

平南三桥桥型方案设计研究

欧阳平, 林增海, 米德才, 陈鑫

(广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029)

摘要: 平南三桥为跨径 575 m 的钢管混凝土拱桥, 是目前世界上最大跨径拱桥。方案设计阶段对悬索桥、斜拉桥和拱桥方案进行了深入的比选研究, 最终选择钢管混凝土拱桥作为实施方案。该文介绍了平南三桥方案比选研究情况, 可为类似工程方案设计及决策提供参考。

关键词: 桥型方案; 钢管混凝土拱桥; 混合梁斜拉桥

平南三桥是广西荔浦至玉林高速公路平南北互通连接线跨越浔江的一座特大桥。根据平南县城总体规划, 平南三桥将作为县城外环路西段跨越浔江的市政桥梁, 因此该桥由平南县出资建设, 并纳入高速公路项目同步建设。

平南三桥实施方案采用跨径 575 m 钢管混凝土拱桥, 是目前世界上最大跨径的拱桥。该桥北岸基础位于覆盖层厚超过 30 m 的复杂地层, 其中包括 20 m 厚的强透水卵石层, 在这样的地质条件下推选钢管混凝土拱桥方案, 是经过方案设计、初步设计和技术设计三个阶段的充分论证得出的科学结论。

平南三桥的建设证明: 在地质条件较差的情况下, 钢管混凝土拱桥仍然具有良好的工程经济性, 是极具竞争力的桥型方案。

1 主要建设条件

1.1 桥位选址

平南三桥桥位总体走向需符合县城总体规划要求, 受规划港口岸线、地形等条件制约, 桥位选址余地不大, 考虑控制桥梁规模和工程投资, 桥位选址基本上是唯一的(图 1、2)。

1.2 通航与防洪

平南三桥桥址位于 S 形连续弯曲河道, 上游 1.5 km、下游 5.5 km 均有河滩, 桥位处水流流态复杂, 通航条件较差, 为保证通航安全, 通航论证要求桥梁一跨过江, 水中不允许设墩, 桥梁跨径不小于 535 m。

桥址两岸均有防洪堤, 根据防洪要求需设 60 m 桥孔跨越两岸防洪堤。

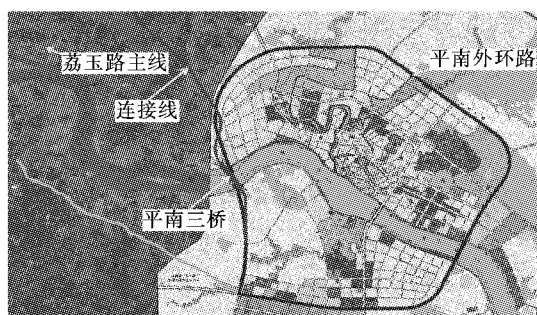


图 1 地理位置图

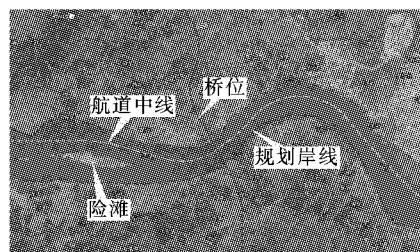


图 2 平南三桥桥位选址

1.3 工程地质条件

桥位区北岸覆盖层自上而下依次为硬塑状粉质黏土、软可塑状粉质黏土、中密状卵石, 均厚分别为 8.5、11.5、16 m, 其中卵石层最大厚度达 25 m; 卵石层中密状, 母岩主要为砂岩、石英岩, 粒径为 20~100 mm, 含量为 50%~70%, 间隙充填圆砾、细砂及粉质黏土, 强透水和强富水, 具承压性, 承压水头为 12~20 m, 与浔江水力联系密切, 呈互补关系。基岩以中风化灰岩为主, 局部间夹泥晶灰质白云岩, 岩体较完整, 属软岩, 岩溶中等发育, 钻孔遇洞率为 33.3%, 线溶率为 1.1%, 多为浅表基岩发育的单一狭长形溶洞, 溶蚀裂隙较密集发育, 岩体较破碎, 但未发育相互连通的大规模岩溶。

