

曲率半径变化对曲线梁桥墩顶荷载特性影响分析

张桂通, 郭森, 赵昌建, 冯步文, 何舒法

(长安大学公路学院, 陕西西安 710064)

摘要:在现代化桥梁建设中,曲线梁桥应用越来越多,曲线梁桥由于“弯扭耦合”效应的存在使其墩顶的荷载特性受力比较复杂。以某曲线梁桥为例,运用 Midas civil 针对曲线梁桥分别从恒荷载、温度力、制动力、预应力、移动荷载等方面进行分析,得到各种荷载作用下曲线梁桥墩顶荷载分布情况,为后续曲线梁桥下部结构设计提供工程参考。

关键词:曲线梁桥;墩顶荷载特性;曲率半径;有限元模拟

中图分类号:U445 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5322(2020)01-0050-07

西部基础设施面貌、交通便利程度日益改善,为了避免山区桥梁建设对河谷生态环境造成破坏,修建高墩大跨桥梁的路线设计越来越多地选择在傍山陡坡地段方式。曲线梁桥适应山区地形条件能力强,但是由于“弯扭耦合”效应的存在使其下部结构的墩顶荷载特性较同等跨径直线梁桥复杂^[1-2]。

1 依托工程结构概况

通常直梁桥下部结构承受的荷载主要有恒荷载、温度力、制动力等等,但是曲线梁桥下部结构受力相对复杂,还要承受由预应力筋张拉产生的径向力和桥面汽车荷载所产生的离心力等荷载^[3-4]。

本文依托工程的预应力混凝土 3 跨连续梁桥,跨径为 22.97 m+35 m+22.97 m,箱梁截面形式为单箱双室,顶底板宽度分别为 9.25 m、6.5 m,梁高 2.1 m,采用软件 Midas civil 中的梁格法对其模拟分析^[5-6]。研究在不同荷载组合下的墩顶受力性能,有限元模型如图 1 所示。

2 下部结构墩顶竖向支座反力特性分析

曲线梁桥由于“弯扭耦合”效应的存在使其墩顶竖向支反力分布特征与同等跨径直线梁桥有很大不同,主要表现为内外侧支座反力存在差异。



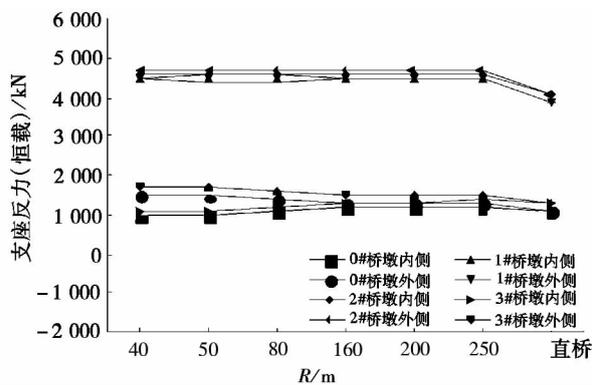
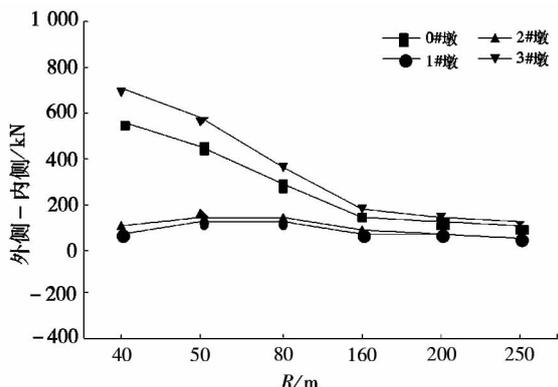
图 1 曲线梁桥 Midas 有限元模型
Fig 1 Midas finite element model of curved beam bridge

