

结构参数对梁拱协作机理的影响

陈超¹, 段燕娥¹, 王方旭²

(1. 甘肃建筑职业技术学院, 兰州 730050; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070)

摘要: 以西宁祥瑞街大桥为工程背景, 该桥为单拱肋下承式连续梁拱组合桥, 以力学分析和有限元建模为主线, 围绕梁拱协作机理和结构参数两方面进行研究。根据拱肋分担荷载比、拱梁弯矩比、拱梁变形比的表达式, 结合工程背景, 绘制各参数(吊杆拱肋等代弯矩刚度比、梁拱截面抗弯刚度比、矢跨比、轴向变形放大系数、边中跨比、边中跨抗弯刚度比)与拱肋分担荷载比、拱梁弯矩比、拱梁变形比的影响曲线, 分析各参数对拱肋分担荷载比、拱梁弯矩比、拱梁变形比的影响。为设计人员在方案设计初期, 拟定较为合理的结构参数提供了力学依据。

关键词: 单拱肋下承式连续梁拱组合桥; 梁拱协作机理; 拱肋分担荷载比; 拱梁弯矩比; 拱梁变形比; 结构参数

中图分类号: U448.213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)14-0274-07

连续梁拱组合桥是城市建设采用最多的桥型之一, 按照主梁、拱肋相对位置可分为上承式、中承式、下承式^[1-3]。其中, 下承式连续梁拱组合桥的结构形式为: 中跨主梁通过吊杆与拱肋连接, 使得主梁竖向刚度得以提升, 由于拱肋的竖向刚度远远超过主梁刚度。因此, 通过拱肋对主梁的加劲作用, 使得主梁在减小梁高的同时, 竖向刚度仍然可以满足标准, 代表桥梁有武汉晴川桥、兰州元通黄河大桥。

丁艳超等^[4]通过建立有限元模型, 得到了矢跨比、刚构段长度、边中跨比和上下弦刚度比等因素对结构响应的影响。曹鑫科等^[5]以网状系杆拱桥为工程背景, 计算分析了矢跨比、吊杆数量、吊杆倾角以及拱梁弯曲刚度等参数变化下, 结构的内力、吊杆力以及系梁挠度的变化规律。Hua 和 Milani^[6]分析梁拱体系在活载作用下, 结构的非线性特征。Andrea 等^[7]采用不同的方法对砌体拱桥抗震性能进行分析, 得出了非线性静态分析的局限性。王頔和马青松^[8]分析了结构参数对下承式钢管混凝土拱桥动力特性的影响。Meng 等^[9]通过分析动静荷载试验的理论值和实测值, 对结构进行分析, 该方法为分析结构受力性能提供参考。张振伟和张伟^[10]对主拱混凝土重度、温度、刚度及系杆索力影响参数进行了分析, 得到了各设计参数变化时对主拱成桥线形、应力及拱脚水平推力的影响。Lu

等^[11]开发出一套全新的检测系统, 对混凝土拱桥的结构性能进行全方位的检测, 为桥梁检测工作提供了有效保障。Lu 等^[12]通过开发三维模型, 有效解决恶劣环境下的桥梁监控和评估工作。龙汉^[13]对钢管混凝土系杆拱桥进行静力参数敏感性分析, 求得各设计参数对拱顶位移、拱座水平推力及拱圈内力等结构响应的敏感因子与敏感百分比。

下承式连续梁拱组合桥, 主梁与拱肋通过吊杆连接共同承担外荷载, 但在体系内部, 主梁和拱肋是分工协作的, 为了分析“分工协作”的原理, 本文引入“拱肋分担荷载比”“拱梁弯矩比”“拱梁变形比”三个概念^[14-15], 以及相关的结构参数^[15-16], 可将该问题数值化、直观化、具体化。

1 求解思路

根据拱肋分担荷载比、拱梁弯矩比、拱梁变形比的表达式^[15], 结合工程背景, 绘制出各参数(吊杆拱肋等代弯矩刚度比、梁拱截面抗弯刚度比、矢跨比、轴向变形放大系数、边中跨比、边中跨抗弯刚度比)与拱肋分担荷载比、拱梁弯矩比、拱梁变形比的影响曲线, 分析各参数对拱肋分担荷载比、拱梁弯矩比、拱梁变形比的影响^[17-19]。上述规律对此类桥型的初步设计有较大的指导作用, 为桥梁设计人员拟定较为合理的结构参数提供了力学依据^[20-21], 有效缩短了初步设计的时间。

收稿日期: 2024-04-07

作者简介: 陈超(1992—), 男, 黑龙江方正人, 硕士, 助教, 研究方向为桥梁理论研究、桥梁设计; 段燕娥(1996—), 女, 甘肃民乐人, 硕士, 助教, 研究方向为桥梁理论研究、桥梁设计; 王方旭(1992—), 男, 甘肃天水人, 博士, 工程师, 研究方向为桥梁工程理论。