通道或大型溶洞。基岩裂隙岩溶水属承压水,承压水头 20~30 m,中等透水,强富水。

南岸地质条件相对较好,覆盖层为硬塑状粉质黏土,均厚 15 m;基岩为中风化灰岩,岩体较完整,强度较高,属较硬岩,岩溶强发育,钻孔遇洞率为 61.9%,线溶率为 2.7%,主要为浅表中小型溶洞和溶蚀裂隙,溶洞及贯通性较好,未发现相互连通的大规模岩溶通道或大型溶洞。基岩裂隙岩溶水属承压水,承压水头 3~13 m,弱透水,中等富水。

1.4 其他

项目所在地交通运输条件较好,桥址位于西江上游,目前可通航 2 000 t 船舶,水运便利;陆路可通过高速公路和地方道路到达桥址。

2 桥型方案设计

2.1 总体思路

主桥跨度由通航要求决定,需达到 535 m 以上,该跨度下的适用桥型有悬索桥、斜拉桥和拱桥。对于悬索桥而言,535 m 跨径较小,不是经济跨径。对于斜

拉桥而言,535 m 是常规跨径,也是经济跨径。对于拱桥,跨径布置要比悬索桥和斜拉桥更大一些,可能突破目前的拱桥跨径记录(目前世界最大跨径的拱桥朝天门大桥跨径为 552 m),因此拱桥方案是方案设计阶段的关键,尤其是在桥址地质情况相对复杂的条件下,不仅要充分论证技术可行性,还要控制方案的工程造价,使拱桥方案具有可比性。

桥面布置考虑市政桥梁功能布置人行道、非机动车道,机动车设置 4 个车道,桥面净宽 28 m(图 3)。

2.2 悬索桥方案

悬索桥采用单跨吊形式,跨径 535 m,加劲梁采用钢箱梁,两岸均采用重力式锚碇,其中考虑地质条件,北岸锚碇采用地下连续墙基础。两岸引桥考虑跨越防洪堤,采用现浇 PC 箱梁(图 4)。

2.3 斜拉桥方案

斜拉桥主跨 535 m,钢混组合梁是经济合理的主梁形式,同时考虑两岸边跨均在岸上,为节省投资,采用混合梁斜拉桥方案,即中跨采用钢混组合梁,边跨采用 PC 箱梁,设置 3 个辅助墩,同时考虑跨越防洪堤要求,桥跨布置见图 5。

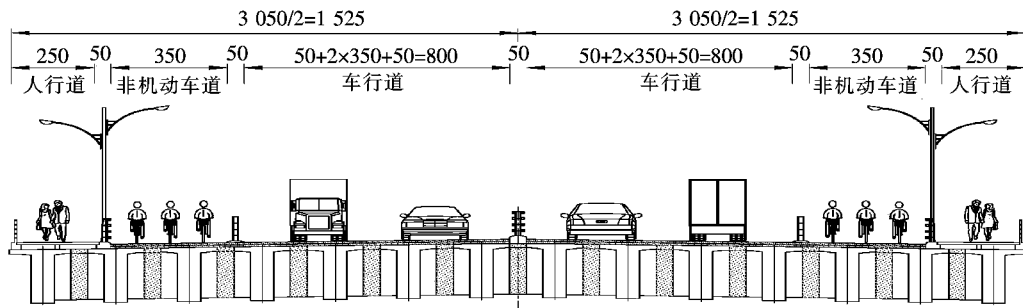


图 3 桥梁标准横断面布置(单位:cm)

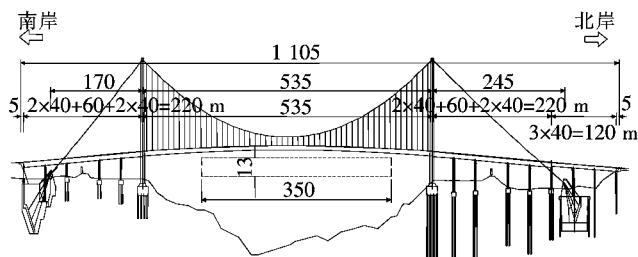


图 4 悬索桥方案立面布置图(单位:m)

