

赣粤运河越岭段通航隧洞平面布置方案研究

姜兴良^{1,2,3}, 庄鑫¹, 胡彧元¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100;
3. 中交集团内河水运建设技术研发中心, 北京 100007)

摘 要: 针对赣粤运河桃沱线越岭段航道环境低影响建设高效通航设施的难题, 根据该段地形地质、水头高差、货运需求等条件, 开展航道结构形式选择与通航隧洞平面布置方案研究, 提出明渠、隧洞、渡槽的适用准则, 对重点航段进行方案比选; 通过构建船舶航行时间模型, 测算不同方案的通航通过能力, 综合分析各方案的技术、经济及环境影响。确定乌迳上枢纽—火烧桥村、百罗村—梨坑枢纽段采用明渠通航方案; 提出火烧桥村—百罗村航段双洞平行布置方案, 测算表明通航明渠通过能力为双线隧洞的 1.57 倍, 双线隧洞方案可满足北上货运需求; 该航段隧洞方案在征地、开挖量、投资及环境影响方面优于明渠, 但通航时间更长、运维难度更大, 前期研究阶段推荐明渠方案。研究提出的航道结构选型准则及平面布置方案, 可为赣粤运河建设及同类超大断面通航隧洞设计提供技术支撑。

关键词: 赣粤运河; 通航隧洞; 平面布置; 通过能力

中图分类号: U6; U612; U643

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2026)09-0084-08

doi: 10.7640/zggwjs202609012

Layout scheme of navigable tunnel for ridge-crossing section of Ganyue Canal

Jiang Xingliang^{1,2,3}, Zhuang Xin¹, Hu Yuyuan¹

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China; 2. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 3. CCCC Group Inland Waterway Transportation Construction Technology R&D Center, Beijing 100007, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of constructing high-efficiency navigation facilities with low environmental impact for the ridge-crossing reach of the Taozhen Route of the Ganyue Canal, this study carries out research on the selection of waterway structural forms and the plane layout scheme of navigation tunnels according to the topographic and geological conditions, water head differences, freight demand and other conditions of this reach. The applicable criteria for open channels, tunnels and aqueducts are proposed, and scheme comparison and selection are conducted for key reaches. By establishing a ship navigation time model, the navigation capacity of different schemes is calculated, and the technical, economic and environmental impacts of each scheme are comprehensively analyzed. It is determined that the open channel navigation scheme is adopted for the reaches from Wujing Upper Junction to Huoshaoqiao Village and from Bailuo Village to Likeng Junction. A parallel twin-tube navigation tunnel layout scheme is proposed for the reach from Huoshaoqiao Village to Bailuo Village. The calculation shows that the navigation capacity of the open channel is 1.57 times that of the twin-tube tunnel, and the twin-tube tunnel scheme can meet the northbound freight demand. For this reach, the tunnel scheme is superior to the open channel in terms of land acquisition, excavation volume, investment and environmental impact, but it has longer navigation time and greater operation and maintenance difficulty, so the open channel scheme is recommended for the preliminary research stage. The proposed selection criteria for waterway structures and plan layout schemes can provide technical support for the construction of the

收稿日期: 2026-04-12 修回日期: 2026-06-10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFB2604700)

作者简介: 姜兴良 (1983—), 男, 山东济宁人, 正高级工程师, 土木水利专业, 主要从事港航工程咨询设计及项目管理工作。

E-mail: jiangxingliang@pdiwt.com.cn

Ganyue Canal and the design of similar super-large cross-section navigable tunnels.

Key words: Ganyue Canal; navigation tunnel; plane layout; navigation capacity

0 引言

赣粤运河是我国“四纵四横两网”高等级航道网的重要组成部分,是连接长江流域与珠江流域的关键水运通道^[1]。越岭段地形起伏大、地质条件复杂,生态环境约束强,是全线工程建设的重难点区段,其航道结构选型与总体布置方案,直接关系到整条运河的通航效率、运行安全、工程投资与生态效益。相较于传统通航明渠,通航隧洞能够有效克服山地地形高差、缩减航行线路,兼具占地少、开挖量小、生态扰动弱、综合造价低等优势^[2],成为越岭段航道建设的优选方案之一,因此开展越岭段通航隧洞平面布置方案研究,对工程落地实施具有极强的现实指导意义。

