

大轴重下线梁偏心对小半径曲线桥承载力影响研究

郑晓光¹, 孙鸿飞², 李航繁², 张家瑞^{2,3}

- (1. 国能朔黄铁路发展有限责任公司原平分公司, 忻州 034000;
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043;
3. 中国铁路北京局集团有限公司天津工务段, 天津 300011)

摘要: 为研究线梁偏心对小半径曲线桥梁承载能力的影响, 以某小半径曲线桥梁(专桥-2059)为研究对象, 采用理论模型与数值仿真的方法, 开展不同工况下线梁偏心对曲线桥梁正截面抗弯及斜截面抗剪承载能力影响分析, 并反推出各工况下的临界线梁偏心值。结果表明: 相较于原设计状况, 现状偏心值(向内偏心330 mm)对曲线桥梁抗弯、抗剪承载能力均有不利影响, 其中, 桥梁抗弯、抗剪承载能力最大降幅分别为17.54%、17.04%; 在最不利工况下, 现状使用阶段的曲线桥梁剪力检定承载系数为0.969, 低于现行规范1.00的限值要求; 在不同超高情况下, 内主梁弯矩、剪力检定承载系数随列车速度提升呈正相关性, 而当列车运行速度恒定时, 其均随线路超高值的增大而呈现负相关特性; 曲线桥梁临界偏心值受其抗剪承载能力控制, 其中最小临界线梁偏心值为向内314 mm。研究揭示了线梁偏心影响规律及临界值, 为该类桥梁设计优化与运营维护提供关键参数支撑, 对工程实践具有重要参考价值。

关键词: 重载铁路; 小半径曲线; 铁路桥梁; 线梁偏心; 承载能力; 临界偏心值

中图分类号: U239.4; U448.35 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2026)05-0139-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.021

Influence of Underline Girder Eccentricity on Bearing Capacity of Small Radius Curved Bridge

ZHENG Xiaoguang¹, SUN Hongfei², LI Hangfan², Zhang Jiarui^{2,3}

- (1. Yuanping Branch of Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Xinzhou 034000, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. Tianjin Engineering Section of China Railway Beijing Group Co., Ltd., Tianjin 300011, China)

Abstract: In order to study the effect of line beam eccentricity on the load carrying capacity of small radius curved bridges, a small radius curved bridge (Special Bridge-2059) is taken as the research object, and theoretical modeling and numerical simulation methods are used to carry out the analysis of the effect of line beam eccentricity on the bending and diagonal shear load carrying capacity of curved bridges in normal cross-section under different working conditions, and to invert the critical line beam eccentricity value under each working condition. The results show that compared with the original design condition, the current eccentricity value (inward eccentricity of 330 mm) has an unfavorable effect on the flexural and shear load capacity of curved bridges, in which the maximum reduction of the flexural and shear load capacity of bridges is 17.54% and 17.04%,

项目来源: 河北省重点研发计划(20375410D)。

作者简介: 郑晓光(1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 重载铁路运营维修。

收稿日期: 2025-04-19

道桥技术

respectively; in the most unfavorable condition, the shear check load factor of curved bridges in the current use stage is 0.969, which is lower than the limit value of 1.00 of the current specification; in the most unfavorable condition, the check load factor of curved bridges in the current use stage is 0.969, which is lower than the limit value of 1.00 of the current specification. Under the most unfavorable working condition, the shear capacity of the curved bridge is 0.969, which is lower than the limit value of 1.00; under different super-high conditions, the bending moment of the inner main girder and the shear capacity checking coefficient are positively correlated with the increase of the train speed, and when the train speed is constant, they are negatively correlated with the increase of the super-high value of the line; the critical eccentricity of curved bridges is controlled by the shear load bearing capacity, and the smallest critical line girder eccentricity value is 314 mm inward.

Key words: heavy haul railway; sharp radius curve; railroad bridge; line beam eccentricity; bearing capacity; critical eccentricity value

0 引言

近年来,随着重载铁路运量攀升和轴重等级跃升,其桥梁结构长期承受高频次、强冲击的复合荷载作用,服役性能面临严峻考验^[1-2]。其中依据“以直代曲”设计理念的曲线桥梁由于超高与运营速度不匹配、轨道几何尺寸动态演变以及轨道温度内力等多因素耦合作用^[3-4],使得部分曲线桥梁产生现偏心值超限现象,其显著削弱桥梁剩余承载寿命并威胁行车安全。

