

梁拱组合体系桥梁刚度性能研究

李凌霄, 邹德强, 刘雄, 朱朝银, 付孟生, 陈觅杭

(中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为分析不同关键设计参数对梁拱组合体系桥梁刚度性能的影响, 引入代表刚度的概念, 根据定义得到理论计算公式; 以江西于都胜利大桥为工程背景, 计算组合体系结构刚度, 分别考虑主梁刚度、主拱刚度、吊索直径等参数, 基于单一参数变量法和总用钢量不变条件下建立多种不同设计参数模式下的有限元计算模型, 对比分析计算结果得出: 梁拱组合体系桥梁中, 拱结构所占材料用量不大, 但其对梁结构的刚度提升非常明显; 吊索结构不直接提供代表刚度, 但它用于梁拱 2 种结构间的受力分配, 影响拱对梁的代表刚度提升效果; 存在一个最佳拱梁刚度比, 使得在总材料用量不变的条件下, 组合后代表刚度最大; 拱梁刚度比与主梁代表刚度的提升倍数存在对数函数关系。

关键词: 桥梁工程; 梁拱组合体系桥; 代表刚度; 有限元分析; 参数分析; 拱梁刚度比

[中图分类号] U441 [文献标识码] A [文章编号]

0 引言

梁拱组合体系桥梁采用主梁与拱肋共同受力的组合结构形式, 既能发挥它们各自的优势, 又能弥补各自的不足。本文以江西于都胜利大桥为研究对象, 对该桥的结构体系及刚度组成进行理论及数值分析, 探讨梁拱组合体系桥梁刚度分析方法, 为同类桥梁设计提供参考。

1 代表刚度定义

本文选取刚度作为评价桥梁结构跨越性能的指标。为了保证指标具有普适性, 定义桥梁主梁结构跨中位置的集中荷载竖向刚度作为桥梁的代表刚度, 用于表征该桥梁结构的跨越能力, 即刚度性能指标。定义代表刚度与结构材料用量和的比值为结构的刚度材料比, 由于结构材料用量和影响桥梁结构造价, 因此, 刚度材料比可用于表征组合结构的刚度性价比。

对于单一类型结构, 其代表刚度的理论计算公式可根据力学原理进行推导。

1) 对于等截面梁结构, 在跨中单位竖向集中荷载作用下, 主梁跨中位置的挠度计算公式为:

$$\delta_L = \frac{L^3}{mE_L I_L}$$

式中: L 为主梁计算跨径; E_L 为主梁弹性模量; I_L 为主梁截面惯性矩; m 为边界条件参数, 当主梁两端简支时取 48, 两端刚接时取 192, 单端悬臂时取 3。

则主梁的代表刚度公式为:

$$K_1 = \frac{mE_L I_L}{L^3}$$

2) 对于等截面拱结构, 在跨中单位竖向集中荷载作用下, 拱肋跨中位置挠度计算公式为:

$$\delta_g = \frac{f^2 L_g}{kE_g I_g}$$

式中: f 为计算矢高; L_g 为拱肋计算跨径; E_g 为拱肋弹性模量; I_g 为拱肋截面惯性矩; k 为边界条件参数, 其取值方法与 m 相同。

则主拱的代表刚度公式为:

$$K_2 = \frac{kE_g I_g}{f^2 L_g}$$

3) 吊索为梁拱 2 种结构的连接构件, 其本身不能直接增加组合结构的代表刚度, 但吊索大小将显著影响梁拱 2 种结构荷载的分配和 2 种结构在组合结构中刚度的发挥。

单位轴向拉力作用下, 吊索变形计算公式为:

$$\delta_s = \frac{L_s}{E_s A_s}$$

式中: L_s 为吊索长; E_s 为吊索弹性模量; A_s 为吊索截面面积。

2 工程概况

江西于都胜利大桥位于江西省赣州市于都县贡江镇, 主桥桥型为 Y 型连续刚构-拱组合体系桥, 跨径布置为 (40+40+168+40+40) m, 主桥桥长 328m。主桥的主要结构方案为主跨简支, 主跨设置系杆, 主跨梁与拱均采用钢箱结构, 边跨、次边跨及 Y 型刚构均采用混凝土结构。