近年来,众多学者在通航隧洞领域开展了大量研究。在结构形式选择方面,德国美因-多瑙运河、法国南运河等跨流域运河工程,针对不同地形条件形成明渠、隧洞、渡槽相结合的航道布局模式,核心是根据地形高程临界值划分结构适用区域。李焱等^[3]针对构皮滩通航隧洞开展尺度优化研究,提出基于船舶航行安全的断面设计控制指标;汤建宏等^[4]通过经济性分析,建立高坝通航隧洞断面选型的量化模型;吴德兴等^[5]围绕富春江通航隧道建筑限界与内轮廓设计,提出了适应浅水航道的断面形式;很多研究人员采用数值模拟方法研究船舶在限制性浅水航道的航行特性,揭示了航道尺度对船舶操纵性的影响机制^[6-11]。

综上所述,目前成果主要为隧洞断面尺度优化设计和船舶航行特性试验研究,针对通航隧洞平面布置、通过能力与过洞方式的研究较少,更

无相关的规范依据。本文以赣粤运河越岭段通航隧洞工程为研究对象,综合地形地质、水文条件、货运规模、施工建设、生态保护及运营维护等多重约束条件,系统开展航道结构选型、通航隧洞平面布置及多方案综合比选研究,建立了越岭航道结构选型量化准则,形成通用选形体系,完善了受限航道通航能力测算方法,总结了生态敏感山区航段综合决策逻辑,构建分阶段方案比选机制。研究成果将为赣粤运河越岭段工程的顺利推进提供技术支撑,同时完善我国越岭段超大断面通航隧洞的设计理论与方法体系。

1 工程概况

赣粤运河推荐线路桃浈线按内河Ⅱ级航道标准建设,代表船型为2000吨级干散货船,尺度为88 m×16.3 m×2.6 m(总长×总宽×满载吃水),预测2035年、2050年越岭段货运量分别为5320万t(北上3350万t,南下1970万t)和8460万t(北上4480万t,南下3980万t)。为兼顾长江与西江船型尺度,并与赣江、浈江中洪水期水深衔接,赣粤运河工程预可行性研究报告提出,天然河流段航道尺度(底宽×最小水深×最小弯曲半径)为80 m×3.5 m×500 m,越岭段航道尺度为70 m×4.8 m×500 m。各梯级枢纽一次性建成双线2000吨级船闸,船闸有效尺度(长×宽×门槛水深)为300 m×34 m×5.5 m。越岭段位于梨坑枢纽和乌迳上枢纽之间,地形高程为165~350 m,通航水位为172~180 m^[12]。通航明渠线路方案两枢纽间航道长约25.60 km,通航隧洞线路方案两枢纽间航道长约23.67 km,通航线路示意图见图1。

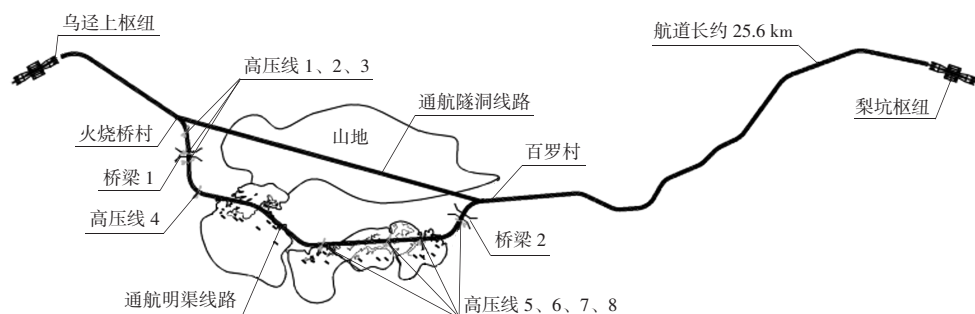


图1 通航线路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of navigable routes

2 越岭段航道结构形式选择

2.1 影响因素分析

赣粤运河桃浪线越岭段地形起伏悬殊、地质条件复杂、生态管控严格,同时受水位变化、货运需求、施工建设及运维管理多重约束。从地形地质、水头高差与水文条件、货运需求与通航能力、施工条件、生态环境、后期运维 6 大维度,分析各因素对航道选型的影响,为方案比选提供完整依据。

1) 地形地质条件

乌迳上枢纽—火烧桥村、百罗村—梨坑枢纽两段间地貌以剥蚀堆积岗地和河谷堆积平原为主,岸形顺直、地形平缓,具备明渠开挖与布置条件,适宜建设通航明渠。火烧桥村—百罗村段地貌以丘陵、山地为主,地表起伏大、无天然可利用河道,山丘植被茂密,地表展线空间不足,应开展通航明渠与通航隧洞方案比选。

