

PC 曲线梁桥水平约束布置及其力学性能

滕小竹

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 通过对 PC 曲线梁桥两种常用支承水平约束布置方式的 8 种曲率半径的参数分析, 研究了 PC 曲线梁桥水平约束布置及其力学性能, 相关结论可为设计人员提供参考。

关键词: PC 曲线梁; 水平约束布置; 力学性能

中图分类号: U448.21+3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)09-0053-06

0 引言

曲线梁桥的支座布置方式, 直接影响到全桥的内力分布, 是曲线梁桥设计中十分重要的问题。已有曲线连续梁桥的支座布置文献主要研究其竖向布置差异, 即是否采用抗扭支承。常在梁端设置横向抗扭支承, 在中间桥墩设置点铰支承(单支座, 见图 1), 在复杂的活载及温度梯度等荷载作用下, 中间墩柱单铰支承并不能起到主动调节扭转变形的作用, 在一些极端情况下甚至会发生侧倾事故。为了避免侧倾案例再度发生, 近年来新建的曲线连续梁桥中, 中间墩独柱单铰支承形式(单支座)逐渐被抗扭支承(双支座)所取代。

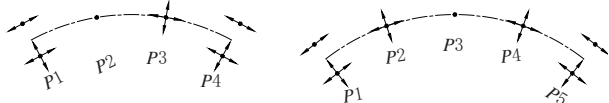


图 1 传统弯桥支座形式

目前混凝土曲线梁桥抗扭支承布置依据水平约束方向不同主要有两种: 一种与直线桥布置一致, 见图 2(简称 Z1); 另一种是在边墩选取一个支座约束横向变形, 挑选一个中间墩约束纵向变形, 见图 3(简称 Z2)。

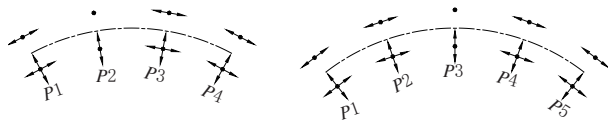


图 2 弯桥支座布置形式 1(简称 Z1)

本文通过两种不同水平约束支座布置形式下, 2 种墩高($H=1\text{ m}$ 、 8 m) 8 种不同曲线半径($R=45\text{ m}$ 、 60 m 、 90 m 、 120 m 、 150 m 、 180 m 、 240 m 、 300 m) 的

收稿日期: 2021-11-11

作者简介: 滕小竹(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

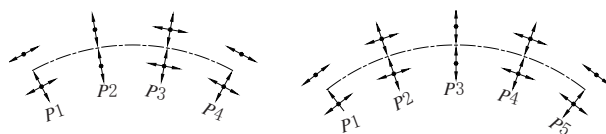


图 3 弯桥支座布置形式 2(简称 Z2)

参数分析, 研究水平约束布置形式对 PC 曲线连续梁桥力学性能的影响; 其他计算参数: $3\times 30\text{ m}$ 等高预应力连续梁(对称配束), 桥宽 $B=9.0\text{ m}$ 。

1 两种支承布置主梁力学性能

1.1 预应力效应

从图 4、图 5 可知, 预应力效应产生的主梁横向弯矩与支座水平布置形式有关, Z1 主梁横向弯矩远大于 Z2; Z1 主梁横向弯矩全桥方向一致, 从边墩到中墩逐渐增大, 中跨变化较小; Z2 主梁横向弯矩以纵向制动中墩为界, 从边墩到制动中墩数值增大方向相反, 在制动中墩突变; Z1 和 Z2 的主梁横向弯矩均随曲线半径减小而增大。