本节着重分析在恒荷载、温度梯度、预应力荷载和移动荷载作用下三跨连续曲线梁桥下部结构墩顶竖向支反力随曲率半径不同的分布规律及变化特点。

2.1 恒荷载工况

恒荷载主要考虑上部结构自重、二期桥面铺装以及钢筋混凝土防撞护栏的重量对墩顶荷载特性的影响。

由图 2 可知,曲率半径的减小使得边墩外侧支座竖向反力增大、内侧支座竖向反力减小并且边墩外侧、内侧支座竖向反力差值越来越大。中墩内外侧竖向支反力变化特点在曲率半径 50 m~250 m 时与边墩变化特点类似,在曲率半径由 50 m 减小到 40 m 时内侧支反力增大,外侧支反力减小,导致外侧较内侧支座反力差值逐渐变小。从图 3 可知,曲线梁桥在恒荷载作用下边墩竖向支反力差值变化对曲率半径变化的敏感性比中墩明显。

图2 恒载作用下桥墩顶反力(F_z)分布图Fig 2 Distribution diagram of pier top reaction (F_z) under constant load图3 桥墩顶内外侧支反力(F_z)差值分布图Fig 3 Distribution diagram of the difference between the internal and external side support reaction forces (F_z) of the pier top

2.2 预应力荷载工况

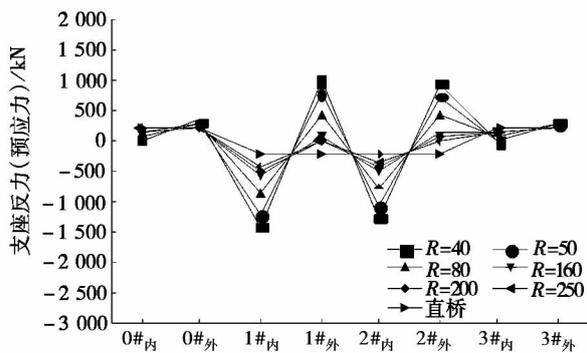
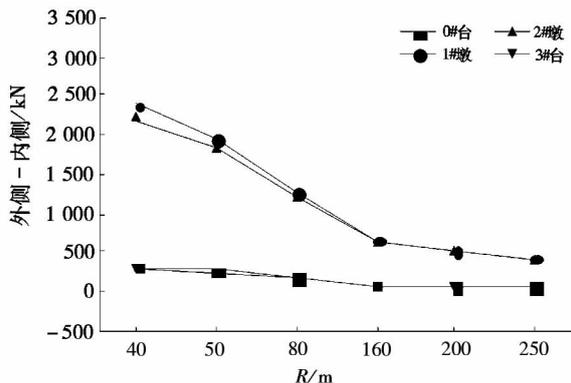
由于曲线预应力钢束的布置是引起墩顶荷载分布特征变化的典型因素,预应力的作用使得曲线梁桥在发生竖向变位的同时还会引起横桥向的变位^[6]。

从图4可知,仅在预应力荷载作用下,曲率半径改变时边墩与中墩支反力变化规律一致,即曲率半径增大,外侧支座与内侧支座的差值逐渐减小,支反力表现为由内侧支反力受拉,外侧支反力受压变为内、外侧支反力均受拉。与同等跨径直线梁桥相比,边墩内、外侧支反力均受压且外侧逐渐增大,内侧逐渐减小。

预应力荷载作用下墩顶内外侧支反力差值分布见图5,从图5中可以发现,中墩内、外侧支反力受预应力效应的影响比边墩更为明显。

2.3 温度梯度(升降温)工况

曲率半径的减小会导致曲线梁桥外、内侧弧长的差值增大,在温度荷载作用下会导致内外侧

图4 预应力荷载作用下曲线梁桥墩顶反力(F_z)分布图Fig 4 Distribution diagram of (F_z) at the top of curved beam pier under prestressed load图5 预应力荷载作用下墩顶内外侧支反力(F_z)差值分布图Fig 5 Difference distribution of inner and outer branch reaction force (F_z) of pier top under prestressing load

产生温度变形差,曲线内外侧变形不一致是导致墩顶内外侧竖向支反力分布存在差异的典型因素,本小节针对温度梯度(升温/降温)荷载作用下墩顶支反力分布特点进行研究,从而掌握墩顶的支反力分布规律^[7]。