越岭段断裂构造发育,多条断裂带穿越运河线路,岩体稳定性总体偏弱^[13]。明渠开挖将形成大面积岩质高边坡,场区软质岩石占比高,遇水易软化,风干失水易干裂,边坡失稳风险突出,明渠方案需配套完善的边坡防护工程。沿线主要地层以第四系冲积层、坡积层、残积层为主,下伏多类软质基岩。中风化砂砾岩单轴饱和抗压强度约 9~15 MPa,中风化泥质粉砂岩单轴饱和抗压强度约 4.0 MPa,岩体抗压强度偏低、变形量较大。通航隧洞虽然可以规避地表高边坡的问题,但是到受断层、风化层的影响,成洞难度提升,必须强化衬砌与支护体系。综合地质特征,2 类方案均需进行针对性工程处理,在技术层面上各有优劣。

2) 水头高差与水文条件

越岭段天然河道洪水、枯水水位变幅大,通过修建航运枢纽,将通航水位控制在 172~180 m,水位变幅为 8 m。越岭段枯水季天然水量无法满足航运用水需求,需修建极富水库、提水泵站联合补水保障通航水位。通航明渠水面直接与大气接触,水体蒸发、渗漏损耗量大。

通航隧洞为封闭式衬砌结构,可大幅减少蒸发与水下渗漏,水资源利用效率更高。同时,明渠受外部降雨、地表径流影响,流态易发生扰动;隧洞内部水流稳定,受外界水文变化干扰极小,通航水位和流态保障度更高。

3) 货运需求与航道通过能力

根据货运量预测和船型发展趋势分析,确定赣粤运河船舶艘次比见表 1,则 2035 年和 2050 年船舶平均吨位分别为 1 204 t 和 1 890 t。

表 1 赣粤运河通航船舶艘次比

Table 1 Ship traffic volume ratio of the Ganyue Canal

船舶种类	船舶吨级 DWT/t	艘次比/%	
		2035 年	2050 年
散货船	500	6.30	0
	1 000	42.10	13.40
	1 500	22.50	16.30
	2 000	6.80	30.20
	3 000	0	11.50
集装箱船	500	2.00	0
	1 000	10.60	4.30
	1 500	6.40	5.80
	2 000	3.30	12.30
	3 000	0	6.20

乌迳上枢纽—梨坑枢纽间航道尺度为 70 m×4.8 m×500 m,其通过能力可按式(1)计算^[14]:

$$c = \frac{pv_1 t}{D} \times \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times \alpha_4 \quad (1)$$

式中: c 为航道通过能力,万 t; p 为航段内船舶吨位, t; v_1 为航速, km/h, 取 10 km/h; t 为全年航行小时数, h, 取航行率为 85%, 营运率为 90%, 则 $t=6\,150.6$ h; D 为 2 艘前进船舶最小安全距离, km, 取 0.5 km; α_1 为船只密度增大时, 航行阻力增加引起的运量折减系数, 取 0.8; α_2 为港口工作不规则影响运量折减系数, 取 0.7; α_3 为变吃水使船只减载系数, 取 0.8; α_4 为船队及航行交叉避让使船舶减速迟缓的影响系数, 取 0.8。

该段航道 2035 年和 2050 年单向通过能力分别为 5 308 万 t 和 8 332 万 t, 能够满足货运需求, 且明渠双向通航、航速高, 通行效率优势显著。

通航隧洞断面尺度小, 船舶在隧洞中航行受边界条件约束明显, 根据类似项目研究成果, 船舶自航速度约 4.32~5.4 km/h, 取 5 km/h 计算通过能力。建设双线通航隧洞时, 按照下行船舶走右侧隧洞, 上行船舶走左侧隧洞的原则通航。假定船舶依次进出通航隧洞, 船舶安全间距以 4 倍船长计算, 则 n 艘船舶通过隧洞的总时间可按式(2)计算。

$$T = \frac{n \times L_s + (n-1) \times 4L_s + L_t}{v_2 \times 60} \quad (2)$$

式中: T 为船舶通过隧洞的总时间, min; n 为通过隧洞的船舶数, 艘; L_s 为设计代表船型总长, m, 取 88 m; L_t 为隧洞长度, m, 取 7 390 m; v_2 为隧洞内船舶航速, m/s, 按 1.39 m/s 考虑。

日工作时间按 22 h 计算, 则日单向通过隧洞的船舶数量为 234 艘。

年通航天数按 335 d 计, 则 2035 年和 2050 年通航隧洞的单向年通过能力分别为 3 382 万 t 和 5 310 万 t, 刚好满足北上 3 350 万 t 和 4 480 万 t 的货运需求。