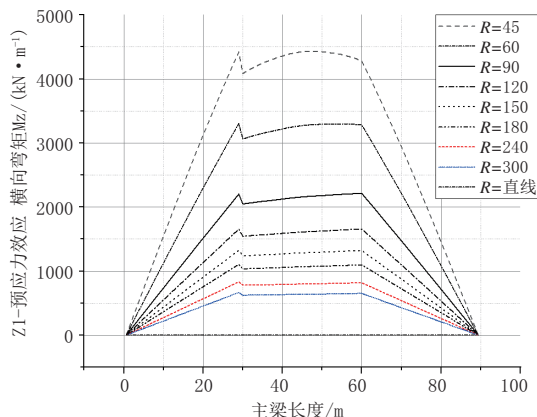
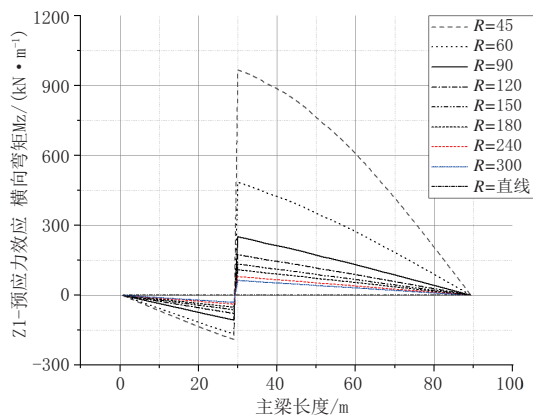
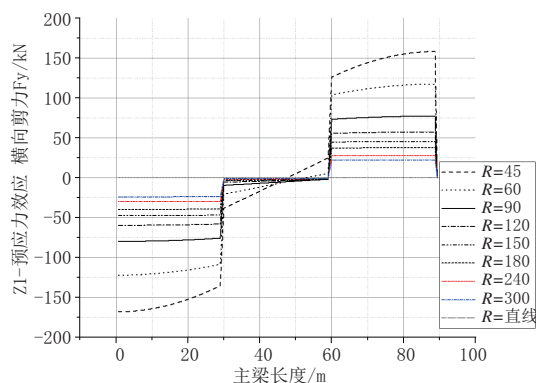
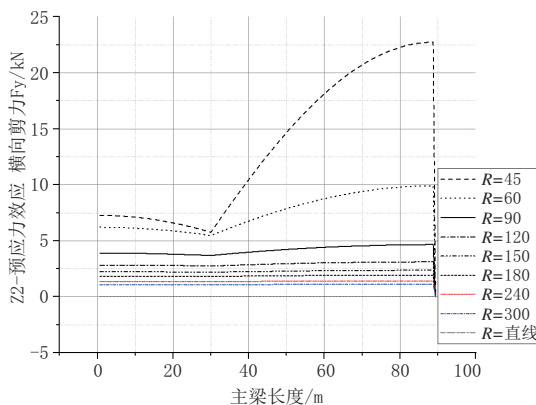


图 4 预应力作用 Z1 主梁横向弯矩 M_z (单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

从图 6、图 7 可知, 预应力效应产生的主梁横向剪力与支座布置形式有关, Z1 主梁横向剪力远大于 Z2; Z1 两个边跨主梁横向剪力方向相反, 从边墩到中

图5 预应力作用 Z1 主梁横向弯矩 M_z (单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

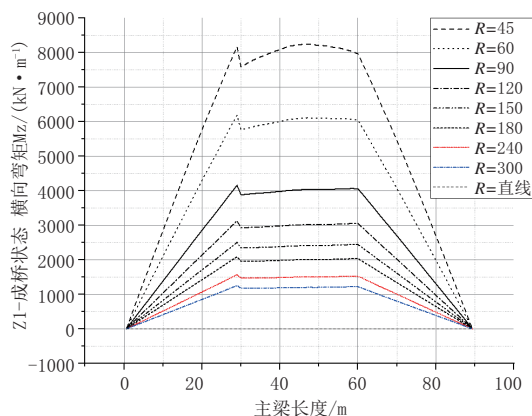
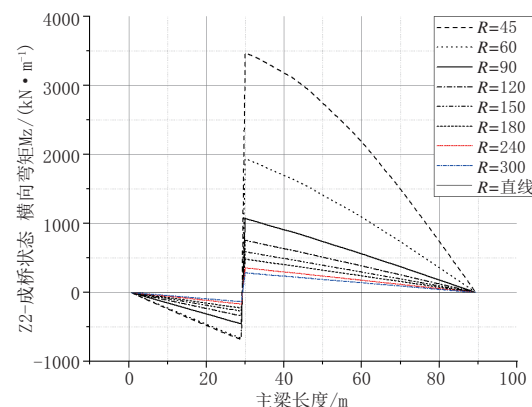
墩稍有减小;Z2 主梁横向剪力全桥方向一致,以纵向制动中墩为界,从边墩到制动中墩数值减小;Z1 和 Z2 的主梁横桥向剪力均随曲线半径减小而增大。

图6 预应力作用 Z1 主梁横向剪力 F_y (单位: kN)图7 预应力作用 Z2 主梁横向剪力 F_y (单位: kN)

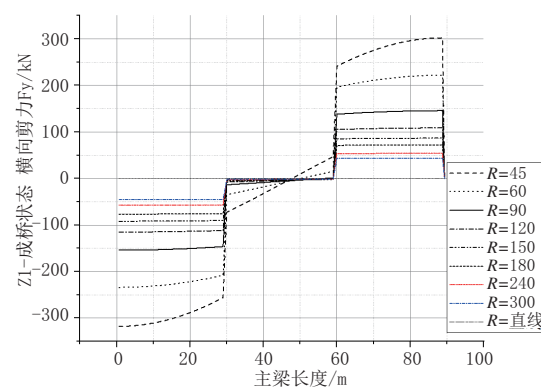
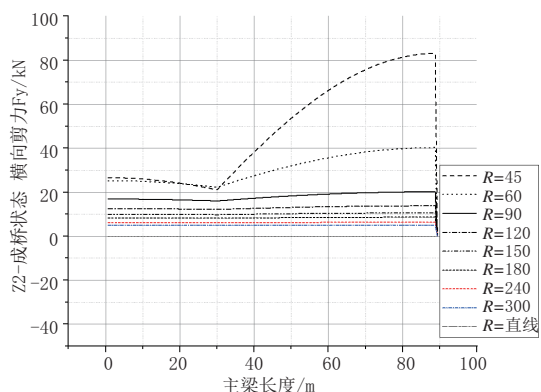
1.2 成桥状态主梁内力