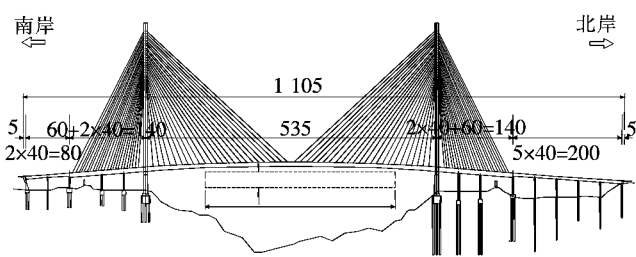


图 5 斜拉桥方案立面布置图(单位:m)

2.4 拱桥方案

2.4.1 跨径

拱桥跨径选择首先满足通航要求,即一跨过江跨径不小于 535 m,此外考虑拱座基础布置和施工需要合理布置跨径,在满足这些条件后跨径宜小不宜大。

2.4.2 体系

拱桥体系按拱座基础受力情况可分为无推力体系和有推力体系。无推力体系一般通过设置系杆平衡拱结构的水平推力,对于大跨径拱桥由于施工需要(先拱后梁)一般采用柔性系杆。无推力拱桥为自平衡体系,水平力不传递给基础,因此该体系对地基和地形适应

性更好,常用于基础地质条件较差的情况,如上海的卢浦大桥;此外飞燕式系杆拱桥可在水中设墩减少主跨长度,如合江三桥。平南三桥由于通航条件限制,水中不能设墩,采用飞燕式系杆拱边跨在岸上,由于桥面离地面不高,因此无条件设置边跨,系杆体系适合采用单跨的下承式系杆拱。

单跨下承式系杆拱桥方案拱座及基础体量较大,与有推力拱桥方案相比下部结构工程经济方面优势不大,考虑上部结构增加了系杆,不仅增加了上部结构的工程造价,而且施工工艺也更复杂,同时系杆后期运营需要定期更换,维护费用较高,因此相比之下有推力拱

桥方案更合理。

2.4.3 拱肋形式

大跨径拱桥拱肋形式主要有钢箱拱肋、钢桁拱肋、钢管混凝土拱肋,对于上述 3 种形式拱肋选择主要从经济上考虑,表 1 通过对同等跨径的 3 座已建成的拱桥进行比较(卢浦大桥、香溪长江大桥、合江一桥)进行说明。从表 1 可见:钢桁拱和钢箱拱经济指标相当,比钢管混凝土拱增加约 3 000 元/ m^2 ,以此指标计,平南三桥采用钢管混凝土拱肋将比钢桁或钢箱拱肋节省约 6 000 万元(保守估计),因此从节省投资角度考虑选择钢管混凝土拱肋。

表 1 拱肋形式工程经济性比较

| 桥名 | 桥型 | 跨径/ m | 桥宽/ m | 拱肋结构 | 桥面 结构 | 钢材用量/t | | 混凝土用量/ m^3 | | 估算经济指 标/(元· m^{-2}) |
|------|---------|----------|----------|-------|----------|--------|-------|---------------------|-------|----------------------------------|
| | | | | | | 拱肋 | 桥面 | 拱肋 | 桥面 | |
| 卢浦大桥 | 飞燕式系杆拱桥 | 550 | 39.5 | 钢箱 | 钢箱梁 | 12 219 | 8 251 | | | 11 307 |
| 香溪大桥 | 单跨推力拱桥 | 531 | 29.6 | 钢桁 | 组合梁 | 11 516 | 3 329 | | 2 795 | 11 867 |
| 合江一桥 | 单跨推力拱桥 | 535 | 30.6 | 钢管混凝土 | 组合梁 | 6 148 | 2 729 | 6 053 | 2 201 | 8 389 |

合江一桥的建设经验表明采用真空辅助灌注钢管内混凝土能有效解决灌注混凝土的密实性和脱空问题,同时根据郑皆连院士研究团队研究成果,目前中国建造 600 m 级钢管混凝土拱桥没有任何技术难题,因此平南三桥采用钢管混凝土拱桥方案合理可行。

2.4.4 基础形式

南岸地质条件较好,可采用明挖扩大基础。北岸地质条件较差,借鉴类似工程地质条件的悬索桥锚碇基础设计经验,对沉井和地下连续墙两种基础形式进行比选。通过经济技术比较,两种基础形式工程造价

