

基于正交实验和灰色理论的曲线连续梁桥抗倾覆稳定性分析

石贤增¹, 王钱泱¹, 万鑫²

(1. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601;
2. 安徽农业大学 林学与园林学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 为研究曲线连续梁桥物理参数对桥梁抗倾覆稳定性的影响, 基于正交实验, 对曲线半径、桥台横向支座间距、中墩横向支座间距、边中跨长度比值等四类典型参数进行了方案设计。依据规范提供的抗倾覆稳定性系数计算方法, 利用 Midas/Civil 软件建立有限元模型进行分析计算, 并采用灰色关联法对结果进行敏感性分析。结果表明: 曲线半径是影响曲线梁桥抗倾覆稳定性的主要敏感因素; 桥台支座间距和中墩支座间距敏感性次之; 边中跨长度比值敏感性最小。进一步分析主要敏感参数对桥梁抗倾覆稳定性的影响规律, 进而明确了桥梁抗倾覆设计中的重点, 对研究曲线桥梁抗倾覆设计具有借鉴意义。

关键词: 曲线连续梁桥; 灰色理论; 正交实验; 抗倾覆稳定性

中图分类号: U44

文献标识码: A

文章编号: 2095-8382(2022)03-001-07

Analysis of Overturning Stability of Curved Continuous Girder Bridge Based on Orthogonal Experiment and Grey Theory

SHI Xianzeng¹, WANG Qianyang¹, WAN Xin²

(1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;
2. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: To study the influence of physical parameters on the overturning stability of the curved continuous girder bridge, a research plan was designed based on orthogonal experiments considering four typical parameters, namely curve radius, transverse bearing spacing of bridge abutment, transverse bearing spacing of middle pier, and edge-to-medium span length ratio. According to the calculation method of overturning stability coefficient provided by JTG 3362-2018, a finite element model was established using Midas/Civil software, and the sensitivity analysis of the results was carried out by gray correlation method. The results show that the curve radius is the main sensitive factor that affects the overturning stability of the cured continuous girder bridge, followed by the side piers spacing and the middle pier spacing, while the sensitivity of the length ratio of the side-span and mid-span have minimum influences. The main sensitive parameters on the overturning stability of the bridge is analyzed, and the key points in the overturning design of the bridge are clarified, which provides references for the overturning design research of the curved bridge.

Keywords: curved continuous girder bridge; grey theory; orthogonal experiment; overturning stability

收稿日期: 2021-07-17

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(2008085QE245); 安徽省高校省级自然科学研究重点项目(KJ2019A0747); 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2019YF-029)

作者简介: 石贤增(1980-), 男, 正高级工程师, 硕士, 研究方向: 道路桥梁结构与设计。

曲线连续梁桥具有曲线优美、占用桥下空间少、交通流量分流能力强等一系列优点,因而大量应用于城市立体交通。然而近年来,国内外多次发生的桥梁整体倾覆事件不断提醒我们,桥梁横向倾覆稳定性的问题不容忽视。据相关文献统计,国内桥梁整体性横向倾覆主要因素是超载造成的^[1]。例如,2019年无锡高架桥侧翻事故的直接原因是箱梁自重等产生的稳定效应无法抵抗移动荷载引起的失稳效应,倾覆力矩使箱梁整体发生倾覆。

国内外学者对桥梁的抗倾覆稳定性也进行了相关研究,姜爱国等^[2]通过建立有限元模型分析独柱墩曲线梁桥抗倾覆能力,对各种车道荷载作用下的桥梁支座受力情况进行研究,确定了支座的脱空顺序以及相应的倾覆轴线。张健等^[3]通过有限元模拟在不同的汽车荷载工况进行荷载组合基础上,分析了预偏心、单、双支座对倾覆稳定性的影响,并提出了一些具体指导性意见。相宏伟^[4]通过建立曲线桥梁独柱墩支座预偏心对比参数,分析其对桥梁结构内力、位移的影响,以此来研究该参数对抗倾覆性能的影响。彭卫兵等^[5]分析了近几年国内桥梁的整体倾覆事件,提出梁桥倾覆的三个阶段和四种可能的破坏模式,同时对现有的倾覆算法进行了进一步分类,建立了对应这些破坏模式的倾覆算法,全面系统地阐述了桥梁倾覆的机理。Dan等^[6]从桥梁结构监测的角度提出了两种评估桥梁潜在倾覆风险的技术路线,为桥梁抗倾覆可靠性提供了一种评估方法。虽然学者对桥梁抗倾覆稳定性做了很多工作,但是多局限在单参数分析,对于多参数共同作用下的敏感性分析却鲜有报道。