从图 8、图 9 可知,成桥状态下,Z1 主梁横桥向弯矩远大于 Z2;Z1 横向弯矩全桥方向一致,从边墩到中墩逐渐增大,中跨变化较小;Z2 横向弯矩以纵向制动中墩为界,从边墩到制动中墩数值增大方向相反,在纵向制动中墩突变;Z1 和 Z2 的主梁横桥向弯矩均随曲线半径减小而增大。

从图 10、图 11 可知,成桥状态下,边跨相同位置 Z1 的主梁横向剪力大于 Z2;Z1 两个边跨主梁横向剪力方向相反,从边墩到中墩稍有减小;Z2 主梁横向

图8 成桥状态 Z1 主梁横向弯矩 M_z (单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)图9 成桥状态 Z2 主梁横向弯矩 M_z (单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

剪力全桥方向一致,以纵向制动中墩为界,从边墩到制动中墩数值减小;Z1 和 Z2 的主梁横向剪力均随半径减小而增大。

图10 成桥状态 Z1 主梁横向剪力 F_y (单位: kN)图11 成桥状态 Z2 主梁横向剪力 F_y (单位: kN)

从图 12、图 13 可知,成桥状态下,Z1 和 Z2 的主梁扭矩在跨中均为 0,在桥墩处较大且有较大突变,边墩位置主梁扭矩大于中墩位置;Z1 和 Z2 的主梁扭矩均随半径增大变小;相同曲率半径 Z1 和 Z2 的主梁扭矩基本一致。

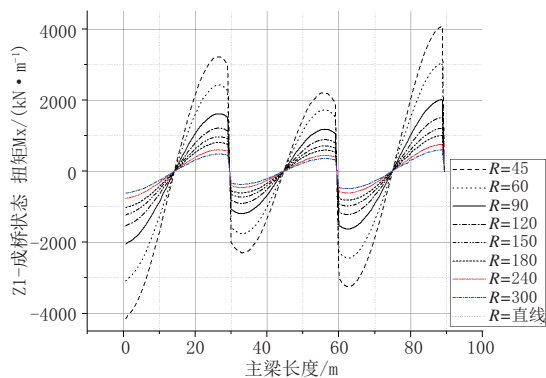


图 12 成桥状态 Z1 主梁扭矩 Mx(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

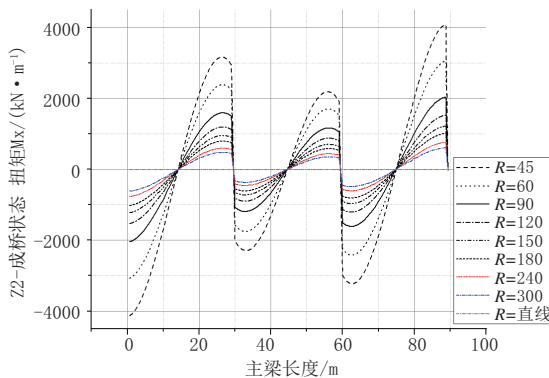


图 13 成桥状态 Z2 主梁扭矩 Mx(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

1.3 汽车荷载效应

从图 14、图 15 可知,汽车荷载作用下,PC 曲线桥梁主梁竖向最小位移(向下)Dz 因曲线半径不同稍有差异,半径越小,位移数值越大;相同曲率半径支座 Z1 和 Z2 的主梁竖向位移基本一致。

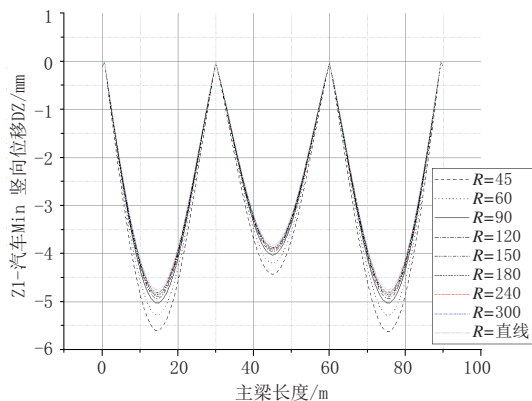


图 14 汽车荷载 Min Z1 主梁竖向位移 Dz(单位: mm)

从图 16~17 可知,汽车荷载作用下,PC 曲线桥梁主梁横向弯矩随曲线半径减小而增大;与 PC 直线桥梁相比,Z1 横向弯矩大致对称,在纵向制动墩位置有突变,半径越小突变越大;Z2 的主梁横向弯矩不对

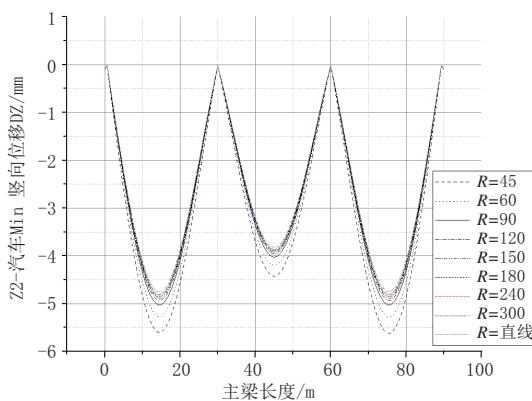


图 15 汽车荷载 Min Z2 主梁竖向位移 Dz(单位: mm)