[作者简介] 李凌霄, , E-mail:691838472@qq.com

[收稿日期] 2024-05-22

主桥次边跨、边跨主梁与主墩刚接成 Y 型连续刚构，中跨为单肋拱桥，背索按装饰索设计，刚度研究时忽略，主桥立面、标准横断面如图 1 所示。主拱肋设置于中央分隔带内，拱轴线形采用抛物线，计算矢高 37m，计算跨径 142m，矢跨比 1/4。拱肋箱形截面为等高度的八边形截面，腹板及顶、底板钢板不同板厚过渡处采用内壁对齐连接，拱肋截面尺寸为 3m×2.5m；为了让拱肋线形与 Y 腿结构外形协调，将主跨桥面以下拱脚顺延拱轴线形成的短斜腿、连接边跨主梁的长斜腿与竖直主墩形成 Y 形桥墩造型，边跨主梁与长、短斜腿刚接形成“三角”混凝土连续刚构，次边跨、边跨主梁净跨径均为 40m，连续刚构悬臂部分双支点铰支于次边墩和边墩上，Y 形墩顶宽 14.5m，墩高 17.3~18.5m，其中斜腿部分高 10.8~11.9m，短斜腿倾角为 50.3°，长斜腿倾角为 18.9°~20.4°，长、短斜腿及墩身均为实体截面，横桥向宽 14.5m，长斜腿厚 3.9~4.5m，短斜腿厚 2.3~3m，竖直墩身纵向为 7.0m，其下端直接与承台刚性相连。

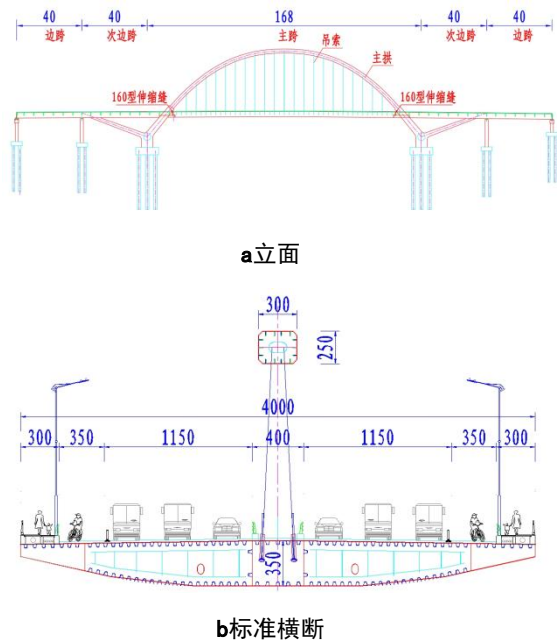


图1 主桥立面与标准横断面

Fig.1 The facade and standard cross section of the main bridge

3 梁拱组合体系刚度分析

本文采用理论分析及数值计算相结合的方式进行对比研究，数值计算主要采用 MIDAS/Civil 软件对胜利大桥主桥上、下部建

立三维空间杆系模型。主梁及拱肋采用梁单元进行模拟，中跨主梁在伸缩缝位置进行梁端约束释放。本桥为固结体系，采用梁拱固结设计，计算模型按共节点进行模拟。吊杆及系杆采用桁架单元进行模拟，系杆单元设置初张力为 27 500kN，以平衡拱肋恒载推力；考虑横向稳定性，吊杆设计为双肢吊杆，1，2，3，4~7，8~11 号单肢吊杆初拉力分别为 1 544，1 047，1 162，1 158，1 159kN（吊杆编号规则为由短到长编号依次增大）。

主桥下部结构 V 腿及主墩下部结构采用梁单元模拟，主墩桩基采用节点弹性支撑模拟桩周土的弹簧效应，桩底按刚接处理。由于本文主要分析主桥纵向整体受力性能，为简化计算，计算模型省略了边墩及受力较小的拱肋背索。模型在边墩及次边墩支座位置设置横桥向及竖向约束条件。主梁及拱肋单元按纵桥向 3m 间距进行划分，局部连接位置进行加密，全桥模型共计有 628 个结点、549 个单元，计算模型如图 2 所示。

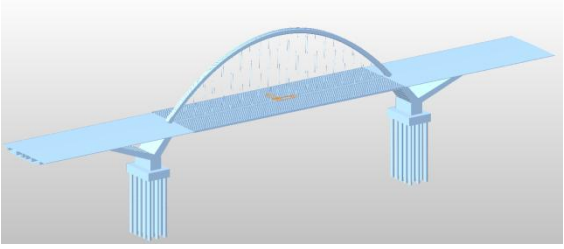


图2 三维有限元模型

Fig.2 Three-dimensional finite element model

胜利大桥的主跨刚度主要由梁拱组合形成，由于边跨形成 Y 形刚构，边跨及 V 腿两肢均采用钢筋混凝土结构，且延伸至拱肋根部。因此，可将边跨及 V 腿看成一个整体，而在主跨范围内，主跨钢箱梁及钢拱肋则通过吊索形成下承式梁拱组合结构。