通航明渠和双向通航隧洞通过能力均能满足设计货运要求, 通航明渠通过能力约为双线通航隧洞的 1.57 倍, 但是 2 类方案的通行效率存在明显差距。

4) 施工条件

乌迳上枢纽—火烧桥村、百罗村—梨坑枢纽段场地开阔, 交通便利, 土石方开挖、边坡施工、建材运输作业条件优越, 明渠施工工艺成熟、组织难度低。火烧桥村—百罗村段地处山地, 场地狭窄, 施工道路、弃渣场布置困难; 且线路毗邻孔江水水库库尾, 施工活动易扰动水体, 环保管控要求严苛。

明渠以露天土石方工程为主, 施工技术门槛低、从业队伍资源充足; 通航隧洞涉及洞挖、围岩支护、衬砌、通风照明等多专业工序, 施工技术复杂、专项设备要求高。

5) 生态环境约束

越岭段山地植被覆盖率高, 属于生态敏感区域。通航明渠线路长、开挖范围广, 会占用大量耕地与林地, 大面积地表开挖易引发水土流失、噪声与粉尘污染, 同时需改造沿线桥梁、高压线路, 对原有地表构筑物及生态格局扰动较大。

通航隧洞以地下工程为主, 地表扰动范围极小, 征地、拆迁规模大幅缩减, 可有效避让耕地与原生植被, 弃渣、水土流失、大气污染等环境问题显著弱化, 生态友好性更强, 也能降低项目环评、用地审批难度。

6) 后期运维管理

通航明渠结构外露, 边坡病害、淤积、设施损坏等问题易排查、易维修, 运维技术简单、成本较低; 但常年受水流、雨水冲刷, 需常态化开展边坡防护、清淤工作。

通航隧洞为封闭空间, 需长期配套通风、照

明、消防、监控等附属系统, 设备运维品类多、能耗高; 洞内故障、船舶事故、火灾等险情排查与救援难度大, 现阶段长大通航隧洞应急处置技术仍存在短板, 整体运维风险与运维成本均高于明渠。

综合以上影响因素判定: 乌迳上枢纽—火烧桥村、百罗村—梨坑枢纽 2 段地形平缓、施工条件优越, 采用通航明渠方案; 火烧桥村—百罗村段地形陡峻、生态敏感, 明渠与通航隧洞各有优劣, 需开展全维度技术、经济、环境综合比选。

2.2 航道结构形式选择准则

根据越岭段工程特征、国内同类跨流域运河实践经验, 综合地形、高差、地质、运量、生态、运维等要素, 建立分级、分场景的航道结构形式比选准则, 明确明渠、通航隧洞、通航渡槽 3 类主流结构的适用边界、技术要求与应用场景, 形成可复用的选型标准。

1) 通航明渠适用准则

优先应用于地形较平缓、整体地形高差小于 30 m, 具备充足展线空间的航段; 要求岸坡条件良好, 存在天然河谷、宽阔台地或可利用的古河道。地质方面避开滑坡、崩塌、软弱夹层等不良地质, 保证边坡及地基稳定性。水文方面要求水位变幅适中、天然流态平稳。

功能层面适配大运量、多船型、通航密度高的场景。核心优势为通航效率高、施工工艺成熟、运维简便, 缺点是占地规模大、地表生态扰动强。适用于以中枯水期通航为主、大流量可旁泄的航段, 是地形条件优越区域的首选方案。

2) 通航隧洞适用准则

优先应用于高山深谷、地形陡峭、展线空间受限, 整体地形高差大于 70 m 的越岭航段, 可规避明渠高边坡失稳、渡槽高支墩造价过高的问题。地质条件要求严苛, 优先选择 I—III 级完整围岩地段, 避开大断层、强岩溶、集中涌水等不良地质, 保障成洞安全。

功能层面适配中运量、单向分向通航场景, 不受雨雪、大风等天气影响, 通航保证率极高。其核心优势为占地少、拆迁量小、地表生态扰动微弱, 特别适用于生态敏感区、基本农田集中区。缺点是洞内航速低、通航时长增加, 施工技术复杂、附属系统多, 运维与应急难度大。当山体的覆盖层厚度大于 2 倍隧洞宽度时, 优先选用通航