2 工程背景

本文以西宁某单拱肋下承式连续梁拱组合桥为工程背景,该桥为三跨下承式连续梁拱组合桥,跨径为40 m+120 m+40 m。结合工程实例,计算得出结构参数如表1所示,计算得出结构参数如表2所示。全桥立面如图1所示,Midas/Civil模型如图2所示。

3 结构参数对拱肋分担荷载比 t 的影响

根据拱肋分担荷载比 t 的表达式,推导过程参考陈超^[15],结合工程实例,分析结构参数对拱肋分担荷载比 t 的影响,为该类桥型提供设计参考。

3.1 吊杆拱肋等代弯矩刚度比 k_{sa} 对拱肋分担荷载比 t 的影响

结合工程实例结构参数和 t 的表达式,推导出 t 和 k_{sa} 的关系式为

相关参数	相关参数含义
f	拱高
L	主梁中跨长度
E_a, E_b	拱肋、主梁弹性模量
I_a, I_b	拱肋、主梁截面惯性矩
A_s	吊杆截面面积
d	吊杆间距
$a_s = \frac{A_s}{d}$	吊杆沿纵向均布轴向抗拉面积

结构参数	结构参数公式	数值
矢跨比	$k_f = \frac{f}{L}$	$k_f = 0.2$
梁拱截面抗弯刚度比	$k_{ba} = \frac{E_b I_b}{E_a I_a}$	$k_{ba} = 0.386$
吊杆拱肋等代弯矩刚度比	$k_{sa} = \frac{E_s a_s L^3}{E_a I_a}$	$k_{sa} = 305.2$
拱肋、主梁轴向变形放大系数	$k_a = \frac{15E_a I_a}{8f^2} \left(\frac{1}{E_a A_a} + \frac{1}{E_b A_b} \right)$	$k_a = 0.016$

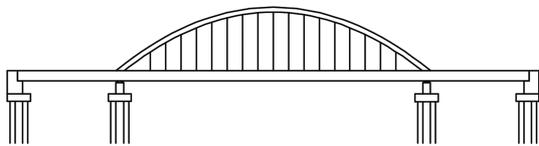


图1 全桥立面

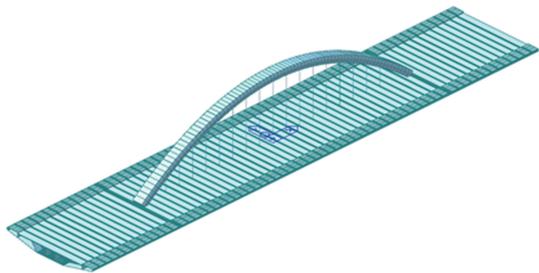


图2 Midas/Civil模型

$$t(k_{sa}) = \frac{k_{sa}}{k_{sa} + 25} \quad (1)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(1),绘制 t 随 k_{sa} 的变化走向图,如图3所示。

从图3中可以看出,当 k_{sa} 在0~100变化时, t 变化显著,且逐渐趋近于1。

3.2 梁拱截面抗弯刚度比 k_{ba} 对拱肋分担荷载比 t 的影响

结合工程实例结构参数和 t 的表达式,推导出 t 和 k_{ba} 的关系式为

$$t(k_{ba}) = \frac{5k_{ba} + 3}{k_{ba}^2 + 6k_{ba} + 3} \quad (2)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(2),绘制 t 随 k_{ba} 的变化走向如图4所示。

从图4可以看出, t 随着 k_{ba} 的增大而减小,随着 k_{ba} 的增大, t 逐渐趋近于0。

3.3 矢跨比 k_f 对拱肋分担荷载比 t 的影响

结合工程实例结构参数和 t 的表达式,推导出 t 和 k_f 的关系式为

$$t(k_f) = \frac{5}{2k_f + 5} \quad (3)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(3),绘制 t 随 k_f 的变化走向如图5所示。

