

大跨度下承式刚性系杆拱桥成桥吊杆索力研究

吴太广

(广东省建筑设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 随着材料和施工技术的发展,下承式刚性系杆拱桥跨度越来越大,但对于大跨度下承式刚性系杆拱桥的吊杆成桥索力研究还不多,结合工程实例,探讨了刚性吊杆法、刚性支撑连续梁法、最小弯曲应变能法三种常用的成桥索力确定方法,并比较分析了它们在大跨度下承式刚性系杆拱桥的适用性。结果显示三种方法确定的跨度吊杆成桥索力差别不大,但端部短吊杆成桥索力差别较大,对比发现刚性支撑连续梁法对于此类大跨度拱桥得到的成桥索力更均匀,拱肋和主梁弯矩也较小。另外对端部吊杆成桥索力分别采用三种优化方法调整后,得出端部短吊杆采用与跨中吊杆索力接近的优化方法更合适。

关键词: 刚性系杆拱桥;吊杆索力;刚性吊杆法;刚性支撑连续梁法;最小弯曲应变能法

中图分类号: U448.22+5;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0118-04

Research on Suspender Cable Force of Long-span Through Rigid Bowstring Arch Bridges

WU Taiguang

(Guangdong Architectural Design and Research Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: With the development of materials and construction technologies, the spans of through rigid bowstring arch bridges have been increasing. However, there is still not much research on the cable force of the suspension rods for long-span through rigid bowstring arch bridges. Combined with the engineering examples, three commonly used methods for determining the cable force of the finished bridges are discussed. These three methods are the rigid suspension rod method, rigid support continuous beam method and minimum bending strain energy method. And the applicability of these methods in large-span through rigid bowstring arch bridges is compared and analyzed. The results show that the bridge cable forces of the span suspension rods determined by the three methods do not differ much. But the bridge cable forces of the short suspension rods at the ends vary greatly. The comparative analysis shows that the rigid support continuous beam method results in a more uniform bridge cable force for such large-span arch bridges, and the bending moments of the arch ribs and girders are also smaller. Furthermore, after three optimization methods are used to adjust the bridge cable forces of suspension rods at the end, it is found that it is more suitable for this project to adopt an optimization method for the short end suspension rods that is close to the cable force of the mid-span suspension rods.

Keywords: rigid bowstring arch bridge; cable force of suspension rod; rigid suspension rod method; rigid support continuous beam method; minimum bending strain energy method

0 引言

简支下承式系杆拱桥由于无需设置抗推力墩,不受地质条件限制,因此应用广泛,尤其在市政桥梁建设中,它避免了设置庞大的抗推力墩,从而减少了对城市用地和景观的影响。简支下承式刚性系杆拱桥通过纵梁作为刚性系杆,其抗弯刚度通常与拱肋在同一量级,纵梁不仅平衡了拱肋的水平力,还与拱

肋共同承担桥梁的竖向荷载。这种刚性系杆梁,对于大跨度一般采用钢箱结构,既可以承担桥面荷载产生的弯矩和剪力,又充分利用了钢箱梁的抗拉性能。目前对于此类系杆拱桥的吊杆成桥索力研究大多偏向于 100 多米跨径的系杆拱桥^[1-5],随着材料和施工技术发展,出现了越来越多超过 200 m 以上的下承式刚性系杆拱桥^[6-10],因此对于此类跨度超过 200 m 的大跨度下承式刚性系杆拱桥的成桥索力研究十分必要。

1 吊杆成桥索力计算方法

系杆拱桥内部为多次超静定结构,拱桥吊杆张

收稿日期: 2024-11-22

作者简介: 吴太广(1984—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁隧道设计工作。

拉力对拱肋、主梁和其余吊杆的内力均会产生影响,因此需要确定一组合理的吊杆张拉力,使三者的内力和变形均在最优状态。目前常用的确定吊杆最优张拉力的方法有刚性吊杆法、刚性支撑连续梁法、最小弯曲应变能法等^[11-15]。