称,在纵向制动墩位置突变较大,半径越小突变越大。

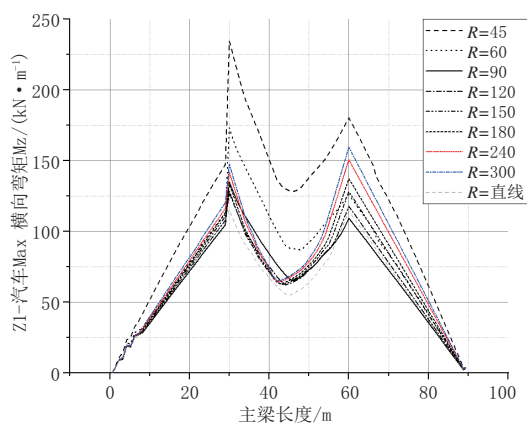


图 16 汽车荷载 Max Z1 主梁横向弯矩 Mz(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

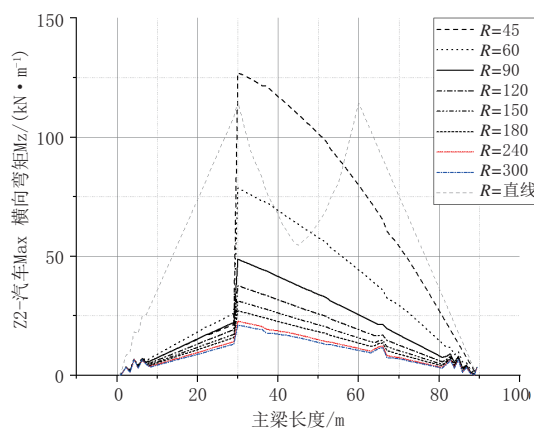


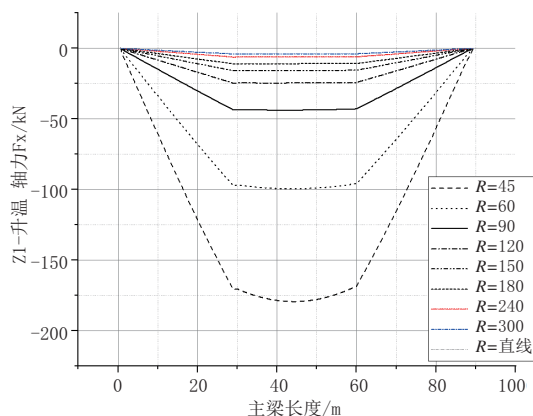
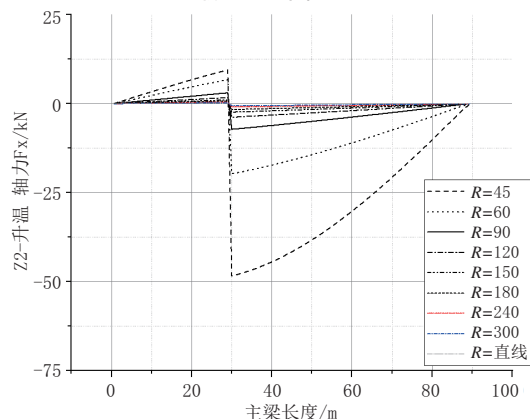
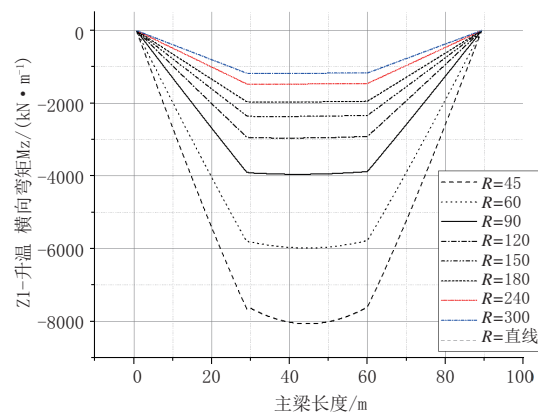
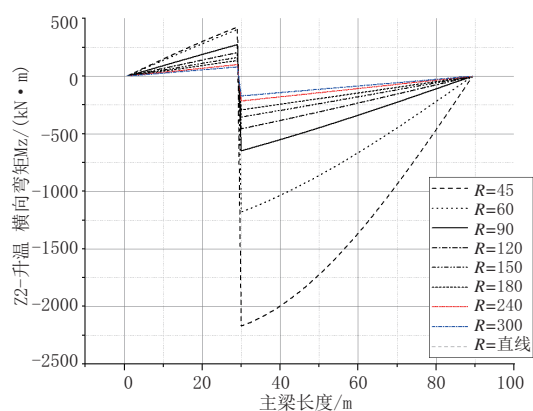
图 17 汽车荷载 Max Z2 主梁横向弯矩 Mz(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