隧洞。

3) 通航渡槽适用准则

适用于跨越深谷、独立河道等地形高差突变的局部区段,实现上下游水位架空衔接。要求槽址两岸地基承载力高、岩体完整稳定,跨河位置避开洪水主冲刷带。渡槽造价、施工难度介于明渠与隧洞之间,以高空作业为主。

功能层面适配中小船型、中低运量航段。当明渠无法贯通,隧洞方案经济性差,且两岸地质条件满足支墩建设要求时,优先选用通航渡槽。运维重点为槽身结构、支墩及止水设施,需强化抗风、抗震监测。

4) 综合选型优先级规则

当越岭段地形平缓、开挖量小时,优先采用通航明渠;当越岭段山体陡峻,去掉覆盖层厚度后的洞顶岩体厚度大于2倍隧洞宽度时,则优先采用通航隧洞;当地形高低突变,在地形低凹区段采用通航渡槽^[15]。

航道结构形式选择遵循“先地表、后地下,先常规、后特殊”的原则:地形平缓、开挖工程量小时,首选通航明渠;山体陡峻、地表受限、洞顶岩体厚度充足时,优选通航隧洞;局部地形突变、深谷跨越且前两类方案不具备实施条件可选用通航渡槽。

3 平面布置方案

3.1 通航明渠方案

航道底宽设计为70 m,通航水位172~180 m,航道水深为4.8 m,则航道底高程为167.2 m。航道沿线的丘陵、低山区局部基岩直接出露,全风化—强风化层普遍较薄。岩层由白垩系砂砾岩、泥质粉砂岩组成,岩质较软,陡倾角节理裂隙较发育,推荐边坡开挖坡比为1:0.75考虑,边坡分级放坡,每级高度15 m,级间设马道,马道宽度取3 m。土质边坡坡比1:2.5~1:3,竖向每隔10 m开挖一级马道,马道宽度取2 m,坡顶设截水沟,通航明渠断面见图2。

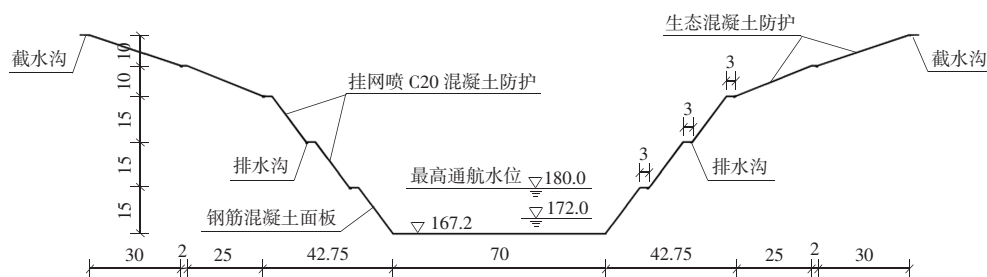


图2 通航明渠断面图(m)

Fig. 2 Cross-section of navigable open channel(m)

根据地质条件开展边坡支护设计,越岭段地质条件复杂,第一级马道以下边坡布置30 cm厚C25钢筋混凝土面板;第一级马道以上岩质边坡布置15 cm厚挂网喷C20混凝土防护;局部区段考虑锚索支护;土质边坡采用生态混凝土防护。

3.2 通航隧洞方案

赣粤运河工程设计代表船型尺度(总长×总宽×设计吃水)为68 m×13.8 m×3.0 m。隧洞宽度采用1.2倍船宽、1.4倍船宽、1.6倍船宽和1.8倍船宽进行航速试验研究,得出断面系数与对岸航速关系曲线^[16]见图3。横坐标 W_B 为隧洞水域宽度与船舶宽度的比值;纵坐标 V_D 为自航船舶在隧洞中的航速; K 为断面系数,即过水断面面积与设计通航船舶或船队设计吃水时的舢横剖面浸水面积之比值。图中实线为模型实测数据,虚线为推测趋势。由图3可知,隧洞宽度取1.4倍船宽、1.6倍

船宽和1.8倍船宽时,航速较为理想。考虑围岩稳定性、成洞经济性、船舶操纵舒适性等方面,选定隧洞宽度为1.4倍船宽,即19.32 m,取整为20 m。为了达到5 km/h的设计航速,断面系数应不小于3.0,则通航隧洞最小通航水深为6.21 m。

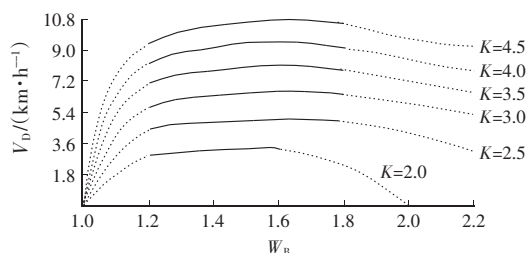


图3 各断面系数相对宽度与对岸航速关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between relative width and over-bank navigation speed for each section coefficient