刚性吊杆法:假定吊杆刚度无限大,在吊杆张拉力作用下,不发生伸缩变形,即吊杆两端不发生相对位移,其本质是拱肋与系梁的拉压应变能和弯曲应变能之和达到最小,用有限元计算时将模型中吊杆截面刚度增加的近似无限大,计算恒载作用下的吊杆内力作为成桥索力。

刚性支撑连续梁法:假定吊杆处主梁的竖向位移为零,即主梁在恒载作用下弯矩是多点支撑连续梁,该方法是将模型中的吊杆单元删除,在吊杆对应的主梁节点添加竖向刚性支座,然后求解支座反力作为吊杆的成桥索力。

最小弯曲应变能法:该方法本质是求解拱肋和主梁弯曲应变能最小对应的吊杆索力,具体求解方法为,将模型中拱肋和主梁的刚度放大至近似无限大,计算恒载作用下的吊杆内力作为成桥索力。

2 工程概况

某大跨度下承式系杆拱桥计算跨径为 210 m,拱脚计算跨径以外部分每端 2.5 m,主桥全长 215 m。拱肋采用钢箱拱肋,桥面系结构采用钢结构格子梁体系,桥面板采用 UHPC 桥面板+沥青混凝土铺装。主纵梁采用钢箱梁,与拱肋固结形成内部超静定结构。主纵梁与桥墩之间通过支座连接,形成外部为简支体系,适应温度伸缩及桥墩不均匀沉降的不利影响。

主桥共设置两道钢箱拱肋,横桥向中心间距为 27.5 m,拱轴线采用二次抛物线,跨度为 210 m,矢高 42 m,矢跨比 1/5。拱肋截面形式采用单箱单室矩形截面,拱肋截面宽度 2.5 m,高度由拱顶处 3.0 m 渐变至距拱脚处 4 m。

3 计算模型

上部结构计算采用 MIDAS Civil 有限元计算软件,建立上部结构三维有限元模型见图 1。



图 1 上部结构三维有限元模型

吊杆索力计算模型在上部结构基础模型的基础上进行适当修改后得到:刚性吊杆法将模型中的吊杆截面刚度调整系数调整为 10 000 倍;刚性支撑连续梁法,删除吊杆单元,在主梁对应位置加上竖向约束;最小弯曲应变能法将拱肋和主梁的截面刚度调整系数设置为 10 000 倍。

4 成桥索力确定

4.1 初步索力计算结果对比

采用三种常用的吊杆索力计算方法,计算得到的吊杆成桥索力见表 1。为方便表达,对吊杆自拱脚至跨中依次编号,见图 2,三种方法计算得到的成桥索力中,D3~D12 吊杆相差较小,基本在 1 575~1 665 kN 范围,最靠近梁端的 D1、D2 吊杆索力相差较大,刚性吊杆和最小弯曲应变能法计算的 D1 较小,分别为 363 kN 和 789 kN,约为跨中吊杆内力的 0.25~0.5 倍;D2 较大,分别为 3 059 kN 和 3 159 kN,约为跨中吊杆内力的 2 倍。整体计算结果表面刚性支撑连续梁法得到的成桥索力根均匀,除端部 4 根吊杆差异较大,其余均接近 1 600 kN。

表 1 三种方法计算的吊杆成桥索力 单位:kN			
吊杆编号	刚性吊杆法	刚性支撑连续梁法	最小弯曲应变能法
D1	614	2 687	1 046
D2	3 127	1 456	3 227
D3	1 629	1 707	1 598
D4	1 601	1 584	1 589
D5	1 587	1 611	1 579
D6	1 590	1 602	1 587
D7	1 613	1 602	1 601
D8	1 638	1 602	1 638
D9	1 652	1 602	1 669
D10	1 644	1 602	1 645
D11	1 611	1 602	1 606
D12	1 601	1 602	1 608

