

# 混凝土弯斜拉桥曲率半径参数的影响分析

单豪良<sup>1</sup>, 陈永高<sup>1</sup>, 孙泽阳<sup>2</sup>

(1. 浙江工业职业技术学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 东南大学 土木工程学院)

**摘要:**曲率半径是混凝土弯斜拉桥的关键设计参数之一,为分析曲率半径对Ⅱ形主梁混凝土弯斜拉桥受力性能的影响,以某座大跨混凝土弯斜拉桥为工程背景,建立空间梁板混合有限元模型。由室内1:20全桥缩尺模型试验,通过测试索力和支反力间接获得主梁内力状态的方法,验证数值模型的正确性。基于数值模型,通过不同曲率半径的弯斜拉桥、同跨径的直线斜拉桥对比,系统分析曲率半径对弯斜拉桥主梁、桥塔、支座以及结构动力特性的影响。分析结果表明:静力方面,曲率半径对主梁跨中挠度影响很大,对两侧纵肋挠度差的影响不明显;桥塔横向塔偏量大于顺桥向塔偏量;边墩、辅助墩和桥塔不同位置处支座反力分布规律存在显著差别;曲率半径大于950 m,主梁扭矩与弯矩峰值比小于5%,其内力分布趋近于同跨径直线斜拉桥。动力方面,随曲率半径减小,弯斜拉桥横弯振型减弱,纵漂和扭转振型增加,其各阶模态特征与直线斜拉桥明显不同。

**关键词:**桥梁工程;弯斜拉桥;曲率半径;参数分析;静力特性;动力特性

斜拉桥主梁以直线形较为常见,然而由于特殊地形地貌、路线限制或美观需求,弯斜拉桥则更加适宜,但弯斜拉桥曲率使得其受力较常规直线斜拉桥更加复杂。一方面,由曲率导致的主梁弯-扭耦合效应使得主梁弯矩、挠度较等跨径的直线桥梁更大;另一方面,由曲率导致的弯梁扭转使得主梁内外侧受力不均。弯斜拉桥复杂的空间受力特性给设计和施工带来极大的困难。因此,众多国内外学者对这一桥型的结构特征、关键设计参数及计算方法等进行了研究。

Raftoyiannis Ioannis G.等提出了一种适用于平曲线斜拉桥的静动力分析数学模型,并通过数值分析验证了方法的有效性;Nour Eldeen Hesham针对部分曲线斜拉桥施工过程中出现的反扭现象提出了4维分析方法;Wen, Q等针对某曲线斜拉桥人致振动的评估及控制方法进行了研究,利用现场数据对方法进行了证明;Tian Liang等分析了曲率半径对一矮塔弯斜拉桥箱梁的剪力滞后的影响;刘三会以某小半径曲线混凝土箱梁桥为工程背景,分析了不同温度影响下支座布置形式对主梁受力的影响;万晓明研究了主梁抗弯刚度、抗扭刚度等参数对某独塔单索面弯斜拉桥整体受力性能的影响;王钧利等采用有限元法分析了桥跨内力、位移和非线性稳定荷载系数与弯桥圆心角的关系;

肖海珠等详细总结了北京地铁五号线弯斜拉桥的设计、计算、施工安装及主要技术特点;谭康荣等对一座四线弯钢箱梁斜拉桥施工控制技术以及水平横向弯曲效应进行了介绍和分析。

另一方面,伴随斜拉桥跨度增大,结构越发轻柔,其对行车荷载、地震荷载等动荷载更加敏感,结构的动力特性越来越受到广泛关注。Avsar等对一座背跨为曲线梁的斜拉桥进行了概念设计,建立三维有限元模型,分析了该桥在活载和地震作用下的结构行为;Liu Haosu等分析了设计半径和墩梁连接形式对矮塔弯斜拉桥动力特性的影响;Bursi等采用随机子空间识别算法对一座曲线斜拉桥进行了模态参数识别,并考虑主梁气动稳定和颤振系数对模型进行了修正;Bassoli等基于现场环境监测数据研究了某人行弯斜拉桥行人通过时的数值模型;杨飞等分析了曲率半径和结构体系对一座曲线部分斜拉桥自振特性的影响;刘昊苏对不同布索形式下的曲线矮塔斜拉桥的动力性能进行了研究。

由上述文献综述可知,对弯斜拉桥或部分弯斜拉桥的关键设计参数进行研究,多限于理论分析和方法讨论,未见相关的试验验证。曲率半径是影响曲梁扭矩分布的关键设计参数,而Ⅱ形主梁作为斜拉桥常用的主梁形式,因其抗扭刚度较低,曲率半径成为决定其