因此,本文在总结前人研究的基础上,通过引入正交实验和灰色关联法,确定不同参数对桥梁抗倾覆稳定性的影响程度,从而将抽象的概念转化为可量化的数值,以期能够为后续曲线桥梁抗倾覆设计提供理论支持,达到减少桥梁倾覆事故发生的目的。

1 灰色关联分析模型

1.1 灰色关联分析方法

灰色系统理论是在非确定性系统领域的一种

常用研究理论,对于整个系统中只知道部分信息,而不清楚其余信息的不确定性问题比较适用^[7]。作为灰色系统中的重要组成部分,灰色关联分析是一种可以在有限信息内对数据序列采用一定的数据处理方式,并通过分析不同序列之间对应数据差值的绝对值大小,以此反映各序列之间关联程度大小的方法。曲线桥梁抗倾覆稳定性是由多种因素共同决定的,各因素之间并无明显的线形关系,具有显著的“灰色”特征。因此,本文将运用灰色关联分析方法,分析不同影响因素与桥梁抗倾覆稳定性之间的关联性,从而找到主要影响因素。

1.2 灰色关联分析步骤

下面对上述方法的计算过程简述如下:

(1) 确定比较序列 X_i :

$$X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m)$$

(2) 确定参考序列 X_0 :

$$X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}$$

(3) 对不同物理量的数据进行无量纲化处理。本文采用区间值化方法对比较序列和参考序列进行数据处理,处理后的新序列为

$$Y_i = \{y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(n)\}, \text{ 其中}$$

$$y_i(k) = \frac{x_i(k) - \min_k x_i(k)}{\max_k x_i(k) - \min_k x_i(k)} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

(4) 计算相对关联系数。关联系数反映了比较序列与参考序列之间的相关程度,参考序列和比较序列经过数据处理后形成的新序列分别为 $Y_0 = \{y_0(1), y_0(2), \dots, y_0(n)\}$ 、 $Y_i = \{y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(n)\} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m)$, 其计算公式如下所示:

$$\gamma_{0i}(k) = \frac{\min_i \min_k |y_0(k) - y_i(k)| + \xi \max_i \max_k |y_0(k) - y_i(k)|}{|y_0(k) - y_i(k)| + \xi \max_i \max_k |y_0(k) - y_i(k)|} \quad (2)$$

式中: $\gamma_{0i}(k)$ ——比较序列和参考序列在第 k 个指标处的相对关联系数;

$$\min_i \min_k |y_0(k) - y_i(k)| \text{——二级最小差;}$$

$\max_i \max_k |y_0(k) - y_i(k)|$ ——二级最大差;

ξ ——分辨系数,分辨系数的值通常取 0.5。

(5) 计算灰色关联度。对上述相对关联系数取平均值,即可得到灰色关联度。公式如下:

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_{oi}(k) \quad (3)$$

式中: $\gamma(X_0, X_i)$ ——比较序列与参考序列的灰色关联度。

通过上述步骤计算出各参数与分析对象之间的灰色关联度后,将数值进行大小排序,即可得到各个参数与分析对象之间的关联度强弱的顺序,从而反映出各影响因素与其分析对象之间敏感性的大小。

2 曲线连续梁桥抗倾覆稳定性影响因素灰色关联分析

2.1 变量选取

从相关文献中可以得知^[8-9],曲线连续梁桥的抗倾覆稳定性取决于多种因素,本文在已有文献的研究基础上总结并选取了曲线半径 R 、桥台双支座距离 B_1 、中墩支座间距 B_2 、边中跨长度比值 n 等四类典型影响因素进行灰色关联分析。