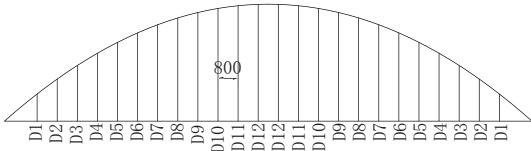


图 2 吊杆编号示意图

4.2 初步索力对应拱肋及主梁计算结果

将上节三种方法确定的成桥索力应用到整体计算模型中,仍按一次落架成桥,计算得到恒载作用下拱肋及主梁弯矩见图 3~图 5。

拱肋最大弯矩:三种方法最大值均位于拱脚处,其中按最小弯曲应变能法计算的弯矩最大,值为

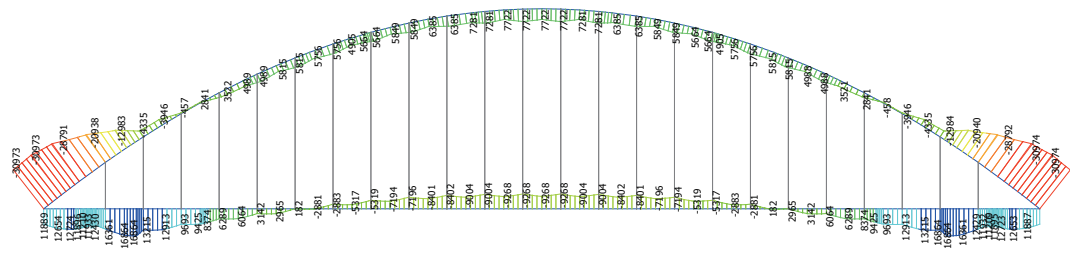


图3 刚性吊杆法成桥索力计算的拱肋及主梁弯矩图(单位:kN·m)

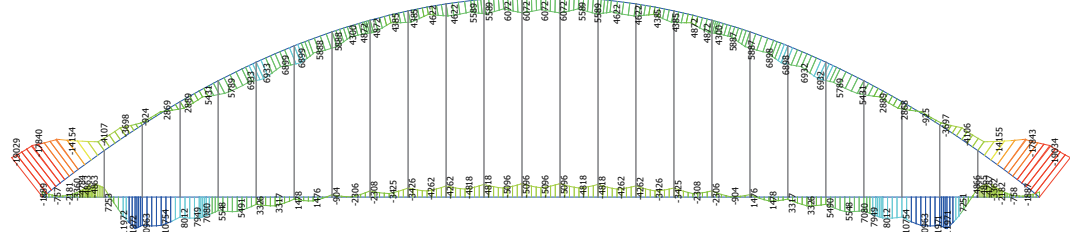


图4 刚性支撑连续梁法成桥索力计算的拱肋及主梁弯矩图(单位:kN·m)

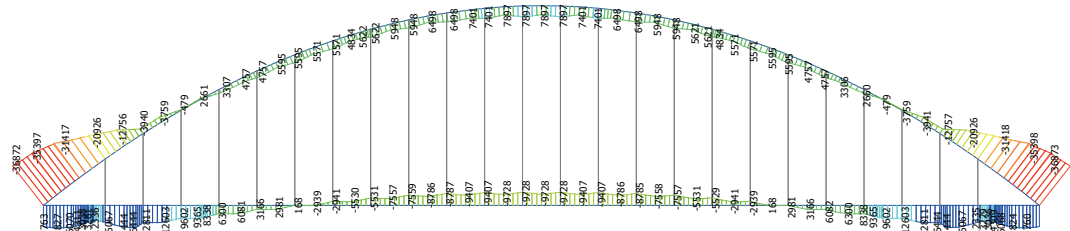


图5 最小弯曲应变能法成桥索力计算的拱肋及主梁弯矩图(单位:kN·m)

