

平南三桥北岸拱座基础方案比选

廖宸锋, 欧阳平, 罗富元

(广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530029)

摘要:目前在复杂地质条件下大跨度拱桥多采用无推力系杆结构,有推力的大跨度拱桥鲜有应用,相关研究较少。平南三桥是建造在复杂地质条件下的超大跨度有推力钢管混凝土拱桥,其中北岸拱座基础场地覆盖层厚、基岩埋藏较深,成为设计的关键。该文介绍了平南三桥北岸拱座基础方案的比选情况,可为类似地质条件的大跨度拱桥设计提供借鉴和参考。

关键词:大跨度拱桥; 钢管混凝土拱桥; 复杂地质条件; 基础方案

传统设计理念中,复杂地质条件并不适合修建大跨径拱桥,因为拱座处产生的巨大推力需要良好的地基来承担,以控制地基变形对结构受力的不利影响,因此目前在复杂地质条件下修建有推力大跨度拱桥的工程案例极少,可参考的工程经验缺乏,这也在一定程度上阻碍了大跨度拱桥的发展。

1 平南三桥工程概况

1.1 地质特点

平南三桥为广西荔浦至玉林高速公路平南连接线上的一座特大桥,大桥跨越浔江,桥型为跨径 575 m 的钢管混凝土拱桥,主拱采用钢管混凝土桁式结构,整束挤压钢绞线吊索体系,计算矢跨比为 1/4,拱轴系数为 1.5,拱肋中距为 30.1 m,桥面标准横断面宽度为 36.5 m,桥道系为格构式钢—混凝土组合结构。桥位区地处冲积河流河谷~阶地地貌,河谷呈近似“U”形,江面宽约 440 m,北岸基础区域地层主要由第四系冲洪积层、泥盆系中统郁江阶组成。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,覆盖层总厚度最厚处达到 40 m。根据勘察成果,其中的卵石层粒径为 20~100 mm,含量为 50%~70%,间隙充填圆砾、细砂及粉质黏土,承载力基本容许值为 380 kPa。

北岸下伏基岩为中风化灰岩,特点为以密集发育的溶蚀裂隙或狭长发育的溶洞为主,根据勘察揭示主要以浅表灰岩中发育的小型溶洞为主,钻孔遇洞率约为 33.3%,属岩溶中等发育地段。灰岩岩石饱和单轴

抗压强度标准值为 14.7 MPa,承载力为 1.2 MPa,属软岩。另勘察结果显示,基础范围内下伏基岩的岩面起伏较大,基岩面最大高差超过 8 m,且局部有隆起。

1.2 水文地质

桥区分布大型地表水体浔江,北岸上层滞水赋存于硬塑状粉质黏土中,弱透水,极弱富水;卵石层孔隙水具备承压性,河床底面高程与卵石层顶面高程相近,卵石层孔隙水稳水位与河水位相近,属强透水层,中等富水~强富水,卵石孔隙水与河水呈互补关系,与浔江河水水力联系较强,其承压水头标高为 12~20 m;下伏灰岩赋存岩溶裂隙水,也具备承压性,承压水头标高为 20~30 m,稳定水位略高于浔江水位,属中等透水层,中等富水,与浔江水力联系一般。根据承压水头标高,如基础进行基坑开挖揭开卵石层时即面临卵石层孔隙水突涌问题。此外,拟建桥梁基础除面临卵石层孔隙水和岩溶裂隙水突涌问题外,上层滞水和卵石层孔隙水的渗流会对基坑土体稳定产生一定影响。

大桥北岸建设条件异常复杂,是建设在不良复杂地质条件下的超大跨径拱桥。经过初步设计、技术设计等多阶段以及多方案的比选,北岸拱座最终采用了创新性的“圆形地连墙+注浆卵石层”的复合拱座基础方案。图 1 为平南三桥桥型示意图,下文简要介绍其北岸拱座基础比选方案情况。

2 北岸拱座基础方案选择

目前拱桥的拱座基础主要有明挖基础、复合桩基

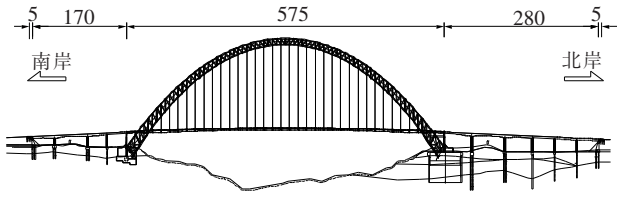


图 1 平南三桥桥型示意图(单位:m)

础(介于明挖基础和桩基础之间)、嵌岩基础(类似单桩,一般采用隧道式开挖)3种形式。明挖基础结构简单,整体刚度大,基础一般设计成台阶状,应用于地质良好的区域,也是目前拱桥应用最为广泛的基础形式。后两种基础形式在山区应用较多。