设计难度的关键因素之一。

该文依托某大跨Ⅱ形混凝土主梁弯斜拉桥，建立空间梁板混合有限元模型，采用数值分析与模型试验相结合的研究方法，系统研究曲率半径对弯斜拉桥受力性能的影响。

### 1 数值模型

某混凝土双塔弯斜拉桥，跨径布置为(49+81+285+81+49) m。主梁截面为预应力混凝土Ⅱ形截面，截面中心梁高 2.3 m。桥面宽 22.0 m，双向 2.5% 横坡，布设双向四车道，曲线梁段的曲率半径为 550 m。曲线内侧布设人行道，桥宽 12.25 m，外侧桥宽 9.75 m。桥塔为钻石形索塔，曲线梁段塔柱为预应力混凝土构件，P2 桥塔塔高 122.2 m，P3 桥塔塔高 119.7 m。斜拉索为双索面扇形布置，标准索距设置为 9.0、6.0 m。全桥概况图如图 1 所示。

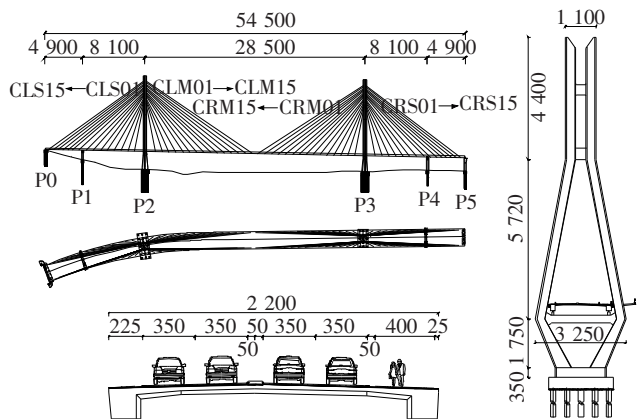


图 1 全桥概况图(单位:cm)

采用梁板混合有限元仿真方法，即Ⅱ形主梁采用梁板混合单元，索塔采用梁单元，斜拉索采用索单元模拟，建立该桥空间理论数值模型如图 2 所示。并分别建立了跨径分布和构造尺寸相同，桥面中心线平曲线半径分别为 350、550、750、950 m 的弯斜拉桥数值模型，另外建立一座同跨径的直线斜拉桥模型以便对比。

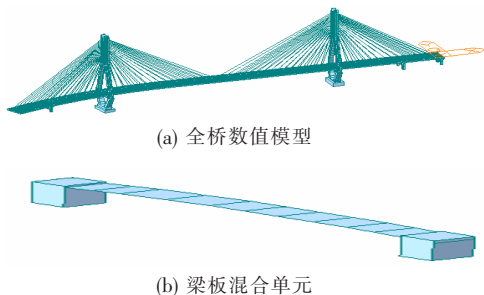


图 2 曲线斜拉桥空间数值模型

### 2 试验验证

#### 2.1 模型斜拉桥概况

模型桥采用几何相似比为 1:20 设计，主梁和桥塔采用“刚度等效”原则设计。全桥模型设计图如图 3 所示。主梁、桥墩和桥塔刚度相似系数如表 1~3 所示。

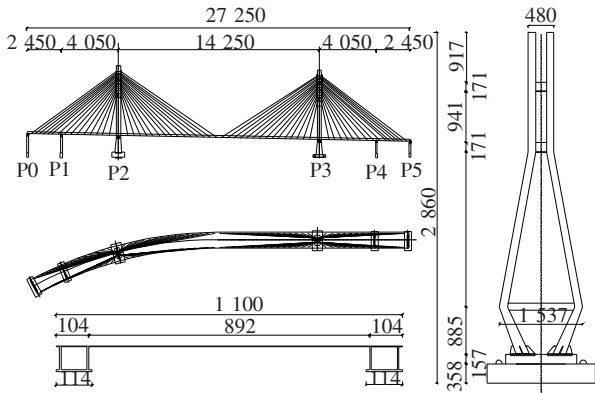


图 3 曲线斜拉桥全桥模型设计图(单位:mm)

表 1 主梁刚度相似系数

梁段	$EI$	$GI$	$EA$
主跨梁段	0.993	1.02	0.980
压重梁段	0.993	1.04	0.991

表 2 辅助墩与过渡墩刚度相似系数

桥墩	轴向刚度	顺桥向抗弯刚度
辅助墩	1.24	1.21
过渡墩	1.24	1.21

表 3 桥塔刚度相似系数

截面位置	$EA$	$EI_y$	$EI_z$
桥塔斜立柱	1.04	0.98	0.98
桥塔上塔柱	1.13	1.02	1.02
桥塔下塔柱	0.97	1.03	1.02