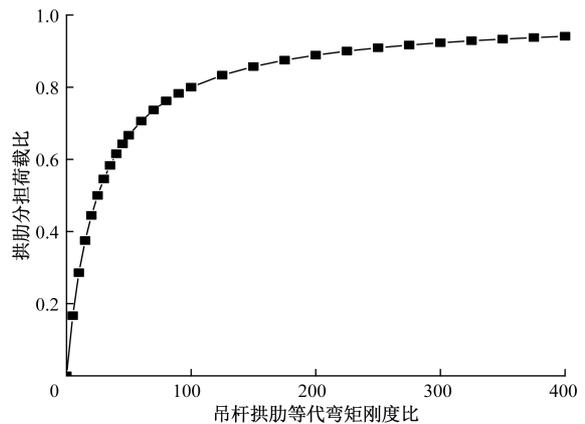


图3 t 随 k_{sa} 变化走向

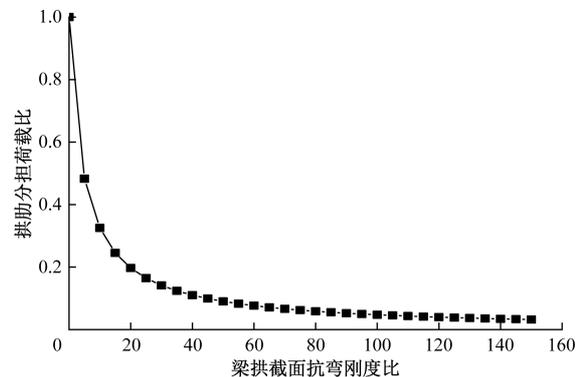


图4 t 随 k_{ba} 变化走向

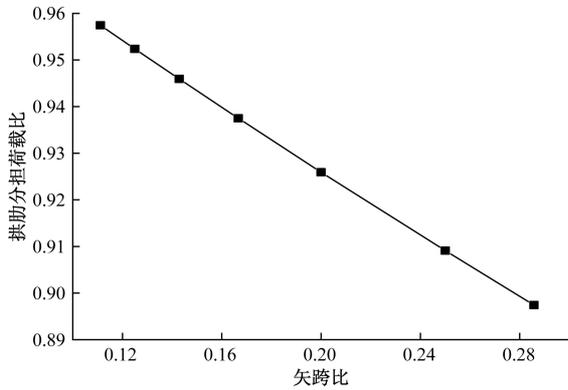


图5 t 随 k_f 变化走向

从图5可以看出, t 随着 k_f 的增大而减小。

3.4 轴向变形放大系数 k_a 对拱肋分担荷载比 t 的影响

结合工程实例结构参数和 t 的表达式, 推导出 t 和 k_a 的关系式为

$$t(k_a) = \frac{2k_a + 1}{5k_a + 1} \quad (4)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(4), 绘制 t 随 k_a 的变化走向如图6所示。

从图6可以看出, t 随着 k_a 的增大而减小, 且逐渐趋于平稳。

3.5 边中跨比 η 对拱肋分担荷载比 t 的影响

结合工程实例结构参数和 t 的表达式, 推导出 t 和 η 的关系式为

$$t(\eta) = \frac{-5\eta^3 + 13\eta + 1}{14\eta + 1} \quad (5)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(5), 绘制 t 随 η 的变化走向如图7所示。

从图7可以看出, t 随着 η 的增大而减小。

3.6 边中跨抗弯刚度比 μ 对拱肋分担荷载比 t 的影响

结合工程实例结构参数和 t 的表达式, 推导出 t

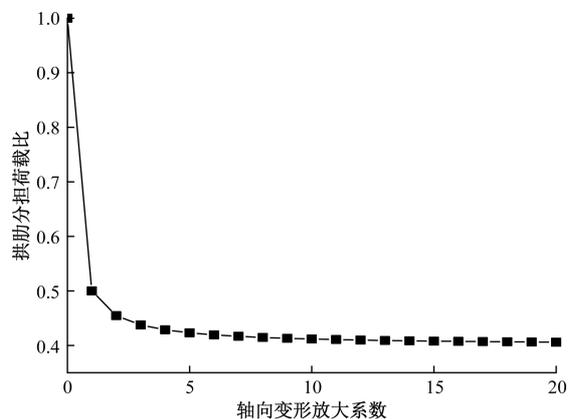


图6 t 随 k_a 变化走向

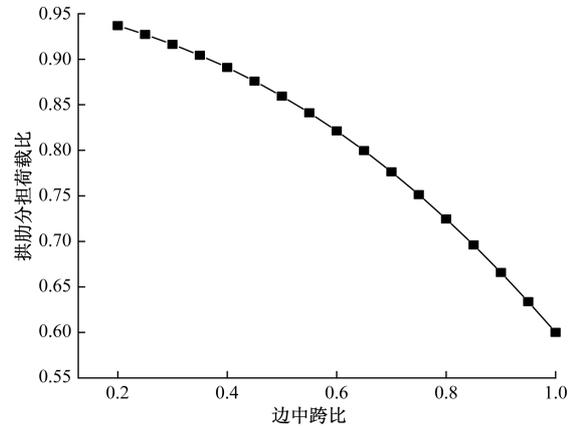


图7 t 随 η 变化走向

和 μ 的关系式为

$$t(\mu) = \frac{\mu + 4.2}{1.13\mu + 4.7} \quad (6)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(6), 绘制 t 随 μ 的变化走向如图8所示。

