座预偏心为  $e_B$ , 如图 7 所示。

此时支座  $A-B-B'-A'$  共线的几何条件为:  $h_A = h_B$  (3)

令:  $l_B = l_2/2 \quad l_A = l_1 + l_B$  (4)

则:  $(R + e_A) \cos \theta_A = (R + e_B) \cos \theta_B$  (5)

设桥梁的曲率半径为  $R$ , 则满足式 5 时, 该半径即为 3 跨连续梁的临界半径  $R_c$ 。

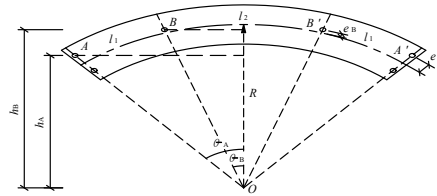


图 7 三跨连续梁

Fig.7 The continuous girder with three spans

为便于应用, 可将式中余弦函数进行级数展开从而得到临界半径  $R_c$  的近似解析解。

$$\theta_i = \frac{l_i}{R} \quad (i = A, B) \quad (6)$$

$$\cos \theta_i \approx 1 - \frac{\theta_i^2}{2!} = 1 - \frac{l_i^2}{2R^2} \quad (7)$$

将式 7 代入式 5, 可得临界半径计算公式:

$$R_c \approx \frac{l_{AB} + \sqrt{l_{AB}^2 + 8(e_A l_A^2 - e_B l_B^2) e_{AB}}}{4e_{AB}} \quad (8)$$

其中:  $l_{AB} = l_A^2 - l_B^2, \quad e_{AB} = e_A - e_B$  (9)

由式 8、式 9 可见, 要得到数学上合理的临界半径, 需要满足  $e_A > e_B$  的条件。当中墩采用单支座时, 通常  $e_A \gg e_B$ 。

由式 3~9 可以看出, 临界半径计算时已考虑了桥梁分孔与跨径、支座横向间距及预偏心等几何参数的影响, 虽未体现桥面宽度的影响, 但在实际设计中, 拟定支座横向间距特别是桥台或联端支座间距时, 必定会考虑箱梁构造尺寸和桥面宽度的影响, 因此, 其影响已隐含在内。

式 4、式 8、式 9 虽然为 3 跨连续梁倾覆临界半径的计算公式, 实际上对于常用的 4 跨及 5 跨连续梁也是适用的, 只需将式 3 稍作变化即可。

《公路桥涵通用图》中 3 跨连续梁桥基本计算参数如下:  $l_1=19.42 \text{ m}, l_2=32.00 \text{ m}, l_B=0.5 l_2=16.00 \text{ m}; l_A=l_1+l_B=35.42 \text{ m}, e_A=3.25 \text{ m}, e_B=0$  代入式 9、式 8 后, 可得临界半径  $R_c \approx 157.6 \text{ m}$ 。

3.1.2 抗倾覆稳定系数计算 考虑桥梁所处路线平曲线半径取值的实际可能性及本桥的跨径布置按, 桥梁曲率半径分别拟定为 50 m、100 m、150 m、200 m、300 m、500 m。鉴于前述临界半径  $R_c=157.6 \text{ m}$ , 为便于比较, 增设 157.6 m、165 m 两个曲率半径。上述计算公式中, 车道荷载标准值、车辆荷载各轮重按规范要求取值, 支座反力由前述梁格法有限元模型计算得出, 支座、荷载至倾覆轴的间距、包围面积等根据几何条件计算得出。各支座反力值计算如下表 1, 不同曲率半径的抗倾

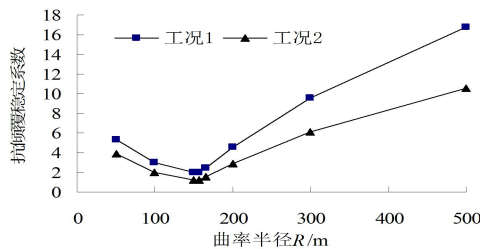
覆稳定系数如下表 2。

**表 1 支座反力值/KN**  
Table 1 The reaction on bearing

曲率半径/m Radius of curvature	支座编号 No.					
	1	2	3	4	5	6
50	1025.5	674.5	6694.3	6704.9	674.4	1020.8
100	1004.5	755.3	6634.6	6646.5	753.1	1001.3
150	993.1	798.2	6603.8	6613.6	795.5	991.3
157.6	938.2	801.8	6657.1	6659.3	801.6	937.4
165	935.5	805.1	6656.6	6658.8	804.8	934.7
200	983.9	825.1	6586.9	6594.4	822.7	983.1
300	962.1	853.3	6580.9	6586.9	851.8	960.7
500	954.2	882.5	6560.5	6563.2	881.3	954.1

**表 2 不同曲率半径的抗倾覆稳定系数**  
Table 2 The anti-dumping stability coefficients of different radius of curvature

曲率半径 R/m Radius of curvature	抗倾覆稳定系数 $\gamma_{af}$ Anti-dumping stability coefficients		
	工况 1	工况 2	工况 2 简化
50	5.35	3.85	3.94
100	3.00	1.97	2.03
150	1.99	1.27	1.27
157.6	1.95	1.24	1.24
165	2.42	1.54	1.54
200	4.51	2.87	2.87
300	9.56	6.07	6.06
500	16.80	10.59	10.58



**图 8 抗倾覆稳定系数变化曲线**

**Fig.8 The various curves with anti-dumping stability coefficients**

由图、表可见，曲率半径相同时，工况二的抗倾覆稳定系数较小，更容易发生桥梁倾覆。当曲率半径  $R$  等于或接近倾覆临界半径  $R_c$  时，抗倾覆稳定系数的最小取值在临界半径  $R_c$  处，以  $R_c$  为界，图 8 所示抗倾覆稳定系数随曲率半径的增大先降低后提升，说明：当  $R < R_c$  时，随着曲率半径的减小，抗倾覆稳定性能得到提高；当  $R > R_c$  时，随着曲率半径的增大，抗倾覆性能也得到了显著的提高。