平南三桥北岸基础地质复杂,覆盖层深厚,以上3种基础形式均不适用于该桥的地质条件,而大跨度拱桥也无在类似地质条件下修建的先例。根据调研,近年来在深厚覆盖层地区建设了较多的特大跨径悬索桥,其锚碇基础的受力方向虽与拱桥相反,但也有一定的共同之处。根据计算,平南三桥在最不利荷载工况下拱座水平推力约为 256 040 kN,与跨度为 950 m 的悬索桥锚碇承受的水平拉力相当,借鉴国内外悬索桥锚碇基础的设计经验,方案比选时主要在沉井基础方案及地下连续墙两大类方案中进行。

根据 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》计算卵石层地基承载力。其中,卵石层地基承载力基本容许值 $[f_{a0}] = 320$ kPa,地基承载力宽度修正系数 k_1 取 1.5(按卵石为稍密状态考虑);地基承载力深度修正系数 k_2 取 3.0(按卵石为稍密状态考虑),修正后卵石层地基承载力容许值 $[f_a] = 815$ kPa。大桥承受的竖向力约为 260 000 kN,经计算,北岸卵石层满足受力要求,可作为基础持力层。

2.1 沉井基础方案

沉井基础特点为整体性强,稳定性好,能承受较大的水平及竖向荷载,因其埋置深度大,是一种适用于深厚覆盖层地区的基础形式。沉井基础施工可依靠自身重力,根据情况辅以取土排水、配重加压、泥浆套、空气幕、振动法等多种措施下沉,施工技术已很成熟。大尺寸、下沉深的大型沉井基础在中国也有多个应用案例,如泰州长江公路大桥、五峰山公铁两用大桥等。

根据拱座外观尺寸,采用矩形截面整体式钢筋混凝土沉井基础,基础除了作为受力结构外,兼作施工时的挡水、挡土支护结构。基础设计高度为 34.5 m,平面尺寸为 55 m×44.1 m,内部设置 4×5 个隔舱,壁厚沿竖向采用分段变厚方式设置,基础顶面以下 0~

12.5 m 范围壁厚 1.3 m,12.5~23.5 m 范围壁厚为 1.8 m,23.5~沉井底范围壁厚 2.0 m,其中首节段采用钢壳。内部隔板厚度均为 1.0 m,沉井封底厚度为 6.0 m,顶板厚 5.0 m,基础总体布置见图 2。沉井采用排水下沉施工,下沉前在沉井外围设置止水帷幕。基础共分 6 个节段,分 12 次下沉到位。针对北岸基础范围钻孔揭示岩溶较发育情况,考虑在沉井基础底部采用混凝土桩基穿过溶洞的方式传递上部结构荷载。

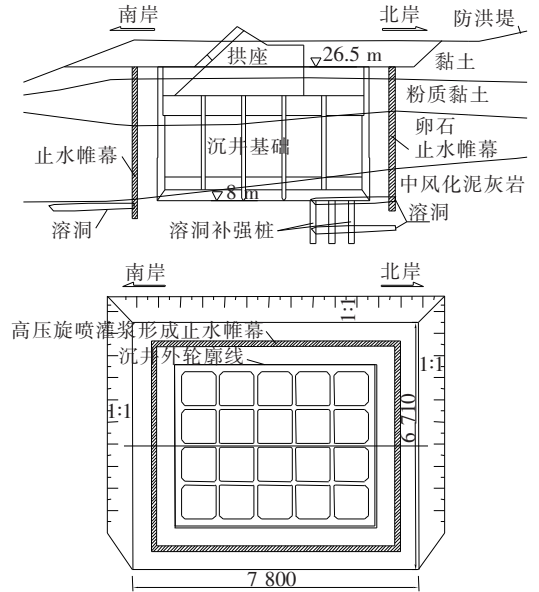


图 2 沉井基础方案总体布置(单位:cm)

2.2 矩形地下连续墙方案

地下连续墙自 1954 年在意大利成功应用后,经过多年发展,技术日益成熟,广泛应用于各种结构基础,包括特大型桥梁,尤其是大跨悬索桥。地连墙与沉井一样,兼具挡土、挡水及承重功能,其突出优点为可不采取排水措施,对周边土体及建筑物影响小,且对地质条件的适应性更强,如岩面起伏较大的基岩。

矩形地连墙方案设计平面尺寸为 55 m×42.5 m,墙厚 1.2 m,墙身嵌入中风化完整灰岩不小于 3 m;其外围同样设置止水帷幕,防止在地连墙成槽阶段卵石层发生塌孔;连续墙顶部采用钢支撑、底部采用钢筋混凝土支撑(图 3)。