从图6温度梯度(升温)荷载作用下的墩顶支反力分布情况可以看出,与同等跨径直桥梁桥支反力相比,随着曲率半径的减小,曲线梁桥会在温度梯度(升温)荷载作用下呈现内侧支反力卸载、外侧支反力超载的规律,同时边墩内外侧支反力均受压且外侧支反力逐渐增加而内侧支反力逐渐减小,中墩内侧支反力承受拉力增大,外侧支反力由受拉逐渐转为受压且逐渐增大。

由图7可知,随着曲线半径的减小,内、外侧支反力差值随着曲率半径的减小而逐渐增大,当曲率半径从250 m减小至40 m时,0#边墩

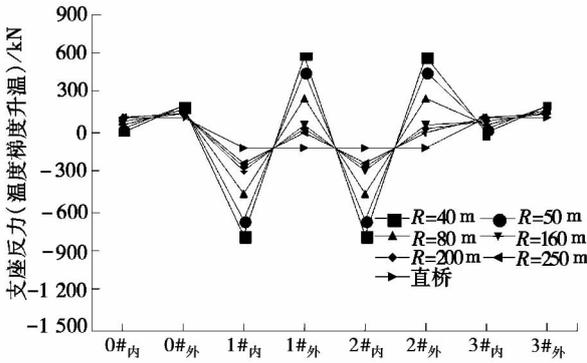


图 6 温度梯度(升温)荷载作用下曲线梁桥墩顶反力(F_z)分布图

Fig 6 Distribution diagram of reaction force (F_z) on pier top of curved girder under the action of temperature gradient (heating up) load

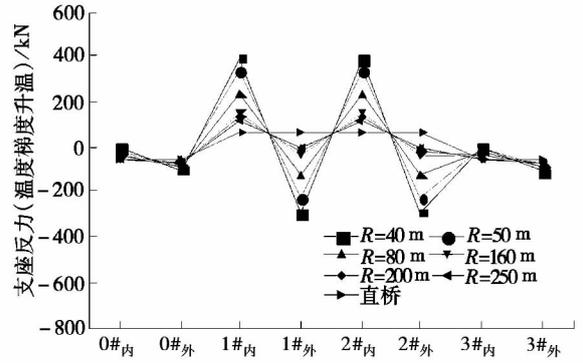


图 8 温度梯度(降温)荷载作用下曲线梁桥墩顶反力(F_z)分布规律

Fig 8 Distribution law of reaction force (F_z) on pier top of curved girder under the action of temperature gradient (cooling) load

的内、外侧支座竖向反力差值从 33 kN 增加至 192 kN,11#中墩的差值从 234 kN 增加到 1 372 kN,中跨墩顶支反力变化趋势较两侧边墩明显。

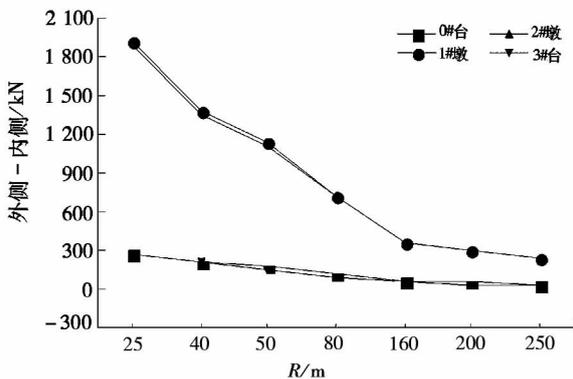


图 7 温度梯度(升温)作用下墩顶内外侧支反力(F_z)差值分布图

Fig 7 Distribution of the difference of the reaction force (F_z) between the inner and outer side of the pier top under the action of temperature gradient (heating up) load