1.4 升温荷载效应

从图 18、图 19 可知,升温作用下,PC 曲线桥梁主梁轴力随曲线半径减小显著增大;Z1 主梁轴力大致对称,Z2 的主梁轴力不对称,在纵向制动墩位置突变较大,半径越小突变越大。

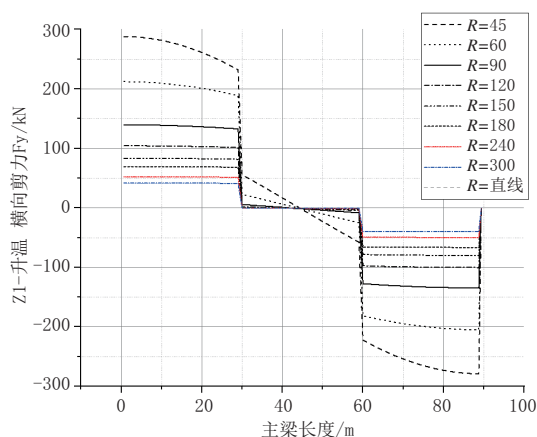
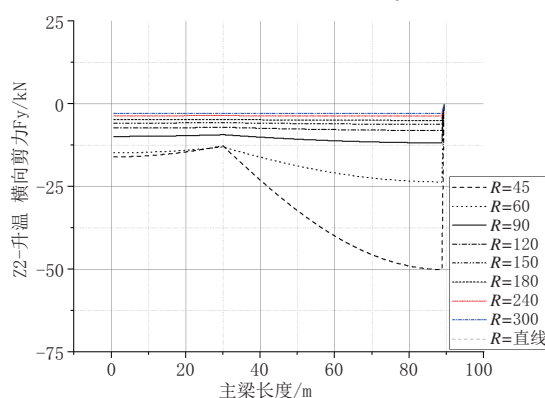
从图 20、图 21 可知,升温荷载作用下 PC 曲线桥梁主梁横向弯矩随曲线半径减小显著增大;Z1 横向弯矩大致对称,Z2 的主梁横向弯矩不对称,在纵向制动墩位置突变较大,半径越小突变越大。

从图 22、图 23 可知,升温荷载作用下,边跨相同

图 18 升温荷载 Z1 主梁轴力 F_x (单位:kN)图 19 升温荷载 Z2 主梁轴力 F_x (单位:kN)图 20 升温荷载 Z1 主梁横向弯矩 M_z (单位:kN·m)图 21 升温荷载 Z2 主梁横向弯矩 M_z (单位:kN·m)

位置 Z1 的主梁横向剪力大于 Z2; Z1 两个边跨主梁横向剪力方向相反, 从边墩到中墩稍有减小; Z2 主

梁横向剪力全桥方向一致, 以纵向制动中墩为界, 从边墩到制动中墩数值减小; Z1 和 Z2 的主梁横向剪力均随半径减小而增大。

图 22 升温荷载 Z1 主梁横向剪力 F_y (单位:kN)图 23 升温荷载 Z2 主梁横向剪力 F_y (单位:kN)

2 两种支承布置反力响应

2.1 预应力效应

从图 24、图 25 可知, 预应力作用对曲线梁各桥墩的曲线外侧支座产生压力(进行加载), 对曲线内侧支座产生拉力(进行卸载); 预应力作用对支座的加载和卸载效应随曲线半径增大逐渐减小。

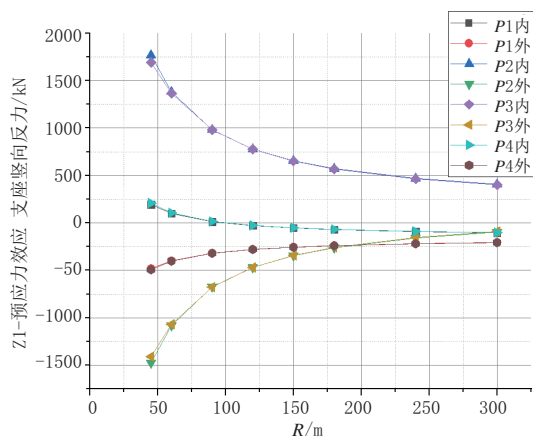


图 24 预应力作用 Z1 支座竖向反力与半径关系图(单位:kN)

从图 26、图 27 可知, 预应力作用对曲线梁桥制动支座水平约束方向产生水平力, Z1 的横桥向水平

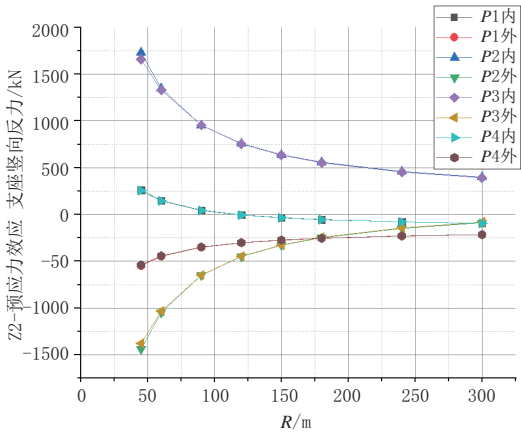


图 25 预应力作用 Z2 支座竖向反力与半径关系图(单位:kN)