-36 873 kN·m,刚性支撑连续梁法计算的最小,值为-19 034 kN·m比最小弯矩应变能法计算的小48.4%。

主梁最大弯矩值:刚性吊杆法和刚性支撑连续梁法计算的主梁最大弯矩位于D2吊杆附近,而最小弯曲应变能法计算的主梁最大弯矩位于梁端支点。其中刚性吊杆法计算的主梁最大弯矩最大,值为16 864 kN·m,刚性支撑连续梁法计算的主梁最大弯矩值最小,值为11 972 kN·m,比刚性吊杆法计算的小29%。

综合拱肋及主梁计算结果可知,由刚性支撑连续梁法确定的成桥索力更适合本桥,其拱肋和主梁最大弯矩均小于其余方法,且差值明显,另外跨中处拱肋及主梁弯矩也比另外两张方法计算的弯矩小,但拱肋1/4跨弯矩略大于其余两种方法。

4.3 端部吊杆成桥索力调整

根据上节分析结论,本桥采用刚性支撑连续梁法计算确定的成桥索力最优,但端部吊杆索力与中间吊杆索力差异较大,不利于吊杆选型,这是由于梁端吊杆长度较短及拱梁节点刚接效应影响,实际设计过程中为保证吊杆型号统一,通常会采用较为均衡的吊杆成桥索力,因此需尽量将端部吊杆索力调整到与跨中索力相近,优化后的最大最小索力差值

不宜超过20%。具体可采用如下优化方法:

方法一:利用竖向力基本平衡的原理来均分端部四根索力,将端部四根吊杆索力平均分配。

方法二:最大差值控制法,将端部第一根吊杆值按比跨中吊杆值大20%,其余三根吊杆值依次过渡至跨中吊杆。

方法三:端部索力全部采用跨中索力,即全桥索力全部平均分配。

以上三方法优化后的索力见表2,D1~D3,按上述三种方法计算,D5~D12按表1中的刚性支撑连续梁法对应的计算结果取整后确定为1 600 kN。

表2 三种方法计算的吊杆成桥索力			单位:kN
吊杆编号	方法一	方法二	方法三
D1	1 850	2 000	1 600
D2	1 850	1 900	1 600
D3	1 850	1 800	1 600
D4	1 850	1 700	1 600
D5~D12	1 600	1 600	1 600

按以上三种方法得到的索力计算的拱肋和主梁弯矩情况见表3。方法三计算的拱肋最大弯矩显著减小,但主梁最大弯矩有所增加,其余方法计算的拱肋和主梁弯矩均增大明显。

表3 调整端部索力后的拱肋和主梁弯矩值 单位:kN

位置	调整前	方法一	方法二	方法三
拱肋最大	-19 029	-27 536	-24 239	-7 488
主梁最大	11 972	16 112	13 836	-16 091
拱肋跨中	6 072	6 137	6 012	5 901
拱肋 1/4 跨	6 933	7 849	7 537	6 971
主梁跨中	-5 096	-6 236	-5 585	-4 174

验算不同调整方法确定的成桥索力,承载力能力基本组合的吊杆索力见表4,结果显示,方法三调整后的索更均匀。综合表2和表3计算结果不难发现,本桥采用方法三调整端部吊杆成桥索力结果优势明显。

表4 不同调整方法承载力基本组合的吊杆索力单位 单位:kN

吊杆编号	调整前	方法一	方法二	方法三
D1	2 685	1 849	1 999	1 599
D2	1 454	1 848	1 898	1 598
D3	1 704	1 847	1 797	1 597
D4	1 580	1 846	1 696	1 596
D5	1 607	1 596	1 596	1 596
D6	1 597	1 595	1 595	1 595
D7	1 597	1 595	1 595	1 595
D8	1 597	1 594	1 594	1 594
D9	1 596	1 594	1 594	1 594
D10	1 596	1 594	1 594	1 594
D11	1 596	1 594	1 594	1 594
D12	1 596	1 594	1 594	1 594