为了深入探究本桥组合结构的刚度组成及变化，将本桥拆分为纯梁及纯拱 2 种结构。再与组合后的结构进行对比分析。

1)纯梁结构，即不考虑拱肋及吊索，主梁结构单独受力（见图 3）。

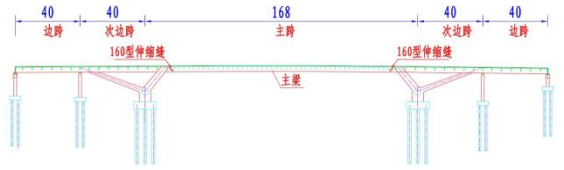


图3 纯梁结构立面

Fig.3 Facade of pure girder structure

将其导入胜利大桥设计方案,主梁代表刚度理论计算参数为: m 为44.8, L 为142 292mm, E_L 为 $2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$, I_L 为 $4.27 \times 10^{12} \text{mm}^4$, K_L 为 $1.37 \times 10^4 \text{N/mm}$ 。

根据计算参数,在主梁跨中位置施加1 000kN集中力,得到跨中挠度理论计算结果为73.97mm。进行有限元建模分析,得到跨中集中荷载工况下的挠度结果。理论计算结果与有限元计算结果吻合较好(见图4)。

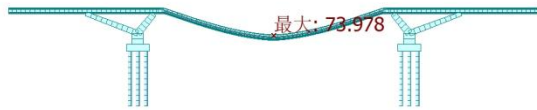


图4 纯梁结构变形结果

Fig.4 The deformation results of pure girder structure

2)纯拱结构,即不考虑主梁及吊索,拱结构单独受力(见图5)。

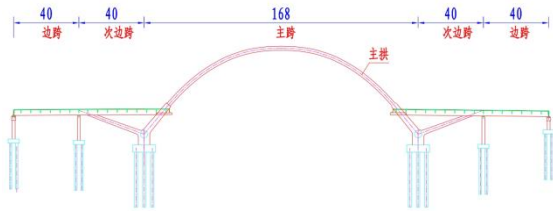


图5 纯拱结构立面

Fig.5 Facade of pure arch structure

将其导入胜利大桥设计方案,主拱代表刚度理论计算参数为: k 为140, E_g 为 $2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$, I_g 为 $4.5 \times 10^{11} \text{mm}^4$, f 为37 081mm, L_g 为142 292mm, K_g 为 $6.63 \times 10^4 \text{N/mm}$ 。

根据计算参数,在主拱跨中位置施加1 000kN集中力,得到跨中挠度理论计算结果为15.08mm。进行有限元建模分析,得到跨中集中荷载工况下的挠度结果。理论计算结果与有限元计算结果吻合较好(见图6)。

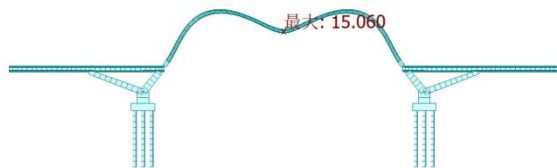


图6 纯拱结构变形结果

Fig.6 Deformation results of pure arch structure

3)梁拱组合变形,即将2种结构进行组合,组合后,由于有吊索约束,梁与拱将协同受力,组合后的结构代表刚度应采用主梁在组合后的变形值确定。同时,由于吊索作用,跨中位置的集中荷载将由梁拱2种结构分担。提取跨中位置吊索轴拉力,作为2种结构的荷载传递值,并分别计算主梁与主拱各自承受的荷载值。初始方案有限元计算结果如图7,8所示。



图7 组合结构变形结果

Fig.7 Deformation results of composite structures

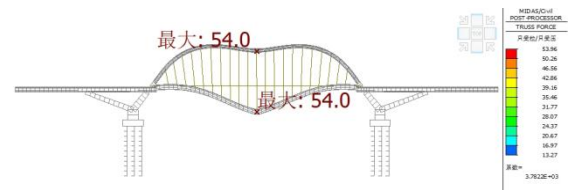


图8 组合结构荷载传递结果

Fig.8 Load transfer results of composite structures

组合后,在主梁跨中位置施加1 000kN集中荷载,主梁跨中位置变形值为4.336mm,主拱跨中位置变形值为3.308mm。跨中位置单个吊索轴力54kN,共2根吊索,因此,拱肋分担的荷载值为 $54 \times 2 = 108 \text{kN}$,主梁承受的荷载值为 $1 000 - 108 = 892 \text{kN}$ 。

根据吊索所受轴力 F 计算,吊索变形值为:

$$\delta_s = \frac{F \times s}{E_s A_s} = \frac{108 \times 10^3 \times 37 081}{2.05 \times 10^5 \times 1.87 \times 10^4} = 1.028 \text{mm}$$