#### 2.2 数值模型合理性验证

采用常规试验手段，斜拉桥主梁内扭矩很难直接测试得到，但根据斜拉桥的结构受力特点可知，可以通过测试斜拉索索力和支座反力，借助有限元数值分析，间接获得斜拉桥主梁内力状态。

成桥状态，曲线梁段斜拉索索力、支座反力测试值与理论值的比值如图 4、5 所示。

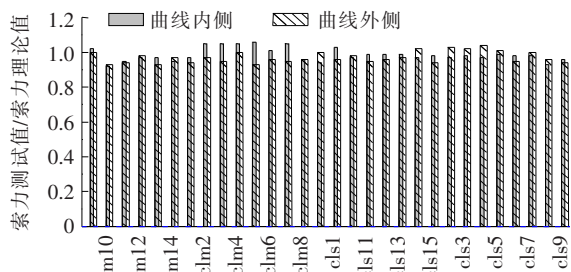


图4 斜拉索索力测试值与理论值之比

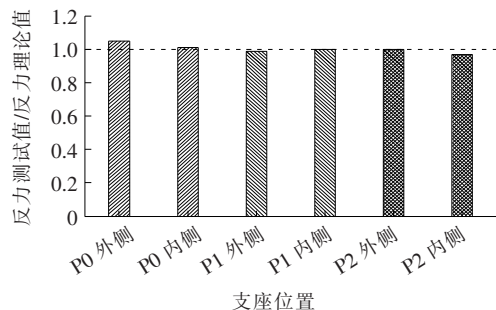


图5 支座反力测试值与理论值之比

由图4、5可知:斜拉索索力、支座反力试验值与理论分析值的比值均在 $(1 \pm 0.05)$ 范围内,表明试验值与理论值吻合良好。其中试验误差主要来自采集仪器的测试误差,人为施加的斜拉索初张力不精确。

由试验测试值与理论计算值的对比可知:该文采用的数值模型能够准确反映实际桥梁的内力状态。基于该文数值模型进行的曲率半径影响分析,其结果与实际结构的力学行为相符。

### 3 曲率半径影响分析

#### 3.1 对静力特性的影响

##### 3.1.1 主梁

##### (1) 主跨跨中挠度及截面扭转角

成桥状态,主跨跨中挠度及截面扭转角随曲率半径变化规律如图6所示。

由图6(a)可以看出:①成桥状态,随曲率半径减小,跨中内外侧边肋挠度变化曲线趋于平行,表明随曲率半径变化,内外侧边肋的竖向变形差保持不变;②曲线斜拉桥跨中位移较直线斜拉桥大,且曲率半径越小,主梁挠度越大。

由图6(b)可以看出:跨中内外侧边肋的扭转角变化曲线的斜率接近0,表明主跨跨中内外侧边肋的扭转程度受曲率半径影响较小,两侧扭转角差值几乎保持不变,这与图6(a)内外侧边肋挠度差保持不变是一

致的。产生这一现象的主要原因为:在主梁截面形式不变即抗扭刚度固定的情况下,主梁扭转角的变化与主梁扭矩分布直接相关。以直线斜拉桥为对比,主梁扭矩增量随曲率半径的变化规律如图7所示。