相当,地下连续墙基础施工周期更短,施工风险小,基础可靠性更高(地下连续墙嵌岩),因此选择采用地下连续墙基础。

2.4.5 拱桥桥型

拱桥方案主桥采用计算跨径 560 m 的钢管混凝土拱桥,南岸明挖扩大基础,北岸地下连续墙基础。拱肋主弦管直径 1.4 m,拱顶桁高 8.5 m,拱脚桁高 17 m,桥道系采用格构式钢—混凝土组合结构(图 6)。

控制性计算表明主拱圈强度、稳定性、抗风及抗震性能均能满足规范要求。

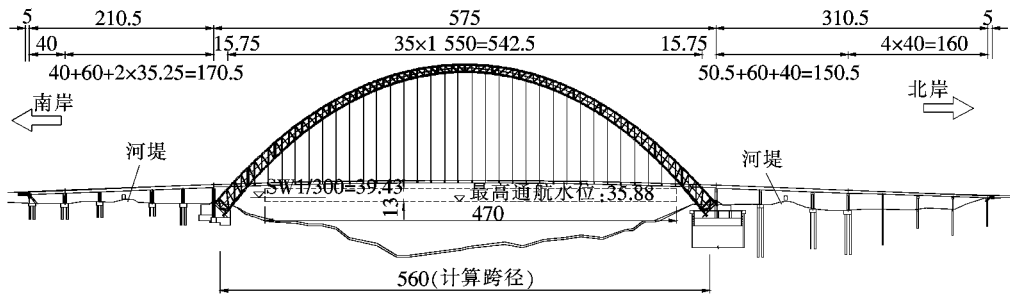


图 6 钢管混凝土拱桥方案立面布置图(单位:m)

3 桥型方案比选

平南三桥属于平南县地方桥梁,因此桥型选择应重点考察工程经济性及运营养护因素,此外还应综合考虑施工难度及施工工期、行车舒适性、桥梁景观等其他因素。

3.1 经济性分析

表 2 对 3 种桥型方案的主要材料及经济性进行了对比。悬索桥由于不在经济跨径范围,其经济指标和造价都是最高;拱桥虽然经济指标比斜拉桥高,但由于主桥长度比斜拉桥短,因此总投资比斜拉桥减少 1 034 万元。

假设北岸基础与南岸一样具有较好的地质条件,采用明挖扩大基础,那么拱桥方案总造价为 55 045 万

元,比斜拉桥方案少 4 278 万元;假设南岸基础地质条件与北岸一样,采用地下连续墙基础,则拱桥方案总造价为 61 533 万元,比斜拉桥方案多 2 210 万元。可见在要求一跨过江的条件下,600 m 级的钢管混凝土拱桥与斜拉桥经济性相当,地质条件对拱桥造价影响较大,地质条件较好时拱桥具有较好的经济性,地质条件较差时,斜拉桥具有较好的经济性。

为考察 600 m 以下跨径的钢管混凝土拱桥的经济性,对主跨 450、350、250 m 的斜拉桥和钢管混凝土拱桥进行比较,其中各项经济指标参考类似工程经验,拱桥经济指标考虑两岸地基条件较差的不利因素取较高值(表 3)。表 3 表明:即使考虑地质条件不利的情况下,钢管混凝土拱桥仍然具有良好的工程经济优势,如果地质条件较好时其经济性优势更为显著。

表 2 各桥型方案主要材料及经济性比较

| 桥型 方案 | 主跨跨 径/m | 桥长/ m | 桥宽/ m | 下部结构材料用量 | | 上部结构材料用量 | | | | 主桥 造价/ 万元 | 主桥经济 指标/ (元·m ⁻²) | 全桥 造价/ 万元 |
|----------|------------|----------|----------|------------------------|----------|------------------------|----------|----------|----------|-----------------|-------------------------------------|-----------------|
| | | | | 混凝土/ m ³ | 钢筋/ t | 混凝土/ m ³ | 钢筋/ t | 钢材/ t | 缆索/ t | | | |
| 悬索桥 | 535 | 535 | 35.0 | 132 022 | 8 940 | | | 10 321 | 3 085 | 54 378 | 29 040 | 65 182 |
| 斜拉桥 | 535 | 895 | 33.5 | 50 743 | 10 822 | 26 627 | 9 231 | 7 291 | 2 817 | 54 871 | 18 301 | 59 323 |
| 拱桥 | 575 | 575 | 36.5 | 63 866 | 2 904 | 11 433 | 1 018 | 12 251 | | 46 529 | 22 170 | 58 289 |