从图8可以看出, t 随 μ 的增大而减小, 但变化幅度很小。

4 结构参数对拱梁弯矩比 r 的影响

本节将根据拱梁弯矩比 r 的表达式, 推导过程参考陈超^[15], 结合工程实例, 分析结构参数对拱梁弯矩比 r 的影响, 为该类桥型提供设计参考。

4.1 吊杆拱肋等代弯矩刚度比 k_{sa} 对拱梁弯矩比 r 的影响

结合工程实例结构参数和 r 的表达式, 推导出 r 和 k_{sa} 的关系式为

$$r(k_{sa}) = \frac{2.6k_{sa} - 178}{k_{sa} + 693} \quad (7)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(7), 绘制 r 随 k_{sa} 的变化走向如图9所示。

从图9可以看出, r 随着 k_{sa} 的增大而增大。

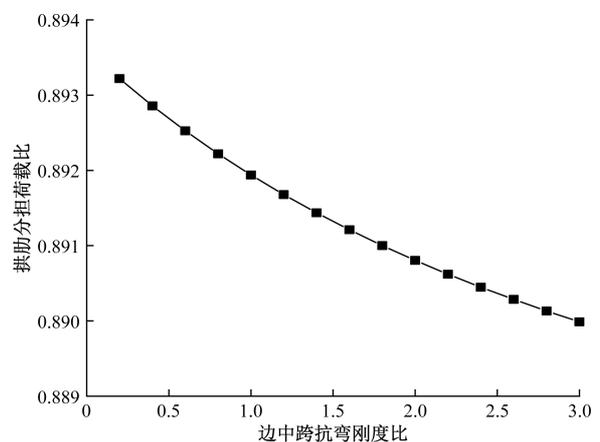
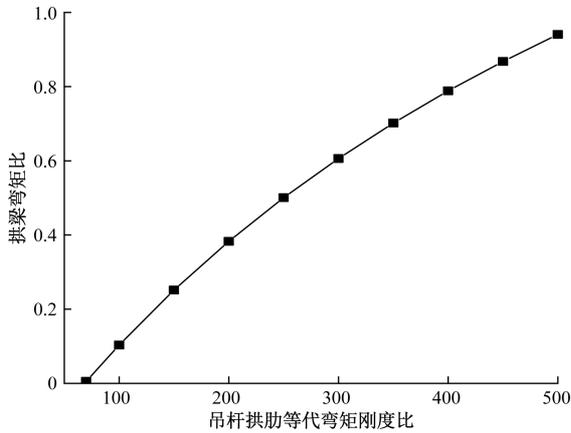


图8 t 随 μ 变化走向

图9 r 随 k_{sa} 变化走向

4.2 梁拱截面抗弯刚度比 k_{ba} 对拱梁弯矩比 r 的影响

结合工程实例结构参数和 r 的表达式,推导出 r 和 k_{ba} 的关系式为

$$r(k_{ba}) = \frac{k_{ba}^2 + 8k_{ba} + 7}{26k_{ba}^3 + 48k_{ba} + 22} \quad (8)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(8),绘制 r 随 k_{ba} 的变化走向如图10所示。

从图10可以看出, r 随着 k_{ba} 的增大而减小,且逐渐趋近于0。

4.3 矢跨比 k_f 对拱梁弯矩比 r 的影响

结合工程实例结构参数和 r 的表达式,推导出 r 和 k_f 的关系式为

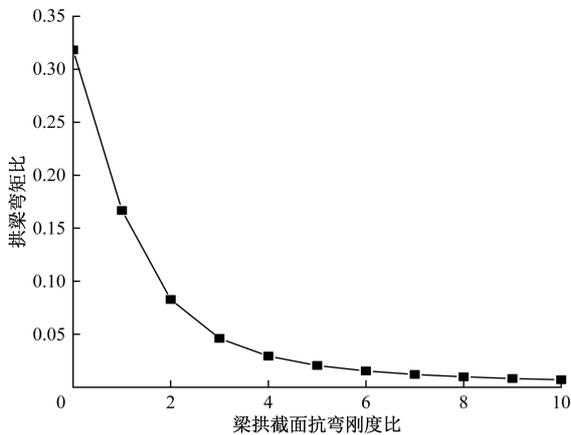
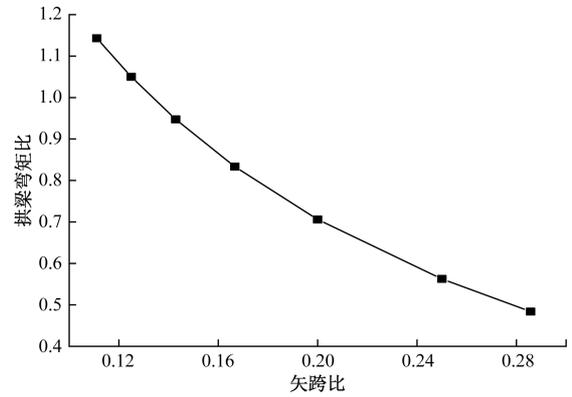
$$r(k_f) = \frac{-3k_f + 3}{12k_f + 1} \quad (9)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(9),绘制 r 随 k_f 的变化走向如图11所示。