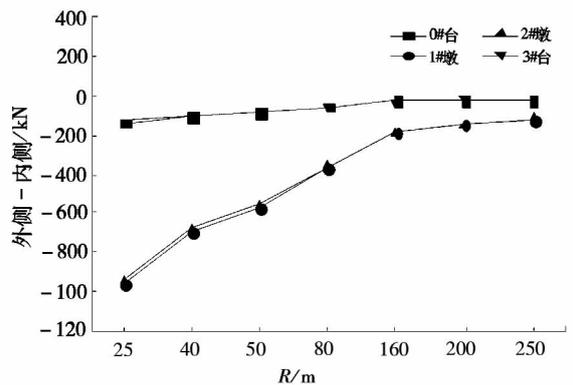


图 9 温度梯度(降温)作用下不同曲线梁桥墩顶内外侧支反力(F_z)差值分布图

Fig 9 Distribution of the difference of the reaction force (F_z) between the internal and external side supports of the pier top with different curved beams under the action of temperature gradient (cooling) load

在温度梯度(降温)荷载作用下三跨连续曲线梁桥在曲率半径变化时墩顶支反力的分布特性统计如图 8、图 9 所示。

从图 6、图 8 温度梯度(升/降温)荷载作用下墩顶支反力分布规律可以看出,与同跨径直梁桥相比较,温度梯度(升温)对曲线梁桥的影响随着曲线半径的减小而越加明显。温度梯度(降温)支反力变化规律与温度梯度(升温)恰好相反,随着曲线半径的减小(圆心角增大)支反力分布规律表现为内侧支座超载、同排外侧支座卸载且出现支座受拉现象,由图 9 可以看出中跨墩顶支反力变化趋势较两侧边墩变化明显,曲率半径

的改变对中墩影响较大。

2.4 移动荷载工况

本节根据依托工程公路桥梁设计等级选择公路—I级荷载,按最不利影响线布载计算在不同移动荷载工况(左偏、中载、右偏)下,随曲率半径的变化各支座竖向反力的变化情况。

从图 10 可以发现,左偏移动荷载 V_{min} 工况下,曲率半径的变化对边墩支反力的影响较中墩明显。由图 11 可以看出,左偏移动荷载 V_{max} 工况下,各墩顶支反力分布特征受曲率半径的改变影响较小。

中载移动荷载工况 V_{min} 下墩顶支反力最小值的变化规律如图 12 所示,其各墩支反力均为负值,边墩内侧支反力与外侧支反力分布特征相反,且内侧支反力最小值的绝对值小于外