两线通航隧洞平行布置,每线隧洞通航水域净宽为20 m,隧洞两侧各设3 m宽人行通道,用

作疏散和救援通道。2 条通航隧洞间布置多条横向交通洞，可互为火灾疏散通道，交通洞间距约

100 m，结合外侧山体布置横向疏散交通洞，双洞通航隧洞平面布置见图 4。

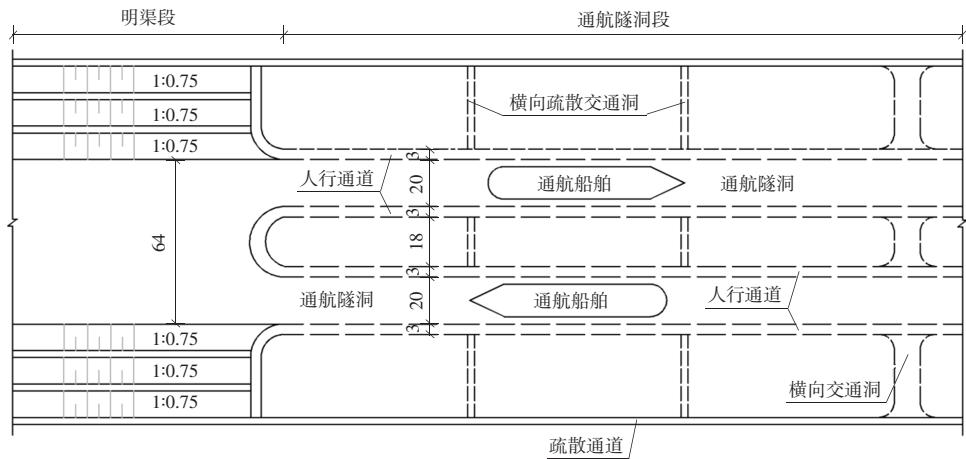


图 4 双洞通航隧洞平面布置图(m)

Fig. 4 Layout plan of twin-tube navigable tunnel(m)

两线通航隧洞净距为 18 m，洞室中间保留宽度为 18~44 m 的岩体。洞室顶拱顶高程 201.79 m，顶拱跨度 26 m，矢跨比约为 1/3。高程 182 m 以上洞室宽度为 26 m(含两侧各 3 m 宽通道)，高程 182 m 以下洞室宽度为 20 m，洞室总高 36.0 m。横向疏散交通洞体形为城门洞形，洞室宽度 8 m，顶拱为半圆形，半径 4 m，洞高 9 m。双洞通航隧洞典型横剖面见图 5。

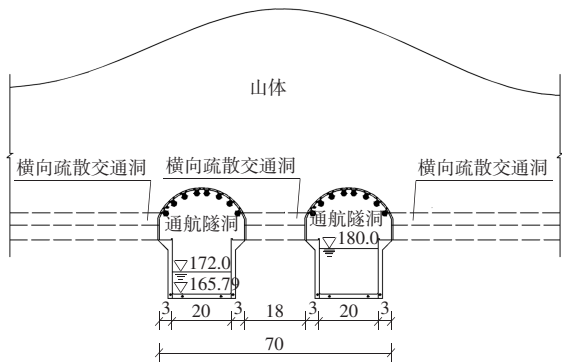


图 5 双洞通航隧洞典型横剖面图(m)

Fig. 5 Typical cross-section of twin-tube navigable tunnel (m)

为控制隧洞开挖的工程量，当通航隧洞穿越地形比较低矮和平缓的区域时采用明挖式成洞方案；当通航隧洞穿越地形比较高的区域时采用洞挖式成洞方案，以便增加洞室的覆盖岩体厚度、增加洞室稳定安全裕度、确保建筑物的安全。赣粤运河越岭段通航隧洞由洞身段和洞口段两部分组成，地形高程 220~254 m 的洞口段采用明挖式

成洞方案，地形高程高于 254 m 的洞身段采用洞挖式成洞方案。

3.3 方案比选及最优方案推荐

针对火烧桥村一百罗村航段，依托第 2 章节中六大影响因素与结构选型准则，从通航效率、占地拆迁与工程投资、环境影响、施工与运维层面，对通航隧洞、通航明渠两大方案开展全面对比分析，结合项目建设阶段定位，明确综合最优解决方案。

