

基于实用算法的独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆影响因素分析*

吕毅刚^{1,2}, 李星¹, 韩伟威^{3,4}, 饶攀¹, 王翠¹, 乔杰¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.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; 3.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 4.长沙理工大学 公路养护技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410114)

摘要: 采用抗倾覆稳定性的实用计算方法分析曲率半径、中墩偏心距、支座间距(桥台处两支座的中心间距)对独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆性能的影响。结果表明,随着曲率半径的增大,独柱墩曲线箱梁桥的稳定效应先减弱后增强,倾覆效应先增强后减弱,抗倾覆稳定系数先减小后增大;随着中墩偏心距的增大,独柱墩曲线箱梁桥的稳定效应增强,倾覆效应减弱,抗倾覆稳定系数增大;曲率小于某限定值时,随着支座间距的增大,独柱墩曲线箱梁桥的稳定效应增强,倾覆效应减弱,抗倾覆稳定系数增大,增大支座间距能显著改善独柱墩曲线箱梁桥的抗倾覆性能。

关键词: 桥梁;独柱墩;曲线箱梁桥;抗倾覆稳定性;曲率半径;中墩偏心距;支座间距

中图分类号:U447

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)01-0148-05

近年来全国各地独柱墩曲线箱梁桥的倾覆事故时有发生,引起了国内外学者的广泛关注。Deng L.等总结了各种桥梁倒塌的主要原因和机理,认为台风、地震、车辆超载、不适当的设计和施工方法是桥梁失效的主要原因^[1];马玉荣等认为独柱墩曲线梁桥在偏心荷载下有 4 种破坏形式,即梁体倾覆、支座受压或被挤出破坏、桥墩偏心受压破坏和支座摩阻力到达极限导致梁体滑移^[2];Xiong W.等认为独柱墩桥梁存在 4 个倾覆阶段,并量化了不同倾覆阶段支座的旋转角度^[3];彭卫兵等基于独柱墩梁桥的 4 种破坏模式,提出了独柱墩梁桥的抗倾覆破坏承载力简化计算方法^[4-5];周子杰等根据几何原理,研究了直线梁桥与曲线梁桥倾覆轴线的选取方法^[6];姜爱国等研究了支座布置方式及曲率对曲线梁桥倾覆的影响,通过支座反力变化推导了曲线梁桥的倾覆轴线^[7];李盼到等研究了不同中墩支承形式的倾覆临界状态,认为应根据支承体系选取不同的倾覆安全系数^[8];Song G. H.等提出了曲线梁桥的倾覆轴线选取实用方法,认为倾覆轴线选取主要受曲率半径、支座偏心等影响^[9];Zhuang D.等通过实例分

析,发现桥梁倾覆发生于内侧支座脱空,外侧支座挤压变形后随支座滑出而倾覆,支座摩擦系数对桥梁的抗倾覆性能有重要影响^[10];鲁圣弟等分析了不同桥型布置下独柱墩的抗倾覆性能和倾覆力学特征,认为国内规范使用的方法会高估曲线半径较大的曲线梁桥的抗倾覆能力^[11];宫亚峰等认为以三跨独柱墩曲线梁桥的两中墩支座连线作为倾覆轴线时,其抗倾覆稳定系数最小^[12];何雄君等分析了弯梁桥曲线半径、车辆荷载、支座布置形式对独柱墩曲线梁桥抗倾覆稳定性的影响^[13];Luo X.研究了小曲率半径多跨曲线箱梁桥的抗倾覆稳定性^[14]。本文介绍独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性的实用计算方法,并采用该方法分析曲率半径、中墩偏心距和支座间距(桥台处两支座的中心间距)对独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性的影响,为独柱墩曲线箱梁桥的抗倾覆设计提供借鉴。

1 抗倾覆稳定性的实用计算方法

文献^[15]提出的基于倾覆轴理论的独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定系数 k_{qf} 计算公式为:

* 基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2022JJ30600);长沙市自然科学基金项目(kq2202208);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);长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(17ZDXK07);长沙理工大学公路养护技术国家工程研究中心开放基金资助项目(kfj210102)

$$k_{\text{qf}} = \frac{\sum M_w}{\sum M_q} \quad (1)$$

式中: $\sum M_w$ 为结构自重产生的稳定效应,按式(2)计算; $\sum M_q$ 为汽车荷载产生的倾覆荷载,按式(3)计算。

$$\sum M_w = SL(\lambda_1 S_j + \lambda_2 S_h + \lambda_3 hB)/B + \sum \lambda_1 S_{ki} B_i L_i \quad (2)$$

$$\sum M_q = (1 + \mu)(q_k \Omega + P_k e) \quad (3)$$

式中: S 为桥面面积; L 为桥面形心与倾覆轴线的垂直间距; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别为箱梁、护栏、桥面铺装的材料容重; S_j 为箱形横截面面积; S_h 为护栏横截面面积; h 为桥面铺装厚度; B 为桥面宽度; S_{ki} 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的间距; μ 为汽车冲击系数; q_k 、 P_k 分别为规范中车道荷载的均布荷载和集中荷载^[16]; Ω 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(见图1)。

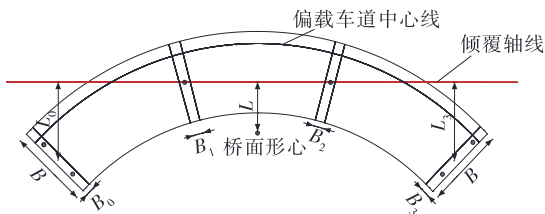


图1 独柱墩曲线箱梁桥计算示意图

2 算例分析

以某 3×30 m 独柱墩曲线箱梁桥为例进行抗

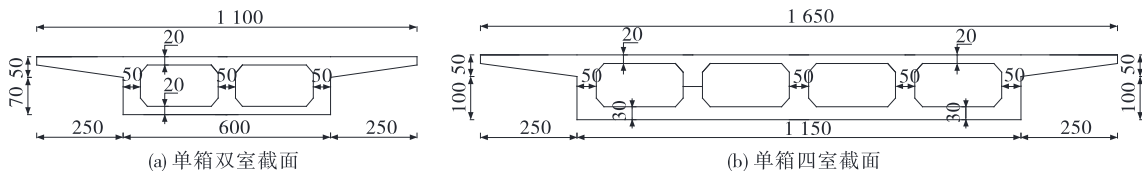


图4 主梁横截面示意图(单位:cm)

2.3 抗倾覆稳定性影响因素分析

2.3.1 曲率半径的影响分析

为研究曲率半径对独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性的影响,选择曲率半径为 50 m、100 m、150 m、200 m、250 m、500 m 和 1 000 m 的空间梁格模型进行抗倾覆稳定性对比分析。采用上述抗倾覆稳定性实用计算方法计算不同曲率半径独柱墩曲线箱梁桥

倾覆稳定性影响因素分析。

2.1 工程概况

该桥箱梁宽度为 11.0 m,箱梁高 1.2 m,采用 C50 混凝土,荷载等级为公路—I 级。除桥台设置双支座抗扭支撑外,其余桥墩为单支座,仅约束桥梁竖向和横向位移。支座布置如下:0-1、3-1 为双向活动支座,0-2、1-1、3-2 为单向活动支座,2-1 为固定支座(见图2)。

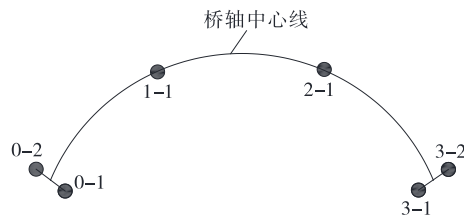


图2 支座布置及标号

2.2 有限元模型建立

采用 MIDAS/Civil 有限元软件建立该桥空间梁格模型(见图3)。由于分析不同支座间距时要求主梁截面加宽,设计单箱双室、单箱四室两种主梁截面,单箱双室用于曲率半径和中墩偏心距因素分析,单箱四室用于支座间距因素分析,其细部构造见图4。通过有限元软件计算独柱墩曲线箱梁桥基频后,采用规范公式计算冲击系数。