吊索变形值与梁拱变形差值相吻合。

4)组合效果。根据组合结构的变形结果,计算组合后结构刚度值,并计算各分项结构材料用量,用于讨论各分项的刚度性价比。

组合后主梁刚度值 K'_1 为:

$$K'_1 = \frac{892 \times 10^3}{4.336} = 2.06 \times 10^5 \text{N/mm}$$

组合后主拱刚度值 K'_2 为:

$$K'_2 = \frac{108 \times 10^3}{3.308} = 3.26 \times 10^4 \text{N/mm}$$

组合后主梁刚度值增大为纯梁刚度的15.3

倍，可见拱梁组合结构对其代表刚度的提升非常明显。

根据胜利大桥设计方案，结构各分项的材料用量计算结果为：主梁钢结构用量 286.77t，主拱钢结构用量 77.27t，拉索钢丝用量 5.9t。其刚度材料比为 556.11。

可见，虽然拱肋材料用料较少，仅为 20%，但其带的刚度提升非常明显，对主梁刚度提升 15 倍。

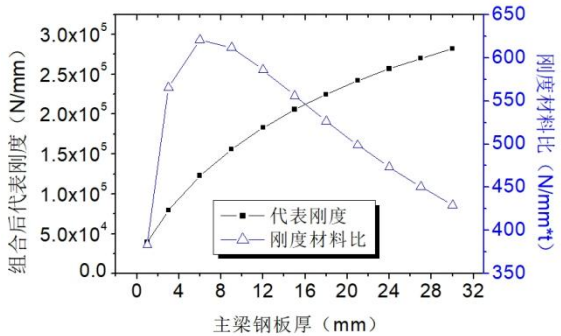
4 单因素变量分析

下面以胜利大桥主桥结构为样本，对梁、拱、吊索 3 种分项结构进行单变量参数分析，分析其取值变化对组合结构代表刚度的影响。

表 1 不同主梁板厚设计值引起的组合刚度变化参数结果

Table 1 Parameter results of combined stiffness variation caused by different design values of main girder plate thickness

主梁板厚 /mm	主梁材料占比 /%	K_1 / (N·mm ⁻¹)	K_2 / (N·mm ⁻¹)	主梁受力 /kN	K_1' / (N·mm ⁻¹)	主梁挠度 /mm	主拱挠度 /mm	刚度材料比
1	19.8	9.16×10^2	6.63×10^4	579.0	3.93×10^4	14.748	10.740	42.8
3	42.6	2.75×10^3	6.63×10^4	759.0	7.95×10^4	9.548	7.254	28.9
6	59.8	5.50×10^3	6.63×10^4	833.8	1.23×10^5	6.790	5.207	22.3
9	69.0	8.25×10^3	6.63×10^4	864.4	1.56×10^5	5.536	4.245	18.9
12	74.8	1.10×10^4	6.63×10^4	881.2	1.83×10^5	4.811	3.681	16.7
15	78.8	1.37×10^4	6.63×10^4	892.0	2.06×10^5	4.336	3.308	15.0
18	81.7	1.65×10^4	6.63×10^4	899.6	2.25×10^5	3.998	3.042	13.6
21	83.9	1.92×10^4	6.63×10^4	905.2	2.42×10^5	3.744	2.842	12.6
24	85.6	2.20×10^4	6.63×10^4	909.6	2.57×10^5	3.545	2.685	11.7
27	87.0	2.47×10^4	6.63×10^4	913.2	2.70×10^5	3.383	2.557	10.9
30	88.1	2.75×10^4	6.63×10^4	916.2	2.82×10^5	3.249	2.451	10.3



a 主梁-组合刚度

分析结果得出，在拱肋及吊索不变的前提下，主梁自身刚度越小，其所承受的荷载越小，组合后其刚度提升倍数越高，但主梁刚度越小将导致其组合后挠度越大。而考虑刚度材料比可看出，当主梁材料占比在 0.58 时，其刚度

4.1 主梁调整

保持其余结构参数不变，仅调整主梁结构，调整方法为保持主梁截面形状不变，仅调整箱形截面钢板厚度，为了方便计算，将箱形截面的所有板件按刚度不变原则等效为同一厚度，并将其作为单一变量。主梁板厚调整范围从 1~30mm。初始设计方案对应的板厚设计值为 15mm。将不同主梁参数代入有限元模型进行计算，根据有限元计算结果，不同主梁板厚设计值引起的主梁、主拱受力分配变化及主梁刚度变化的数值结果如表 1 所示。提取代表刚度和刚度材料比数据，绘制不同主梁钢板厚条件下的变化曲线，如图 9a 所示。

材料比最大，该情况下，主梁受力占总受力的比例为 0.834。该组合结构仍以梁结构为主要受力构件，分析原因，应是吊索尺寸偏小、间距偏大，其对 2 种结构的连接作用效力不足，无法充分传递拱肋对主梁刚度的辅助效力。

4.2 拱肋调整

主梁板厚采用 15mm，保持其余结构参数不变，仅调整主拱结构，调整方法为保持主拱截面形状不变，仅调整截面钢板厚度，板厚调整范围为 10~72mm。初始设计方案对应的板厚设计值为 32mm。