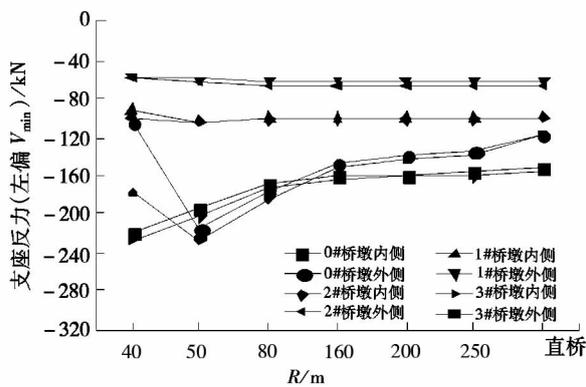


图 10 左偏 V_{min} 各支座反力变化图

Fig 10 Changes of reaction forces of all supports in left-biased V_{min}

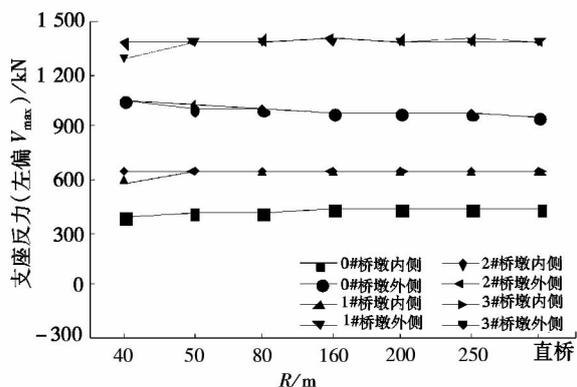


图 11 左偏 V_{max} 各支座反力变化图

Fig 11 Changes of reaction forces of all supports of left-biased V_{max}

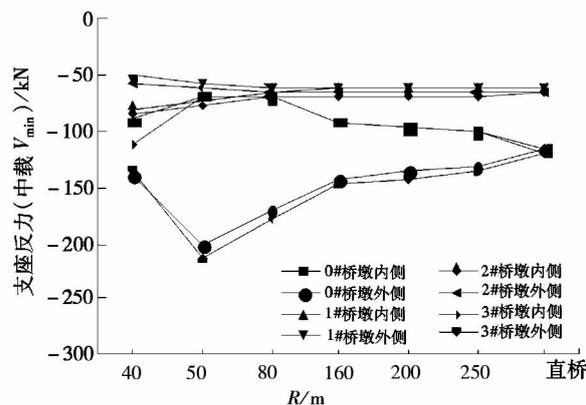


图 12 中载 V_{min} 各支座反力变化图

Fig 12 Change graph of reaction force of each support in mid-load V_{min}

侧支座。中墩外侧支座反力随着曲率半径的增大而减小,内侧支座反力随着曲率半径的增大而增大,边墩支座反力随着曲率半径的减小先表现为增大,后减小。当曲率半径 $R > 160$ m 时可认为支座反力不受曲率半径的影响。

中载移动荷载 V_{max} 工况下支座反力最大值随

曲率半径的变化规律如图 13 所示,边墩外侧支座反力随着曲率半径的增加而减小,中墩外侧支座最大值反力随着曲率半径的增大而增大。边墩内侧支座反力最大值随着曲率半径的增大增大,中墩内侧支座反力最大值受曲率半径的改变影响较小,且从图中可以看出,当曲率半径 $R > 160$ m 时,曲率半径的改变对墩顶支座反力最大值的影响较小。

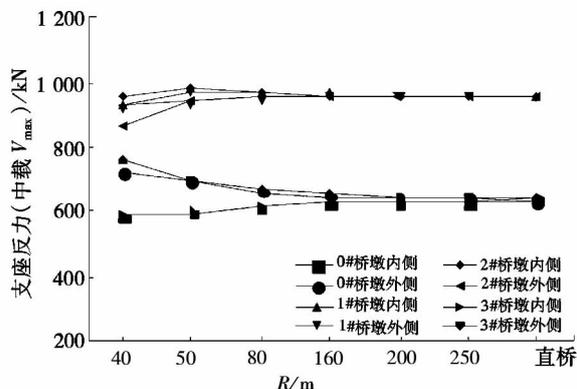


图 13 中载 V_{max} 各支座反力变化图

Fig 13 Change graph of reaction force of each support in mid-load V_{max}

右偏移动荷载工况 V_{min} 下支座反力最小值随曲率半径的变化如图 14 所示,边墩支座反力最小值变化受曲率半径影响较大,边墩外侧支座支反力绝对值随着曲率半径的减小而增大,边墩内侧支座反力绝对值随着曲率半径的减小而减小,中墩支座反力受曲率半径影响较小。

