文章编号:2096-5052(2026)03-0001-09　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.01

黄河中下游公铁合建盾构隧道设计关键技术

孙文昊[1,2],许为民[3],何应道[1,2],历朋林[4],张锦程[5],张亮亮[1,2*]

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063;
2. 水下隧道技术国家地方联合工程研究中心, 湖北 武汉 430063;
3. 济南城市建设集团有限公司, 山东 济南 250014;
4. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211899;
5. 共青团济南市委, 山东 济南 250021)

摘要:随着黄河流域生态保护和高质量发展战略实施,跨黄通道建设需求持续增长,公铁合建隧道修建及运营保障成为核心技术挑战。采用模型试验、数值模拟以及工程类比法,总结济南市济泺路穿黄隧道及其北延隧道工程的设计关键技术与运营保障方案。结果表明,创新采用协同疏散与集约化通风设计,实现通道资源和空间高效利用;构建“管片+内部结构”力学模型,研发环间抗剪结构与一体化防水体系,使管片结构安全系数提升 25.3%~33.6%;建立管片破损面积与防淹门关闭时间的量化关系;推行内部结构预制装配化方案,在控制断面直径的同时,提升隧道内部结构施工效率;搭建管片结构实时监测体系与隧道智能运维管控平台,提升隧道运营的精细化管理与通行安全能力。研究成果可为黄河中下游以及类似跨江越海的超大直径盾构隧道工程设计与修建提供技术参考。

关键词:黄河中下游;水下隧道;公铁合建;盾构隧道;设计关键技术
中图分类号:U452;U459.5　　**文献标志码**:A

引用格式:孙文昊,许为民,何应道,等. 黄河中下游公铁合建盾构隧道设计关键技术[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):1-9. Sun Wenhao, Xu Weimin, He Yingdao, et al. Key design techniques for highway-railway combined shield tunnels in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):1-9.

Key design techniques for highway-railway combined shield tunnels in the middle and lower reaches of the Yellow River

Sun Wenhao[1,2], Xu Weimin[3], He Yingdao[1,2], Li Penglin[4], Zhang Jincheng[5], Zhang Liangliang[1,2*]

(1.China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China;
2. National-Local Joint Engineering Research Center of Underwater Tunnelling Technology, Wuhan 430063, Hubei, China;
3. Jinan City Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China;
4. China Railway 14th Bureau Group Large Shield Engineering Co., Ltd., Nanjing 211899, Jiangsu, China;
5. Communist Youth League Jinan Municipal Committee, Jinan 250021, Shandong, China)

Abstract: With the rollout of the Yellow River National Development Strategy, the demand for cross-Yellow River transportation infrastructure construction has continued to grow, and the construction and operation safety assurance of road-rail combined tunnels has been identified as a core technical challenge. In this research, a combination of model testing, numerical simulation and engineering analogy methods was adopted, and key design technologies and operation safety assurance schemes for the Jinan Jiluo Road Yellow River-Crossing Tunnel and its Northern Extension Project were

收稿日期:2026-04-20;**修回日期**:2026-07-15;**接受日期**:2026-07-23;**出版日期**:2026-09-20
基金项目:济南城市建设集团有限公司科技开发计划资助项目(2020W003)
第一作者简介:孙文昊(1975—),男,河北沽源人,正高级工程师,硕士,主要研究方向为隧道工程。E-mail:297890680@qq.com
*通信作者简介**:张亮亮(1980—),男,安徽阜阳人,正高级工程师,博士,主要研究方向为岩土与隧道工程。E-mail:25010849@qq.com

systematically summarized. The results showed that: an innovative collaborative evacuation and integrated ventilation design was adopted, by which highly efficient utilization of cross-river channel resources and underground space was realized. A mechanical model for the "segment lining + internal structure" composite system was constructed, and a patented inter-ring shear-resistant structure and an integrated waterproof system for segment joints were developed, by which the safety factor of the segment lining structure was increased by 25.3%-33.6%. A quantitative correlation between segment lining damage area and flood control gate closing time was established. A prefabricated assembly scheme for tunnel internal structures was implemented, by which the construction efficiency of tunnel internal structures was improved while keeping the tunnel cross-sectional diameter under strict control. A real-time monitoring system for segment lining structures and an intelligent tunnel operation and maintenance management platform were built, by which the refined management level and traffic safety assurance capability during tunnel operation were significantly enhanced. It was concluded that the research findings could provide valuable technical reference for the design and construction of super-large diameter shield tunnel projects in the middle and lower reaches of the Yellow River, as well as similar large-scale river-crossing and sea-crossing infrastructure projects.

Keywords: middle and lower reaches of the Yellow River; underwater tunnel; highway-railway combined construction; shield tunnel; key design technologies

Received: 2026-04-20; **Revised**: 2026-07-15; **Accepted**: 2026-07-23; **Published**: 2026-09-20