3.3.1 指标对比

本航段通航隧洞线路总长 7.59 km，通航明渠线路总长 9.52 km，2 类方案核心指标见表 2。

表 2 通航线路方案比选表

Table 2 Comparison table of navigable route schemes

比选项目	通航隧洞线路	通航明渠线路
线路长度	7.59 km，其中隧洞长 7.39 km	9.52 km
通航时间/min	89.88	57.12
征地面积/ha	11.69	333.03
拆迁面积/m ²	435	17 382
土石方/万 m ³	1 418	8 150
混凝土/万 m ³	208.56	56.57
钢筋/万 t	25.03	1.70
对沿线设施影响	无显著影响	道路被运河截断需新建 2 座桥梁，8 处高压线路，改造投资约 1.52 亿元
对沿线环境影响	施工区域环境影响非常小	需采取措施做好水土保持与环境影响管控
投资额/亿元	33.78	46.26

3.3.2 综合论述

1) 通航效率层面: 通航明渠优势突出。明渠航速 10 km/h, 船舶通行时长仅 57.12 min; 隧洞内受限界约束航速降至 5 km/h, 船舶通行时长 89.88 min, 单船通航耗时增加明显。明渠双向自由通航, 综合通过能力为隧洞的 1.57 倍, 在货运量持续增长背景下, 通航灵活性与效率优势突出。

2) 占地拆迁与工程投资层面: 通航隧洞优势显著。隧洞方案比明渠征地面积减少 322.53 ha, 拆迁面积缩减了 16 947 m², 土石方开挖量减少了 13 446 万 m³, 工程总投资节省 12.48 亿元, 大幅降低土地占用、土石方处置及工程建设成本。

3) 生态与外部设施影响层面: 通航隧洞优势显著。隧洞以地下工程为主, 地表扰动极小, 可规避耕地占用、大面积水土流失、粉尘噪声污染等问题, 无需改造沿线桥梁、高压线路, 对现有基础设施、原生生态破坏极低, 环评与用地审批阻力更小; 明渠需大范围开挖地表, 配套改造 2 座桥梁、8 处高压线, 生态管控与外部协调工作量大。

4) 施工与运维层面: 通航明渠优势突出。明渠施工工艺普及、工序简单、工期可控, 后期边坡检修、航道清淤、病害处理难度低, 应急处置体系成熟, 综合运维风险小; 通航隧洞施工技术复杂、工期更长, 洞内通风、照明、消防等附属系统常年运行, 且隧洞内船舶事故、火灾等应急救援技术尚未完全成熟, 地质突水、围岩变形等潜在风险高, 全生命周期运维压力大。

3.3.3 最优方案推荐

结合项目当前推进阶段、技术成熟度、风险管控要求, 分阶段明确最优方案。

1) 预可行性研究阶段推荐采用通航明渠方案。当前通航隧洞的应急救援、长期运维技术仍有待完善, 山地隧洞地质风险存在不确定性。通航明渠技术体系成熟、通航效率高、风险可控, 能够保障运河项目快速落地、稳定运营, 综合适配现阶段项目建设需求, 为本阶段综合最优解决方案。

2) 下阶段, 待区域地质勘察成果进一步细化、超大断面通航隧洞运维与应急技术完成攻关后, 可再次开展方案比选。若将来生态保护、土地管控政策收紧, 且隧洞技术风险得到有效管控, 可将双线平行通航隧洞作为优选方案。

4 结语

1) 提出了一套越岭航道结构选型量化准则, 形成通用选型体系。根据地形高差、地表展线空间、地质条件等核心控制要素, 划定通航明渠、通航隧洞、通航渡槽 3 类主流结构的适用边界: 地形平缓、整体高差小于 30 m 且具备充足展线空间的航段, 优先采用通航明渠; 山体陡峻、整体高差大于 70 m、地表布置条件受限的越岭区段, 优先选用通航隧洞; 地形突变、需跨越深谷与河道的局部地段, 宜采用通航渡槽。

2) 完善了受限航道通过能力测算方法。针对通航明渠与通航隧洞 2 类通航建筑物, 分别构建船舶航行时间模型与通过能力计算模型, 厘清了航速、船舶间距、空间约束等参数对通航效率的影响规律。测算结果表明, 2 种方案均可满足内河 II 级航道远期货运需求, 通航明渠通行效率显著优于双线分向通航隧洞。