2.2 实验方案设计

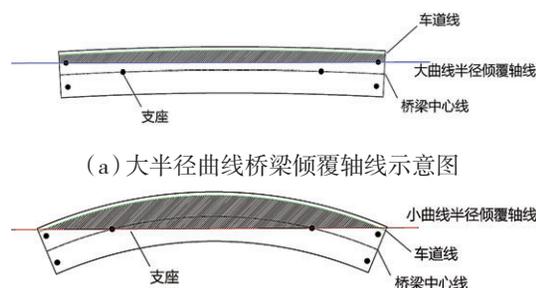
若要考虑不同因素的不同水平对桥梁结构抗倾覆稳定性的影响程度,需要控制变量进行大量的试验设计组合,显然不太经济。因此,本文采用正交实验法对其方案进行优化。正交试验法用于安排多因素试验的一种科学方法,其原理是利用正交性从所有水平组合中挑选出具有代表性的部分组合进行试验,从而达到对多因素多水平试验进行优化的目的^[10]。本文探究的各个因素及水平为:桥梁曲线半径 R (68 m、140 m、300 m);桥台支座间距 B_1 (3 m、4.5 m、5 m);中墩支座间距 (1 m、1.25 m、1.5 m);边中跨长度比值 n (0.5、0.65、1)。采用 $L_9(3^4)$ 正交实验表,设计四因素三水平的正交实验,共计九种实验方案。数据组合方式见表 1 所示。

表 1 基于正交实验的数据组合方式

组号	曲线半径 (m)	桥台支座间距 (m)	中墩支座间距 (m)	边中跨长度比值
R1B ₁ 1B ₂ 1n1	68	3	1	0.5
R1B ₁ 2B ₂ 2n2	68	4.5	1.25	0.65
R1B ₁ 3B ₂ 3n3	68	5	1.5	1
R2B ₁ 1B ₂ 2n3	140	3	1.25	1
R2B ₁ 2B ₂ 3n1	140	4.5	1.5	0.5
R2B ₁ 3B ₂ 1n2	140	5	1	0.65
R3B ₁ 1B ₂ 3n2	300	3	1.5	0.65
R3B ₁ 2B ₂ 1n3	300	4.5	1	1
R3B ₁ 3B ₂ 2n1	300	5	1.25	0.5

2.3 抗倾覆稳定性计算方法

相关学者对于曲线桥梁结构倾覆破坏的计算研究也做了大量工作,其研究工作大部分都是将箱梁刚体转动为基础进行理论研究^[11-12],得出了不同情况下的倾覆轴线,如图 1 所示。



(a) 大半径曲线桥梁倾覆轴线示意图

(b) 小半径曲线桥梁倾覆轴线示意图

图 1 曲线桥梁倾覆轴线示意图

基于刚体转动的计算理论是将箱梁当作理想的刚体,以各支座到倾覆轴线的距离为基准力臂长度,忽略倾覆过程中墩台之间的相互作用,其结果高估了桥梁的稳定性。

2018 年交通运输部颁布了《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“新版规范”)。新版规范提出了一种基于变形体转动理论的倾覆计算方法,该方法放弃了倾覆轴线这一概念,而采用倾覆极限状态概念,明确了其倾覆过程分为 2 个特征状态^[13]。特征状态 1 规定了支座在作用基本组合下不能出现脱空的情况;特征状态 2 的验算在特征状态 1 的基础上给出了具体稳定系数计算公式,在各作用效应按标准值组合下,上部结构的作用效应符合下式:

$$\frac{\sum S_{bk,i}}{\sum S_{sk,i}} \geq k_{qf} \quad (4)$$

$$\sum S_{bk,i} = \sum R_{Gki} l_i$$

$$\sum S_{sk,i} = \sum R_{Qki} l_i$$

式中： k_{qf} ——抗倾覆稳定性系数，取 2.5；

$\sum S_{bk,i}$ ——稳定效应设计值；

$\sum S_{sk,i}$ ——失稳效应设计值；

R_{Gki} ——永久作用下第 i 个桥墩处失效支座的支反力值；

R_{Qki} ——可变作用下第 i 个桥墩处失效支座的支反力值，汽车荷载按各失效支座对应的最不利布置位置取值，并考虑冲击系数；

l_i ——双支座的计算距离。

新版规范综合考虑梁体倾覆过程中的临界状态，因此在设计中只需确定稳定效应和失稳效应对应的的作用效应力矩，即可通过公式(5)计算出横向抗倾覆稳定系数，从而评估其桥梁倾覆稳定性。