力数值较大,边墩和中墩制动支座横向水平力方向相反,边墩制动支座横向水平力数值较大;Z2 的横桥向水平力较小,纵向水平力较大;预应力作用产生支座水平力随曲线半径减小而增大。

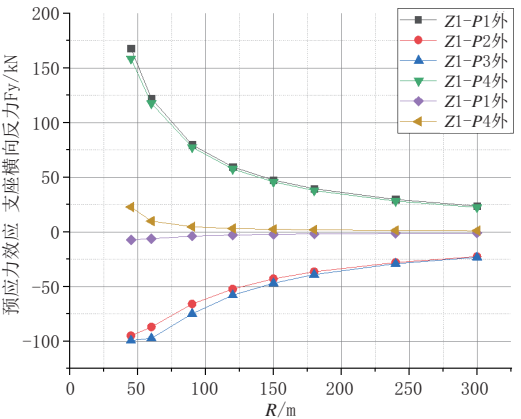


图 26 预应力作用 支座横向水平力与半径关系图(单位:kN)

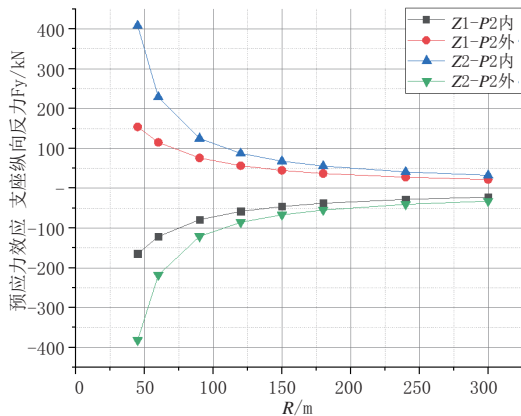


图 27 预应力作用 支座纵向水平力与半径关系图(单位:kN)

2.2 成桥状态反力

从图 28 可知,成桥状态,曲线梁桥制动支座水平约束方向均产生水平力,Z1 每个桥墩设置横桥向制动支座,产生横桥向水平力,对下部结构产生影响,Z2 两个边墩设置横桥向制动支座;Z1 的横桥向水平力数值较大,边墩和中墩制动支座横向水平力方向相反,边墩制动支座横向水平力数值较大;Z2 的

横桥向水平力较小;支座横向水平力随曲线半径增大逐渐减小。

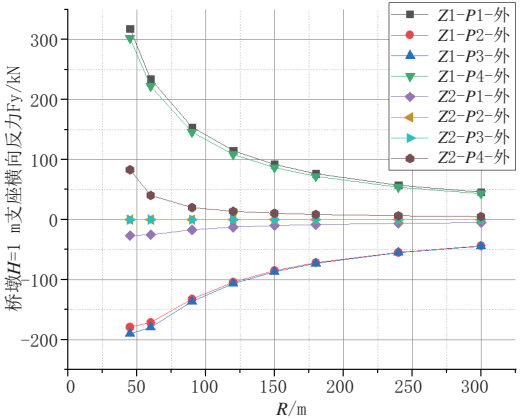


图 28 成桥状态 支座横桥向水平力与半径关系图(单位:kN)

从图 29 可知,成桥状态,Z2 纵桥向制动支座产生较大方向相反的纵向水平力,导致制动墩(P2)产生的较大的扭矩,制动支座纵向水平力大小随曲线半径增大逐渐减小;Z1 纵桥向制动支座产生的纵向水平力较小,纵桥向制动墩(P2)产生的扭矩较小,其大小随曲线半径增大很快趋近于零;两种支座布置形式制动支座产生的纵向水平力随桥墩高度增大显著减小。

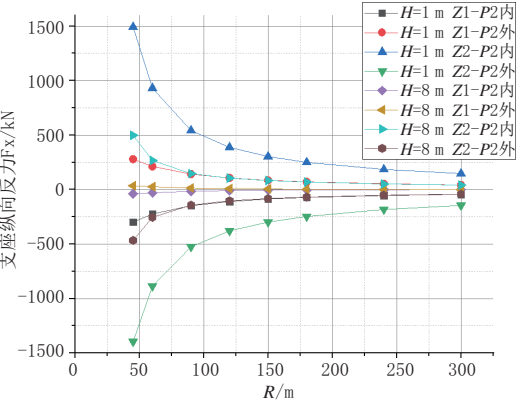


图 29 成桥状态 支座纵桥向水平力与半径关系图(单位:kN)

2.3 升温荷载效应

从图 30 可知,升温荷载作用下,制动支座位移约束方向产生水平力。Z1 每个桥墩设置横桥向制动支座,产生横桥向水平力,对下部结构产生影响;Z2 两个边墩设置横桥向制动支座。三跨联混凝土曲线梁桥两种支座布置形式,制动支座横桥水平力随曲线半径减小而增大。