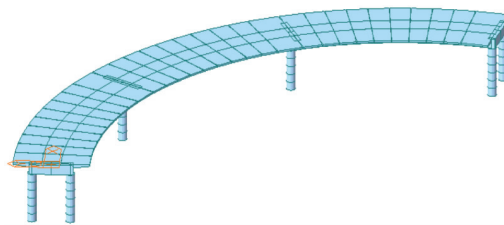


图3 独柱墩曲线箱梁桥有限元空间梁格模型

的稳定效应、倾覆效应、抗倾覆稳定系数,计算结果见表1和图5。

由表1和图5可知:独柱墩曲线箱梁桥的稳定效应随曲率半径的增大先减弱后增强,曲率半径为 50 m 时最大,曲率半径为 250 m 时最小;倾覆效应随曲率半径的增大先增强后减弱,曲率半径为 250 m 时达到峰值,这是因为曲率半径小于 250 m 时倾

表1 不同曲率半径下抗倾覆稳定系数计算结果

| 曲率半径/m | 基频/Hz | 冲击系数 | 稳定效应 M_w /(kN·m) | 倾覆效应 M_q /(kN·m) | 抗倾覆稳定系数 k_{qf} |
|--------|-------|-------|--------------------|--------------------|------------------|
| 50 | 2.371 | 0.137 | 61 687.89 | 5 011.26 | 12.31 |
| 100 | 2.501 | 0.146 | 31 265.68 | 5 130.88 | 6.09 |
| 150 | 2.526 | 0.148 | 21 010.53 | 5 309.27 | 3.96 |
| 200 | 2.535 | 0.149 | 15 801.95 | 5 551.29 | 2.85 |
| 250 | 2.540 | 0.149 | 12 656.89 | 5 758.26 | 2.20 |
| 500 | 2.545 | 0.149 | 19 619.15 | 4 786.66 | 4.10 |
| 1 000 | 2.546 | 0.149 | 28 440.48 | 3 661.85 | 7.77 |

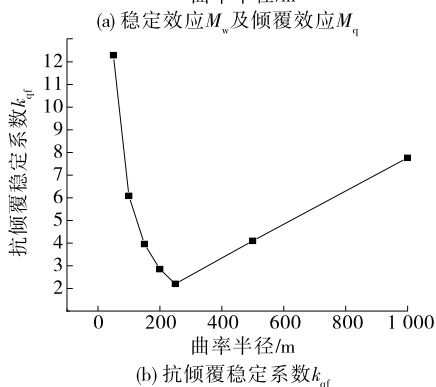
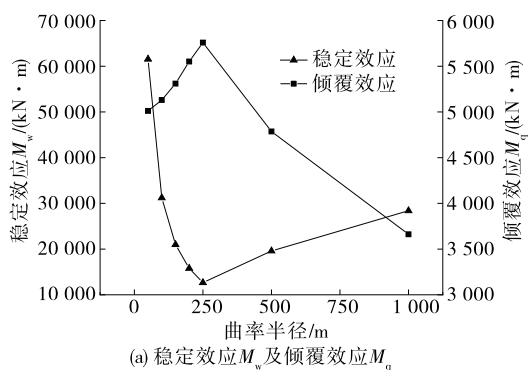


图5 稳定效应、倾覆效应、抗倾覆稳定系数与曲率半径的关系

覆轴线为两中墩支座连线,大于 250 m 时倾覆轴线为两桥台支座连线;曲率半径为 250 m 时稳定效应最小值和倾覆效应最大值同时出现,这是因为曲率半径改变时,倾覆轴线由两中墩过渡到两桥台外侧支座,导致稳定效应和倾覆效应的趋势出现拐点;在稳定效应和倾覆效应共同作用下,独柱墩曲线箱梁桥的抗倾覆稳定系数随曲率半径的增大先减小后增大。曲率半径为 250 m 时,抗倾覆稳定系数最小,为 2.20,低于规范中规定的抗倾覆稳定系数下限值 2.5,桥梁的安全储备不足,容易失稳,桥梁设计时宜将曲率半径控制在 100 m 以内或大于 500 m。