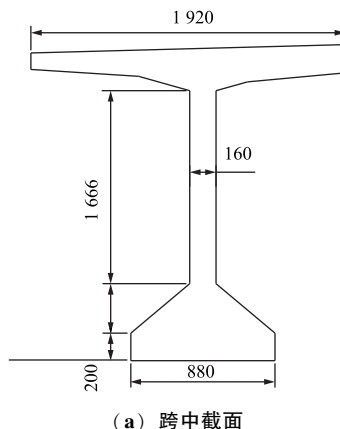
国内外研究团队围绕线梁偏心影响及整治加固技术等关键问题做了大量研究。Fabianowski 等^[5]结合程度分析模糊层次分析法(EA FAHP)和主导层次分析法(DAHP),提出了一种新型聚合计算算法,并实际用于波兰铁路桥梁超限的维修决策管理;李军等^[6]提出了曲线桥梁偏心全寿命周期数据管理、曲线桥梁偏心状态分析评定及偏心超限整治方案自动计算的曲线桥梁偏心超限整治模型;曾继鑫^[7]基于车桥耦合动力学模型与实测,揭示线路偏心显著加剧轮轨横向力及车辆脱轨风险,提出安全速度阈值;王利军^[8]基于线梁偏心整治工程,验证了机械拨道技术,并建立奇异谱预测模型精准捕捉偏心演化趋势;李泽宇^[9]结合静动力试验与有限元仿真,发现线梁偏心导致小半径T梁内外梁动力响应非对称分化;蔺鹏臻等^[10]揭示了线路偏心引发轮轨系统非线性扰动效应,提出了以轮轨横向力阈值作为轨道稳定性控制核心指标;崔健^[11]、杨育林等^[12]、杨旭东^[13]针对铁路桥梁偏心超限问题,通过参数化模型与动态耦合调整机制,实现线桥精准复位,验证了大型养路机械线路拨移技术的工程适用性;文颖等^[14]基于轨道-桥梁耦合模型解析了轨下扣件刚度与道床厚度的敏感性特征,支撑抗偏载设计;李添

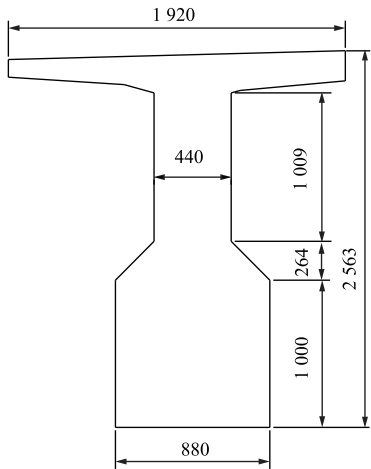
悦等^[15]研发非接触式光学检测装置,通过图像解算与畸曲线桥梁最大偏心值。

既有成果多集中于线梁偏心现象的形成机理、工程整治措施及运维管理领域,针对线梁偏心对重载铁路小半径曲线桥梁的承载性能的影响研究尚存提升空间。为此,综合理论分析与数值模拟技术,系统探讨线梁偏心对该类桥梁结构承载能力的影响机制,重点揭示线梁偏心距、超高参数及行车速度与检定承载系数之间的动态关联性,最终建立运营条件下小半径曲线桥梁的临界偏心阈值。

1 研究对象

某重载铁路小半径曲线大桥为28孔32 m预应力混凝土简支T梁组成,图号为专桥-2059,线路曲线半径R为400 m。梁体混凝土强度等级为C48,普通钢筋采用A₃钢和T20MnSi钢,单孔T梁共布置23束24φ5 mm钢丝束,采用后张法张拉预应力,两端张拉控制应力为1 160.6 MPa。桥梁跨中截面和端部截面如图1所示,每片梁自重112 t;依据设计图纸和对道砟厚度、钢轨、轨枕、人行道支架等参数现场实测,得到二期恒载为54.5 kN/m。





(b) 端部截面

图 1 T 梁横截面示意图 单位: mm

Fig. 1 T beam cross section diagram

针对上述重载铁路小半径曲线大桥（曲线半径 $R=400\text{ m}$ ）进行线梁偏心值实测。桥梁最大向内侧偏心值达 330 mm ，远超 TG/GW 103—2018《普速铁路桥隧建筑物修理规则》规定的 70 mm 限值，其中进桥处第 1 孔桥梁超限最为严重，故针对第 1 孔桥梁内主梁进行研究分析。

2 曲线折减系数

在曲线桥梁几何偏心效应作用下，线路中线和桥梁中线的偏移会诱发主梁非对称受载，致使桥梁截面弯矩与剪力相较直线梁结构呈现差异。工程中将这种增大或减小桥梁截面弯矩和剪力的影响定义为曲线折减系数 $1/\eta$ 。其中，曲线折减系数由线路曲线半径、超高以及列车运行速度等参数共同决定^[16]。曲线桥梁内主梁的 η 按铁运函 [2004] 120 号《铁路桥梁检定规范》S. 0. 2 条计算，曲线折减系数计算图如图 2 所示。

钢轨高度 t_1 为 150 mm ，计算轨距为 $1\,500\text{ mm}$ ，轨底至梁顶的距离 t_2 为 450 mm ，轨顶至列车中心的距离为 $2\,000\text{ mm}$ ，线路超高 h 分别取 80 、 90 和 100 mm 。