从图 31 可知,升温荷载作用下,Z2 纵桥向制动支座产生较大方向相反的纵向水平力,Z1 纵桥向制动支座产生的纵向水平力较小;两种支座布置形式制动支座产生的纵向水平力随桥墩高度增大显著减小。

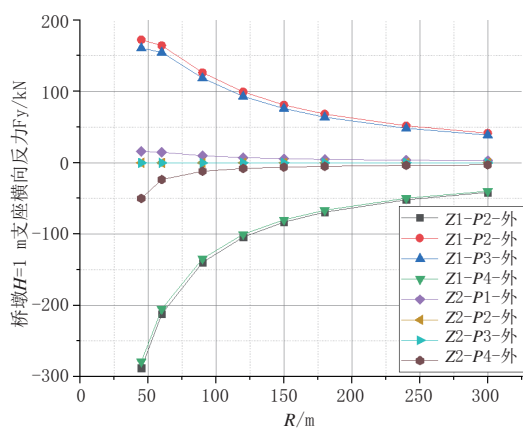


图 30 升温作用 支座横向水平力与曲线半径关系图 (单位: kN)

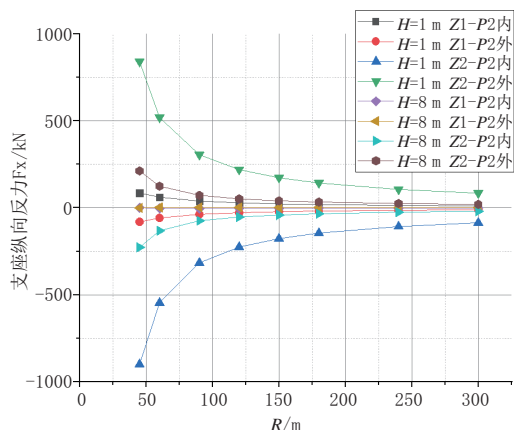


图 31 升温作用 支座纵向水平力与曲线半径关系图 (单位: kN)

2.4 汽车荷载效应

从图 32~ 图 35 可知,汽车荷载作用下,PC 曲线梁桥边墩内外支座反力差异较大,中墩内外支座反力差异较小;相同曲率半径 Z1 和 Z2 的支座竖向反力相差不大。

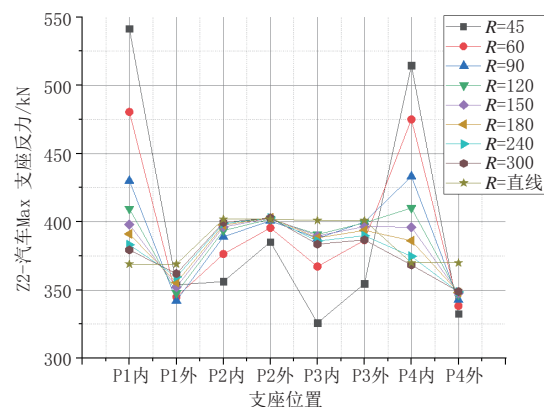


图 32 汽车荷载 Max Z1 支座竖向反力与半径关系图 (单位: kN)

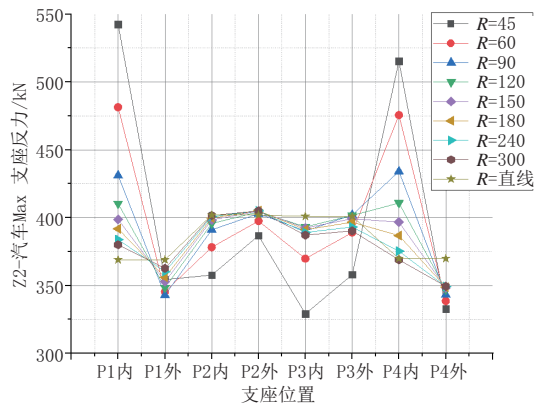


图 33 汽车荷载 Max Z2 支座竖向反力与半径关系图 (单位: kN)

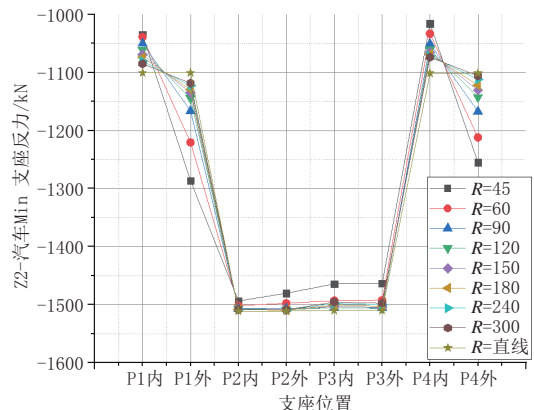
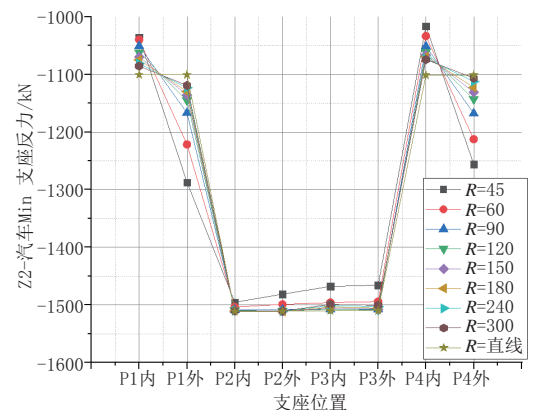