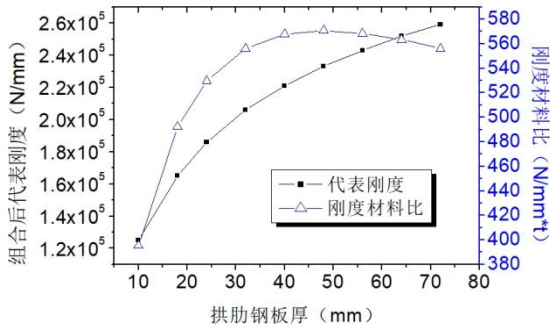
根据有限元计算结果，得到不同拱肋板厚设计值引起的主梁受力及主梁刚度变化情况，如表 2、图 9b 所示。

表 2 不同拱肋板厚设计值引起的组合刚度变化参数结果

Table 2 Parameter results of composite stiffness variation caused by different design values of arch rib plate thickness

拱肋板厚 /mm	拱肋材料占比 /%	K_1 / (N·mm ⁻¹)	K_2 / (N·mm ⁻¹)	主梁受力 /kN	K_1' / (N·mm ⁻¹)	主梁挠度 /mm	主拱挠度 /mm	刚度材料比
----------	-----------	-------------------------------	-------------------------------	----------	--------------------------------	----------	----------	-------

拱肋板厚 / mm	主梁材料占比 /%	K_1 / $(N \cdot mm^{-1})$	K_2 / $(N \cdot mm^{-1})$	主梁受力 / kN	K_1' / $(N \cdot mm^{-1})$	主梁挠度 / mm	主拱挠度 / mm	刚度材料比
10	92.2	1.37×10^4	2.07×10^4	912.4	1.25×10^5	7.285	6.451	395.33
18	86.8	1.37×10^4	3.73×10^4	902.6	1.65×10^5	5.455	4.527	492.27
24	83.2	1.37×10^4	4.98×10^4	897.4	1.86×10^5	4.833	3.856	529.60
32	78.8	1.37×10^4	6.63×10^4	892.0	2.06×10^5	4.336	3.308	556.11
40	74.8	1.37×10^4	8.29×10^4	887.8	2.21×10^5	4.018	2.949	567.66
48	71.2	1.37×10^4	9.95×10^4	884.2	2.33×10^5	3.792	2.689	570.73
56	68.0	1.37×10^4	1.16×10^5	881.0	2.43×10^5	3.622	2.489	568.47
64	65.0	1.37×10^4	1.33×10^5	878.4	2.52×10^5	3.487	2.328	563.31
72	62.3	1.37×10^4	1.49×10^5	875.8	2.59×10^5	3.376	2.194	556.09



b 主拱-组合刚度

分析结果看出，在主梁及吊索不变的前提下，随着拱肋自身刚度增加，拱肋分担的荷载越大，组合后其刚度提升增加，但增加的结果将减小。但主梁刚度越小将导致其组合后挠度越大。而考虑刚度材料比可看出，当主梁材料

占比在 0.68 时，其刚度材料比最大，该情况下，主梁受力占总受力的比例为 0.881。该组合结构仍以梁结构为主要受力构件，分析原因，应是吊索尺寸偏小、间距偏大，其对 2 种结构的连接作用效力不足，无法充分传递拱肋对主梁刚度的辅助效力。

4.3 吊索调整

主梁板厚采用 15mm，拱肋板厚采用 32mm，仅调整吊索直径。调整方法为保持吊索节点及数量不变，仅调整吊索直径，直径调整范围为 30~280mm。初始设计方案对应的板厚设计值为 110mm。

根据有限元计算结果，得到不同吊索直径设计值引起的主梁受力及主梁刚度变化情况，如表 3、图 9c 所示。

表 3 不同吊索直径设计值引起的组合刚度变化参数结果

Table 3 Parameter results of combined stiffness variation caused by different design values of sling diameter

吊索直径/ mm	主梁材料占比/%	K_1 / $(N \cdot mm^{-1})$	主梁受力 / kN	K_1' / $(N \cdot mm^{-1})$	主梁挠度 / mm	主拱挠度 / mm	刚度提升倍数	刚度材料比
280	78.8	1.37×10^4	819.6	2.20×10^5	3.730	3.465	16.0	546.29
250	78.8	1.37×10^4	831.4	2.21×10^5	3.762	3.450	16.1	560.23
220	78.8	1.37×10^4	843.8	2.22×10^5	3.805	3.433	16.1	572.12
190	78.8	1.37×10^4	856.6	2.21×10^5	3.869	3.411	16.1	580.16
160	78.8	1.37×10^4	869.8	2.19×10^5	3.969	3.382	15.9	582.06
130	78.8	1.37×10^4	883.2	2.13×10^5	4.140	3.343	15.5	573.07
110	78.8	1.37×10^4	892.0	2.06×10^5	4.336	3.308	15.0	556.11
100	78.8	1.37×10^4	896.6	2.00×10^5	4.479	3.287	14.6	542.63
90	78.8	1.36×10^4	901.0	1.93×10^5	4.669	3.262	14.2	524.42
60	78.8	1.36×10^4	914.8	1.56×10^5	5.877	3.149	11.5	425.54
30	78.8	1.36×10^4	931.6	8.06×10^4	11.561	2.807	5.9	221.09