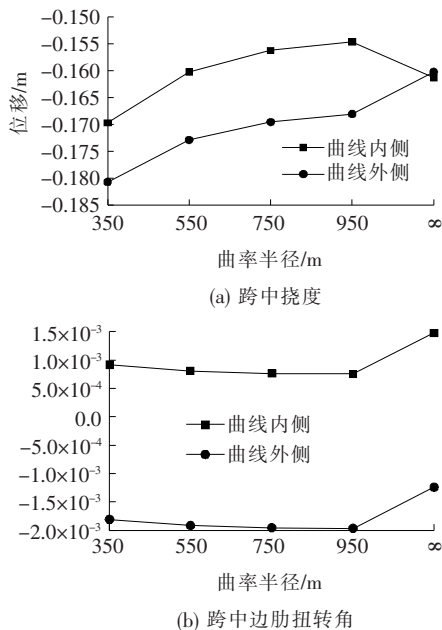


图6 主跨跨中挠度及扭转角随曲率半径变化曲线

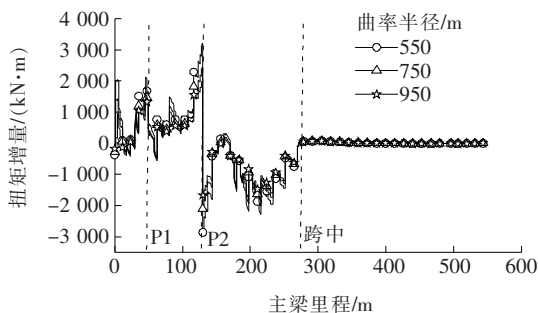


图7 主梁扭矩增量随曲率半径变化图

由图7可知:跨中截面的扭矩增量随曲率半径几乎无变化。扭矩变化最大处为曲线梁段P2桥塔位置,而直线梁段,由于荷载沿主梁截面对称分布,且结构对称,扭矩增量几乎为0。

##### (2) 主梁扭弯比

成桥状态,主梁扭矩和弯矩峰值比随曲率半径变化如图8所示。采用最小二乘法对离散数据点进行了拟合, $y$ 表示扭弯比, $r$ 表示曲率半径。

由图8可知:主梁扭弯比随曲率半径增大逐渐减小。由理论公式可知:当曲率半径大于950m后,扭弯比小于5%,主梁以受弯为主,其内力分布趋近于同跨度直线斜拉桥。

(3) 主梁在支座支撑处的扭矩

成桥状态, P2 桥塔、P1 桥墩及 P0 桥墩处主梁扭矩变化曲线如图 9 所示。

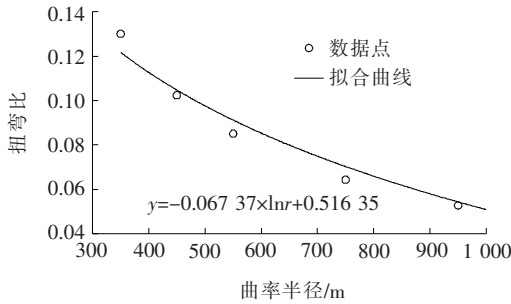


图 8 主梁扭转比随曲率半径变化规律

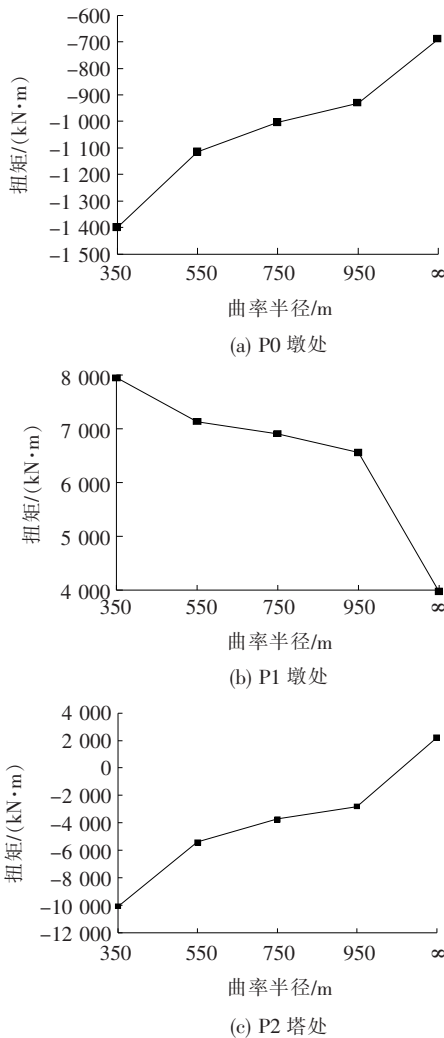


图 9 成桥状态支座附近主梁截面扭矩

由图 9 可知:① 当曲率半径相同时, P0 墩处主梁扭矩相对 P1 桥墩和 P2 桥塔处主梁扭矩要小;② 曲率半径为 550~950 m 时, 扭矩变化曲线的斜率相等。当曲率半径达到 350 m 时, 扭矩变化率增大;③ P1 墩处主梁扭矩与 P0 边墩和 P2 桥塔处主梁扭矩符号相

反, 表明 P0~P2 主梁段存在反扭点。

引起上述现象的原因有:① P2 桥塔和 P1 桥墩沿曲线径向设置了较强的横向约束, 导致此处主梁截面产生较大的横向弯矩, 增加了主梁的扭转程度。为避免由温度变化引起的主梁横向弯曲变形过大, 导致结构开裂破坏, P0 墩处横向约束较弱, 以释放部分梁端横向弯矩;② P2 桥塔对主梁约束作用较强, 若近似将此处视为曲线梁段的锚固端, 则由符拉索夫的弹性薄壁曲杆理论, 主梁扭矩与曲率半径和曲梁梁段长度有关。曲率半径越小, 曲线梁段越长, 则锚固端扭矩值越大。P2~P1 梁段长度为 P1~P0 梁段长度的 1.65 倍;③ 由于斜拉索不对称的索力和不平衡的支反力影响, P1 桥墩处主梁存在反扭点, 使得 P1 桥墩处主梁扭矩与 P0 桥墩和 P2 桥塔处主梁扭矩符号相反。