通过计算得到车速 $30\sim 65\text{ km/h}$ 和超高为 80 、 90 、 100 mm 时，原设计和现状（偏心值为 330 mm ）的内主梁弯矩曲线折减系数，结果见表 1。

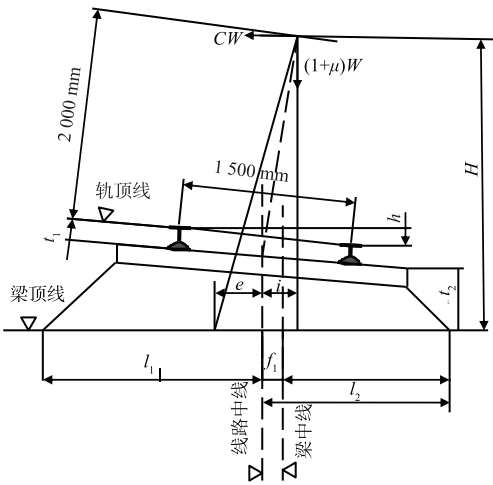


图 2 折减系数计算图示

Fig. 2 Reduction coefficient calculation diagram

表 1 内主梁弯矩曲线折减系数

Table 1 Reduction factor of bending moment curve of inner mainbeam

车速 / (km/h)	h = 80 mm		h = 90 mm		h = 100 mm	
	设计	现状	设计	现状	设计	现状
30	0.96	0.80	0.94	0.79	0.93	0.78
35	0.96	0.80	0.95	0.79	0.93	0.78
40	0.97	0.81	0.95	0.80	0.94	0.79
45	0.98	0.81	0.96	0.80	0.95	0.79
50	0.99	0.82	0.97	0.81	0.96	0.80
55	1.00	0.83	0.98	0.82	0.97	0.80
60	1.01	0.84	0.99	0.82	0.98	0.81
65	1.02	0.84	1.01	0.83	0.99	0.82

内主梁弯矩曲线折减系数与线路超高呈负相关关系。但在超高一定时，弯矩曲线折减系数与列车运行速度呈正相关关系。其中线路超高为 100 mm 且列车速度为 30 km/h 时，弯矩曲线折减系数分别为 0.93 （设计）和 0.78 （现状），表明此时桥梁内主梁抗弯承载能力受曲线桥梁偏载影响较大。

车速 $30\sim 65\text{ km/h}$ 和超高为 $80\sim 100\text{ mm}$ 时，原设计和现状的内主梁剪力曲线折减系数，结果见表 2。

内主梁剪力曲线折减系数与线路超高值呈现显著负相关性，与行车速度则构成正相关趋势。在 100 mm 超高与 30 km/h 车速工况组合下，设计状态与运营状态对应的弯矩折减系数分别为 0.90 和 0.76 ，表明该工况下曲线桥梁偏载对桥梁内主梁抗剪承载能力有显著影响。

道桥技术

表 2 内主梁剪力曲线折减系数
Table 2 Reduction coefficient of shear curve of main girder

车速 / (km/h)	h = 80 mm		h = 90 mm		h = 100 mm	
	设计	现状	设计	现状	设计	现状
30	0.93	0.78	0.91	0.77	0.90	0.76
35	0.93	0.78	0.92	0.77	0.90	0.76
40	0.94	0.79	0.92	0.78	0.91	0.77
45	0.95	0.79	0.93	0.78	0.92	0.77
50	0.96	0.80	0.94	0.79	0.93	0.78
55	0.97	0.81	0.95	0.79	0.94	0.78
60	0.98	0.81	0.96	0.80	0.95	0.79
65	0.99	0.82	0.97	0.81	0.96	0.80

通过上述内主梁弯矩曲线折减系数和剪力折减系数结果的对比,在不同工况下,线路偏心设置对内主梁梁端抗剪承载能力的折减影响较为显著。

3 按直线桥梁分析承载能力

检定承载系数 K 计算公式为:

$$K = k/k_0 \tag{1}$$

式中: k 为桥梁构件的容许换算均布活载, kN/m ; k_0 为标准活载的换算均布活载, 计入动力系数, kN/m 。

$$k = \frac{NM}{K'\Omega_k} \times 10^3 - p \frac{\Omega_p}{\Omega_k} \tag{2}$$

$$k = \frac{NQ}{K'\Omega'_k} \times 10^3 - p \frac{\Omega'_p}{\Omega'_k} \tag{3}$$

式中: N 表示一条线路中主梁片数; $M(Q)$ 分别为单片梁的极限弯矩或剪力, $\text{MN} \cdot \text{m}$ 或 MN ; 下角标 p 表示恒载, k 表示活载, Ω_p 和 Ω'_p 分别为桥梁恒载作用下计算截面弯矩和剪力影响线面积, m^2 或 m ; p 为主梁恒载重, kN/m ; K' 为安全系数, 取 1.9。