图 34 汽车荷载 Min Z1 支座竖向反力与半径关系图 (单位: kN)

图 35 汽车荷载 Min Z2 支座竖向反力与半径关系图 (单位: kN)
主梁横桥向剪力和弯矩均随主梁曲线半径减小而增大;

(2)采用 Z1 在成桥状态和温度荷载等作用下,制动支座位移约束方向会产生较大的横桥向水平力,进而导致桥墩墩底较大的横桥向水平力和弯矩;相同荷载作用下 Z2 横桥向剪力和横桥向弯矩均远小于 Z1;但是 Z2 的纵桥向制动墩支座的纵向水平力均远大于 Z1;两种支座布置形式,桥墩横桥向剪力和弯矩均随主梁曲线半径减小而增大。

(3)PC 曲线梁桥采用 Z1 支座布置形式需要重点考虑每个桥墩横桥向制动支座对主梁约束导致的主梁横桥向剪力、弯矩,以及对下部桥墩的横桥向剪

3 结 语

(1)采用 Z1 每个桥墩均有横桥向制动支座,在预应力效应、成桥状态和温度荷载等作用下,主梁产生较大的横向剪力和横桥向弯矩;Z2 主梁产生的横向剪力和横桥向弯矩均远小于 Z1;两种支座布置形式,

(3)基于收集到的实验数据和国内外学者提出的公式,整合后通过数值模拟进行验证,认为结果吻合良好,可作为组合连接件设计计算的参考。

参考文献:

- [1] 肖林,李小珍,卫星.PBL 剪力键静载力学性能推出试验研究[J].中国铁道科学,2010,31(3):15-20.
- [2] 杨欣松,王志宇,付磊,等.PBL 剪力连接件的推出及拔出试验力学性能研究[J].四川理工学院学报(自然科学版),2017,30(2):71-76.
- [3] 宗周红,车惠民.剪力连接件静载和疲劳试验研究[J].福州大学学报(自然科学版),1999,27(6):61-66.
- [4] Dennis L,Ehab E.Behavior of headed stud shear connectors in composite beam[J].Journal of Structural Engineering,2005,131(1):96-107.
- [5] Xue W C,Ding M,Wang H,et al.Static behavior and theoretical model of stud shear connectors[J].Journal of Bridge Engineering,2008,13(6):623-634.
- [6] 赵本露.钢-纤维陶粒混凝土组合梁组合剪力连接件力学性能[D].武汉:武汉科技大学,2019.
- [7] 谢剑,亢二聪,严加宝,等.低温环境下栓钉连接件抗拉拔性能研究[J].建筑结构学报,2019,42(1):386-394.
- [8] 李现辉,李国强.腹板嵌入式组合梁抗剪连接件拔出试验[J].建筑科学与工程学报,2009,26(1):43-48.
- [9] 薛辉,王志宇.PBL 与 PZ 型剪力连接件抗拉拔性能试验[J].四川大学学报,2016,48(6):68-76.
- [10] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
- [11] 胡建华,叶梅新,黄琼.PBL 剪力连接件承载力试验[J].中国公路学报,2016,19(6):65-72.
- [12] Young-Ho Kim,Jae-Yoon Kang,Hyun-Bon Koo,et al.Pull-Out Resistance Capacity of a New Perfobond Shear Connector for Steel Pile Cap Strengthening[J].Advances in Materials Science and Engineering,2016.
- [13] Hosaka T.Study on shear strength and design method of perfobond strip[J].Japanese Journals of Structural Engineering,2002.
- [14] 蔺钊飞,刘玉擎.焊钉连接件拉剪相关关系模型实验[J].中国公路学报.2015,28(1):80-86.
- [15] 马原.组合结构栓钉连接件抗拔性能研究[D].北京:清华大学,2015.
- [16] Eurocode 4,Design of Composite Steel and Concrete Structures[S].2005.

~~~~~  
(上接第 58 页)

力和弯矩;采用 Z2 支座布置形式需要重点考虑纵桥向制动支座对主梁约束产生的方向相反的纵向力水平力和桥墩扭矩;在设计分析计算时,需要按照实际考虑桥墩刚度和支座刚度,并依据计算结果核实支座水平力是否满足要求,主梁与桥墩的构造和配筋是否满足要求。

#### 参考文献:

- [1] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 项海帆,等.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [3] 徐栋,赵瑜,刘超.混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [4] 邵容光,夏滢.混凝土弯梁桥[M].北京:人民交通出版社,1994.