0 引言

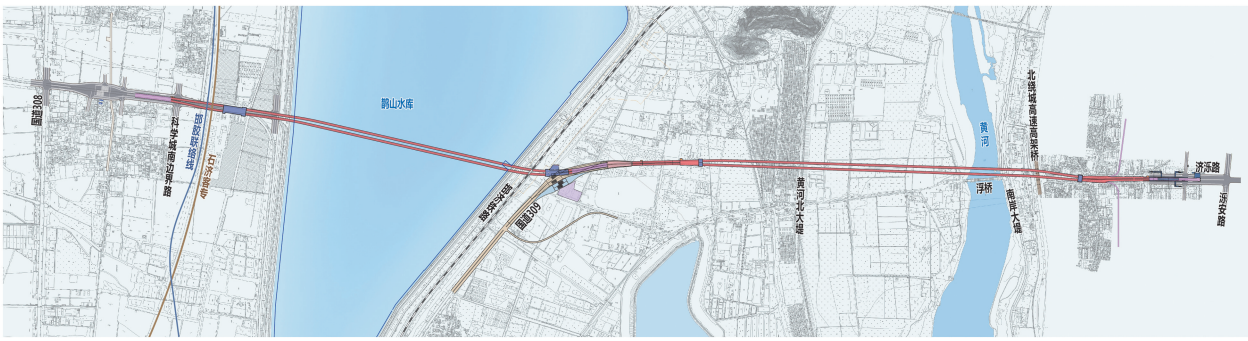
依托国家黄河流域生态保护和高质量发展战略的强势赋能,济南市作为黄河流域重要的中心城市,肩负新旧动能转换和跨河发展的使命[1],需要引领沿黄城市交流合作,对跨黄通道建设需求迫切。公铁合建隧道通过集约化断面设计提升空间利用率,减少占用通道地下空间与建构筑拆迁,在穿越“江河湖海城”通道资源逐渐紧张背景下,水下公铁合建隧道方案成为道路与轨道共通道的优选[2]。随着武汉长江公铁隧道[3]、济南黄河济泺路隧道[4]工程陆续建成与运营,建造与研究成果丰富。肖明清等[5]系统研究公铁合建双层盾构隧道设计关键技术,认为公铁合建隧道方案宜依据地铁和道路规划、周边现状选用,同时建议提前确定管理界面划分和投资分劈。熊朝辉等[6]对比分析武汉地区 3 种过江隧道模式下的土建投资,认为纯盾构段合建方案土建费用低于分建方案,明挖段费用均较单建方案高。赵世超等[7]评估了车辆阻塞工况下疏散间距,认为道路层可通过监控抓拍减少事故次数和控制行车间距减轻阻塞状态,地铁停车前向火源上游疏散乘客。

济南市济泺路过黄通道承担着市政道路与轨道交通功能,受限于黄河险工、高速公路桥、百年水文站、铁路、水源保护地等周边环境保护要求,选择公铁合建超大直径盾构修建方案。然而,在修建过程中存在盾构断面集约程度高、大冲淤悬河河床下的隧道纵向变形控制及管片结构设计经验少、防淹封堵难度大、内部施工进度慢、隧道运营保障要求高等难点。本研究采用模型试验、数值模拟以及工程类比法,总结出济南市济泺路穿黄隧道及其北延隧道工程的设计关键技术,保障了黄河中下游典型粉质黏土层或类似工程水文地质条件的公铁合建超大直径盾构隧道修建与运营安全。

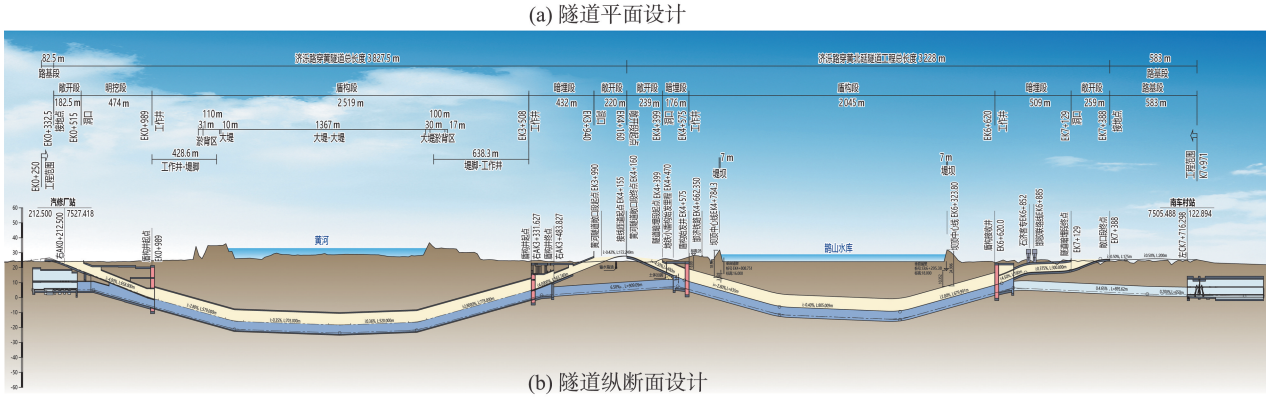
1 工程概况

济南市济泺路穿黄隧道于 2021 年 9 月完工,作为世界首例采用超大直径盾构法穿越地上悬河的水下隧道工程,以其工程难度和社会影响被誉为“万里黄河第一大隧”。济南市济泺路穿黄隧道线路总长 4 760 m,其中盾构段长2 519.2 m,竖向距离黄河主河槽与河漫滩分别为25、38 m,最大水压0.65 MPa。北延隧道作为穿黄隧道的延续项目于2025 年 8 月完工,是超大直径盾构国内首次穿越一级水源保护地(鹊山水库)、国内首次穿越客运专线及重载铁路高架桥的市政明挖隧道[8];线路总长4 328 m,隧道段长 3 228 m,盾构段长2 045 m;在水库处覆土深 24.47 m,最大水压0.42 MPa。

项目南接泺口片区(济泺路),北联济南新旧动能起步区(黄河大道与梓东大道),线路最大纵坡4.5%,公铁合建、双管双层盾构段最大纵坡2.8%,最小平竖曲线半径分别为 1 800、5 000 m;其中,国道 309 通过地面道路进出济泺路穿黄隧道。主线道路采用设计时速 60 km、城-A 荷载的双向 6 车道城市主干路标准;轨道交通为 6A 车辆编组接触网悬挂,设计时速 100 km。隧道平纵断面设计如图 1 所示。