3.1 正截面极限抗弯分析

依据 TB 10092—2017《铁路桥涵混凝土结构设计规范》,桥梁跨中截面可等效成 T 形截面计算分析,图 3 为等效后的 T 形跨中截面尺寸。

桥梁跨中截面混凝土受压区高度为 392.2 mm,属于第二类 T 形截面。其正截面极限承载弯矩计算公式为:

$$M = f_c \left[bx \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + (b'_f - b) h'_f \left(h_0 - \frac{h'_f}{2} \right) \right] + \sigma'_{pa} A'_p (h_0 - a'_p) + f'_s A'_s (h_0 - a'_s) \tag{4}$$

式中: M 为正截面极限承载弯矩, $\text{MN} \cdot \text{m}$; f_c 为混

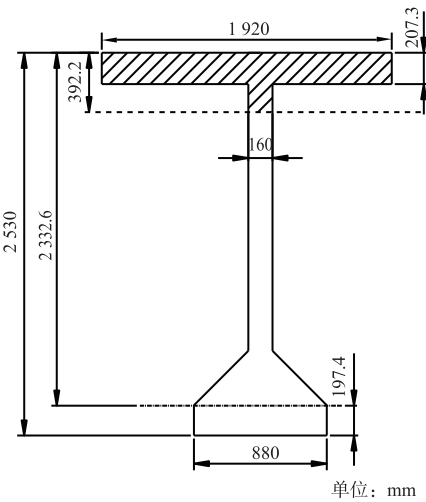


图 3 主梁跨中等效截面

Fig. 3 The equivalent cross-section of the mainbeam mid-span
凝土抗压极限强度, MPa ; b 为腹板厚度, m ; x 为混凝土受压区高度, m ; h_0 为截面有效高度, m ; b'_f 为受压翼缘有效宽度, m ; h'_f 为受压翼缘高度, m ; σ'_{pa} 为受压预应力钢筋应力, MPa ; A'_p 、 A'_s 分别为受压区预应力钢筋和非预应力钢筋截面面积, m^2 ; f'_s 为受压区非预应力钢筋抗压计算强度, MPa ; a'_p 、 a'_s 分别为受压区预应力钢筋和非预应力钢筋中应力的合力作用点与计算截面两侧边最近的距离, m 。

将参数代入式 (4),在忽略受拉和受压区普通钢筋作用的情况下,计算得到主梁跨中截面处 $M_{\text{正}}$ 为 $34.58 \text{ MN} \cdot \text{m}$,再由式 (1) 计算跨中正截面极限弯矩容许换算均布活载 $k_{\text{正}} = 161.2 \text{ kN/m}$,计算中使用的参数见表 3。

依据铁路函〔2004〕120 号《铁路桥梁检定规范》将标准活载换算为均布活载,得到 $k_{0\text{正}} = 117.45 \text{ kN/m}$,最后计算得到桥梁跨中截面极限弯矩检定承载系数 $K_{\text{正}}$ 为 1.37,其中计算使用的动力系数为 1.19^[17]。

表 3 正截面极限弯矩容许换算均布活载参数
Table 3 Positive section ultimate bending moment allowable conversion uniform live load parameters

参数	N	$M_{\text{正}}/(\text{MN} \cdot \text{m})$	K'	$p/(\text{kN/m})$	Ω_k/m^2	Ω_p/m^2
数值	2	34.58	1.9	123.2	128	128

3.2 斜截面极限抗弯分析

依据铁路函〔2004〕120 号《铁路桥梁检定规范》和 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》对桥梁斜截面强度计算分析,计算如图 4 所示,其中斜截面投影长度 c 计算公式为:

道桥技术

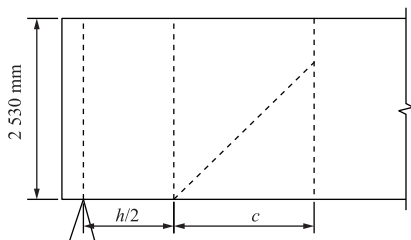


图4 斜截面强度计算图示

Fig. 4 Inclined section strength calculation diagram

$$c = 0.6mh_0 \quad (5)$$

$$m = \frac{K'M_v}{Qh_0} \quad (6)$$

式中: m 为桥梁斜截面顶端正截面处的剪跨比, 当 m 大于 3 时取 m 等于 3, 无量纲; Q 为验算截面的最大剪力设计值, MN; M_v 为验算截面的弯矩设计值, MN·m, 其余参数定义与前述一致