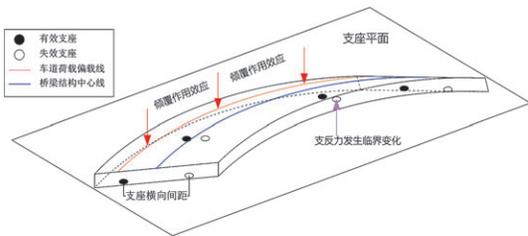


图 2 倾覆临界状态示意图

2.4 计算实例

通过 Midas/Civil 软件对上述九组方案建立有限元模型。为控制变量，在建模过程中除这四类参数外，其余建模参数均相同，见表 2 所示。

表 2 工程概况及建模参数表

参数设置	参数说明
工程概况	结构为三跨预应力混凝土曲线连续箱梁，桥长 90 m；主梁桥宽 9.74 m，单箱双室结构；采用满堂支架法施工，一次成桥
主梁材料	C50
冲击系数	程序计算各组模型结构基频，参照 JTG D60-2015 ^[14] （以下简称 15 规范）公式计算冲击系数
荷载信息	混凝土容重 26 kN/m ³ ，预应力荷载 1 357.8 Mpa，二期铺装及防撞护栏分别 40.38 kN/m、10 kN/m，温度及车道荷载分别按照 15 规范设置，车道荷载按最不利位置加载
支座沉降	-0.5 cm
边界设置	全桥均设置抗扭双支座；边界采用弹性连接和一般支承模拟，除在曲线内侧 A1-1 支座设定为固定支座外，A0-1、A2-1、A3-1 均为单向活动支座；曲线外侧 A1-2 支座设定为单向活动支座，其余均为双向活动支座，支座编号顺序如图 3 所示

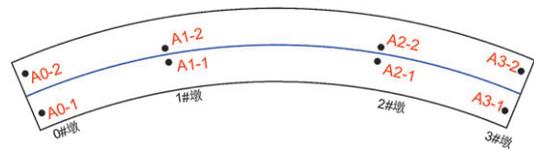


图 3 支座布置图

基于正交实验进行参数设计的 Midas/Civil 计算模型如图 4 所示。

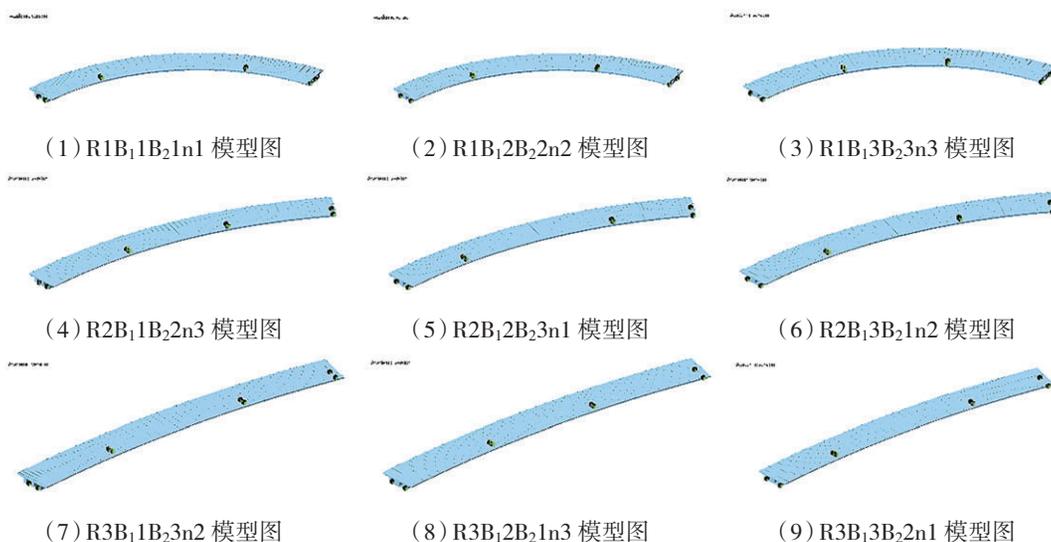


图 4 正交试验方案有限元模型图

由于梁单元模型不能考虑到曲线桥梁在自重下会产生向曲线外侧的横向均布扭矩,分析结果会与实际有一定的误差。因此,本文根据相关学者的研究成果^[15],先计算出不同曲线半径的均布扭矩值,将其以外荷载的形式施加到各组模型中,从而能够较为准确地分析曲线桥梁的抗倾覆稳定性。下面将计算过程简述如下:

(1) 将箱梁的横截面划分为矩形、梯形基本截面区段,并标上序号,如图 5 所示。

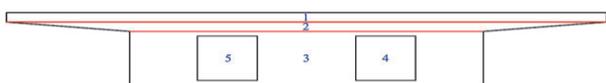


图 5 计算自重产生的横向均布扭矩截面划分示意图

(2) 根据相关文献所给出的矩形、梯形截面单位长度梁段体积 \bar{V} 和截面重心到曲率重心距离 R_e 的计算公式,分别求得 1,2,3,4,5 区段的 \bar{V} 和 R_e 的值,同时计算其单位体积矩 \bar{U} ,其中挖空的区段取负值,公式如下:

矩形截面:

$$\bar{V} = 4\alpha R_0 D h \quad R_e = \frac{\sin \alpha}{\alpha} \left[R_0 + 3 \frac{D^2}{3R_0} \right] \quad (5)$$

梯形截面:

$$\bar{V} = 2\alpha R_0 h' (2D' - b) \quad R_e = \frac{\sin \alpha}{\alpha} \left[R_0 + \frac{D'^2 - D'b + \frac{b^2}{2}}{3R_0} \right] \quad (6)$$

其中: $\alpha = \frac{1}{2R_0}$ (7)

单位体积矩: $\bar{U} = \bar{V} R_e$ (8)

式中: D —— 矩形截面长边的 1/2;

h —— 矩形截面的高;

D' —— 梯形截面上底的 1/2;

h' —— 梯形截面的高;

R_0 —— 主梁的曲率半径;

b —— 梯形截面上底和下底长度差值的 1/2。

此处只列出曲线半径 68 m 曲线箱梁截面各区段对应数据的计算过程,曲线半径 140 m、300 m 计算过程与之相同,下文不再赘述,其计算结果如表 3 所示。

表 3 曲线半径 68 m 曲线箱梁截面各区段计算数据

区段编号	截面形式	R_0 /m	D /m	H /m	B /m	α	\bar{V}	R_e	\bar{U}
1	矩形	68	4.87	0.2		0.007 35	1.948	68.116	132.690
2	梯形	68	4.87	0.2	2	0.007 35	1.548	68.078	105.385
3	矩形	68	2.87	1.2		0.007 35	6.888	68.040	468.662
4	矩形	69.285	0.485	0.95		0.007 21	0.921 5	69.286	63.847
5	矩形	66.715	0.485	0.95		0.007 49	0.921 5	66.716	61.479
合计							8.541		581.411

(3) 计算截面重心到曲率重心距离 R_e 及截面偏心距:

$$R_e = \frac{\sum \bar{V}_i R_{ei}}{\sum \bar{V}_i} \quad (9)$$

$$e = R_e - R_0 \quad (10)$$

(4) 计算曲线桥梁在自重作用下产生的横向均布扭矩:

$$M_x = \gamma e \sum \bar{V}_i \quad (11)$$

式中: γ —— 混凝土容重,取 26 kN/m³。

根据上述步骤计算得到的不同曲线半径下弯桥自重产生的横向均布扭矩,分别为 $M_{x(68)} = 15.593$ kN/m³, $M_{x(140)} = 7.573$ kN/m³, $M_{x(300)} = 3.534$ kN/m³。在模型中以梁单元荷载的形式添加上述均布扭矩的值,依据新版规范的抗倾覆稳定性计算方法,采用有限元分析得到的结果如图 6 所示。