3) 总结生态敏感山区航段综合决策逻辑, 构建分阶段方案比选机制。对于地形复杂、生态管控严格的山区越岭航段, 通航隧洞土地占用少、土石方工程量小、工程投资更低, 对地表生态与既有基础设施扰动极小, 长期综合效益突出; 通航明渠技术体系成熟、通航效率高、运维及应急处置难度低, 项目落地风险可控。结合工程建设周期、技术成熟度、行业管控要求, 提出分阶段动态决策思路: 前期研究阶段, 优先选用技术可靠的通航明渠; 待地质勘察成果深化、通航隧洞运维与应急技术全面成熟后, 再重新评估隧洞方案实施可行性。该决策模式兼顾工程落地性与长远发展, 可为国内山区大型水运工程方案论证提供可复制的决策框架。

参考文献:

- [1] 中共中央, 国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[M]. 北京: 人民出版社, 2021.
CPC Central Committee, State Council of the People's Republic of China. Planning outline of national comprehensive three dimensional transportation network[M]. Beijing: People's Publishing House, 2021.
- [2] 钮新强, 吴俊东, 王小威. 基于目标优化的大型通航隧洞断面尺度研究[J]. 水利水运工程学报, 2021(3): 1-8.
Niu X Q, Wu J D, Wang X W. Study on section size of large navigation tunnel based on objective optimization[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(3): 1-8.
- [3] 李焱, 郑宝友, 周华兴. 构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究[J]. 水道港口, 2012(1): 45-50.

- Li Y, Zheng B Y, Zhou H X. Test on scale of navigation tunnel and canal bridge in the intermediate channel between ship lifts of Goupitan Power Station[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012 (1): 45–50.
- [4] 汤建宏, 阙得静. 高坝通航建筑物通航隧洞断面经济性分析[J]. 水运工程, 2017(7): 141–144.
- Tang J H, Kan D J. Economic analysis of navigable tunnel section of high dam[J]. Port & Waterway Engineering, 2017(7): 141–144.
- [5] 吴德兴, 周红升, 郭洪雨, 等. 富春江通航隧道建筑限界及内轮廓设计研究[J]. 隧道建设, 2015(11): 1182–1187.
- Wu D X, Zhou H S, Guo H Y, et al. Study on design of cross-section of Fuchunjiang waterway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2015 (11): 1182–1187.
- [6] Terziev M, Tezdogan T, Oguz E, et al. Numerical investigation of the behaviour and performance of ships advancing through restricted shallow waters[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 76: 185–215.
- [7] Vermeer H. The behaviour of a ship in restricted waters[J]. International Shipbuilding Progress, 1977, 24(280): 323–336.
- [8] Sergeant P, Lefrancois E, Mohamad N. Virtual bottom for ships sailing in restricted waterways: unsteady squat[J]. Ocean Engineering, 2015, 110: 205–214.
- [9] 王士伦. 浅水效应下的船体下沉与纵倾研究[J]. 中国水运, 2017 (5): 11–14.
- Wang S L. Research on ship sinking and pitching under shallow water effect[J]. China Water Transport, 2017(5): 11–14.
- [10] 周华兴, 郑宝友. 关于深水、浅水与限制性航道界定的探讨[J]. 水运工程, 2006(1): 53–58, 67.
- Zhou H X, Zheng B Y. Discussion on defining deep water, shallow water and restricted channel[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(1): 53–58, 67.
- [11] MarCom Working Group 20. Capability of ship manoeuvring simulation models for approach channels and fairways in harbours[R]. PIANC Bulletin, 1992: 49.
- [12] 中交水运规划设计院有限公司. 赣粤运河工程预可行性研究报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2025: 8–10.
- CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Pre-feasibility study report on Gan-Yue Canal project[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2025: 8–10.
- [13] 中交水运规划设计院有限公司. 赣粤运河工程地质勘察报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2024: 73–85.
- CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Geological investigation report on Gan-Yue Canal project[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2024: 73–85.
- [14] DG/TJ 08-2116—2020 内河航道工程设计标准[S].
- DG/TJ 08-2116—2020 Standard for design of inland waterway engineering[S].
- [15] 中交水运规划设计院有限公司. 越岭段超大断面隧洞通航建设技术研究[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2025: 15.
- CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Research on navigation construction technology of super-large cross-section tunnel in mountain crossing section[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2025: 15.
- [16] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 通航隧洞断面尺度与船舶航速及航行条件关联性研究[R]. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2025: 8–15.
- Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport. Research on the correlation between cross-section dimensions of navigation tunnels and ship speed under navigation conditions[R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, 2025: 8–15.

欢 迎 订 阅