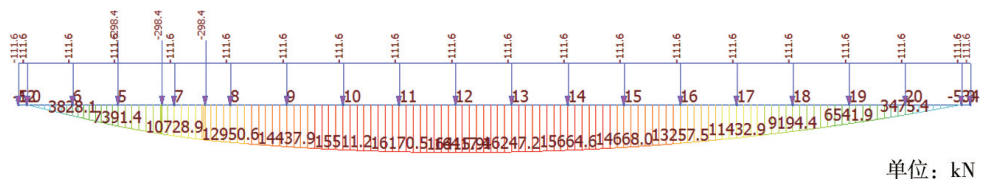
在距支座中心线 $h/2$ 位置处, 计算得到截面有效高度 h_0 为 1 853.2 mm。通过有限元分析得出, 在临界截面位置 (距支座中心线 $h/2+h_0$ 处) 的最大剪力值 $Q = 2.20$ MN (如图 5 所示), 对应弯矩值 $M_v = 7.39$ MN·m (如图 6 所示)。通过式 (4)、(5) 计算剪跨比 $m = 3.43 > 3.0$, 故按规范限值取 m 为 3.0^[18]。最终计算得斜截面水平投影长度 c 为 3 335.7 mm。



单位: kN

图5 最大剪力结果

Fig. 5 Maximum shear force results



单位: kN

图6 对应弯矩结果/(kN·m)

Fig. 6 Corresponding bending moment results

在距支座中心线 $h/2$ 的斜截面位置, 按规范计算得到斜截面极限弯矩 $M_{斜} = 34.99$ MN·m, 换算为均布活载, 换算系数 $k_{斜} = 1 771.4$ kN/m。根据铁运函 [2004] 120 号《铁路桥梁检定规范》Q.0.2 条规定的标准活载组合 (含动力系数 1.19), 计算得到斜截面极限弯矩检定承载系数 $K_{斜}$ 为 13.07。

3.3 斜截面极限抗剪分析

预应力混凝土桥梁斜截面极限承载剪力可按式 (7) - (11) 进行分析。

$$Q_{剪} = Q_{cv} + Q_b \quad (7)$$

$$Q_{cv} = bh_0 \sqrt{1.32(2+p)} f_{ct}^{3/4} \mu_v f_s \quad (8)$$

$$Q_b = 0.9 f_p \sum A_{pb} \sin \alpha \quad (9)$$

$$p = 100\mu = 100 \times \frac{A_p + A_{pb} + A_s}{bh_0} \leq 3.5 \quad (10)$$

$$\mu_v = \frac{A_v}{s_v b} \quad (11)$$

式中: $Q_{剪}$ 为斜截面顶端对应的正截面竖向剪力极限值, Q_{cv} 为混凝土与箍筋共同承担的竖向剪力, Q_b 为预应力弯起钢筋所承受的竖向剪力, 单位均为 MN; b 为腹板宽度, m; h_0 为混凝土受拉区纵向钢筋合力作用点至受压区边缘的高度, m; μ_v 为受拉区纵向钢筋的配筋率, 按式 (16) 计算, 当 p 大于 3.5 时取 3.5; A_v 计算斜截面内箍筋的总面积, m^2 ; s_v 箍筋的间距, m; f_{ct} 为混凝土抗拉极限强度, MPa。

斜截面极限承载力计算时使用的上述参数取值见表 4。

表4 斜截面极限承载剪力计算参数

Table 4 Oblique section ultimate bearing shear calculation parameters

参数	b /mm	h_0 /mm	$\sum A_{pb} \sin \alpha$ /mm ²	A_v /mm ²	s_v /mm	$(A_{pb} + A_p)$ /mm ²	A_s /mm ²
数值	440	1 853.2	1 012.9	157.1	100	10 838.5	0

得到距支座 $h/2$ 处斜截面极限承载剪力 $Q_{剪} =$

道桥技术

8.3 MN (不考虑纵向钢筋影响)。表 5 为斜截面极限剪力容许换算均布活载计算参数。

表 5 斜截面极限剪力容许换算均布活载参数
Table 5 Oblique section ultimate shear allowable conversion uniform live load parameters

N	$Q_{剪}/(MN)$	K'	$p/(kN/m)$	Ω'_k/m	Ω'_p/m
2	8.3	1.9	123.2	14.8	14.7

计算得 $k_{剪} = 468.9 \text{ kN/m}$, $k_{0剪}$ 为 135.15 kN/m (动力系数为 1.19)。最终得斜截面极限剪力检定承载系数 $K_{剪}$ 为 3.47。

3.4 使用阶段抗剪分析

预应力混凝土桥梁进行使用阶段抗剪分析时,其容许换算均布荷载按下式计算。使用阶段剪力容许换算均布活载计算参数见表 6。

$$k = \frac{N \left(1.06 \sqrt[3]{f_{ct}} z b + Q_p \frac{z}{z_k} \right) \times 10^3}{\Omega'_k} - \frac{p_1 z \Omega'_p}{z_k \Omega'_k} - p_2 \frac{\Omega'_p}{\Omega'_k} \quad (12)$$