从图11可以看出, r 随着 k_f 的增大而减小。

4.4 轴向变形放大系数 k_a 对拱梁弯矩比 r 的影响

结合工程实例结构参数和 r 的表达式,推导出 r 和 k_a 的关系式为

图10 r 随 k_{ba} 变化走向图11 r 随 k_f 变化走向

$$r(k_a) = \frac{317k_a^2 + 139k_a + 1}{140k_a^2 + 70k_a + 4} \quad (10)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(10),绘制 r 随 k_a 的变化走向如图12所示。

从图12可以看出, r 随着 k_a 的增大而增大,当达到一定数值后,逐渐趋于平稳。

4.5 边中跨比 η 对拱梁弯矩比 r 的影响

结合工程实例结构参数和 r 的表达式,推导出 r 和 η 的关系式为

$$r(\eta) = \frac{71\eta^3 + 2\eta + 1}{23\eta^3 + 14\eta + 1} \quad (11)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(11),绘制 r 随 η 的变化走向如图13所示。

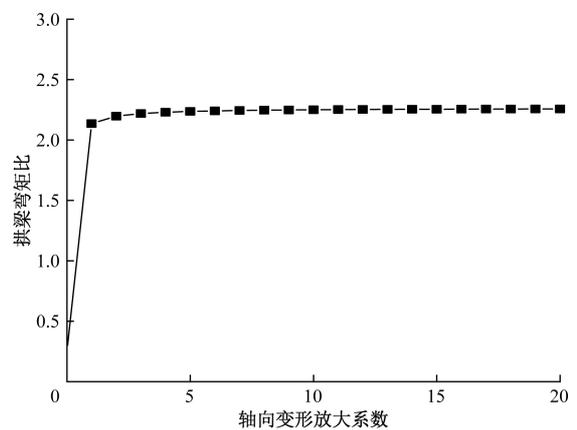
从图13可以看出, r 随着 η 的增大而增大。

4.6 边中跨抗弯刚度比 μ 对拱梁弯矩比 r 的影响

结合工程实例结构参数和 r 的表达式,推导出 r 和 μ 的关系式为

$$r(\mu) = \frac{2\mu^2 + 14\mu + 25}{3\mu^2 + 22\mu + 41} \quad (12)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(12),绘制 r 随 μ 的变化走向如图14所示。