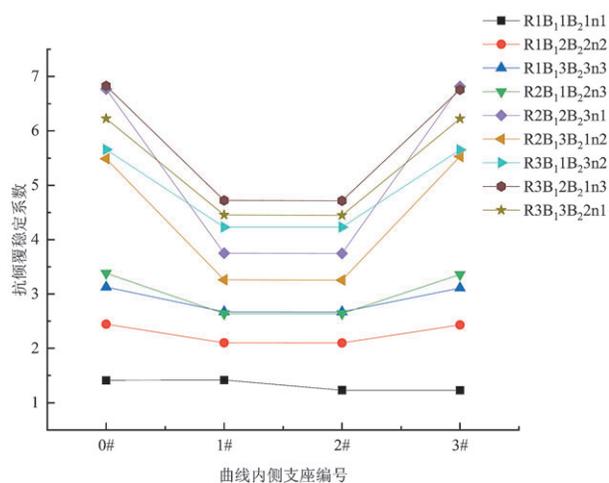


图 6 各组方案的抗倾覆稳定性分析结果

取各组方案抗倾覆稳定系数的最小值,并根据 1.2 节所述的步骤进行灰色关联分析,正交实验方案及有限元分析结果见表 4 所示。

表 4 正交实验方案及有限元分析结果

组号	曲线半径 (m)	桥台支座间距 (m)	中墩支座间距 (m)	边中跨长度比值	抗倾覆稳定系数
R1B ₁ 1B ₂ 1n1	68	3	1	0.5	1.229
R1B ₁ 2B ₂ 2n2	68	4.5	1.25	0.65	2.099
R1B ₁ 3B ₂ 3n3	68	5	1.5	1	2.670
R2B ₁ 1B ₂ 2n3	140	3	1.25	1	2.639 1
R2B ₁ 2B ₂ 3n1	140	4.5	1.5	0.5	3.746
R2B ₁ 3B ₂ 1n2	140	5	1	0.65	3.256
R3B ₁ 1B ₂ 3n2	300	3	1.5	0.65	4.230
R3B ₁ 2B ₂ 1n3	300	4.5	1	1	4.714
R3B ₁ 3B ₂ 2n1	300	5	1.25	0.5	4.447

将抗倾覆稳定系数作为参考序列 $X_0 = \{1.229, 2.099, 2.670, 2.639, 3.746, 3.256, 4.230, 4.714, 4.447\}$, 曲线半径 R、桥台双支座间距 B₁、中墩双支座间距 B₂、边中跨长度比值 n 等四类影响因素分别作为比较序列 $X_1 = \{68, 68, 68, 140, 140, 140, 300, 300, 300\}$; $X_2 = \{3, 4.5, 5, 3, 4.5, 5, 3, 4.5, 5\}$; $X_3 = \{1, 1.25, 1.5, 1.25, 1.5, 1, 1.5, 1, 1.25\}$; $X_4 = \{0.5, 0.65, 1, 1, 0.5, 0.65, 0.65, 1, 0.5\}$ 。对上述原始数据利用区间值化的方法进行无量纲化处理,处理的结果如表 5 所示。

表 5 原始数据无量纲后的数据表

组号	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅
R1B ₁ 1B ₂ 1n1	0	0	0	0	0
R1B ₁ 2B ₂ 2n2	0	0.75	0.5	0.3	0.250
R1B ₁ 3B ₂ 3n3	0	1	1	1	0.413
R2B ₁ 1B ₂ 2n3	0.310 3	0	0.5	1	0.404
R2B ₁ 2B ₂ 3n1	0.310 3	0.75	1	0	0.722
R2B ₁ 3B ₂ 1n2	0.310 3	1	0	0.3	0.581
R3B ₁ 1B ₂ 3n2	1	0	1	0.3	0.861
R3B ₁ 2B ₂ 1n3	1	0.75	0	1	1
R3B ₁ 3B ₂ 2n1	1	1	0.5	0	0.923

根据上述结果,进一步计算数据处理后的影响因素序列 Y_i 与抗倾覆稳定系数序列 Y₀ 对应元素(指标)之差的序列差绝对值。公式如下:

$$\Delta_i = |y_0(k) - y_i(k)| \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (12)$$

计算结果见表 6 所示。从表中可知,二级最大差 $\max_i \max_k \Delta_i(k)=1$, 二级最小差 $\min_i \min_k \Delta_i(k)=0$ 。

表 6 各参数序列与标准序列的序列差绝对值

组号	曲线半径	桥台支座间距	中墩支座间距	边中跨长度比值
R1B ₁ 1B ₂ 1n1	0	0	0	0
R1B ₁ 2B ₂ 2n2	0.250	0.500	0.250	0.050
R1B ₁ 3B ₂ 3n3	0.413	0.587	0.587	0.587
R2B ₁ 1B ₂ 2n3	0.094	0.404	0.096	0.596
R2B ₁ 2B ₂ 3n1	0.412	0.028	0.278	0.722
R2B ₁ 3B ₂ 1n2	0.271	0.419	0.581	0.281
R3B ₁ 1B ₂ 3n2	0.139	0.861	0.139	0.561
R3B ₁ 2B ₂ 1n3	0	0.250	1	0
R3B ₁ 3B ₂ 2n1	0.077	0.077	0.423	0.923