式中: z 为计算截面换算惯性矩与换算截面重心轴以上面积对重心轴的面积矩, m ; z_k 为净截面的相应比值, m ; Q_p 为由于预加应力发生在一片梁的截面剪力, MN ; p_1 , p_2 分别为单线桥梁自重、桥梁恒载, kN/m ; 其余参数含义同上。

表 6 使用阶段剪力容许换算均布活载参数
Table 6 Shear force allowable conversion uniform live load parameters in use stage

N	$Q_p/(MN)$	z/m	z_k/m	$p_1/(kN/m)$	$p_2/(kN/m)$	Ω'_k/m	Ω'_p/m
2	1.3	1.85	1.87	68.7	54.5	14.76	14.74

通过计算可得距支座 $h/2$ 处 $k_{使} = 173.1 \text{ kN/m}$, $k_{0使}$ 为 135.15 kN/m (动力系数为 1.19), 使用阶段剪力检定承载系数 $K_{使}$ 最终确定为 1.28。

4 线梁偏心影响分析

斜截面极限弯矩检定承载系数 (13.07) 与极限剪力检定承载系数 (3.47) 均显著高于基准值 1.0。依据铁运函 [2004] 120 号《铁路桥梁检定规范》第 Q.0.5 条规定, 选取全桥关键控制指标—跨中极限弯矩检定承载系数 (1.38) 及使用阶段剪力检定承载系数 (1.28) 作为线梁偏心效应分析的基准参数组合^[18]。

4.1 线梁偏心对桥梁抗弯影响分析

基于第 3 小节计算得到的正截面极限弯矩检定承

载系数 K (按直线桥梁分析), 引入弯矩曲线折减系数进行修正。针对运营列车速度 30~65 km/h (间隔 5 km/h 共 8 个工况), 线路超高 80、90、100 mm 三种参数组合, 分别计算曲线桥梁在设计状态与现状评估下的修正承载系数 $K'_{正}$, 如图 7 所示。

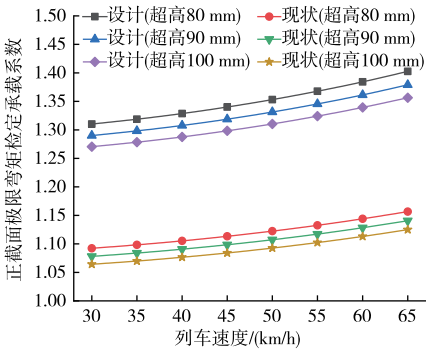


图 7 曲线桥梁正截面极限弯矩检定承载系数
Fig. 7 Check load factor for ultimate bending moment in positive section of curved bridges

由于线梁偏心超限, 超高为 80、90 及 100 mm 时, 原设计的内主梁正截面极限弯矩检定承载系数均大于现状数值; 相较于原设计, 现状内主梁正截面极限弯矩检定承载系数最大降幅分别为 17.54%、17.29%及 17.06%。由此可见, 线梁偏心超限对桥梁正截面抗弯承载能力影响明显。

当线路超高为 80、90 及 100 mm 时, 内主梁正截面极限弯矩检定承载系数均与列车速度呈正相关。其现状条件下的最小值与最大值均满足规范要求 (大于 1.0)。

在不同超高条件下, 数据表明内主梁正截面极限弯矩的检定承载系数会随着列车速度的提升而逐渐增大, 与此同时, 当列车速度保持不变时, 该系数则会随着线路超高的增加呈现出下降趋势。

4.2 线梁偏心对桥梁抗剪影响分析

与 4.1 小节正截面极限弯矩检定承载系数计算分析过程相同, 曲线桥梁不同参数工况下的设计及现状使用阶段剪力检定承载系数 $K'_{使}$ 如图 8 所示。

由于线梁偏心超限, 当超高为 80、90 和 100 mm 时, 原设计的内主梁使用阶段剪力检定承载系数均大于现状的数值。与原设计相比, 现状情况下, 内主梁使用阶段剪力检定承载系数最大降幅分别为 17.04%、16.79%及 16.56%。由此可见, 线梁偏心超限对桥梁梁端的抗剪承载能力影响显著。

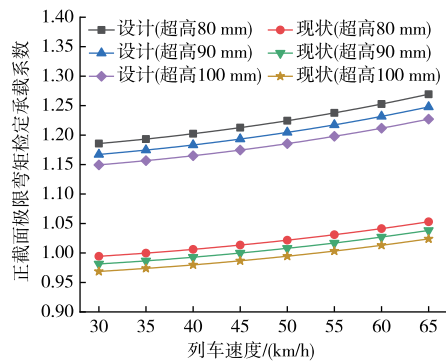


图 8 曲线桥梁使用阶段剪力检定承载系数
Fig. 8 Shear check load factors for curved bridges in service phase