3.1.2 桥塔

成桥状态, P2 桥塔塔底截面顺桥向弯矩、横桥向弯矩、扭矩以及塔偏随曲率半径变化规律见图 10、11。

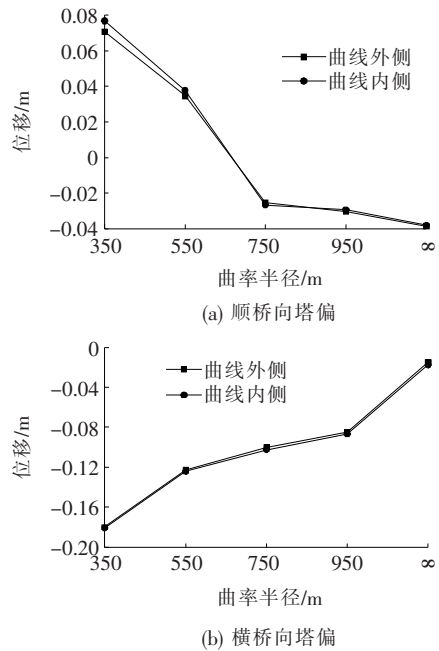


图 10 成桥状态 P2 桥塔塔顶位移变化曲线

由图 10 可知:① 随曲率半径减小, 顺桥向塔顶位移逐渐增加, 且偏移方向由边跨侧转为主跨侧, 这与图 6(a) 主梁跨中挠度变化是协调的;② 随曲率半径减小, 横桥向塔偏逐渐增加, 偏移方向沿径向向内。曲率半径为 550~950 m 的塔偏变化率小于 350~550 m 的塔偏变化率, 表明曲率半径由 550 m 变化至 350 m 时, 横桥向受力明显加剧;③ 横桥向塔偏绝对值为顺桥向塔偏的 3~5 倍。

由图 11 可知:① 曲率半径为 550~950 m 时, 顺

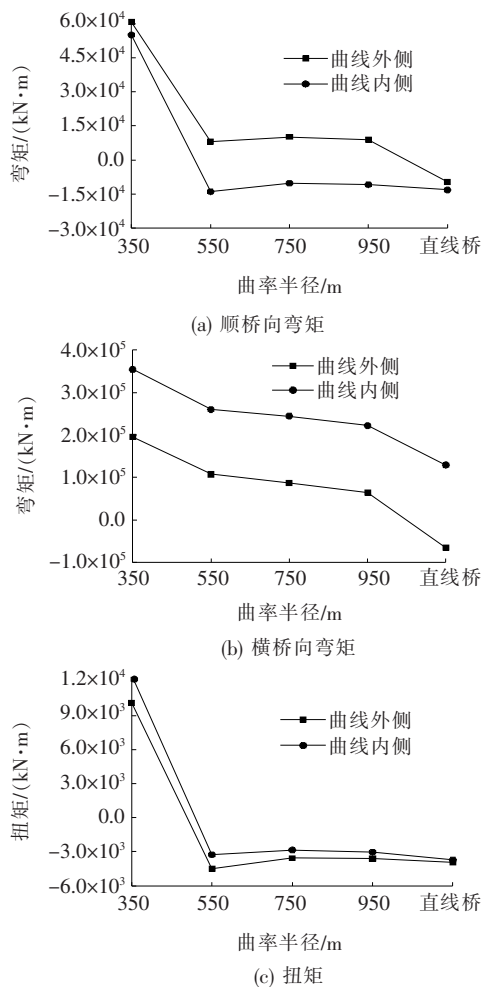


图 11 成桥状态 P2 桥塔塔底截面内力变化曲线

桥向弯矩变化平缓,与直线桥相差不大,当曲率半径减小至 350 m 时,弯矩值急剧增加;② 随曲率半径减小,横桥向弯矩逐渐增大,但曲线内外侧扭矩变化曲线接近平行,这表明曲线内外侧塔底截面弯矩差值受曲率半径影响不大;③ 当曲率半径为 550~950 m 时,塔底扭矩变化曲线上升平缓,当曲率半径减小至 350 m 时,扭矩变化明显,塔底扭矩急剧增加。