2.3 圆形地下连续墙方案

圆形地连墙基础由地连墙、内衬、帽梁、填芯、底板组成。地连墙直径为 60.0 m,墙身厚 1.2 m,由于岩面起伏较大,墙身按不等高设计,但需保证墙身嵌入中风化灰岩不小于 5 m。

为满足地连墙内部开挖受力要求,在地连墙内侧

设置圆形刚性混凝土内衬。根据受力不同,内衬厚度沿竖向采取分段变厚方式设置,帽梁以下10 m深度范围厚度1.0 m,10~20 m深度范围厚1.5 m,20 m以下的深度范围厚2.0 m。

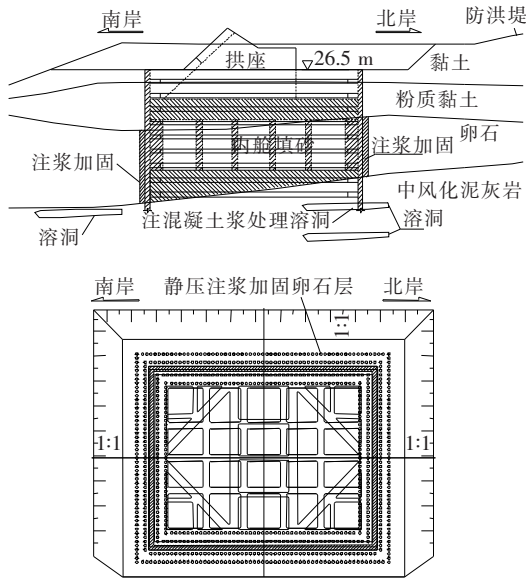


图3 矩形地连墙基础方案总体布置

为了避免基岩开挖,减小施工难度,保持基岩的完整性,以天然岩面作为底板底面,底板到拱座底面之

间采用填芯混凝土填充,以增强基础结构的整体性。填芯混凝土与内衬底板和拱座间设置连接钢筋(图4)。

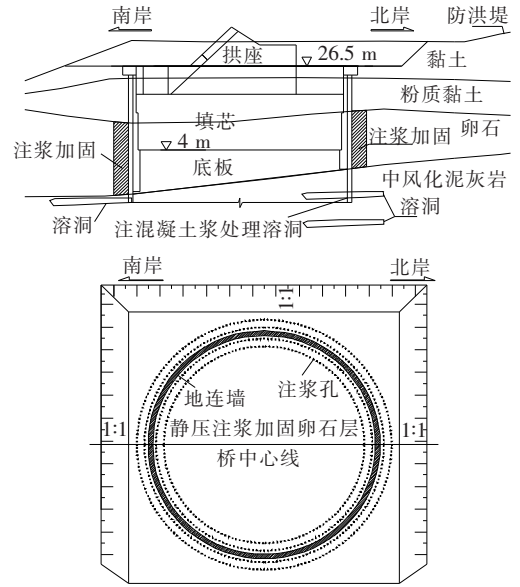


图4 圆形地连墙基础方案总体布置

2.4 方案比选

基础方案比较见表1。根据该桥地质水位条件,综合考虑结构受力特点、经济性、施工周期、施工难度、施工风险等因素,经过深入研究及分析计算,最终选择圆形地下连续墙方案。

表1 基础方案比较

基础形式	可靠性	基础混凝土方量/ m ³	基础内开挖方量/ m ³	工程造价/ 万元	施工工期/ 月	施工难易	环境影响	施工风险
沉井基础	基础嵌入中风化灰岩,基础可靠性较高	41 020 (填芯采用砂)	83 680	10 000	18	沉井需穿透深厚卵石层并嵌入不平整基岩,下沉及纠偏难度大	排水下沉,对周边土体有一定影响	较大
矩形地连墙基础	墙身嵌入中风化灰岩,内衬墙及隔板形成后,基础整体性好,基础可靠性较高	50 886 (填芯采用砂)	74 750	10 800	15	施工工艺成熟,但内支撑及内隔墙施工繁复,且内支撑影响开挖作业面,施工困难	对周边土体影响小	中
圆形地连墙基础	墙身嵌入中风化泥灰岩,底板、填芯及内衬整体浇筑,基础整体性较好,基础可靠性较高	71 884 (含填芯混凝土)	91 764	9 300	10	受地质约束小,施工工艺成熟,无内支撑,仅需施工内衬,施工方便快捷	对周边土体影响小	中

3 圆形地下连续墙方案优化

基础方案形式确定后,对整体式圆形地连墙基础方案进行进一步分析研究。根据该桥地质水文条件,

卵石层为承压水层,而采用整体式圆形地连墙方案,地连墙槽段施工完成后,采用逆筑法施工,分层开挖内部土体一直到基岩面,因此当揭开卵石层时,将面临着突涌的风险,开挖至岩面时,还可能面临岩溶裂隙水的突涌问题。根据现场勘察及现场试验,预测清除完卵石