2.3.2 中墩偏心距的影响分析

因现实问题,有时设计人员不能随意决定桥梁

走向,也无法随意改变曲率半径,但设计人员可以通过中墩偏心、调整支座间距等提高桥梁的抗倾覆稳定性。中墩的位置影响独柱墩曲线箱梁桥倾覆轴线的选取,从而影响倾覆效应和稳定效应,分析中墩偏心距对独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性的影响十分必要。由于曲率半径过大时设置中墩偏心距无意义,选取曲率半径为 50 m,中墩偏心距为 0.0、0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m、0.5 m 的空间梁格模型作为对象,运用抗倾覆稳定性实用计算方法计算不同中墩偏心距独柱墩曲线箱梁桥的稳定效应、倾覆效应、抗倾覆稳定系数,计算结果见表 2 和图 6。

表2 不同中墩偏心距下抗倾覆稳定系数计算结果

| 偏心距/m | 基频/Hz | 冲击系数 | 稳定效应 M_w /(kN·m) | 倾覆效应 M_q /(kN·m) | 抗倾覆稳定系数 k_{qf} |
|-------|-------|-------|--------------------|--------------------|------------------|
| 0.0 | 2.371 | 0.137 | 61 687.89 | 5 011.26 | 12.3 |
| 0.1 | 2.379 | 0.137 | 66 214.90 | 4 960.28 | 13.3 |
| 0.2 | 2.386 | 0.138 | 68 622.12 | 4 732.56 | 14.5 |
| 0.3 | 2.397 | 0.139 | 70 092.86 | 4 326.72 | 16.2 |
| 0.4 | 2.406 | 0.139 | 74 023.97 | 4 158.65 | 17.8 |
| 0.5 | 2.418 | 0.140 | 77 446.08 | 4 033.65 | 19.2 |

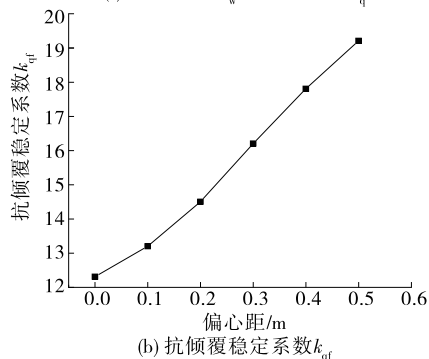
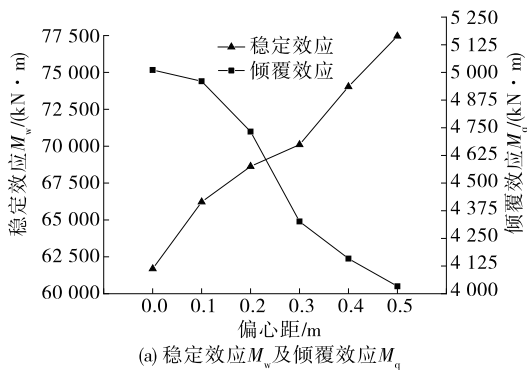


图6 稳定效应、倾覆效应、抗倾覆稳定系数与中墩偏心距的关系

由表 2 和图 6 可知:随着中墩偏心距的增大,独柱墩曲线箱梁桥的稳定效应增强,从中墩居中到偏心 0.5 m 时稳定效应增加 29.5%,而倾覆效应的变

化趋势与之相反,随中墩居中到偏心 0.5 m 倾覆效应降低 23.9%;抗倾覆稳定系数随中墩偏心距的增大而增大,偏心距增大至 0.5 m 时,抗倾覆稳定系数比未设置中墩偏心时大 65.5%。

造成上述现象的原因是小曲率半径独柱墩箱梁桥的倾覆轴线为中墩支座连接线(见图 1),中墩偏心距越大,桥面形心到倾覆轴线的距离越远,计算所得稳定效应越大,而倾覆轴线外侧的面积、偏载车道中心线到倾覆轴线的距离均减小,倾覆效应减弱,抗倾覆稳定系数增大。可见,增加中墩偏心距可大幅增强小曲率半径独柱墩曲线箱梁桥的抗倾覆稳定性。