分析产生上述现象的原因有:① P2 桥塔位于圆曲线梁段上,索塔中心线与弯梁垂直,斜拉索向曲线的圆心方向产生水平径向分力。由于径向力的作用,P2 桥塔处于空间不对称受力状态,曲线内外侧塔柱受力复杂;② 随曲率半径变化,塔、梁上的斜拉索锚固位置变化复杂;③ 该文背景桥梁在设计时,采取了施加不等预应力等措施来减小小桥塔内外塔柱受力不对称的问题,这在一定程度上影响了桥塔内外塔柱的内力值。

### 3.1.3 支座反力

曲线内外侧支座反力差(内侧支反力减外侧支反力)随曲率半径的变化如图 12 所示。

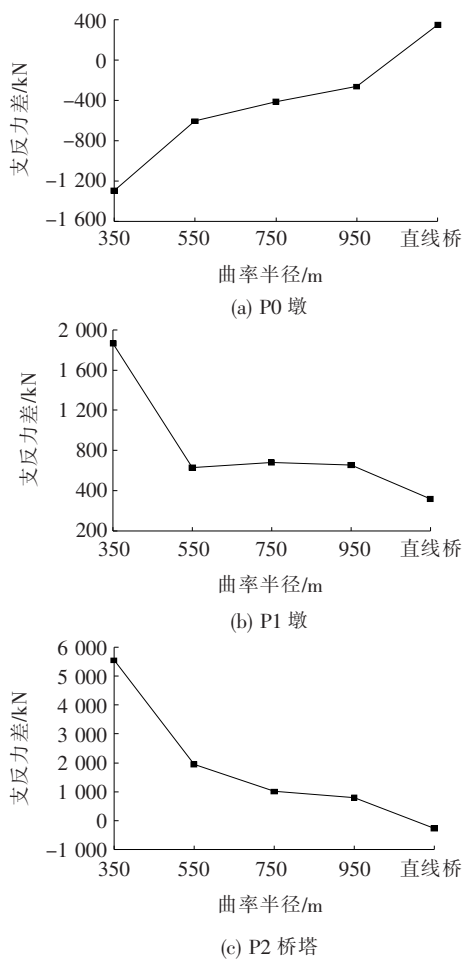


图 12 成桥状态曲线段支反力差变化曲线

由图 12 可知:① 随曲率半径减小,支反力差均呈增大趋势。曲率半径为 550~950 m 的支反力差变化曲线的斜率显著小于曲率半径为 350~550 m 曲线斜率。这意味着当曲率半径大于 550 m 后,P0 墩曲线内侧支反力值较小,支座脱空的潜在风险很大;② 对设置辅助墩的曲线斜拉桥,边墩、辅助墩和桥塔处曲线内外侧支反力分布不一致。对该文背景桥梁而言,支反力大小分布表现为:P0 墩支反力曲线外侧大于内侧,而 P1 桥墩和 P2 桥塔处内侧大于外侧。

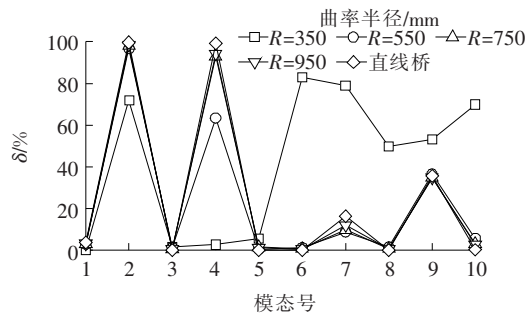
上述现象产生的原因为:支座不平衡支反力与主梁扭矩分布关系密切,支反力的变化规律由图 7、9 所表明的规律共同决定。支座反力的变化规律其实质是对上述由图 7、9 所得结论的进一步验证。

### 3.2 对动力特性的影响

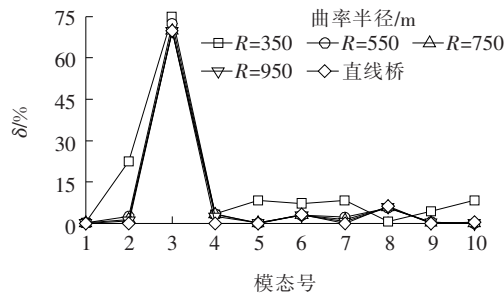
基于子空间迭代法,计算获得不同曲率半径曲线斜拉桥前 10 阶自振频率和各振型参与因子  $\delta$ 。前 10 阶振型自振频率如表 4 所示。各方向振型参与因子如图 13、14 所示。其中,振型参与因子  $\delta$  为各振型有