表 3 斜拉桥与钢管混凝土拱桥经济性比较

| 桥型 | 跨径 450 m | | | 跨径 350 m | | | 跨径 250 m | | |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 主桥经 济指标 | 引桥经 济指标 | 总造价/ 万元 | 主桥经 济指标 | 引桥经 济指标 | 总造价/ 万元 | 主桥经 济指标 | 引桥经 济指标 | 总造价/ 万元 |
| 斜拉桥 | 1.6 | 0.7 | 45 360 | 1.5 | 0.7 | 33 075 | 1.3 | 0.7 | 20 475 |
| 钢管混凝土拱桥 | 2.2 | 0.7 | 43 470 | 2.0 | 0.7 | 31 360 | 1.7 | 0.7 | 19 775 |

注:① 桥宽按 35 m 计;② 斜拉桥桥长按边中跨比 0.4 计;③ 引桥桥长为斜拉桥与拱桥主桥桥长之差;④ 经济指标单位为万元/m²。

3.2 运营养护

拱桥方案养护较容易,费用也是最低的,悬索桥由

于主缆的防腐养护要求较高其养护费用是最高的,斜拉桥因斜拉索养护成本较大其养护费用也较高(表 4)。

表 4 各桥型方案养护比较

| 桥型 | 主要养护内容 | 估算年平均养护 费用/(万元·年 ⁻¹) |
|---------|--|-------------------------------------|
| 悬索桥 | 钢梁及主缆防腐涂装养护(定期大修更换),吊索养护(定期大修更换),主缆除湿系统运营、维护及设备定期更换,桥面铺装养护(定期大修更换) | 409 |
| 斜拉桥 | 钢梁防腐涂装养护(定期大修更换),斜拉索养护(定期大修更换),桥面铺装养护(定期大修更换) | 312 |
| 钢管混凝土拱桥 | 钢管拱肋、钢梁防腐涂装养护(定期大修更换),吊索养护(定期大修更换),桥面铺装养护(定期大修更换) | 195 |

3.3 行车舒适性

斜拉桥和悬索桥都属索承重结构,结构刚度相对拱桥要小,以主梁挠度指标考察,平南三桥悬索桥最大挠度为 1 380 mm,斜拉桥最大挠度为 515 mm,拱桥最大挠度为 142 mm,可见钢管混凝土拱桥刚度明显优于悬索桥和斜拉桥,其行车舒适性更好。

3.4 施工难度及施工工期

斜拉桥和悬索桥方案跨径在常规范围,已建成类似的工程很多,施工工艺成熟,施工难度较低。钢管混凝土拱桥跨径突破现有拱桥跨径,并采用了地下连续

墙基础,拱肋钢结构的加工、现场吊装、管内混凝土灌注及地下连续墙成槽、基坑开挖等施工工艺要求高,施工安全、施工质量和施工精度等控制要求严格,因此拱桥方案施工难度较大。

工期方面,钢管混凝土拱桥采用斜拉扣挂、缆索吊装施工,施工速度快,工期较短。平南三桥悬索桥方案工期约为 36 个月,斜拉桥工期约为 38 个月,拱桥方案工期约为 35 月(考虑洪水不利影响)。

3.5 技术风险及解决方案

斜拉桥和悬索桥方案跨径在常规范围,技术成熟,

风险较低。

拱桥方案技术风险较高,主要有两个方面:

(1) 拱肋的技术风险。钢管混凝土拱桥跨径 575 m,比目前已经建成的最大跨径同类桥型跨径增长了 45 m(合江一桥跨径 530 m),因此拱肋的设计及施工风险相对较高。近年来中国钢管混凝土拱桥建造技术得到了极大的发展,真空辅助灌注管内混凝土技术、自密实无收缩混凝土技术、扣塔位移主动控制技术等一系列自主创新技术使得大跨径钢管混凝土拱桥建造技术又迈上一个新台阶。同时中国国内科研机构、设计院等对 700 m 级跨径的钢管混凝土拱桥建造关键技术进行了充分的研究,这些研究成果为钢管混凝土拱桥向更大跨径发展提供了理论基础。因此拱肋的技术风险总体上是可控的,充分利用合江一桥等大跨径钢管混凝土拱桥的建设经验和相关的科研成果,采用先进施工技术,加强设计、施工、监理等各个环节的管理,选择高水平的建设队伍,可有效降低拱肋的技术风险。