将上述表格中的数据代入公式(2),即可得到比较序列和参考序列在各个指标处的相对关联系数 $\gamma_{0i}(k)$,结果见表 7 所示。

表 7 参数数据与标准数据之间的相对关联系数 $\gamma_{0i}(k)$

组号	曲线半径	桥台支座间距	中墩支座间距	边中跨长度比值
R1B ₁ 1B ₂ 1n1	1	1	1	1
R1B ₁ 2B ₂ 2n2	0.667	0.5	0.666	0.909
R1B ₁ 3B ₂ 3n3	0.547	0.46	0.46	0.46
R2B ₁ 1B ₂ 2n3	0.842	0.553	0.84	0.456
R2B ₁ 2B ₂ 3n1	0.548	0.947	0.643	0.409
R2B ₁ 3B ₂ 1n2	0.648	0.544	0.462	0.64
R3B ₁ 1B ₂ 3n2	0.783	0.367	0.783	0.471
R3B ₁ 2B ₂ 1n3	1	0.667	0.333	1
R3B ₁ 3B ₂ 2n1	0.867	0.867	0.541	0.351

最后根据公式(3),计算比较序列与参考序列的灰色关联度,其结果如下图所示。

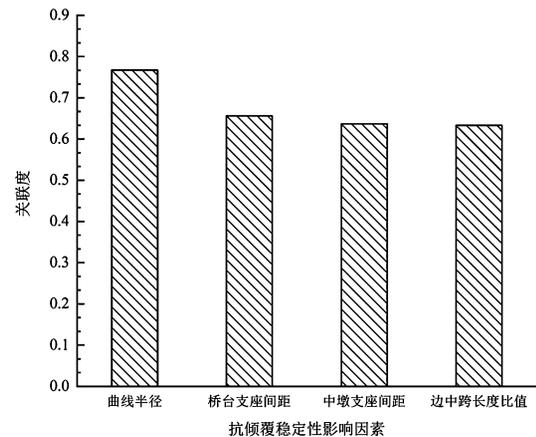


图 7 曲线连续梁桥抗倾覆稳定性与不同参数之间关联度

显然,关联度的值越大,表明该影响因素对于独柱墩曲线梁桥抗倾覆稳定性的影响越敏感。从图7中可知,曲线半径与桥梁抗倾覆稳定性的关联度为0.77,说明曲线半径是影响结构抗倾覆性能的最敏感因素;桥台支座间距的关联度为0.66,其敏感性次之;中墩支座间距和边中跨长度比值的关联度分别为0.64和0.63,这两个因素对于桥梁抗倾覆性能的影响小于曲线半径和桥台支座间距,位于后两位。综上所述,各因素与抗倾覆稳定性敏感性排序为:曲线半径>桥台双支座间距>中墩双支座间距>边中跨长度比值。

进一步研究高度相关因素即曲线半径和桥台支座间距共同作用下对桥梁抗倾覆性能的影响规律,选取上述九组方案中抗倾覆稳定性较差但平面布置较合理的第二组模型为算例进行分析,在仅改变边支座横向间距的情况下探究不同曲线半径下桥梁的抗倾覆稳定性,其结果如图8所示。

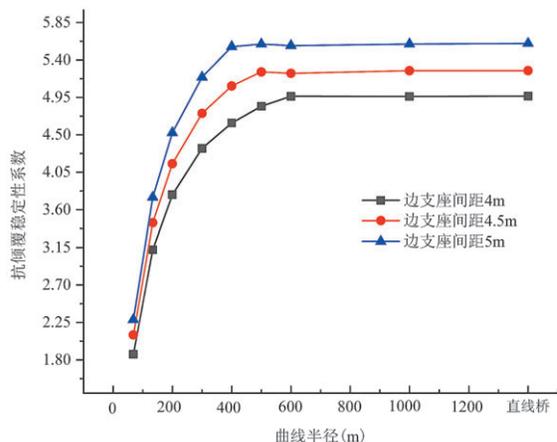


图8 曲线半径与边支座间距变化对桥梁抗倾覆稳定性的影响

由图8可知,随着曲线半径的增大,在一定的曲线半径范围内,抗倾覆稳定系数显著增大,呈现明显的非线性特征。但是当曲线半径增大到一定数值,该影响效应减弱,其数值逐渐趋于直线桥梁。显然,曲线半径对曲线桥梁抗倾覆稳定性的影响存在一个极限值,半径小于该值时,桥梁抗倾覆稳定性随着曲线半径的增大呈现显著的增长趋势。到达一定的数值后,抗倾覆稳定系数逐渐趋于一个固定值。因此,在曲线桥梁抗倾覆性能设计中要注意极限半径的存在,曲线半径大小超过一定的值后,对桥梁抗倾覆稳定性的增益也不再显著。