图12 r 随 k_a 变化走向

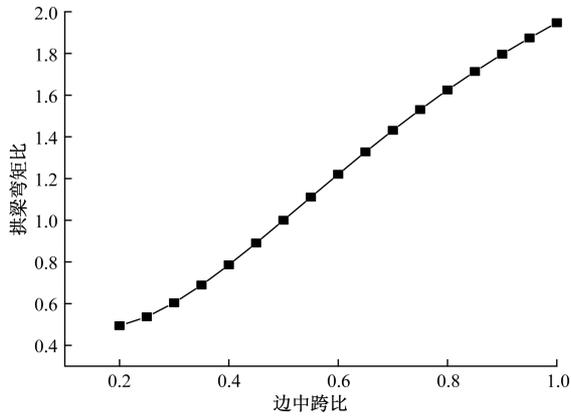


图13 r 随 η 变化走向

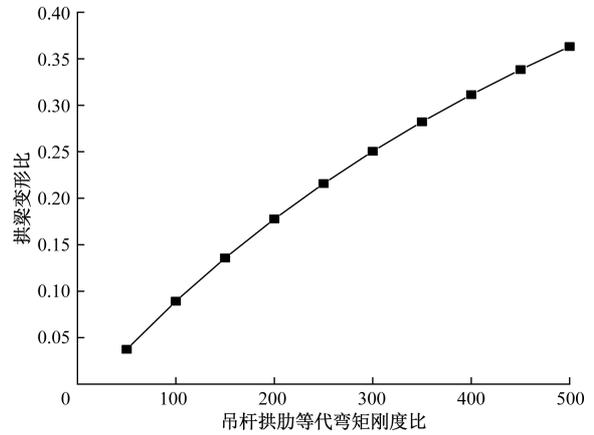


图15 ω 随 k_{sa} 变化走向

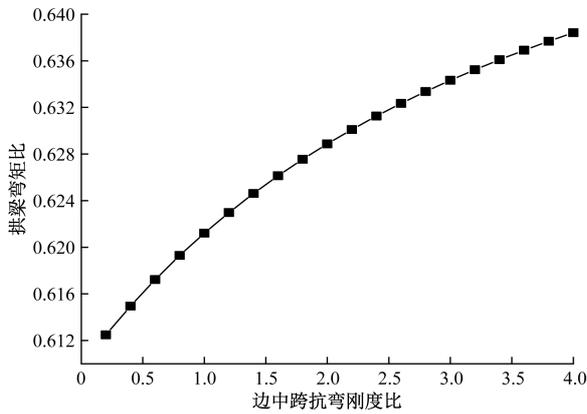


图14 r 随 μ 变化走向

从图14可以看出, r 随着 μ 的增大而增大,但变化幅度很小。

5 结构参数对拱梁变形比 ω 的影响

根据拱梁变形比 ω 的表达式, 推导过程参考陈超^[15], 结合工程实例, 分析结构参数对拱梁变形比 ω 的影响, 为该类桥型提供设计参考, 方法同上。

5.1 吊杆拱肋等代弯矩刚度比 k_{sa} 对拱梁变形比 ω 的影响

结合工程实例结构参数和 ω 的表达式, 推导出 ω 和 k_{sa} 的关系式为

$$\omega(k_{sa}) = \frac{k_{sa} - 17}{k_{sa} + 830} \quad (13)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(13), 绘制 ω 随 μ 的变化走向如图15所示。

从图15可以看出, ω 随着 k_{sa} 的增大而增大。

5.2 梁拱截面抗弯刚度比 k_{ba} 对拱梁变形比 ω 的影响

结合工程实例结构参数和 ω 的表达式, 推导出 ω 和 k_{ba} 的关系式为

$$\omega(k_{ba}) = \frac{6k_{ba}^2 + 11k_{ba} + 5}{28k_{ba}^2 + 46k_{ba} + 18} \quad (14)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(14), 绘制 ω 随 k_{ba} 的变化走向如图16所示。

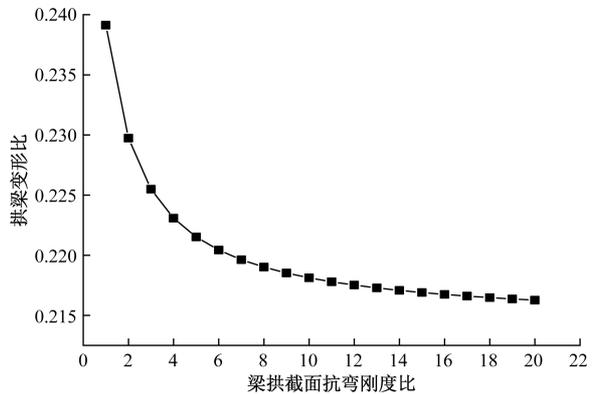


图16 ω 随 k_{ba} 变化走向

从图16可以看出, ω 随 k_{ba} 的增大而减小, 且逐渐趋于平稳。

5.3 矢跨比 k_f 对拱梁变形比 ω 的影响

结合工程实例结构参数和 ω 的表达式, 推导出 ω 和 k_f 的关系式为

$$\omega(k_f) = \frac{-k_f + 4}{50k_f + 4} \quad (15)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(15), 绘制 ω 随 k_f 的变化走向如图17所示。

从图17可以看出, ω 随着 k_f 的增大而减小。

5.4 轴向变形放大系数 k_a 对拱梁变形比 ω 的影响

结合工程实例结构参数和 ω 的表达式, 推导出 ω 和 k_a 的关系式为

$$\omega(k_a) = \frac{44k_a^2 + 19k_a}{48k_a^2 + 23k_a + 1} \quad (16)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(16), 绘制 ω 随 k_a 的变化走向如图18所示。