(a) 隧道平面设计



(b) 隧道纵断面设计

图 1　济南市济泺路穿黄隧道及济泺路穿黄北延隧道平纵断面设计图

Fig.1　Plan and longitudinal section of the Yellow River Tunnel and North Extension Tunnel

轨道交通土建预留工程含一座地下二层岛式车站(长 299.3 m,位于黄河南岸敞开段正下方)和轨行区间(长 6 273.8 m),其中,公铁合建的盾构段、明挖段分别长 4 955.7 m、243.9 m;分建段采用竖向空间分离方案,盾构段(管片外径 6.8 m)长 798.5 m、明挖段长 275.7 m。为预留起步区来向的地铁盾构接收条件,在北延隧道的水库北岸明挖合建段末端设地铁盾构吊出井,其平面布置示意如图 2 所示。

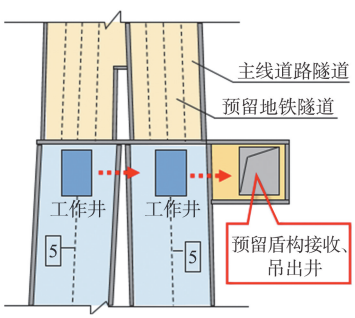


图 2　预留地铁盾构吊出井平面布置示意

Fig.2　Plan layout of reserved metro shield hoisting shaft

2　设计关键技术

2.1　公铁合建隧道断面集约化设计

公铁合建盾构隧道断面布置如下:市政道路层位于上层,每车道宽 3.5 m,净高 4.5 m;轨行区间位于下层,净高 4.5 m,并集成地铁排烟道(截面积 5.8 m^2)、电缆廊道及共用疏散通道,如图 3 所示。

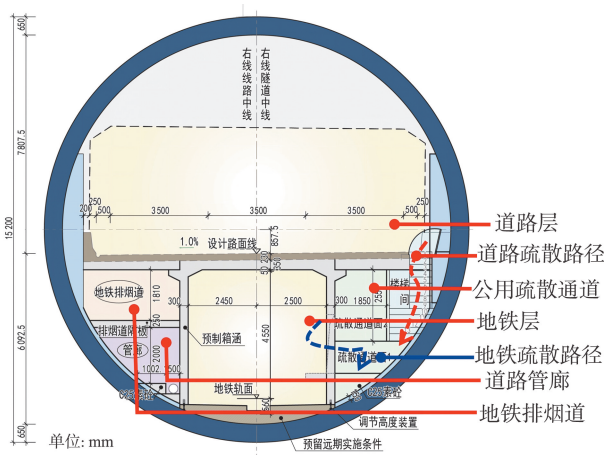


图 3　公铁合建盾构隧道横断面

Fig.3　Cross-section of the tunnel

为满足文献[9]对道路层 20 min 安全疏散时间要求,在行车左侧每隔 75 m 设置一处竖向疏散楼梯,连接至下层共用疏散通道。轨道交通每隔 150 m 设置防火门,利用疏散平台横向连接共用疏散通道,通道设置两种标高并通过斜坡道连接,如图 4 所示。

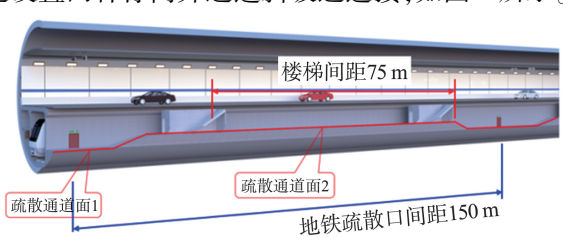


图 4　疏散通道设计示意图

Fig.4　Schematic diagram of evacuation passage

道路层隧道采用竖井排出式纵向通风(隧道每端各设 5 组射流风机+1 组轴流风机),每条隧道两端各设 30 m 高风塔(环评需求)。为满足文献[10]相关要求(即地铁隧道独立设置时,中间风井间距不大于 1 800 m,通长设置烟道面积 14 m^2,断面风速不小于 2 m/s),轨道交通通风系统在行车区右侧分段设置 3 段排烟道,并在区段端部设置排烟口进行机械排风,满足地铁区间多辆列车追踪运行时的通风排烟要求,穿黄隧道地铁通风示意如图 5 所示。

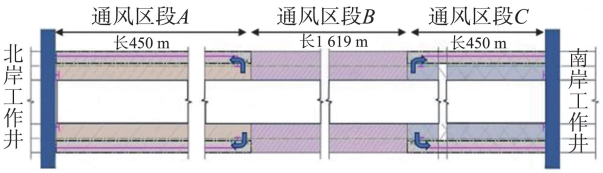


图 5 公铁合建隧道地铁区间通风系统

Fig.5 Ventilation system of road-metro tunnel

为抽排隧道冲洗、渗漏及消防废水并规避隧道结构轮廓外设置泵房的施工风险,提出“轨道交通内置式废水泵房”方案,即在合建隧道最低处,通过沿隧道纵向布置钢筋混凝土轨道梁将道床分隔成 3 部分(两侧及中心水沟),并用预埋管连通,作为集水池(有效容积不小于 10 m^3);采用 3 台真空凸轮泵(平时 1 台工作,消防时 2 台同时启动,另 1 台为备用),在轨行区侧面设置两级泵房(二级泵房容积不小于 20 m^3),将废水抽排至洞外,如图 6 所示。