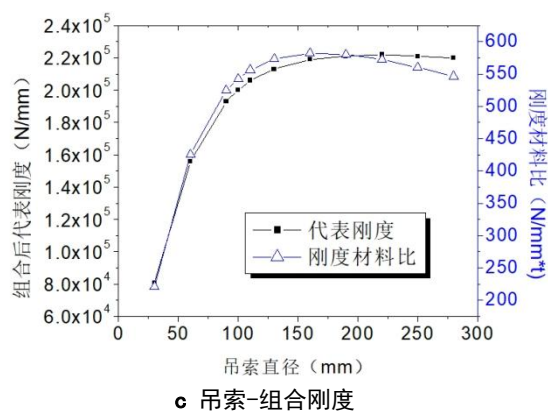


图9 不同主梁板厚设计值、拱肋板厚设计值、吊索直径设计值引起的组合刚度变化曲线

Fig.9 The composite stiffness change curves caused by different main girder plate thickness design values, arch rib plate thickness design values and sling diameter design values

分析结果看出，吊索 $<90\text{mm}$ 时，拱肋对主梁刚度的提升效果迅速减小，说明拱肋对主梁的刚度提升必须通过吊索实现，当吊索尺寸过小时，组合刚度提升将不再有效；而当吊索 $>160\text{mm}$ 时，拱肋对主梁的刚度提升将不再

增加，说明在固定的主梁和拱肋材料比例下，拱肋对主梁的刚度提升效果有极限，当吊索尺寸足够大时，提升效果便会达到极限。

根据本桥参数，主梁与拱肋的材料比为3.7时，拱肋对主梁的刚度提升极限倍数为16.1倍。

5 拱梁刚度比分析

实际工程设计中，需控制桥梁总投资，梁拱结构的总用钢量需整体考虑。为了给桥梁设计人员提供参考，在假设拱梁总用钢量不变的前提下，调整拱梁钢材用量比例，研究其引起的组合结构刚度变化。

考虑到主梁及拱肋截面形状可能会造成梁拱材料比无法表征其力学比例，引入刚度比的概念，即将拱结构代表刚度与梁结构代表刚度的比值作为拱梁刚度比，以此反映拱梁结构比例的变化。具体方法为，同时调整主梁和拱肋钢板厚，保持总材料用量不变。同时，为了考虑吊索直径变化引起的组合刚度影响，每种拱梁比均考虑6种吊索直径，其有限元计算结果如表4所示。

表4 拱梁刚度比变化结果

Table 4 The change result of arch-girder stiffness ratio

拱梁刚度比	吊索直径/mm					
	110	160	220	280	340	400
	组合后代表刚度 K_1' / ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)					
1.01	123 214.8	122 473.1	123 251.7	123 051.5	122 610.10	122 166.7
2.13	165 997.1	174 060.4	175 892.5	175 162.6	173 792.00	172 321.6
3.39	191 489.4	202 855.2	205 303.4	203 935.9	201 520.70	198 865.0
4.83	205 719.6	219 148.4	221 760.8	219 731.9	216 210.40	212 394.2
6.46	213 108.4	227 677.6	230 094.4	227 314.0	222 771.70	217 976.2
8.35	216 013.8	230 953.7	232 989.7	229 342.7	223 869.00	218 083.5
10.37	214 514.9	229 268.3	230 667.1	226 200.4	219 927.80	213 321.2
12.96	211 764.7	226 056.0	226 732.4	221 539.4	214 385.40	206 936.8
16.06	206 856.3	220 451.5	220 305.7	214 277.2	206 365.60	198 219.2
19.86	200 095.3	212 787.6	211 845.1	204 945.5	196 333.00	187 500.0
24.61	191 757.4	203 343.8	201 452.1	193 746.4	184 419.40	175 135.5
30.71	181 899.4	192 241.4	189 376.2	180 839.0	170 863.60	160 923.6
38.85	170 232.8	179 180.9	175 342.5	166 143.7	155 750.70	145 606.9
50.24	156 871.5	164 300.7	159 412.2	149 547.6	138 702.60	128 402.7
67.34	141 427.5	147 097.6	141 068.4	130 657.1	119 639.10	109 427.8
95.83	123 172.8	126 777.3	119 616.4	108 802.7	97 911.36	88 153.4