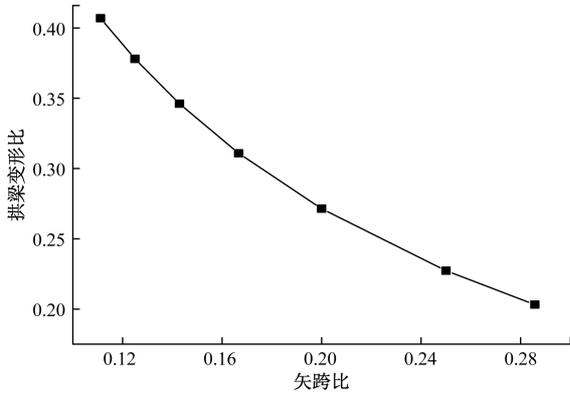


图 17 ω 随 k_f 变化走向

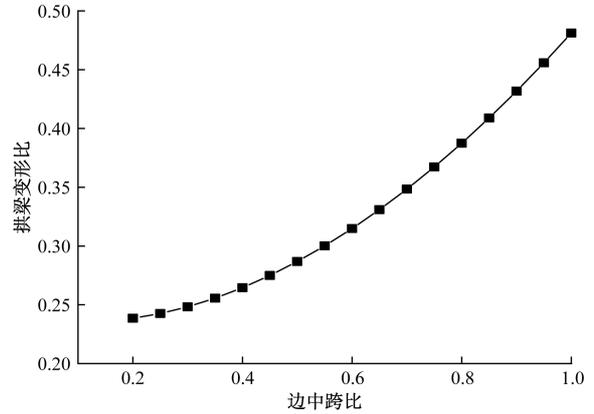


图 19 ω 随 η 变化走向

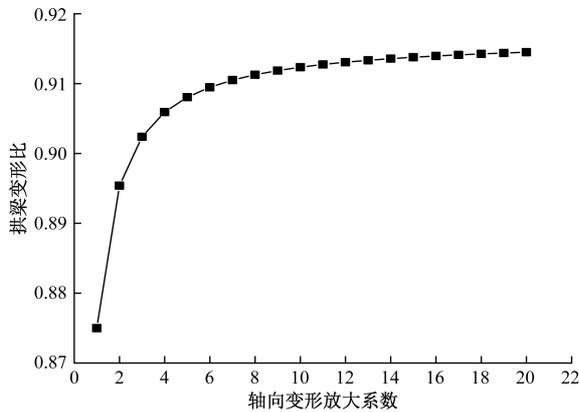


图 18 ω 随 k_a 变化走向

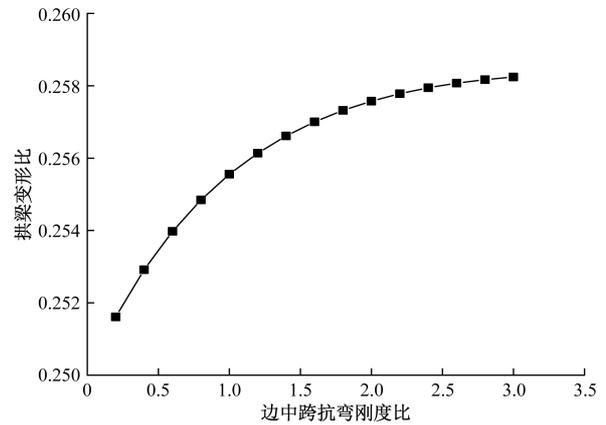


图 20 ω 随 μ 变化走向

从图 18 可以看出, ω 随着 k_a 的增大而增大, 且逐渐趋于平稳。

5.5 边中跨比 η 对拱梁变形比 ω 的影响

结合工程实例结构参数和 ω 的表达式, 推导出 ω 和 η 的关系式为

$$\omega(\eta) = \frac{146\eta^4 + 14\eta^3 + 112\eta^2 + 21\eta + 1}{12\eta^4 + \eta^3 + 505\eta^2 + 89\eta + 4} \quad (17)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(17), 绘制 ω 随 η 的变化走向如图 19 所示。

从图 19 可以看出, ω 随着 η 的增大而增大。

5.6 边中跨抗弯刚度比 μ 对拱梁变形比 ω 的影响

结合工程实例结构参数和 ω 的表达式, 推导出 ω 和 μ 的关系式为

$$\omega(\mu) = \frac{\mu^2 + 8\mu + 14}{4\mu^2 + 30\mu + 56} \quad (18)$$

具体推导过程参考陈超^[15]。根据式(18), 绘制 ω 随 μ 的变化走向如图 20 所示。

从图 20 可以看出, ω 随着 μ 的增大而增大, 但变化幅度很小。

6 结论

结合工程实例, 分析得出各结构参数对拱肋分

担荷载比、拱梁弯矩比、拱梁变形比的影响, 具体规律如表 3~表 5 所示。为设计人员在方案设计初期, 分析敏感性参数对结构内力的影响, 拟定较为合理的结构参数提供了力学依据。

表 3 结构参数对拱肋分担荷载比 t 的影响

参数	各参数与 t 的关系
k_f	t 随 k_f 的增大而减小
η	t 随 η 的增大而减小
μ	t 随 μ 的增大而减小, 但变化幅度很小
k_a	t 随 k_a 的增大而减小, 且逐渐趋于平稳
k_{ba}	t 随 k_{ba} 的增大而减小, 且逐渐趋近于 0
k_{sa}	t 随 k_{sa} 的增大而增大, 且逐渐趋近于 1

表 4 结构参数对拱肋分担荷载比 r 的影响

参数	各参数与 r 的关系
k_f	r 随 k_f 的增大而减小
η	r 随 η 的增大而增大
μ	r 随 μ 的增大而增大, 但变化幅度很小
k_a	r 随 k_a 的增大而增大, 且逐渐趋于平稳
k_{ba}	r 随 k_{ba} 的增大而减小, 且逐渐趋近于 0
k_{sa}	r 随 k_{sa} 的增大而增大