从表中也可以看出，密集车辆组作用下的抗倾覆稳定系数通过简化公式计算所得的结果满足倾覆临界半径随曲率半径变化相对应的抗倾覆稳定系数的变化规律，与人为加载计算的结果相比误差很小，最大误差为 2.3%，并且曲率半径越大计算结果越接近，简化公式的计算结果可以满足工程实际计算精度需求。

### 3.2 支座布置对临界半径及抗倾覆性能的影响

假设上述桥梁的曲率半径恰好为  $R=157.6\text{ m}$ ，通过调整支座横向间距及预偏心可改变临界半径。调整后的临界半径及抗倾覆稳定系数见表 3。

由表 3 可以看出：

(1) 当端支座间距不变时，适当增大中支座预偏心，可增大倾覆临界半径，从而使桥梁由临界状态转入大弯状态，抗倾覆稳定系数增大。

(2) 增大端支座间距，可减小临界半径，使桥梁由临界状态转入微弯状态，抗倾覆稳定系数随之增大；当端支座间距增大到一定程度后，中支座预偏心的变化不足以使桥梁结构转换弯曲状态，

因而对抗倾覆稳定系数的影响很小, 但通过设置中支座预偏心可以调整内外侧端支座的反力分布、主梁扭转和支座水平力, 可改善结构受力和变形。

(3) 同时增大端支座间距和中支座预偏心, 可能会出现桥梁仍处于接近临界状态的情况, 但此时相对于原结构, 抗倾覆稳定系数仍有所提高, 其主要原因仍如上所述, 是由于支座布置的变化导致支座反力重新分布而引起的。

**表 3 不同支座布置的抗倾覆稳定系数**  
**Table 3 The anti-dumping stability coefficients of different bearings**

中支座预偏心 $e_B/m$ Eccentric in bearing	端支座间距 $2e_A/m$ Distance between end bearings	倾覆临界半径 $R_c/m$ Overthrow the critical radius	抗倾覆稳定系数 Anti-dumping stability coefficients	
			工况 1 Working Condition	工况 2 Working condition
0.0	6.5	157.61	1.948	1.242
0.1	6.5	162.46	2.269	1.447
0.2	6.5	167.64	2.660	1.699
0.0	6.7	153.14	2.315	1.477
0.1	6.7	157.70	2.313	1.476
0.2	6.7	162.56	2.660	1.699
0.0	6.9	148.93	2.698	1.724
0.1	6.9	153.23	2.699	1.724
0.2	6.9	157.80	2.698	1.723
0.0	7.1	144.97	3.105	1.985
0.1	7.1	149.03	3.104	1.984
0.2	7.1	153.33	3.105	1.985

**3.3 桥梁孔径布置对临界半径及抗倾覆性能的影响**

仍取曲率半径  $R=157.6$  m 的 3 跨连续梁, 保持桥跨总长度不变, 将其孔径由(20+32+20) m 调整为  $3 \times 24$  m, 则车道荷载标准值为:  $P_k=308$  kN,  $q_k=10.5$  kN/m; 汽车冲击系数  $\mu=0.343$ 。跨径调整后的临界半径及抗倾覆稳定系数计算结果见表 4, 为便于计算, 表中仅列出汽车荷载工况一的抗倾覆稳定系数。

**表 4 等跨布置的抗倾覆稳定系数**  
**Table 4 The anti-dumping stability coefficients of equal spans**

端支座间距 $2e_A/m$ Distance between end bearings	中支座预偏心 $e_B/m$ Eccentric in bearing	倾覆临界半径 $R_c/m$ Overthrow the critical radius	抗倾覆稳定系数 Anti-dumping stability coefficients
			工况 1 Working condition
6.5	0	174.45	2.981
6.5	0.1	179.87	3.401
6.5	0.2	185.64	3.846

等跨布置的连续弯梁桥, 其抗倾覆稳定性能优于中跨较大的不等跨布置形式。

临界半径是一个动态指标, 并非一成不变。在设计阶段, 当出现  $R$  与  $R_c$  相等或接近的情况时, 为了提高其抗倾覆稳定性, 可通过调整桥梁孔径、支座横向间距及预偏心等几何参数而改变临界半径, 从而使  $R$  与  $R_c$  相差较大而提高抗倾覆稳定性。

**4 结 语**

(1) 引入的临界曲率半径计算公式和精度可以满足工程需求, 且适用于常用的多跨连续桥梁。

(2) 当实际半径与临界半径非常接近或相等时, 可以通过调整几何参数来改变临界半径, 以使桥梁避开临界状态, 提高抗倾覆稳定性。对于中小跨径连续弯梁桥, 宜采用等跨布置的形式; 通过调整端支座间距或中支座预偏心也可提高抗倾覆稳定性, 这种调整较容易实现, 建议优先采用。

**参考文献**

[1] 中华人名共和国交通运输部.JTGD60-2015 公路桥涵设计通用规范[S].北京:人民交通出版社,2015:34-35  
 [2] 中华人名共和国交通运输部.JTG D62-2012 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 (讨论稿) [S].2012  
 [3] 孙吉书,杨春风,窦远明,等.基于交通调查的重载交通公路桥梁设计车辆荷载探讨[J].河北工业大学学报,2009,38(1):91-95  
 [4] 王海丰.连续箱梁桥抗倾覆稳定性分析[J].北方交通,2013(2):53-56  
 [5] 交通部专家委员会.公路桥涵通用图[M].北京:人民交通出版社,2007