表 4 不同曲率半径下结构自振频率

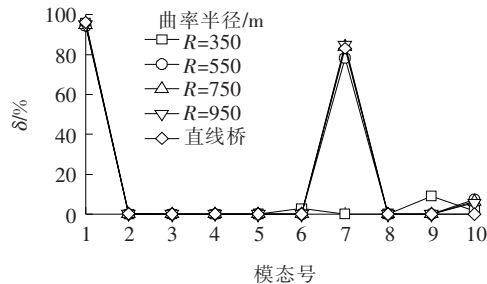
模态号	不同曲率半径(m)时的自振频率/Hz				
	350	550	750	950	直线桥
1	0.400	0.402	0.403	0.403	0.403
2	0.530	0.531	0.534	0.535	0.536
3	0.585	0.610	0.611	0.611	0.614
4	0.705	0.631	0.640	0.641	0.641
5	0.767	0.710	0.709	0.709	0.713
6	0.799	0.770	0.769	0.769	0.769
7	0.841	0.804	0.804	0.804	0.804
8	0.903	0.893	0.892	0.892	0.893
9	1.022	1.001	1.001	1.001	1.001
10	1.029	1.027	1.027	1.027	1.025



(a) ROTN-X



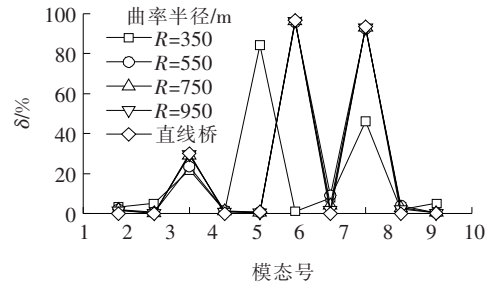
(b) ROTN-Y



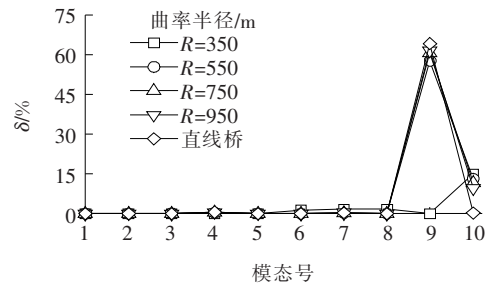
(c) ROTN-Z

图 13 不同方向振型参与因子变化曲线(1)

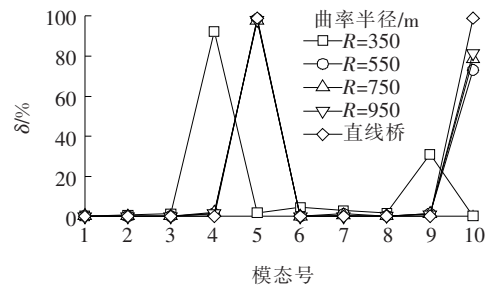
效质量比(各振型参与比作为 100%时各自由度方向的参与比例)。图中,TRAN-X、TRAN-Y、TRAN-Z 分别表示沿桥梁纵向、横向、竖向的平动;ROTN-X、



(a) ROTN-X



(b) ROTN-Y



(c) ROTN-Z

图 14 不同方向振型参与因子变化曲线(2)

ROTN-Y、ROTN-Z 分别表示绕桥梁纵轴、横轴和竖轴的转动(整体坐标系见图 2)。

由表 4 及图 13、14 可知:① 同一模态下,随曲率半径减小,振型参与方向增加,与直线桥相比,振型参与平均多出 1~2 个,如第 10 阶振型,曲线斜拉桥相比直线斜拉桥,新增 ROTN-Z 方向振型;② 随曲率半径减小,新增加的振型可成为主要参与振型,如曲率半径为 350 m 斜拉桥,第 5 阶振型新增 ROTN-X 振型;③ 随曲率半径减小,曲线斜拉桥与直线斜拉桥同一方向的振型可能位于不同模态,但其同一模态下自振频率接近,如图 14(b)的 ROTN-Y 振型,曲率半径为 350 m 斜拉桥出现在第 4 阶模态,而直线斜拉桥则出现在第 5 阶模态,但二者第 5 阶频率相差不大;④ 随曲率半径减小,各阶模态中 TRAN-X 和 ROTN-X 方向振型参与比例增加,TRAN-Y 方向振型参与逐渐减小。

曲率半径对曲线斜拉桥自振特性的影响,其原因可归结为:①曲率半径越小,曲线斜拉桥主梁水平面内横向刚度越大;②随曲率半径的减小,斜拉索在主梁上的竖向分量和径向分量发生变化,而斜拉索索力的竖向分量对主梁可视为弹性支撑作用,同时水平分量对主梁产生横向压力作用,索力对斜拉桥整体结构刚度产生复杂的影响。