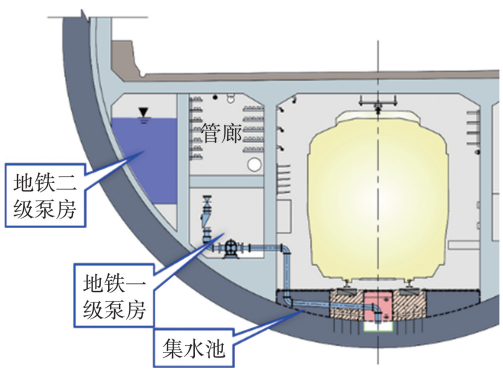


图 6 轨道交通“内置式”废水泵房设置示意图

Fig.6 Schematic diagram of "built-in" wastewater pump station for rail transit

为减少对周边敏感建构物(桥梁、黄河大堤与水文站、铁路)扰动以及集约占地规模,通过协同疏散技术、隧道结构体内泵房方案与综合通风体系[11],比传统 3 车道道路隧道直径(14.5 m)仅增大 4.8%,实现断面 95%利用率,将 3 或 4 孔公铁分建隧道缩减至 2 孔合建,形成了地面双向六车道、地下双向六车道及双线地铁区间的三层立体交通体系。

2.2 管片与内部结构协同设计

济南段黄河为典型悬河,常水位高于两岸城市地表 3~5 m,设防洪水位差达 11.6 m。常时流量约 1 200 m^3,防洪流量 1.1 万 m^3,河床最大冲刷深 22.6 m,工程设计使用年限内累计淤积 8.35 m。针对黄河中下游河床大冲淤条件以及典型粉质黏土地层下的隧道纵向变形控制难题,开展盾构隧道围岩-衬砌结构体-内部结构大比尺纵向模型试验,其几何与密度的相似比分别取 40、1;模型箱尺寸为 2 m 长×2 m 宽×2 m 高,箱体上方及前后方各设千斤顶反力架,模型土采用重晶石粉、粉煤灰、机油、河沙,配比为 0.250∶0.225∶0.085∶0.440;管片和螺栓用石膏材质与铁丝模拟,共 30 环。通过模型试验(隧道构件为石膏),如图 7 所示,河床冲淤作用下隧道纵向变形试验结果如图 8、9 所示,其中,D、F 代表位移计、分布式光纤的测量结果。



图 7 “管片+内部结构”模型试验

Fig.7 "Segment + internal structure" model test

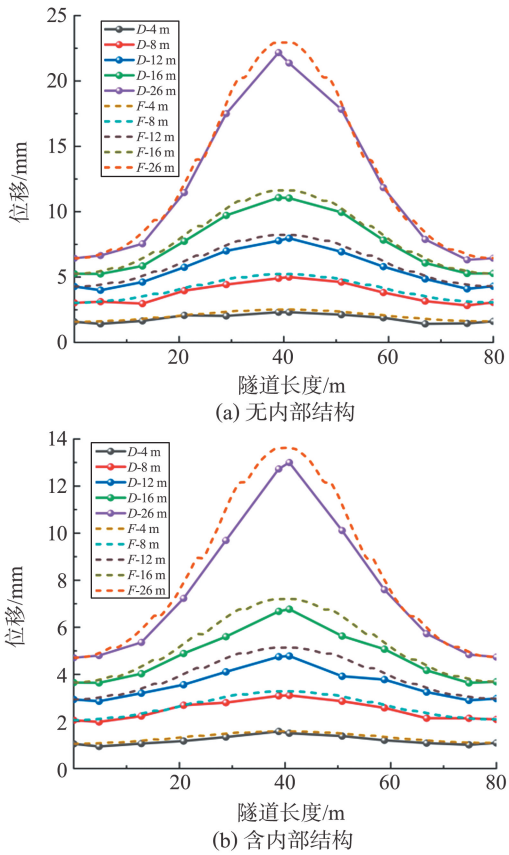
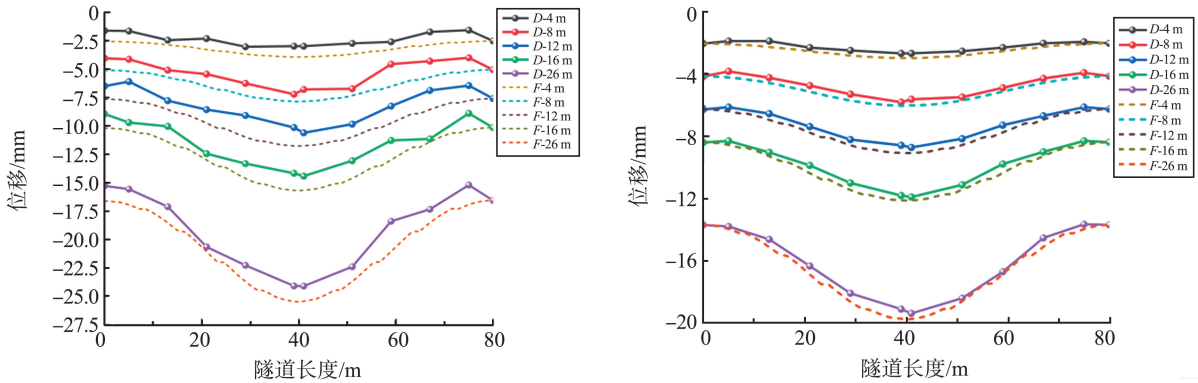


