

# 铁路装配式涵洞接缝与综合防水技术研究

杨国静

(中国铁路设计集团有限公司, 天津市 300308)

**摘要:** 为解决传统现浇铁路涵洞存在的施工周期长、质量管控难、标准化程度低等问题,系统研究了铁路装配式涵洞的接缝处理和综合防水技术;然后基于构件运输、吊装重量和涵洞孔径的核心约束条件,提出了小孔径(1~3 m)涵洞采用整体式、大孔径(4~6 m)涵洞采用分块拼装的构件划分原则,进而提出了一套包含“构件自防水+接缝多道设防+结构外部整体包裹”的综合防水体系;最后通过BIM技术的应用,将装配式涵洞的各个环节紧密联系在一个统一的数字化平台之上。所作研究对提升铁路基础设施建设的工业化水平和设计质量具有重要的实践指导意义。

**关键词:** 铁路工程;装配式涵洞;接缝技术;综合防水;BIM技术

**中图分类号:** TP319

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2026)06-0058-06

## Research on Joint and Comprehensive Waterproofing Technology of Prefabricated Railway Culverts

YANG Guojing

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** To address issues such as long construction cycles, difficulty in quality control, and low standardization in traditional cast-in-situ railway culverts, this paper systematically studies the joint technology and comprehensive waterproofing technology of prefabricated railway culverts. Firstly, based on the core constraints of component transportation, hoisting weight, and culvert aperture, it proposes the component division principles and technical routes: integral components for small apertures (1~3 m) and segmented assembly for large apertures (4~6 m). Furthermore, a comprehensive waterproofing system is put forward, which includes component self-waterproofing, multi-layer joint waterproofing and overall external structural wrapping. Finally, the application of BIM technology closely links all aspects of prefabricated culverts on a unified digital platform. This research has important practical guiding significance for improving the industrialization level, efficiency, and quality of railway infrastructure construction.

**Keywords:** railway engineering; prefabricated culvert; joint technology; comprehensive waterproofing; BIM technology

## 0 引言

随着我国建筑工业化的深入推进,铁路工程中广泛采用的现浇涵洞因施工周期长、质量控制难和标准化程度低等弊端,已难以适应现代铁路建设的高效、优质要求。Gebremedhn等<sup>[1]</sup>和Chen等<sup>[2]</sup>基于有限元模型对U形预制混凝土箱涵的力学特性进行分析,为接缝受力模拟提供了基础方法,但该研究未结合铁路动荷载特点开展适配性分析。张朝等<sup>[3]</sup>通过试验探究了装配式综合管廊承插接头的抗剪性能,明确了连接件的影响规律,凌同华等<sup>[4]</sup>则针对性地研究了此类接头的抗弯性能,揭示了其破坏机理。上述研究为接缝力学设计提供了试验支撑,却未形成覆盖设计、施工的全流程技术规范。

在防水技术研究领域,相关成果同样缺乏系统性和适配性。Kasapoglu等<sup>[5]</sup>提出了预制涵洞外部防护方案;Sharma<sup>[6]</sup>梳理了接缝密封构造的演变历程,但二者与我国铁路涵洞的服役环境契合度不足。曹海明<sup>[7]</sup>提出了拼接节点渗漏检测方法,但该方法仅能实现渗漏后补救,无法从设计源头规避风险。魏杰等<sup>[8]</sup>指出施工工艺不当易导致接缝密封失效,凸显了施工与设计衔接的重要性。吴素清<sup>[9]</sup>、Li等<sup>[10]</sup>、张超哲等<sup>[11]</sup>对管廊深基坑支护设计优化和UHPC材料在涵洞中的应用进行了研究。何亮等<sup>[12]</sup>进行了基于可信度理论的高速公路装配式涵洞施工安全风险

收稿日期: 2025-10-20

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司科技开发课题(2023A0248008)