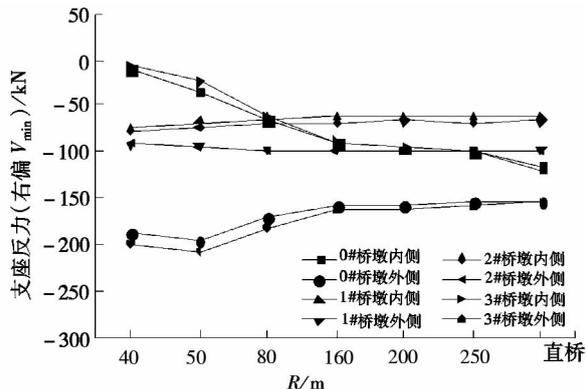


图 14 右偏 V_{min} 各支座反力变化图

Fig 14 Changes of reaction forces of all supports in right-biased V_{min}

曲线梁桥在移动荷载右偏工况下不同曲率半径的支座反力最大值分布图如图 15 所示,从图中可以看出,在此工况下支反力的分布受曲率半径影响较小。

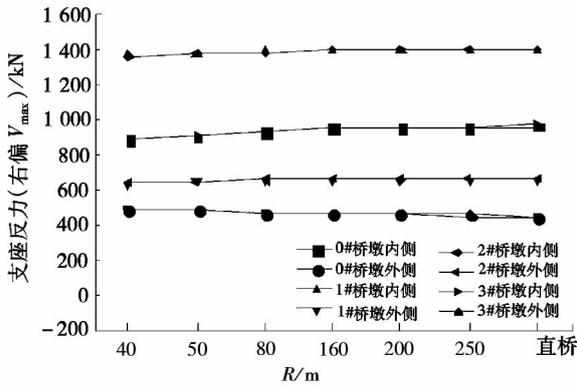


图 15 右偏 V_{max} 各支座反力变化图

Fig 15 Changes of reaction forces of V_{max} supports on the right side

3 下部结构墩顶水平向支座反力特性分析

在横向水平力的作用下,曲线梁桥上部结构将产生横桥向变位,但由于支座的存在使其横向变位受到约束,研究墩顶水平约束力在曲率半径、不同荷载效应下的变化规律对分析下部结构力学行为很有必要^[8]。本节主要考虑了汽车离心力、制动力、曲线预应力钢束引起的径向分力等对曲线梁桥墩顶荷载特性的影响,分析其对横向水平力的影响及曲率半径改变时墩顶水平向约束力的变化特点^[9]。

3.1 汽车离心力作用

汽车离心力作用在桥面上使曲线梁桥上部结构发生曲线外侧滑移,支座的设置约束了横桥向的滑移^[7]。本文关于汽车离心力的计算根据《公路桥梁设计规范答疑汇编》^[10]的相关解释,按现行通用规范第 4.3.1 条^[11]规定的 q_k 和 P_k ,其中 P_k 值按一联桥梁中的跨径取值,并转化为与 q_k 一样均匀分布于一联桥面上,然后计算由一个桥墩承受的竖向力,再乘以离心力系数 C ,此值即认为是作用于该桥墩的离心力,且不考虑墩横向刚度分配的影响。当曲线梁桥按多车道设计时需按规范要求对其所受汽车荷载效应进行折减。

离心力系数按下式计算:

$$C = \frac{v^2}{127R} \quad (1)$$

式中: v 为设计速度, km/h, 应按桥梁所在路线设计速度采用; R 为曲率半径, m。

根据依托工程资料,桥梁设计速度 80 km/h, 由式(1)可计算得到曲线梁桥不同曲率半径下的

离心力系数如表 1 所示,参照文献[10]中计算方法可求出汽车荷载引起的离心力。

表 1 汽车荷载引起的离心力系数计算表
Table 1 Calculation table of centrifugal force coefficient caused by automobile load

曲率半径 R/m	离心力系数 C
40	0.126
50	0.101
80	0.063
160	0.031
200	0.025
250	0.020

首先,计算由一个桥墩承受的竖向力,再乘以离心力系数 C ,此值即为作用于该桥墩的离心力。计算可得,墩顶支反力分布情况如图 16 所示,汽车荷载引起的离心力值如图 17 所示。