提高桥台支座间距对桥梁抗倾覆稳定性也具有显著的正向作用。在图中进行纵向对比可以看出,桥梁抗倾覆稳定性与支座间距呈现明显的线性关系,随着支座间距的增大,桥梁的抗倾覆性能得到提升。另一方面,虽然曲线半径是影响桥梁抗倾覆稳定性的首要因素,但一般情况下桥梁在设计之初就会受到线形的约束,而提高支座间距显然成本就会低很多,同时支座间距对于桥梁抗倾覆稳定性收益也有较大帮助。因此,对于既有桥梁,通过调整支座间距提高其抗倾覆稳定性更具有较高的经济适用性。

3 结论

本文采用正交实验的方法对影响桥梁抗倾覆稳定性的四类典型参数进行了方案设计,并建立有限元模型分析各组方案的抗倾覆稳定性。进一步对有限元分析结果进行灰色关联分析,并研究了高度相关因素对抗倾覆稳定性的影响。得到以下结论:

(1) 曲线半径是影响曲线桥梁抗倾覆稳定性的主要敏感因素,桥台支座间距、中墩支座间距的敏感性次之,边中跨长度比值的敏感性最小。

(2) 曲线半径对曲线桥梁抗倾覆稳定性的影响存在一个极限值,在极限半径范围内,桥梁的抗倾覆系数随着曲线半径的增加呈现明显的非线性增长。超过这个极限值后,增加曲线半径对提高桥梁抗倾覆性能的收益不再显著,其抗倾覆系数逐渐趋于一个固定值。

(3) 提高桥台支座间距对曲线桥梁抗倾覆稳定性的提升具有显著的正向作用,两者呈现明显的线形关系。通过调整支座间距来提高桥梁抗倾覆稳定性的方式更加经济和简便,建议实际工程中优先采用。

参考文献:

- [1] 韩亮,樊健生. 近年国内桥梁垮塌事故分析及思考 [J]. 公路,2013,58(3):124-127.
- [2] 姜爱国,杨志. 独柱墩曲线梁桥倾覆轴线研究 [J]. 世界桥梁,2013,41(4):58-61.
- [3] 张健,肖文杰. 独柱墩桥梁抗倾覆稳定性分析 [J]. 公路工程,2013,38(4):170-173.

- [18] Paknahad M, Shariati M, Sedghi Y, et al. Shear capacity equation for channel shear connectors in steel-concrete composite beams[J]. *Steel and Composite Structures*, 2018, 28(4): 483-494.
- [19] Zhao Q, Du Y, Peng Y F, et al. Shear performance of short channel connectors in a steel-UHPC composite deck[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2020, 20(1): 300-310.
- [20] 林宗凡. 钢-混凝土组合结构[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.
- [21] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [22] Russell M J, Clifton G C, Lim J B P. Vertical and horizontal push tests on specimens with a Trefoil decking profile[J]. *Structures*, 2021, 29: 1096-1110.
- [23] Maleki S, Bagheri S. Behavior of channel shear connectors, Part II: analytical study[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(12): 1341-1348.
- [24] 徐世焱, 蔡向荣, 张英华. 超高韧性水泥基复合材料单轴受压应力-应变全曲线试验测定与分析[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(11): 79-85.
- [25] 彭云帆. 钢-UHPC组合桥面板连接件抗前性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2017.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [27] 伍鹤皋, 于金弘, 石长征, 等. 基于正交试验法的埋地钢管参数敏感性分析[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(8): 97-103.

(上接第7页)

- [4] 相宏伟. 支座预偏心对独柱墩弯桥抗倾覆性能的影响分析[J]. *交通世界(运输车辆)*, 2015(4): 41-43.
- [5] 彭卫兵, 朱志翔, 陈光军, 等. 梁桥倾覆机理、破坏模式与计算方法研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(12): 104-113.
- [6] 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.
- [7] 刘思峰, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [8] 苏宁. 独柱墩连续梁桥抗倾覆非线性分析[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [9] 曾桑平. 独柱墩箱梁桥抗倾覆影响因素分析及加固方法探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [10] 权长青, 焦楚杰, 杨云英, 等. 混杂纤维混凝土力学性能的正交试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(3): 363-370.
- [11] 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(03): 69-74.
- [12] 周子杰, 阮欣, 石雪飞. 梁桥横向稳定验算中倾覆轴的选取[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(5): 907-910.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 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.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [15] 潘凯. 考虑自重扭矩和剪切变形影响的曲线梁桥的受力分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.