图 8 河床冲刷作用下隧道纵向变形

Fig.8 Longitudinal deformation of tunnel under riverbed scouring



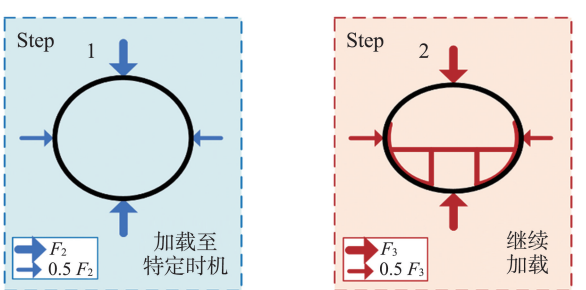
(a) 无内部结构　　(b) 含内部结构

图 9　河床淤积作用下隧道纵向变形

Fig.9　Longitudinal deformation of tunnel under riverbed siltation

由图 8、9 可知,河床冲刷/淤积作用下隧道产生不均匀回弹变形,最大回弹/沉降变形分别为 22.94 mm、−25.46 mm;考虑内部结构作用可以减少在河床冲刷、淤积工况下的回弹变形和沉降变形。

针对黄河中下游河床大冲淤条件以及典型粉质黏土地层下的隧道纵向变形控制难题,利用圆形盾构隧道拱顶以下富余内部空间设置二次衬砌,并与中间箱涵、车道板浇筑形成“管片−内部结构”复合体系[12]。利用二次衬砌叠合结构受力原理,构建了可表征施工阶段管片与内部构件分序受力、运营阶段协同受力的计算模型,如图 10 所示。经计算,施加内部结构后,在不同荷载下,管片结构安全系数由 3.59 ~ 1.71 增加到 5.41 ~ 2.29,提升幅度达到 25.3% ~ 33.6%。



(a) 管片承担水土压力　　(b) 管片和内部结构承担超载

图 10　“管片+内部结构”协同受力分析模型

Fig.10　"Segment + internal structure" collaborative stress analysis model

2.3　悬河段隧道防淹体系设计

为规避悬河段极端灾害下隧道结构破损而导致河水倒灌城市的巨大风险,黄河段隧道采用两道防淹门设计,即在隧道两端洞门及车站范围内设置防淹门的基础上,在黄河两岸工作井内增设一道防淹门(黄河两岸共 43 樘),如图 11 所示。

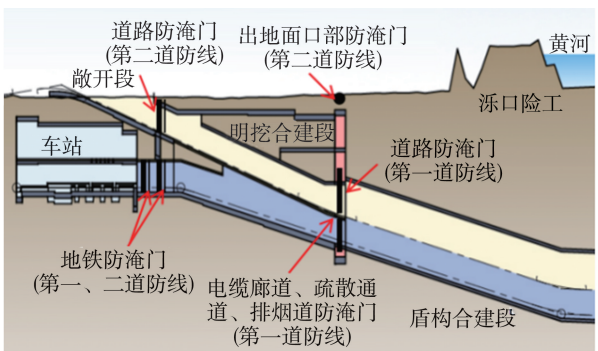


图 11　隧道“两道”防淹门布置

Fig.11　Layout of tunnel "two-stage" flood gates

推导出基于古德曼经验公式的管片破损涌水量计算方法,建立防淹门可用关闭时间与管片破损面积、涌水量的关系。管片破损涌水量计算方法表达式为

$$H+\frac{P_1}{\rho g}+\frac{\alpha V_1^2}{2g}=\frac{P_2}{\rho g}+\frac{\alpha V_2^2}{2g}+h_{\mathrm{W}}, \tag{1}$$

式中:H 为隧道围岩静水头高度,m;P 为静水压力;ρ 为喷涌泥浆密度;α 为修正系数,一般取 1.0;v 为截面水出流速度,m/s;g 为重力加速度,m/s^2;h_{W} 为泥浆在破损喷涌处的水头损失值,即 $h_{\mathrm{W}}=\dfrac{V_2^2}{2g}$。

取黄河主河槽下方隧道断面(洪水位 33.67 m,水头高 57.3 m),拟定 3 种管片破损工况,分别为 1 m^2(约为一块封顶块的面积)、5 m^2(约为半块标准块的面积)和 10 m^2(约为一块标准块的面积)。在涌水达到防淹门最低点标高时,单条隧道储水体积为 274 659 m^3。最后,计算得出不同破损面积下的可用关闭时间分别为 194、38、19 min。

上述计算方法可为防淹(闸)门可用关闭时间、防淹门非标构件(道路层防淹门 6.25 m 宽×5.3 m 高)设计与安装要求、管理用房(距离两隧道洞口不超过 600 m,总建筑面积约 10 716 m^2)选址及人员配置(工作人员 180 人,其中消防人员 24 人)提供

理论依据。

2.4 超大直径盾构成洞控制技术

穿越黄河与水库的公铁合建隧道管片外径 15.2 m,内径 13.9 m,管片厚 0.65 m,环宽 2 m,楔形量 68 mm,错缝拼装,10 分块,与邻接块纵缝偏移量 125 mm。在隧道管片环间设 28 组“分布式凹凸榫+M36 斜螺栓”组成抗剪结构。分布式凹凸榫单点设计尺寸为 360 mm 长×180 mm 宽×30 mm厚,在发生错台时,管片接缝处具有多个沿圆环均匀分布的接触点,充分发挥所有凹凸榫的抗剪作用,其工作原理如图 12 所示,实物如图 13 所示。

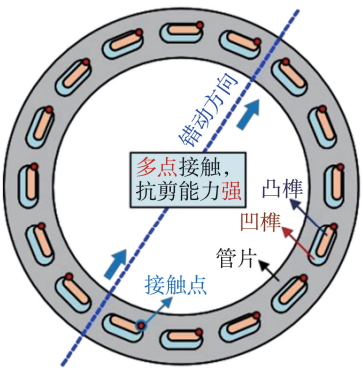


图 12 分布式凹凸榫工作原理示意

Fig.12 Schematic diagram of working principle of distributed concave-convex tenon