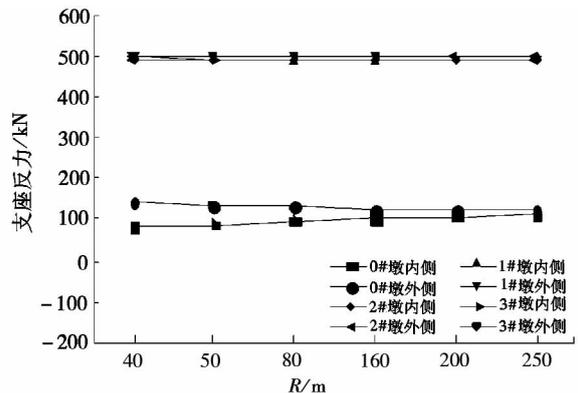


图 16 桥墩承受的竖向力分布图

Fig 16 Vertical force distribution diagram of bridge pier bearing

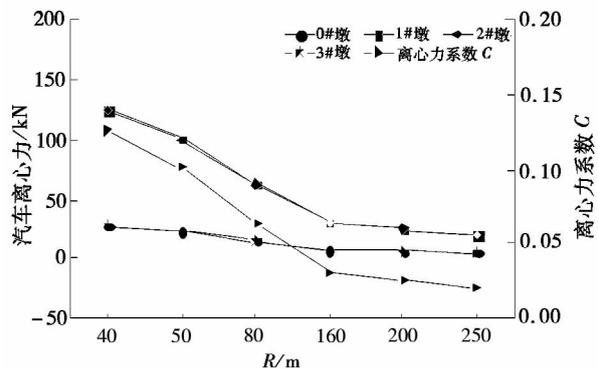


图 17 汽车荷载引起离心力效应分布图

Fig 17 Distribution diagram of centrifugal force effect caused by vehicle load

由式(1)可知离心力系数不仅与曲线梁桥曲率半径有关,且与速度的二次方成正比。由图 17 可知,离心力随着曲率半径的减小而增大,边墩与中

墩由于离心力所引起的墩顶横桥向支座反力均随曲率半径的减小而增大,汽车离心力对中墩的影响较边墩大。

3.2 预应力荷载

曲线梁桥中的预应力钢束的径向分力使得梁体上部结构发生径向偏位,然而横桥向约束的存在使其变位得到限制,从而在下部结构墩顶产生横桥向水平反力,使下部结构在横桥向作用力影响下发生横桥向变位。本节分析结构预应力径向分力所引起的墩顶横桥向支座反力随曲率半径变化的特点。

根据墩顶支座布置情况可知2#墩内侧支座布置固定支座,同排外侧支座顺桥向约束(D_x)、竖向约束(D_z),由图18可知,曲率半径的减小使得各墩横桥向反力绝对值均增大,当曲率半径大于160 m时,墩顶水平支座反力基本不受曲线半径的影响。

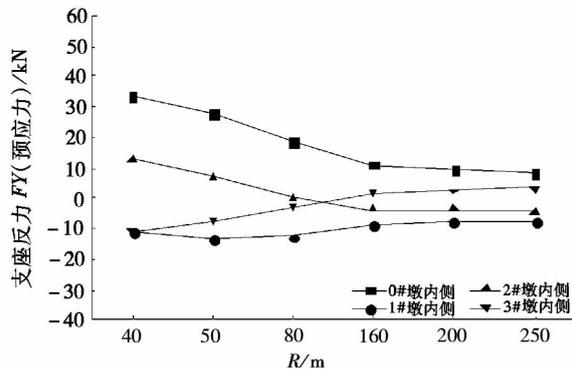


图18 预应力荷载作用下墩顶反力(F_Y)

Fig 18 Pier top reaction under prestressed load (F_Y)

3.3 汽车制动力

在直线梁桥中汽车制动力在支座上仅引起水平纵向(顺桥向)反力,由于曲线梁桥结构特点以及支座设置等因素,使得汽车制动力作用在桥面

时导致桥梁横桥向亦发生变位,由于其变位受到支座约束所以会在墩顶引起径向水平分力。本小节对曲率半径发生改变时汽车制动力引起的支座水平反力的变化特征进行研究,分析结果如图19所示。在汽车制动力作用下,边墩墩顶水平方向反力相对中墩受曲率变化的敏感性要小的多。

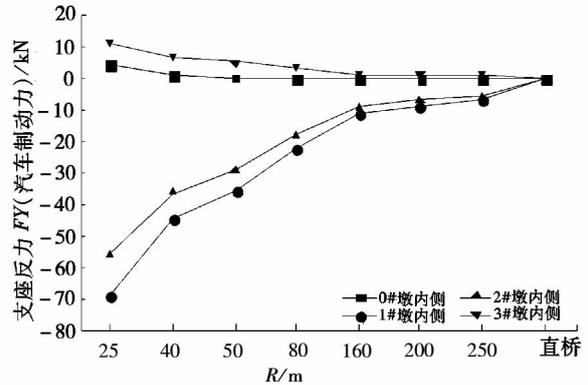


图19 汽车制动力作用下墩顶反力(F_Y)