在现状条件下，当列车速度为 30 km/h，超高为 80 mm 时，内主梁使用阶段剪力检定承载系数为 0.994；当列车速度为 30~40 km/h，超高为 90 mm 时，内主梁使用阶段剪力检定承载系数分别为 0.981、0.987 及 0.993；在超高 100 mm 工况下，列车速度从 30 km/h 逐渐提高到 50 km/h 的过程中，内主梁的剪力承载系数分别为 0.969、0.974、0.980、0.987 和 0.995，这些数值均低于规范要求的 1.0 限值。数据说明，当线梁偏心距超过标准时，会明显降低内主梁的抗剪承载力，使结构处于安全临界状态。这种情况对铁路运营安全造成了实际威胁，需要引起高度重视。

此外，当线路超高为 80、90 及 100 mm 时，内主梁使用阶段剪力检定承载系数同样与列车速度呈正相关关系。在现状条件下，其最小值（列车速度为 30 km/h）分别为 0.994、0.981 及 0.969；最大值（列车速度为 65 km/h）分别为 1.053、1.038 及 1.024， $K'_{使}$ 分别提升了 5.89%、5.80% 及 5.71%。

基于图 8 的分布规律及数据对比分析结果表明，在不同超高情况下，内主梁使用阶段剪力检定承载系数和列车速度之间呈现正相关特性；当列车速度恒定时，该系数与线路超高参数值呈负相关关系。

5 临界偏心值分析

通过上述对线梁偏心对曲线桥梁抗弯及抗剪影响分析可知，偏心值大小会显著影响内主梁的正截面极限弯矩承载系数和使用阶段的剪力承载系数。故以内主梁正截面极限弯矩检定承载系数或使用阶段剪力检定承载系数等于 1 作为临界限值，求解曲线

桥梁的临界偏心值。

5.1 抗弯临界偏心值分析

针对 32 m 预应力混凝土简支 T 梁，将其内主梁正截面极限弯矩检定承载系数假定为 1，反推出各工况下曲线桥梁临界偏心值（以抗弯分析），见表 7。

表 7 临界偏心值分析结果（抗弯）
Table 7 Analysis results of critical eccentricity (bending resistance)

车速/ (km/h)	$K'_{正}$	$h=80\text{ mm}$	$h=90\text{ mm}$	$h=100\text{ mm}$
		偏心值/mm		
30	1	-517	-490	-463
35	1	-528	-501	-474
40	1	-540	-514	-487
45	1	-555	-528	-502
50	1	-571	-545	-518
55	1	-588	-563	-536
60	1	-608	-582	-556
65	1	-628	-603	-577

注：偏心值为负值代表向内偏心。

轨道线路超高与列车运行速度对内侧临界偏心值（抗弯性能）的影响呈现相反趋势，具体而言，随着线路超高的增加，内侧临界偏心值逐渐降低。与上述内主梁抗弯、抗剪承载能力分析中的各参数影响规律相同，再次证明了各参数影响规律的正确性。其中，在列车以 65 km/h 速度运行且线路超高设定为 80 mm 的条件下，抗弯临界偏心值为-628 mm；当列车速度降至 30 km/h 且线路超高增加至 100 mm 时，对应的抗弯临界偏心值为-463 mm。与前者工况相比，临界限值降幅约为 26.27%。由此可知，曲线桥梁的临界偏心值受到线路超高及列车运行速度的影响。

5.1 抗剪临界偏心值分析

采用了一个基本假设：将内主梁在使用阶段的剪力检定承载系数设为 1；基于这个假设条件，通过逆向推导的方法，能够计算出不同工况下曲线桥梁的临界偏心距数值（以抗剪分析），见表 8。

表 8 临界偏心值分析结果（抗剪）
Table 8 Critical eccentricity analysis results (shear)

车速/ (km/h)	$K'_{使}$	$h=80\text{ mm}$	$h=90\text{ mm}$	$h=100\text{ mm}$
		偏心值/mm		
30	1	-367	-341	-314
35	1	-379	-352	-325
40	1	-391	-364	-338
45	1	-406	-379	-352
50	1	-422	-395	-368
55	1	-440	-413	-386
60	1	-459	-432	-406
65	1	-480	-454	-427

注：偏心值为负值代表向内偏心。

道桥技术

向内临界偏心值(抗剪)同样随着线路超高增大而减小,随着列车速度增大而增大。在列车以65 km/h速度运行且线路设置80 mm超高的条件下,抗剪临界偏心值为-480 mm;当列车速度降低至30 km/h且线路超高提升至100 mm时,对应的抗剪临界偏心值为-314 mm。与前者工况相比,曲线桥梁临界偏心值降幅约为34.58%。