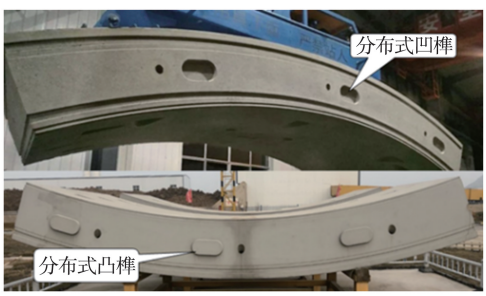
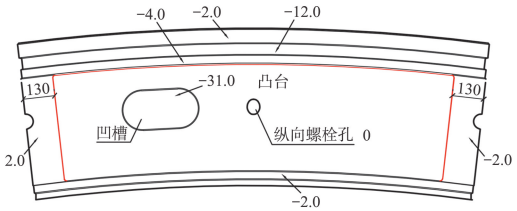


图 13 分布式凹凸榫实物图

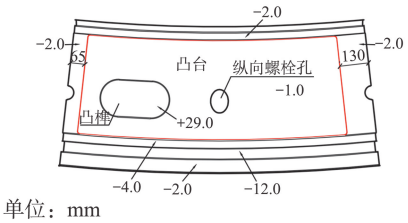
Fig.13 Physical drawing of distributed concave-convex tenon

同时,为防止在管片拼装期间接头部位产生应力集中,在管片环缝面设置贯穿内侧密封垫、至外侧密封垫沟槽边的“凸台”(高 2 mm),分布角度取 10°,共 28 组,如图 14 所示。图 14 中,红线为凸台边缘线,数值为相对基准面凸起或凹陷尺寸。

通过数值分析、原型试验[13],分布式凹凸榫的管片结构环缝的受力作用机理可归纳为:凹凸榫构件未接触阶段,环缝变形体现为错台,螺栓受力较小,环间作用为纯剪;凹凸榫接触阶段,环缝变形体现为转动张开,螺栓受弯拉组合,限值环缝张开量、错台量的增加,环间作用为弯剪组合,如图 15 所示。通过现场监测数据,“分布式凹凸榫+斜螺栓”施设后错台量仅为 5~10 mm。



(a) 迎千斤顶面



(b) 背千斤顶面

图 14 管片(封顶块)环缝“凸台”设计

Fig.14 Segment boss for circumferential joint

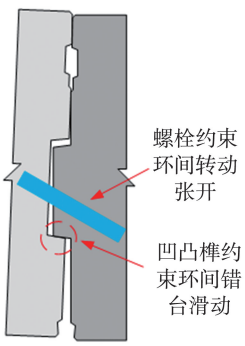


图 15 分布式凹凸榫受力机理图

Fig.15 Force mechanism diagram of distributed concave-convex tenon

盾构段采用双道密封垫防水体系(二级防水等级):多孔型弹性三元乙丙橡胶密封垫(沟槽与密封垫面积比 1.094)为主、遇水膨胀聚醚型聚氨酯弹性密封垫为辅,外侧设氯丁海绵条,环缝(背千斤顶面)设 1.5 mm 厚橡胶传力垫,实现了 70 m 级水压下,接缝张开 11 mm、错位 15 mm 条件下“零渗漏”,如图 16 所示。

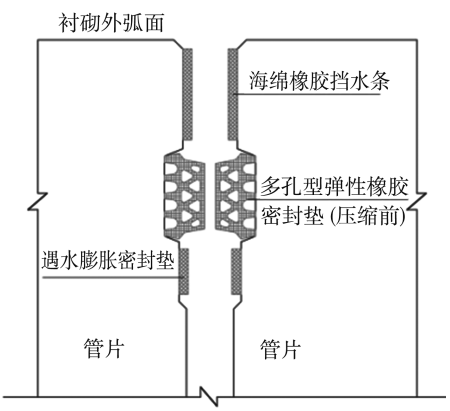


图 16 管片接缝“双道”防水密封垫

Fig.16 "Dual-channel" waterproof gasket for joints

2.5　内部结构快速装配技术

研发了预制(3.0 m 长×3.15 m 宽×0.15 m 厚)+叠合现浇组合式车道板结构,车道板安装位置以及实物分别如图 17、18 所示。经测算,该设计实现了隧道装配率 91%,每月施工 600 m 车道结构的目标。

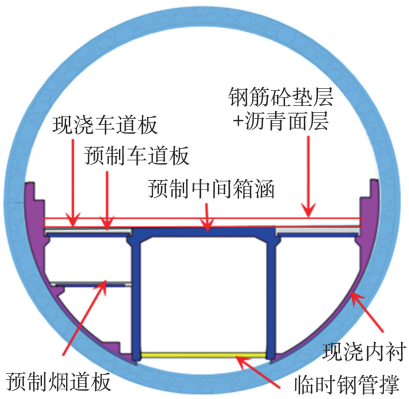


图 17　隧道内部结构图
Fig.17　Internal structure of tunnel



图 18　预制车道板
Fig.18　Prefabricated lane slab

同时,结合运营期 380 d 的箱涵拼缝张开变形现场监测数据,通过有限元仿真和拟合方法,探明该类型车道板结构与预制箱涵的单层钢筋连接接头的受力变形规律和车道板结构寿命预测方法(采用有限元软件自带的混凝土塑性损伤本构模型。其中,模型塑性损伤参数分别为:膨胀角 30°、偏心率 0.1、黏聚系数 0.000 5,不变应力比 0.667、极限抗压强度比 1.16)。结果表明:该类型接头相较于全现浇结构的抗弯刚度折减系数取 0.68;通过归纳混凝土结构损伤应力-应变关系函数,测算道路层箱涵两侧连接拼缝满足设计使用年限要求[14]。