由于刚性系杆拱桥主梁承担拱脚水平力,因此主梁轴力也是主梁应力的关键因素,吊杆不同张力对主梁轴力也有影响,不同方法计算的最大主梁及拱肋轴力见表5,结果显示,方法三得到的最大主梁轴力和拱肋轴力均略小于其他方法。

表5 不同调整方法恒载作用下的吊杆索力 单位:kN

吊杆编号	调整前	方法一	方法二	方法三
主梁最大轴力	30 563	30 644	30 608	30 511
拱肋最大轴力	43 033	43 018	43 007	42 363

5 结 语

结合工程实例对跨度超过 200 m 的下承式刚性系杆拱桥的吊杆成桥索力采用刚性吊杆法、刚性支撑连续梁法和最小弯曲应变能法进行比较计算,并

对梁端部短吊杆索力采用三种方法优化调整,通过比较分析,得出以下结论:

(1)大跨度下承式刚性系杆拱桥,由于跨度大,主梁的相对刚度小,采用三种常用方法得到的跨中索力差别不大,但梁端索力差别较大,综合比较,对于本项目的大跨度下承式刚性系杆拱桥采用刚性支撑连续梁法计算的成桥索力更优。

(2)对于本项目的大跨度下承式大跨度刚性系杆拱桥,主梁端部吊杆索力采用与跨中索力相同的值更合适,用此方法计算的成桥索力、拱肋和主梁的弯矩和轴力等都比其余两种方法更优。

参考文献:

[1] 汤远华.下承式钢管混凝土系杆拱桥吊杆力计算与分析[J]. 交通科技与管理,2024,5(3):100-102.

[2] 李雪纯,梁辰奇,王慧东.130 m 中承提篮系杆钢拱桥吊杆力优化与施工控制[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2024,41(5):50-55;77.

[3] 尹泽政,刘新峰,程浩波.下承式系杆拱桥吊杆索力计算方法对比分析研究[J]. 建筑结构,2023,53(增刊2):575-580.

[4] 车小林.钢筋混凝土系杆拱桥合理成桥状态与吊杆索力优化研究[D]. 贵阳:贵州大学,2019.

[5] 童林,李传习,上官兴.钢管混凝土拱梁组合体系系杆成桥索力的确定[J]. 长沙交通学院学报,2004(3):11-15.

[6] 张志坚,李亮,田卿.210 m 下承式钢箱提篮系杆拱桥总体设计[J]. 城市道桥与防洪,2022(3):51-54.

[7] 史光军.265 m 简支下承式钢箱系杆拱桥的设计[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(11):133-137.

[8] 鄢余文.大芦线二期浦星公路 230 m 下承式系杆拱桥设计[J]. 城市道桥与防洪,2018(5):103-106;133.

[9] 黄国清.大跨度下承式钢箱提篮拱桥总体设计[J]. 山西交通科技,2023(4):67-70.

[10] 曹少华.简支下承式钢管混凝土系杆拱桥稳定性参数研究[J]. 黑龙江交通科技,2023,46(2):101-103.

[11] 刘二宝,刘旭政,王继承.考虑施工过程的下承式系杆拱桥吊杆索力二次优化法[J]. 安徽建筑,2024,31(2):52-55.

[12] 焦明东,高敏,宋玉,等.系杆拱桥合理成桥状态研究分析[J]. 城市道桥与防洪,2022(3):60-63.

[13] 傅金龙,黄天立.刚性系杆拱桥成桥吊杆索力优化方法的适用性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2014,11(4):6-13.

[14] 韦伟.拱梁组合体系吊杆张拉受力行为的分析及优化[D]. 广州:广州大学,2012.

[15] 朱颖,李传习.红港大桥合理成桥状态及吊杆索力的确定[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2010,7(3):31-35;84.