(2) 地下连续墙基础技术风险。拱桥方案北岸采用地下连续墙基础,该基础形式在同类桥型中未有过工程应用,因此地下连续墙基础设计和施工风险较高。近年来中国有多座大跨径悬索桥的锚碇采用地下连续墙基础(如虎门二桥坭洲水道桥采用直径 90 m 的地下连续墙作为锚碇基础),拱桥和悬索桥锚碇基础受力类似,均承受较大的水平荷载,因此充分借鉴大跨径悬索桥的锚碇地下连续墙基础建设经验,加强设计、施工、监理等各个环节的管理,可以有效降低地下连续墙基础的技术风险。

3.6 桥梁景观

总体上悬索桥和拱桥比例协调,与环境融合较好,斜拉桥由于边跨主梁均在岸上,且两岸桥面离地面不高,因此比例协调性相对较差,与环境融合度也较差。

3.7 推荐方案

从减轻地方财政压力角度考虑,平南三桥方案选择重点考虑经济性和运营养护两方面因素。

经济性:拱桥方案比斜拉桥方案节省 1 034 万元,相当于平南县一年财政收入的 0.5%(平南县 2018 年财政收入 19.8 亿元),其经济效益是显著的。

养护成本:斜拉桥换索费用高,按斜拉索用量 2 300 t 计算,换一次索需要花费 6 000 多万元,这对于县财政来说是一个巨大的开支,而拱桥吊杆更换一次仅需 600 多万元(吊杆用量按 220 t 计算),比斜拉桥换索费用要低得多。

由此可见,拱桥方案在经济性和运营养护方面具

有显著的优势,其他方面如行车舒适性、桥梁景观等方面拱桥方案均具有优势。尽管拱桥方案施工难度较大,技术风险也较高,但通过合理选择施工队伍,加强施工管理和监控,采取合理的技术风险应对措施,拱桥方案是合理可行的。综合上述因素选择钢管混凝土拱桥为推荐方案。

4 方案实施情况

平南三桥于 2018 年下半年开工建设,两岸基础及下部结构已顺利完成,目前拱肋已完成安装,预计 2020 年 12 月建成通车。

5 结论

(1) 在同等跨径条件下,钢管混凝土拱桥与斜拉桥具有经济可比性,方案设计阶段宜进行同深度比选。

(2) 经济性相当条件下,钢管混凝土拱桥在行车舒适度和养护方面具有显著的优势,是首选的合理桥型方案。

(3) 钢管混凝土拱桥是一种经济实用的桥型,以目前的桥梁技术能力钢管混凝土拱桥可以做到 700 m 左右跨径,在这个跨径范围内钢管混凝土拱桥的应用具有良好的应用发展前景。以广西为例,对于平原地区跨江桥梁,很多情况由于通航和桥位选线的限制桥梁必须一跨过江,而广西地区沿河地质覆盖层一般在 40 m 以内,因此即使考虑地质条件不利等因素,钢管混凝土拱桥仍然具有较好的经济性;对于山区峡谷桥梁,斜拉桥由于需要控制桥塔高度,其跨径往往比拱桥更大,而且山区地质条件一般较好,因此钢管混凝土拱桥具有显著的优势。

参考文献:

- [1] 王雷,陈政清,梁立农,等.榕江大桥总体设计[J].中外公路,2016(4).
- [2] 张晋瑞,李程,胡建华,等.岳阳洞庭湖大桥主桥结构设计与整体分析[J].中外公路,2017(6).
- [3] 郑皆连.大跨径拱桥的发展及展望[J].中国公路,2017(13).
- [4] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017(6).
- [5] 郑皆连,王建军,牟廷敏,等.700 m 级钢管混凝土拱桥设计与建造可行性研究[J].中国工程科学,2014(8).