作者简介: 杨国静(1987—),男,硕士,高级工程师,从事铁路桥梁、城轨桥梁结构设计工作。

评估。但现有研究多为单一环节改进,未形成“设计—施工—防护”一体化体系,未能融入我国铁路复杂地质和运营场景,尚未形成一套系统、完善且适用于我国铁路工程的标准化设计和施工技术体系<sup>[13]</sup>。另外,Bartonek等<sup>[14]</sup>和Liu<sup>[15]</sup>通过案例研究,将铁路工程竣工资料重构至BIM,实现了工程信息的精细化管理,构建了基于BIM技术的预制隧道结构智能识别和施工系统。但现有BIM技术应用仍然多局限于单一环节管控。

为解决上述问题,提升铁路装配式涵洞的接缝可靠性和整体防水能力,本文在梳理现有研究成果的基础上,结合铁路工程的服役特点,提出了“构件自防水+接缝多道设防+结构外部整体包裹”体系,以形成一套技术可行、经济合理的解决方案,为铁路涵洞的工业化建造提供理论依据和实践指导;最后通过BIM技术的应用,将装配式涵洞设计和施工的各个环节紧密联系在一个统一的数字化平台之上,参数化解决了非标构件的标准化等难题。

## 1 铁路装配式涵洞结构体系和构件划分

首先,基于运输和吊装能力的核心约束,确立铁路装配式涵洞构件划分原则为:小孔径(1~3 m)涵洞采用单节整体预制;大孔径(4~6 m)涵洞采用顶、边、底板分块预制。

其次,通过涵洞-土体协同作用的有限元建模,量化分析不同接缝构造在内力重分布、接缝张开等关键性能指标上的表现。在此基础上,提出“构件自防水+接缝多道设防+结构外部整体包裹”的综合防水策略,并明确各节点的具体做法。

最后,利用BIM技术,实现从工厂预制到现场安装的全流程标准化管理和质量追溯。

通过上述步骤,即可构建“构件划分→接缝设计→综合防水→标准化施工→BIM集成”的完整技术体系,从而形成一套可直接应用于工程的标准化设计和施工方案。

### 1.1 装配边界与分类维度

装配式涵洞的构件划分首先受运输和吊装能力约束。与现浇方案相比,预制节段需要跨场地运输和起吊作业,因而单件重量宜控制在设备能力范围内,工程实践中通常控制在20 t以内,单节长度为1.0~3.0 m,以兼顾运输通行与现场吊装的安全和效率。该边界条件直接影响着孔径分档和装配方式的选择:小孔径场景更适合整节整体吊装,以减少环缝、

提升装配速度;当孔径增大或受运输限宽/限高约束时,则倾向于将顶板、边墙与底板分件化,采用“工厂分块—现场拼装”的路径,以降低单件重量并增强适应性。

在“受限重量—孔径分档—装配方式”这一链条下,构件体系的分类从2条线展开:其一按配筋形式分为预制钢筋混凝土与预制预应力混凝土,后者在顶/底板施加横向预应力,有利于减薄板厚、降低自重并提高抗裂能力,更适用于大型箱涵;其二按装配形式分为整体式、拼块式(含“四构件式”、“左右拼接现浇式”)、门式和盖板式,其中整体式以“整节预制、接缝最少”为特征,适合孔径较小且运输与吊装条件允许的路段;四构件式将底板、两侧墙和顶板进行标准化分件,通用性与线形适应性好,便于在装配阶段布置沉降缝,但因接缝数量增加而对精度和防水提出了更高要求;左右拼接现浇式通过侧墙对接处的现浇带来恢复整体性;门式和盖板式则在净空控制、先期回填组织上更具弹性。通常应结合施工组织、运输条件和耐久需求,择优或组合选用构件体系类别。