## 4 结论

(1) 随曲率半径减小,主跨跨中位移逐渐增大;两侧纵肋变形差变化不明显。桥塔塔偏增加。横桥向塔偏显著大于顺桥向塔偏。

(2) 对该文背景桥梁而言,以主梁扭弯比为衡量指标,当曲率半径大于950 m时,主梁以受弯为主,其内力分布趋于同跨径直线斜拉桥。

(3) 对设置辅助墩的曲线斜拉桥,边墩、辅助墩和桥塔位置曲线内外侧支反力分布趋势不一致。曲线段不同位置处支座选型需特别注意。

(4) 曲线斜拉桥主梁同曲线梁桥,均存在“外重内轻”现象;与曲线梁桥不同之处,由于斜拉索不对称索力和不平衡支反力的作用,其主梁存在多个反扭点。

(5) 弯斜拉桥与直线斜拉桥各阶频率接近,但二者模态特征存在明显差别。对该文背景桥梁而言,随曲率半径减小,振型参与方向增加。新增加振型,可成为主要振型。对于多跨曲线斜拉桥,随曲率半径减小,结构的纵漂和扭转振型参与比例逐渐增加,横弯振型参与比例逐渐减小。

## 参考文献:

[1] 肖金军,李传习.小半径曲线箱梁非对称增大截面加固分析与试验研究[J].中外公路,2019(2).

[2] Raftoyiannis, Ioannis G., Michaltsos, George T. Curved-in-Plane Cable-Stayed Bridges; A Mathematical Model[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2012(3): 41-82.

[3] Nour Eldeen, Hesham. 4-D Analysis of Curved Segmental Cable-Stayed Bridges[J]. IABSE 2012 Spring Conference on Global Thinking in Structural Engineering, 2012(5).

[4] Wen, Q., Hua, X. G., Chen, Z. Q., et al. Control of Human-Induced Vibrations of a Curved Cable-Stayed Bridge:

Design, Implementation and Field Validation[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(7): 04016028.

- [5] Tian Liang, Dong jun. Investigation on Shear Lag Effects of Extradosed Cable-Stayed Curved Bridge under the Influence of Curvature Radius[J]. Proceedings of the 10th Asia Pacific Transportation Development Conference, 2014: 631-638.
- [6] 刘三会.基于温度效应的小半径曲线箱梁支座布置[J].中外公路,2017(4).
- [7] 万晓明.独塔单索面曲线斜拉桥力学性能研究[D].大连理工大学硕士学位论文,2009.
- [8] 王钧利,贺拴海.大跨径弯桥圆心角对其内力、位移及稳定性的影响[J].交通运输工程学报,2007(3).
- [9] 肖海珠,张强,高宗余.北京地铁五号线曲线斜拉桥设计[J].桥梁建设,2006(4).
- [10] 谭康荣,余昆.四线曲线钢箱梁斜拉桥施工控制技术[J].桥梁建设,2013(4).
- [11] Avsar, Ozgur, Caner, Alp, Sarici, Barbaros. A Conceptual Design of a Cable Stayed Bridge with a Curved Back Span[J]. Advanced Materials Research. 2011 (255-260): 993-997.
- [12] Liu Haosu, Dong Jun, Yang Yun, et al. Analysis of Seismic Response for an Extradosed Cable-Stayed Curved Bridge Based on Different Design Parameters[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 226-228: 1 551-1 554.
- [13] Bursi, Oreste S., Kumar, Anil, Abbiati, Giuseppe, Ceraolo, Rosario. Identification, Model Updating and Validation of a Steel Twin Deck Curved Cable-Stayed Footbridge[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2014, 29(9): 703-722.
- [14] Bassoli, Elisa, Gambarelli, Paola, Simonini, Laura, Vincenzi, Loris. Dynamic Analyses of a Curved Cable-Stayed Footbridge under Human Induced Vibrations: Numerical Models and Experimental Tests[J]. 5th EC-COMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2015: 2 495-2 511.
- [15] 杨飞,杨昀,王晓雷,等.曲线部分斜拉桥静、动力特性研究[J].公路交通科技(应用技术版),2012(10).
- [16] 刘昊苏.不同布索形式下曲线矮塔斜拉桥静动力性能研究[D].北京建筑大学硕士学位论文,2013.
- [17] 王子文,徐世文,邓露,等.变截面椭圆形独塔斜拉桥塔-梁结合段模型试验研究[J].中外公路,2019(4).