发明了高度可调节预制箱涵,在中间预制箱涵的底部设置高度调节螺栓,其中,套筒直径114 mm、长 510 mm,Q235;螺杆直径 108 mm、长 510 mm,Q390,如图 19 所示。通过调整螺杆的拧入深度,主动精准控制箱涵顶面标高,将箱涵竖向标高误差由 8~16 cm 控制在 0.3~1 cm,从而减少盾构隧道断面直径 20 cm。



图 19　螺栓与螺杆
Fig.19　Bolt and screw

3　隧道运营保障设计

3.1　管片结构沉降监测

隧道在盾构起终点、黄河大坝、黄河主槽道、隧道最大埋深处等位置设管片结构健康监测断面,其中,沿隧道纵向每 100 m 布置精度为 0.001°或 0.02 mm/m的“姿态盒”,自动化实时监测隧道管片结构的收敛和沉降。结合泺口水文站提供的河床高程数据,如图 20 所示。监测到黄河枯、丰水期间隧道结构沉降数据,如图 21 所示。

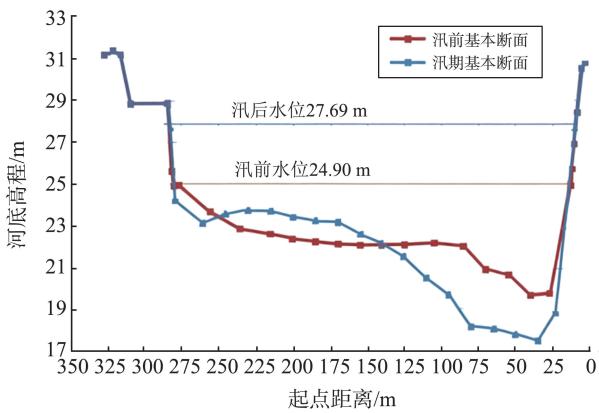


图 20　汛期前后河床冲淤曲线
Fig.20　Riverbed scouring-siltation curve before and after flood season

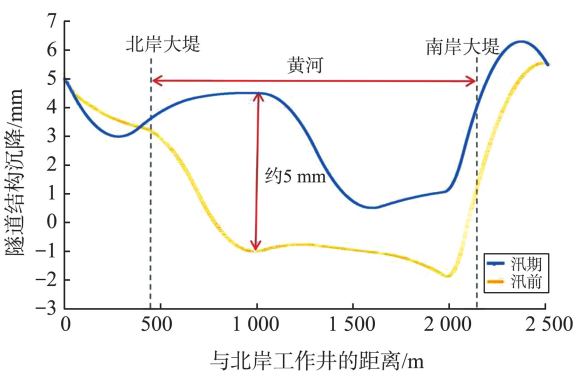


图 21　隧道结构健康监测数据
Fig.21　Health monitoring data of tunnel structure

由图 20、21 可知,黄河主槽河床在 2024 年汛期冲刷约 3 m,与之对应的隧道结构健康监测纵向上浮约 5 mm,表明在考虑“管片+内部结构”效应的结构体系下,河床冲刷对隧道结构纵向变形是有一定影响,且处于安全范围内,与图 8 数值计算结果相似。

3.2 隧道智能运维平台

两隧道之间设管理中心(含中央控制室、消防控制室、消防站、养护与救援设施、收费设施)、北端设紧急救援站。在项目中央控制室成功运用了城市交通隧道智能运维一体化平台,其框架设计如图 22 所示。该平台深度融合物联网、AI 算法与 BIM 技术,接入 2 000 多台设备实时采集交通状态、异常事件、设备运行数据的全域感知,并基于算法自动识别事件,推送处置预案的智能决策,实现了隧道状态实时诊断、风险智能预警与应急协同处置[15]。

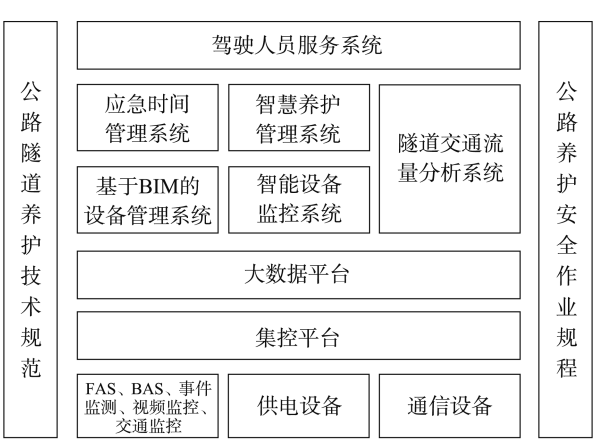


图 22 隧道智能运维平台设计总体架构图

Fig.22 Overall architecture design of intelligent tunnel operation and maintenance platform

构建了静态 BIM 结构信息与动态物联网数据的融合渲染方法,实现三维环境下的故障高亮定位与最优维修路径规划。提出了基于激波理论的排队长度计算模型,模型在多种事故场景下的预测误差控制在±5.8%以内,与分布式 PLC 交通预测方法相比,预测延迟缩短约 35%。对比 2021 年 9 月至 2025 年底运营数据,相比人工记录方式,养护工单平均处理时间由约 45 min 缩短至 28 min,处理效率提升约 38%;通过自动触发交通管控预案,应急响应时间由 60 s 缩短至 35 s;通过优化交通信号控制、诱导信息发布等手段,提高交通流的整体运行效率约 18%。