2.3.3 支座间距的影响分析

独柱墩曲线箱梁桥的曲率在跨径和支座间距一定时存在一个限值使倾覆轴线同时过两个中墩和两桥台外侧支座,曲率大于这个限值时,独柱墩曲线箱梁桥的支座间距不影响倾覆轴线。因此,选择图 7 所示曲率半径为 250 m,支座间距为 3.5 m、4.0 m、4.5 m、5.0 m 和 5.5 m 的空间梁格模型进行分析,运用抗倾覆稳定性实用计算方法计算不同支座间距下独柱墩曲线箱梁桥的稳定效应、倾覆效应、抗倾覆稳定系数,计算结果见表 3 和图 8。

由表 3 和图 8 可知:随着独柱墩曲线箱梁桥支座间距的增大,稳定效应增强,倾覆效应减弱,桥梁两端同墩台支座间距由 3.5 m 增大至 5.5 m 时,稳定效应约增大 3.26 倍,倾覆效应减小 27.2%;随着独柱墩曲线箱梁桥支座间距的增大,独柱墩曲线箱梁桥的抗倾覆稳定系数增大,支座间距 3.5 m 时抗倾覆稳定系数为 2.18,不满足规范要求,支座间距为 5.5 m 时抗倾覆稳定系数增大 4.26 倍。

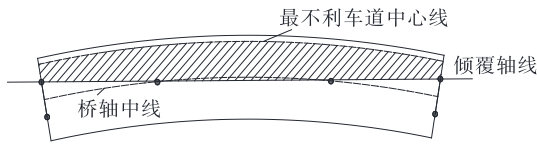


图 7 曲率半径为 250 m 时的倾覆轴线

表 3 不同支座间距下抗倾覆稳定系数计算结果

| 支座间距/m | 基频/Hz | 冲击系数 | 稳定效应 M_w /(kN·m) | 倾覆效应 M_q /(kN·m) | 抗倾覆稳定系数 k_{qf} |
|--------|-------|-------|--------------------|--------------------|------------------|
| 3.5 | 2.705 | 0.160 | 21 681.80 | 9 954.93 | 2.18 |
| 4.0 | 2.732 | 0.162 | 30 354.29 | 9 441.41 | 3.22 |
| 4.5 | 2.752 | 0.163 | 42 678.43 | 8 710.78 | 4.90 |
| 5.0 | 2.767 | 0.164 | 55 000.11 | 7 979.06 | 6.89 |
| 5.5 | 2.778 | 0.165 | 67 322.91 | 7 250.49 | 9.29 |

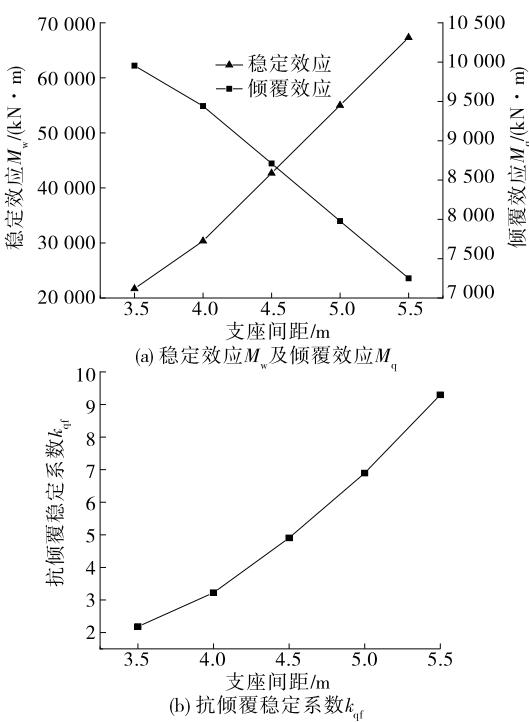


图 8 稳定效应、倾覆效应、抗倾覆稳定系数与支座间距的关系

在同等曲率半径下,增加独柱墩曲线箱梁桥的支座间距会使其倾覆轴线外移,既减少倾覆效应的分布荷载面积,也会使其到倾覆轴线的力臂减小,使梁体拥有更好的抗倾覆稳定性。因此,对于曲率半径较大的独柱墩曲线箱梁桥,可通过加大两端桥台的支座中心距离来增强其抗倾覆稳定性。