表5 结构参数对拱梁变形比 ω 的影响

参数	各参数与 ω 的关系
k_f	ω 随 k_f 的增大而减小
η	ω 随 η 的增大而增大
μ	ω 随 μ 的增大而增大,但变化幅度很小
k_a	ω 随 k_a 的增大而增大,且逐渐趋于平稳
k_{ba}	ω 随 k_{ba} 的增大而减小,且逐渐趋于平稳
k_{sa}	ω 随 k_{sa} 的增大而增大

参考文献

- [1] 陈宝春, 刘君平. 世界拱桥建设与技术发展综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(1): 27-41.
- [2] 徐岳. 钢管混凝土系杆拱桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [3] 陈宝春, 陈友杰, 赵秋. 桥梁工程(第三版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [4] 丁艳超, 胡旭辉, 向中富, 等. 梁拱组合刚构桥组合体系合理构造研究[J]. 公路, 2020, 65(11): 204-209.
- [5] 曹鑫科, 杨国俊, 郝宪武. 网状吊杆系杆拱桥设计参数的研究[M]. 北京: 中冶建筑研究总院有限公司, 2021.
- [6] HUA Y, MILANI G. Novel block element with axial-only deformation for limit analysis of masonry arch bridges[J]. Computers and Structures, 2024, 298: 107361.
- [7] Andrea G, Amedeo C, Valentina P, et al. Institutes and model updating of an RC tied-arch bridge[J]. Procedia Structural Integrity, 2023, 44: 822-829.
- [8] 王颀, 马青松. 结构参数对下承式钢管混凝土拱桥动力特性的影响[J]. 桥梁建设, 2011(2): 34-38.
- [9] MENG S, CUI K R, HE Z R, et al. Study on the spatial system dynamics of long-span arch bridge interacting with

vehicles subjected to multiple vehicle loads[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2023, 12(3): 4971-4985.

- [10] 张振伟, 张伟. 飞燕式钢管混凝土系杆拱桥参数分析与线形控制[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 105-108.
- [11] LU Z R, GUO C, LI G C. Air void and ring gap effect on CFST arch bridges dynamic performance[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 177: 106418.
- [12] LU P Z, ZHANG J P, LI D G, et al. Conceptual design and experimental verification study of a special-shaped composite arch bridge [J]. Structures, 2021, 29: 1380-1389.
- [13] 龙汉. 钢管混凝土系杆拱桥静力参数敏感性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(2): 419-425.
- [14] 许斐. 单承载面下承式连续梁拱组合体系桥结构性能相关问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [15] 陈超. 单拱肋下承式连续梁拱组合桥跨比及梁拱协作机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [16] 郑晓龙, 杨建荣, 黄华, 等. 下承式组合梁系杆拱桥荷载试验研究[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(12): 1-6.
- [17] 夏文传, 任利锋, 周智宏. 大跨连续梁拱组合桥梁拱分担比例实验探究[J]. 中国公路, 2020(9): 104-105.
- [18] 丁庆洋. 单拱肋下承式连续梁拱组合桥边中跨比及极限跨径研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [19] 程宇飞, 黄焕子, 胡逸琛, 等. 梁拱组合体系桥梁荷载分配分析研究[J]. 公路, 2021, 66(3): 158-162.
- [20] 夏文传, 陈权. 梁拱组合结构桥梁梁拱挠度分承比研究[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2017, 9(4): 352-356.
- [21] 郭鹏. 中承式钢管混凝土系杆拱桥施工控制及参数敏感性分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.

Influence of Structural Parameters on the Beam-arch Cooperation Mechanism

CHEN Chao¹, DUAN Yan'e¹, WANG Fangxu²

(1. Gansu Vocational College of Architecture, Lanzhou 730050, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Taking Xiangrui Street Bridge in Xining as the engineering background, it is a single-arch through continuous beam-arch combination bridge, combining with mechanical analysis and finite element modeling as the main line. The following researches were carried out on the beam-arch cooperation mechanism and structural parameters. According to the expressions of load sharing ratio of arch, bending moment ratio of arch-beam, and deformation ratio of arch-beam, combined with engineering background, the author draws the influence curves of each parameter (suspender-arch ratio of equivalent flexural rigidity, ratio of beam-arch sectional flexural rigidity, rise-span ratio, influence coefficient of axial deformation, side-to-main-span ratio, side-to-main-span flexural rigidity ratio) and load sharing ratio of arch, bending moment ratio of arch-beam, deformation ratio of arch-beam were drawn. The influence of structural parameters on the load sharing ratio of arch, bending moment ratio of arch-beam, and deformation ratio of arch-beam was also analyzed. It provides a mechanical basis for designers to formulate reasonable structural parameters in the initial stage of scheme design.

Keywords: single-arch through continuous beam-arch combination bridge; beam-arch cooperation mechanism; load sharing ratio of arch; bending moment ratio of arch-beam; deformation ratio of arch-beam; structural parameters