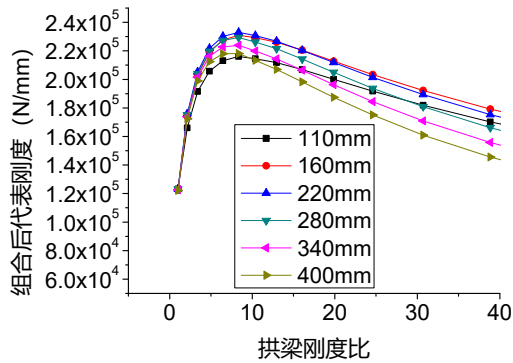


图10 同一吊索直径条件下不同主梁材料占比曲线

Fig.10 The proportion curves of different girder materials for the same sling diameter

将同一吊索直径条件下的不同主梁材料占比绘制成曲线，并将不同吊索直径的曲线进行对比分析，如图 10 所示结果表明：

1)随着主梁材料占比增加，组合后结构的代表刚度均为先增大后减小，这表明合适的梁拱比才能更好地提高组合后的代表刚度。可将组合后的代表刚度最大值对应的拱梁刚度比称为最佳拱梁比。

2)不同吊索直径下，代表刚度最大值均出现在拱梁刚度比 8.4 附近，这表明最佳拱梁比与吊索无关，该值应与主梁及拱肋截面、跨径、矢跨比、组合形式等参数相关。

3)在吊索直径为 220mm 时，组合结构代表刚度出现最大值，这表明过大和过小吊索设计均无法提高梁拱组合结构的代表刚度，分析原因，应是过小吊索无法传递结构荷载，无法发挥组合结构优势；而过大吊索因其自重，将造成多余的附加变形，从而减小代表刚度。

将拱梁刚度比作为横坐标，组合后的代表刚度提升倍数作为纵坐标，得到用于研究组合结构刚度提升的分析曲线。为了避免因吊索尺寸不足引桥的组合效率无法发挥问题，选取 400mm 直径吊索作为数据样本，得到分析曲线如图 11 所示。

通过拟合曲线可得到代表刚度提升倍数与拱梁刚度比存在对数函数关系。工程应用中可用于分析梁拱组合体系的拱梁组合效力是否充分发挥；函数中的参数则可反映组合体系的刚度提升效力，从而反映结构整体设计是否合理。

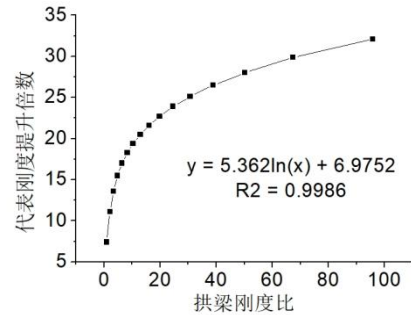


图11 不同拱梁刚度比下刚度提升曲线

Fig.11 Stiffness lifting curves with different arch-girder stiffness ratios

考虑到实际工程设计时需将组合结构作为整体分析，考虑其整体承受荷载的刚度性能，因此，不考虑荷载分配，引入整体代表刚度的概念。将主梁单位变形所承受的跨中集中力荷载作为结构的整体代表刚度值，并以此为纵坐标，而将拱梁刚度比作为横坐标，得到分析曲线如图 12 所示。

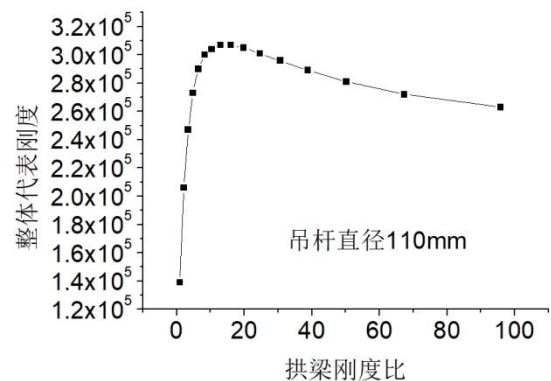


图12 不同拱梁刚度比下整体刚度曲线

Fig.12 The overall stiffness curve with different arch-girder stiffness ratios

结果表明，当拱梁刚度比为 10.4 时，整体代表刚度达到最大值。整体代表刚度最大对应的拱梁刚度比要略大于最佳拱梁比。实际工程设计时，建议拱梁比取值在两者之间，以最大限度地发挥梁拱组合结构的刚度提升效果。