Fig 19 Pier top reaction force (F_Y) under automotive braking force

4 结语

(1) 分析了几种常见荷载工况下,曲率半径对改变墩顶竖向支反力分布特性的影响。恒荷载作用下曲率半径的变化对边墩荷载分布特性的影响较大,对中墩影响较小;预应力荷载、温度梯度(升降温)、基础变位作用下曲率半径对中墩支反力分布特性影响较大,对边墩影响较小。

(2) 对墩顶水平力分布特性影响较为显著的荷载工况如汽车离心力、预应力荷载、汽车制动力进行了分析。发现边墩与中墩由于离心力所引起的墩顶横桥向支反力均随着曲率半径的减小而增大;汽车制动力作用下墩顶水平力绝对值均随着曲率半径的增大而减小;且随曲率半径的变化汽车离心力、汽车制动力对中墩的影响较边墩大。

参考文献:

- [1] 孙宪魁,杨响,王磊,等.我国混凝土弯梁桥的现状与发展[J].公路交通科技(应用技术版),2010,6(5):146-149.
- [2] 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.
- [3] 梁甜甜.曲线梁预应力效应试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [4] 韩星.曲线梁桥“弯扭耦合”效应影响因素分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [5] 牛小龙.梁格法在斜、弯桥分析中的应用[D].成都:西南交通大学,2008.
- [6] 邢世玲,徐秀丽,李枝军,等.墩-梁固结的曲线梁桥预应力作用试验研究[J].桥梁建设,2018,48(2):49-54.
- [7] 郑国华.曲线梁桥日照温度场和离心力效应研究[D].广州:广州大学,2018.
- [8] 张彦飞.独柱墩桥梁横向稳定影响因素研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(12):252-255.
- [9] 秦艳辉.曲线连续箱梁横向偏位成因分析[J].交通科技,2017(5):22-25.

- [10] 中交公路规划设计院有限公司标准规范研究室. 公路桥梁设计规范答疑汇编[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [11] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

Analysis of the Influence of Curvature Radius Change on Load Characteristics of Pier Top of Curved Beam

ZHANG Guitong, GUO Sen, ZHAO Changjian, FENG Buwen, HE Shufa
(College of highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

Abstract: In the construction of modern bridges, curved beam bridges are used more and more. Due to the "bending-torsion coupling" effect, the load characteristics of the curved beam bridge are more complicated. Taking a curved beam bridge as an example, Midas civil is used to analyze the dead load, temperature force, braking force, prestress, moving load and other aspects of the curved beam bridge. The distribution of the top load of the curved beam bridge pier under various loads is obtained, which provides engineering reference for the subsequent design of the substructure of the curved beam bridge.

Keywords: curved beam bridge; load characteristics of pier top; radius of curvature; finite element simulation

(责任编辑:张英健)

(上接第 12 页)

参考文献:

- [1] 张勇如. 工业废水排放对居民健康的影响:基于 CHNS 调查数据的分析[D]. 厦门:厦门大学,2017.
- [2] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴:2018[M]. 北京:中国统计出版社, 2018.
- [3] 陆隽,胡晓雨,姚敏. 江苏省淮河流域片入河排污口现状分析与评价[J]. 江苏水利,2018(6):38-41.
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 2016 中国环境状况公报[Z]. 2017.
- [5] 王佳彬. 浅谈入河排污口设置审批及批后监管在水污染防治中发挥的作用[J]. 上海水务,2018,34(3):55-57.

Problem Analysis and Countermeasure Discussion on River-entry Sewage Outlet in the Yangtze River Basin

XIE Changhuai, XU Weibing
(Anhui Authority of Yangtze River, Wuhu Anhui 241000, China)

Abstract: The analysis shows that the shortage of water resources and serious pollution are the two most prominent problems of the Yangtze River water environment, while the Yangtze River water environment treatment focuses on the coastal pollution control. In this paper, the existing problems in the management of sewage outfalls are summarized, and practical measures are put forward to provide reference for the regulation and supervision of sewage outfalls in the Yangtze River Basin.

Keywords: Yangtze River Basin; sewage outlet; discussion

(责任编辑:熊璐璐)