### 1.2 节段与涵片连接构造

构件装配后的整体性和耐久性,取决于环向(节段间)、纵向(涵片间)这2类接缝的受力和止水设计。

目前,环向接头常用的柔性连接方案主要为企口式接头、单/双橡胶圈式接头,如图1所示。预制箱涵节段常用的承插口构造实物照片如图2所示。

企口式接头构造简单、生产和安装高效,具备一定程度的不均匀沉降适应性,但因其本质为平接,允许转角较小,不宜用于曲线段。

单/双橡胶圈式接头将橡胶圈布置在水平工作面,按单圈或双圈构成冗余密封,利于快速回填并适用于有一定位移和转角的场合。在地下水丰富地段,宜优先采用“双圈”方案,惟对工作面精度及就位对中要求较高;对于转弯或弧形路段,以及需要提高抗渗可靠性的场合,可采用钢承插口接头。这种接头将钢套环埋入混凝土,刚度大、抗渗好、接头张角范围宽,但制作与界面防腐控制较为关键。

上述连接构造可从“受力路径、密封路径、施工性”三维度进行系统归纳与对比:受力上关注弯矩再分配、缝口转角与关键截面应力;密封上强调“构件自防水+接缝多道设防+外包整体包裹”的闭合水路;施工性则考量容差控制、就位效率与检验可实

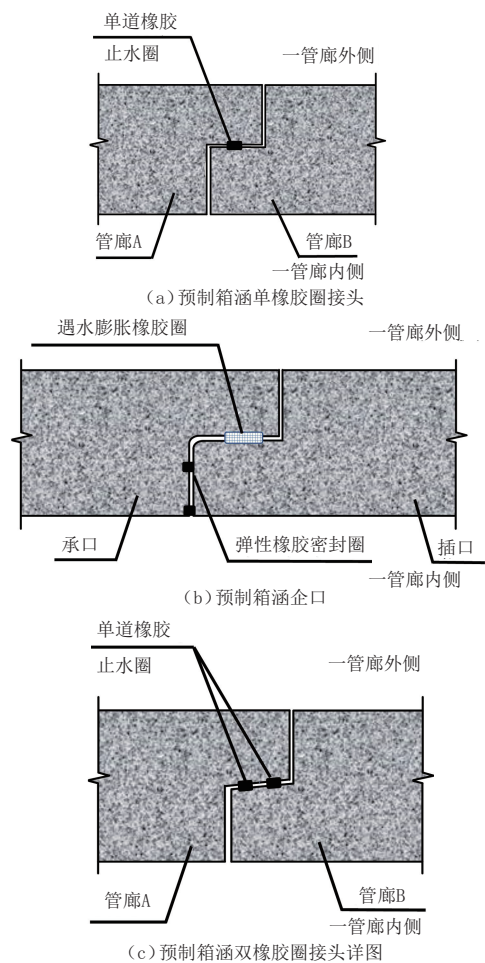


图1 预制箱涵环向接头的柔性连接方案

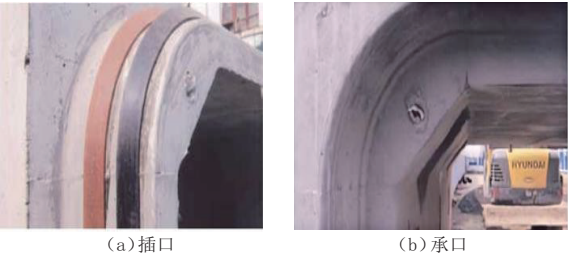


图2 预制箱涵节段常用的承插口构造实物照片

施性。

为兼顾连接构造的密封和整体受力,工程中还常采用将端面压缩胶圈与纵向约束(如预应力)相结合的“柔-刚”组合连接方式(见图3)。此类连接通过在腠角预留孔道,穿设高强螺杆或钢绞线并张拉锁定,使相邻节段在端面压紧与纵向拉结的共同作用下形成整体受力,同时以端面压缩胶圈实现接头密封。这类接头即便采用橡胶圈作为密封材料,其力学属性也已非完全柔性,可有效抑制缝口张开与错台,提高不均匀沉降与循环荷载下的整体性和耐久性。