3 结论

基于抗倾覆稳定性实用计算方法进行独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆稳定性影响因素分析,得出如下结论:

- (1) 随曲率半径增大,独柱墩曲线箱梁桥的稳定效应先减弱后增强,倾覆效应先增强后减弱,桥梁抗倾覆稳定系数先减小后增大;弯曲程度大的曲线桥梁的稳定性较好,曲率半径为 250 m 时抗倾覆性能较差。
- (2) 随着曲线箱梁桥中墩偏心距的增大,稳定效应增强,倾覆效应减弱,抗倾覆稳定系数增大。增加中墩偏心距可大幅增强曲率半径较小的独柱墩曲线箱梁桥的抗倾覆稳定性。
- (3) 曲率满足限值要求时,增大两桥台处的支座间距可使倾覆效应随桥梁跨数增大呈线性减弱,稳定效应和抗倾覆稳定性呈线性增强。增加支座间距能显著改善曲率半径较大的曲线箱梁桥的抗倾覆

稳定性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马玉荣, 陈海波, 吕改锋, 等. 独柱墩桥梁上部结构抗倾覆稳定性分析[J]. 太原科技大学学报, 2019, 40(4): 316—322.
- [3] XIONG W, CAI C S, KONG B, et al. Overturning-collapse modeling and safety assessment for bridges supported by single-column piers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(11): 04017084—1—13.
- [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.
- [5] PENG W B, ZHAO H, DAI F, et al. Analytical method for overturning limit analysis of single-column pier bridges [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(4): 04017007.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 李盼到, 张京, 王美. 独柱支承梁式桥倾覆稳定性验算方法研究[J]. 世界桥梁, 2012, 40(6): 52—56.
- [9] SONG G H, CHE D L, LI M H. Overturning axis selection in curved box-girder bridges with single-column piers [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018 (104): 1—9.
- [10] ZHUANG D, XIAO R, JIA L, et al. Failure analysis for overall stability against sliding and overturning of a girder bridge [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109: 104271.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] LUO X. Research on anti-overturning performance of multi-span curved girder bridge with small radius [J]. Acta Mechanica Malaysia, 2017, 1(1): 4—7.
- [15] 吕毅刚, 饶攀, 韩伟威, 等. 独柱墩曲线箱梁桥抗倾覆实用计算方法研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 35—40.
- [16] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTGD60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

收稿日期: 2022-04-05

(上接第 139 页)

明显, 边跨振动轻微。综上, 该桥主梁的竖向振动和扭转振动振型基本以中振动为主, 耦合索塔纵向振动; 主跨边跨多参与横向振动, 耦合索塔的横向振动。各阶频谱图中主频明显, 结构目前整体工作状态良好。

由表 2、表 3 可知: 各阶实测频率与历年测试结果基本一致, 阻尼比与历年测试结果相比较小, 表明目前结构的整体刚度未出现较明显变化, 约束(支撑)体系亦无明显变化。有限元模型计算各阶振型出现的顺序与实测各阶振型出现的顺序不完全一致, 对有限元模型还需不断进行修正。

5 结论

(1) 汕头碧石大桥各阶振型以主梁主跨振动为主, 边跨多参与横向振动, 实测结构横向一阶振动以主梁主跨的平面摆动为主。

(2) 各阶实测频率与历年测试结果基本一致, 阻尼比与历年测试结果相比较小, 表明目前结构的整体刚度未出现明显变化, 约束(支撑)体系亦无明显变化; 各阶频谱图中主频明显, 表明结构目前整体工作状态良好。

(3) 有限元模型计算各阶振型出现的顺序与实测各阶振型出现的顺序不完全一致, 说明有限元模型还需不断修正, 与实测情况一致后才能作为该桥的基准有限元模型。

参考文献:

- [1] 长安大学. 公路桥梁荷载试验规程: JTGT J21—01—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [2] 湖南中大建设工程检测技术有限公司. 汕头碧石大桥 2018 年度全桥常规(定期)检测报告[R]. 长沙: 湖南中大建设工程检测技术有限公司, 2018.

收稿日期: 2022-01-13