4 结语

位于黄河中下游流域的济南市济泺路穿黄隧道及北延隧道工程在结构与运维设计中主要采用如下关键技术。

(1)创新采用“叠层集约化布局+协同疏散技术+综合通风体系”方案,为公铁合建隧道的通风、救援与安全疏散筑牢双重保障,盾构断面利用率达 95%。

(2)研发“管片+内部结构”复合结构,搭配分布式圆端凹凸榫+斜螺栓连接、凸台工艺与结构防水体系,既保障盾构隧道成洞、成型效果,管片结构安全系数提升 25.3%~33.6%。

(3)发展隧道内淹没体积与涌水量的经验公式,测算出隧道所有防淹门的有效关闭所需时长为 15 min,支撑隧道“双道”防淹门系统与项目整体防灾救援设计。

(4)应用“预制+现浇”叠合式车道板及高度可调箱涵结构,盾构隧道整体装配率达 91%,在压缩盾构断面直径 20 cm 的同时,显著提升施工效率和安装精准度。

(5)开发管片结构监测系统和隧道智能运维平台,通过现场应用证明,不仅验证了隧道变形与黄河水文条件相符,而且能够有效提升隧道运维管理的精细化、智能化与安全水平,通行量增加 18%。

随着工程优质安全通车,公铁合建隧道技术不仅缓解了过河交通的拥堵、促进了黄河景观风貌带形成,而且保障了通道资源和城市地下空间集约化高效利用、节省了工程投资,有着较好的推广应用前景。但是,项目对轨道交通部分仅进行土建预留,列车运营对整体隧道结构与安全的影响有待实测数据论证研究。

参考文献:

[1] 济南市人民政府. 济南市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要[EB/OL]. (2021-05-28)[2026-04-18]. http://www.jinan.gov.cn/art/2021/5/28/art_2612_4788130.html

[2] 肖明清. 水下隧道设计技术[M].北京:中国铁道出版社, 2016: 107-111.

[3] 肖明清, 凌汉东, 孙文昊. 武汉三阳路公铁合建长江隧道总体设计关键技术研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 161-167.
Xiao Mingqing, Ling Handong, Sun Wenhao. Key techniques for the overall design of the rail-and-road combined Yangtze River Tunnel on Sanyang Road in Wuhan[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(4): 161-167.

[4] 杜昌言. 穿越黄河的超大直径盾构隧道: 济南市济泺路穿黄隧道[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(7): 1244-

1251.
Du Changyan. Super-large diameter shield tunnel crossing Yellow River：Yellow River-Crossing Tunnel on Jiluo Road, Jinan[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(7): 1244-1251.

[5] 肖明清, 孙文昊, 何应道, 等. 公铁合建双层盾构隧道设计关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(8): 1533-1543.
Xiao Mingqing, Sun Wenhao, He Yingdao, et al. Key design technologies for integrated highway-metro double-layer shield tunnels[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(8): 1533-1543.

[6] 熊朝辉, 彭慧琼, 孙雪兵. 武汉长江隧道公铁合建与分建的经济性对比分析[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(5): 882-891.
Xiong Zhaohui, Peng Huiqiong, Sun Xuebing. Comparative economic analysis of highway-metro integrated and separated construction of Yangtze River Tunnel in Wuhan, China[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(5): 882-891.

[7] 赵世超, 姜学鹏, 蒲婷. 公轨双层共管合建隧道火灾疏散措施研究[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(6): 10-13.
Zhao Shichao, Jiang Xuepeng, Pu Ting. Study on fire evacuation and rescue countermeasures in public railroad double-level joint management tunnel[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(6): 10-13.

[8] 钟建敏, 张亮亮, 何应道, 等. 济泺路穿黄北延隧道设计关键技术[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(4): 72-80.
Zhong Jianmin, Zhang Liangliang, He Yingdao, et al. Key design techniques of the north extension project of Jinan Jiluo Road Yellow River Tunnel[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(4): 72-80.

[9] JTG/T 3371—2022 公路水下隧道设计规范[S].

[10] GB 50157—2013 地铁设计规范[S].

[11] 张亮亮. 纵向排烟 V 形坡隧道火灾烟流特性现场火灾试验研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(2): 71-79.
Zhang Liangliang. Field fire test on smoke flow characteristics of V-slope tunnel with longitudinal smoke exhaust[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2023, 5(2): 71-79.

[12] 王均勇, 封坤, 孙文昊, 等. 不同内部结构类型对盾构隧道纵向力学性能的影响[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(11): 100-107.
Wang Junyong, Feng Kun, Sun Wenhao, et al. Influence of different internal structure types on longitudinal mechanical properties of tunnels[J]. Railway Standard Design, 2022, 66(11): 100-107.

[13] 周弋力, 封坤, 郭文琦, 等. 超大直径盾构隧道管片纵缝抗弯力学行为与损伤过程研究[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(4): 163-173.
Zhou Yili, Feng Kun, Guo Wenqi, et al. Study on the bending behavior and damage characteristics of longitudinal segment joints in super-large diameter shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62(4): 163-173.

[14] 刘福震, 张西文, 刘广森, 等. 公轨合建隧道内部结构变形和寿命预测研究[J/OL]. 城市轨道交通研究, 2025-05-30. https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.20242112
Liu Fuzhen, Zhang Xiwen, Liu Guangsen, et al. Research on deformation and life predictionof internal structure of highway-metro integrated tunnel[J/OL]. Urban Mass Transit, 2025-05-30. https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.20242112

[15] T/SDCEAS 40001-2023 城市交通隧道智能化运维管理系统建设指南[S].

(编辑：宋艳)