层时,基底总涌水量为 $4\ 728\ \text{m}^3/\text{d}$ 。

为解决上述工程难点,在圆形地连墙方案的基础上,提出将卵石层作为拱座基础的主要持力层方案,并充分利用圆形地连墙的环向效应,对地基土施加“套箍作用”,使地基土整体处于三向受力状态,以提高地基土的强度、承载力,减少基础沉降,形成“圆形地连墙+卵石层”的复合基础(图 5)。基坑底面的设计标高为 $11.0\ \text{m}$,该标高仅需对卵石层进行 $1\ \text{m}$ 的开挖,同时将地连墙的内衬厚度均优化为 $1.5\ \text{m}$ 。由于卵石层受地下水动力作用影响较大,且天然卵石层压缩性较大,为进一步加强结构安全,以防止基础发生过大沉降、不均匀沉降及基底涌水等,对卵石层进行注浆加固。注浆的目的以降低卵石层渗透系数为主,加固为辅,同时控制地下水动力作用对卵石层力学性质造成的影响。经过比选,注浆工艺采用静压注浆工艺。

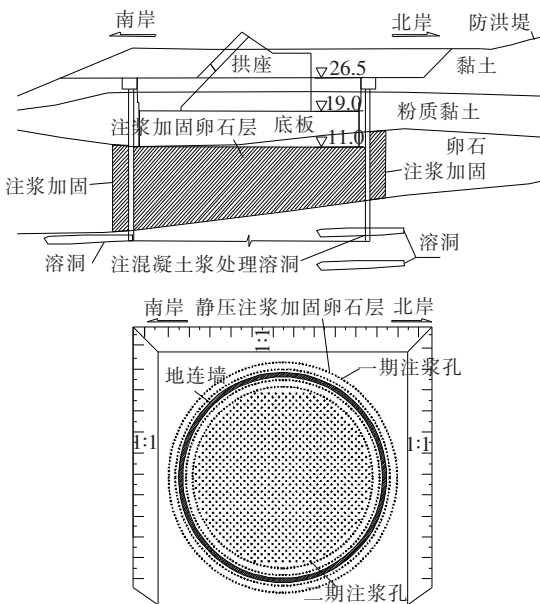


图 5 圆形地下连续墙+卵石层注浆基础方案
总体布置(单位:m)

在不考虑地下连续墙参与受力的情况下,以天然卵石层作为地基条件计算,拱座基础各项指标均能满足要求。该方案与整体式圆形地下连续墙方案相比,工期可由 10 个月缩短至 6 个月,工程造价由 9 300 万元减至约 7 200 万元,优势明显,风险小,最终实施采用了该方案。

4 结论

平南三桥地质条件复杂,北岸拱座基础设计是大桥设计的关键。大桥最终创新性地采用了“圆形地下连续墙+卵石层注浆”的新型复合基础方案,可为今后类似条件的桥梁设计提供有益借鉴。经过对平南三桥北岸拱座基础方案的比选研究,可得以下结论:

(1) 大跨度拱桥拱座基础与悬索桥锚碇基础受力具有一定相似性,都承受巨大的水平力,因此可借鉴地质条件类似的悬索桥锚碇基础设计经验,合理选取基础形式。

(2) 圆形地下连续墙具有良好的力学性能,且施工适应性强,是一种适用于复杂地质条件的大跨度拱桥基础形式。

(3) 复杂地质条件下大跨度拱桥设计时,应综合采用勘察手段,查明地质情况,掌握各风险点,并在基础方案设计时结合风险点进行设计。

平南三桥已于 2020 年 12 月 28 日顺利通车,北岸基础建设过程也非常顺利,进一步验证了该基础方案的可靠性。

参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 北京:人民交通出版社, 2016.
- [2] 郑皆连,王建军,牟廷敏,等. 700m 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).
- [3] 郑皆连. 我国大跨径混凝土拱桥的发展新趋势[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016(S1).
- [4] 侯明勋,房营光,胡桂衔. 基于 ANSYS 的地下连续墙水平位移数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2011(32).
- [5] 翟杰群,谢小林,贾坚. “上海中心”深大圆形基坑的设计计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010(S1).
- [6] 沈健,王卫东,翁其平. 圆形基坑地下连续墙分析方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008(S).
- [7] 周昌栋,袁庆华,代明净,等. 悬索桥锚碇基础强透水地层施工防渗技术[J]. 世界桥梁, 2016(5).
- [8] 顾倩燕,朱宪辉,田振,等. 超大直径圆形薄壁地下连续墙围护结构研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005(4).
- [9] 赫宏伟. 黄河机场特大桥基础钢板桩围堰水下封底混凝土设计及施工[J]. 中外公路, 2019(1).