将桥梁抗弯、抗剪分析得到临界偏心值相比较可以得到,在相同工况下,临界偏心值(抗剪)均小于临界偏心值(抗弯),这说明曲线桥梁临界偏心值以抗剪分析得到临界偏心值控制。

通过计算分析临界偏心理论值与实际测量偏心值的相对偏差,可以判断是否应该进行桥梁养护维修及偏心超限整治。

6 结论

针对线梁偏心对某重载铁路小半径曲线桥梁承载能力影响问题,通过理论计算与数值模拟相结合的方式,系统分析了线梁偏心对曲线桥梁正截面抗弯性能及斜截面抗剪承载力的影响,得出以下主要结论:

(1)在不同工况下,线路偏心对于内主梁梁端的抗剪承载能力的影响均大于其对内主梁跨中抗弯承载能力的影响。

(2)通过对原设计、现状两种情况进行曲线桥梁检定承载系数理论分析,得到原设计及现状情况下,曲线桥梁内主梁最小正截面极限弯矩检定承载系数分别为1.271和1.064;内主梁最小使用阶段剪力检定承载系数分别为1.149和0.969;与原设计相比,桥梁(现状)抗弯、抗剪承载能力最大降幅为17.54%、17.04%。

(3)在现状条件下,当线路超高为80、90及100 mm时,内主梁最小使用阶段剪力检定承载系数分别为0.994、0.981及0.969,均小于规范规定的要求值(1.0),即在现状(向内偏心330 mm)情况下,内主梁抗剪安全储备不足。

(4)在不同超高情况下,内主梁正截面极限弯矩、使用阶段剪力检定承载系数均与列车速度呈正相关关系;当列车速度恒定时,均与线路超高呈负相关特性。

(5)通过对各工况条件下,曲线桥梁抗弯、抗

剪分析得到的临界偏心值进行对比分析,得出曲线桥梁临界偏心值受其抗剪承载能力控制,其中在最不利工况下,曲线桥梁临界偏心值为314 mm(向内偏心)。

参 考 文 献

- [1] 张一鸣,王飞球,金顺利,等.铁路简支梁桥动力响应数值分析与实试验验证[J].建筑科学与工程学报,2019,36(4):87-93.
- [2] 王煜轩,刘朝阳,王志丰,等.重载铁路小半径曲线钢轨波磨对轨道动态响应影响[J/OL].铁道标准设计,2026,70(3):55-61.
- [3] 王凤,袁磊,王新让,等.朔黄铁路小半径曲线桥梁大偏心评估与整治技术[J].铁道建筑,2022,62(8):98-102.
- [4] TB 10082—2017 铁路轨道设计规范[S].
- [5] Fabianowski D, Jakiel P. An expert fuzzy system for management of railroad bridges in use[J]. Automation in Construction, 2019, 106(4):34-42.
- [6] 李军,秦宪国,安茹,等.神朔铁路曲线桥梁偏心超限整治模型研究[J].铁道建筑,2017,(6):17-20.
- [7] 曾继鑫.既有铁路曲线桥线路偏心后的车桥振动特性研究[D].兰州:兰州交通大学,2024.
- [8] 王利军.重载铁路400 m小半径曲线桥偏心整治效果及演化趋势预测[J].铁道建筑,2023,63(2):72-76.
- [9] 李泽宇.线梁偏心对重载铁路桥梁静动力性能影响及整治对策研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2022.
- [10] 蔺鹏臻,曾继鑫,薛多辉,等.既有铁路曲线桥线路偏心对列车安全运行的影响分析[J].铁道建筑,2023,63(10):42-48.
- [11] 崔健.阳涉铁路大型养路机械整治桥梁偏心方案研究——以50#弓家沟桥为例[J].城市建设理论研究(电子版),2022(36):121-123.
- [12] 杨育林,张凯峰,何峰.重载铁路特大桥线桥偏心病害整治方法研究[J].测绘通报,2020(增刊1):87-90.
- [13] 杨旭东.京九线下行茨园特大桥线梁偏心整治探讨[J].上海铁道科技,2016(4):119-120.
- [14] 文颖,欧阳曾辉,吉克,等.移动列车荷载下桥上有砟轨道偏心研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(10):2552-2560.
- [15] 李添悦,程子默,陈子乾,等.一种铁路桥梁线路偏心 and 道砟厚度的测量方法[J].铁道建筑,2018,58(2):134-137.
- [16] 王新让,袁磊,张岩,等.重载铁路桥梁线桥偏心 and 道砟超厚的影响[J].铁道建筑,2022,62(9):56-60.
- [17] 郑晓光.重载铁路T梁后装声屏障适应性分析与改造技术研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2023.
- [18] 何占元.重载铁路线梁偏心对小半径曲线桥梁性能的影响[J].铁道建筑,2023,63(11):74-81.