6 结语

1)采用结构跨中位置的集中荷载竖向刚度作为桥梁结构的代表刚度，可用于表征该桥梁结构的跨越能力。该方法较简单、高效，可用于直观地对组合结构进行刚度分析。

2)梁拱组合结构的代表刚度主要来源于拱结构与梁结构 2 部分，吊索结构不直接提供代表刚度，但它用于梁拱 2 种结构间的受力分配，

进而影响拱对梁的代表刚度提升效果。吊索需要采用合适的设计尺寸, 过大或过小均不利于组合结构的跨越性能。

3)梁拱组合体系桥梁中, 拱结构所占的材料用量不高, 一般占比为 20%~40%, 但其对梁结构的刚度提升非常明显, 其对主梁代表刚度的提升可达 10~20 倍。

4)在梁拱结构总材料用量不变的条件下, 理论上存在一个最佳拱梁刚度比, 使得梁拱组合后代表刚度最大, 从而在造价受限的前提下, 最大限度提升组合结构的刚度性能。

5)在保证吊索尺寸足够、可充分发挥组合结构刚度提升效果的前提下, 拱梁刚度比与主梁代表刚度的提升倍数存在对数函数关系, 该拟合函数公式可为类似拱梁组合体系桥梁设计提供参考。

参考文献:

- [1] 李国平. 连续拱梁组合桥的性能与特点[J]. 桥梁建设, 1999(1):10-13.
LI G P. Performance and characteristic of continuous composite arch bridge [J]. Bridge construction, 1999(1): 10-13.
- [2] 吴念. 梁拱组合体系桥梁静力特性及结构优化分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
WU N. Static characteristics and structural optimization analysis of girder and arch combination bridge [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [3] 易云焜. 梁拱组合体系设计理论关键问题研究 [D]. 上海: 同济大学, 2007.
YI Y K. Key-problem study for design theory of girder-arch association system [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [4] 金成棣. 预应力混凝土梁拱组合桥梁——设计研究与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
JIN C D. Prestressed concrete beam arch composite bridge - design research and practice [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [5] 金成棣. 结构静力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1982.
JIN Cheng-di. Structural Statics [M]. Beijing: China Communications Press, 1982.
- [6] 李映. 拱梁组合体系桥梁的拱梁相对刚度分析[J]. 桥梁建设, 2008(1):50-53.
LI Y. Analysis of relative rigidity of arches and girders of arch and girder hybrid system bridges[J] Bridge construction, 2008(1): 50-53.
- [7] 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.
CHENG Y F, HUANG H Z, HU Y C, et al. Research on load distribution analysis of beam arch composite system bridges [J]. Highway, 2021, 66(3):158-162.
- [8] 姜军, 蒲黔辉, 勾红叶. 大跨度连续刚构拱组合桥梁拱墩结合块模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(7):69-75.
JIANG J, PU Q H, GOU H Y. Experimental test on model of beam, arch and pier combination area of long-span continuous rigid frame composite arch bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2010, 27(7):69-75.
- [9] 勾红叶, 蒲黔辉, 陈志伟, 等. 大跨度 V 形刚构拱组合桥拱与梁的刚度研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(7):97-102.
GOU H Y, PU Q H, CHEN Z W, et al. Study on rigidities of Arch and Beam of Long-span V-shaped Rigid Frame Composite Arch Bridge[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2013, 30(7):97-102.
- [10] 刘振宇. 大跨度梁拱组合桥梁结构优化分析 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
LIU Z Y. Optimizing analysis of long-span girder-arch combination bridges [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.

Stiffness Performance of Girder-arch Combination System Bridge

LI Lingxiao, ZOU Deqiang, LIU Xiong, ZHU Chaoyin, FU Mengsheng,
CHEN Mihang

(China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: To explore the influence of different key design parameters on the stiffness performance of girder-arch combination system bridge, the concept of representative stiffness is firstly introduced, and theoretical calculation formulas are obtained based on the definition. Taking Victory Bridge in Yudu of Jiangxi as the engineering background, the structural stiffness of the combination system was analyzed and calculated, and the parameters such as the main girder stiffness, main arch stiffness, and suspension cable diameter were considered separately. Based on the single parameter variable method and the constant total steel consumption, multiple finite element calculation models under different design parameter modes were established, and the calculated results were compared and analyzed. The results show that in girder-arch combination system bridge, the material consumption of the arch structure is not high, but it significantly improves the stiffness of the girder structure; The suspension structure does not directly provide representative stiffness, but it is used for force distribution between girder and arch structures, thereby affecting the effect of the arch on improving the representative stiffness of the girder; It exists an optimal arch-girder stiffness ratio, under the condition of constant total material consumption, which represents the maximum stiffness when it is combined; There is a logarithmic function relationship between the arch-girder stiffness ratio and the increase in stiffness represented by the main girder.

Keywords: bridges; girder-arch combination system bridges; representative stiffness; finite element analysis; parameter analysis; arch-girder stiffness ratio