此外,为进一步提高拼缝处的整体受力和耐久性,也可采用钢筋灌浆套筒连接实现主筋对穿。该

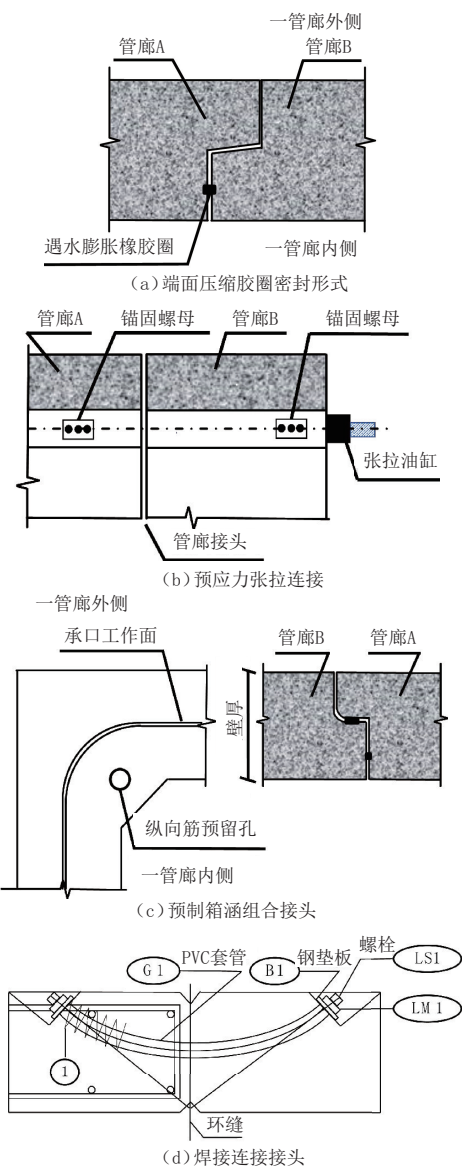


图3 预制箱涵的组合连接方案

做法通过“钢筋-套筒-高强灌浆料”形成强连接,可显著提升接缝处的弯矩传递和转角控制能力,使纵向拼缝的力学属性由柔性趋近于整体。

背贴式涵节构造包括沉降缝内构造和接缝内构造(见图4)。背贴式涵节沉降缝构造在沉降缝处设置圆型止水带并填塞聚氯乙烯胶泥以适应变形,并通过钢垫板及M10膨胀螺栓压紧固定。聚氯乙烯胶泥上部为聚乙烯泡沫塑料板,外侧与混凝土顶板形成贴合,以增强防水效果。背贴式涵节接缝构造与沉降缝类似,接缝处布置止水带,并采用钢垫板及M10膨胀螺栓进行固定压紧。接缝中部预留一定宽度缝隙,并填充聚氯乙烯胶泥以实现密封。该构造主要用于普通节段拼接,通过止水带与嵌缝材料的组合,形成连续防水层,满足装配式涵洞接缝的防渗要求。

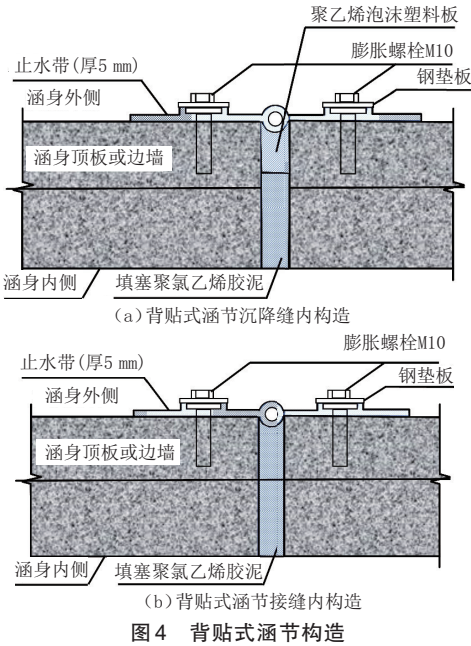


图 4 背贴式涵节构造

1.3 装配式构件综合防水

在明确力学响应边界后,防水与接缝处理遵循“构件自防水+接缝多道设防+结构外包整体包裹”的闭合防护逻辑:(1)构件本体通过混凝土强度和密实度控制、端部加厚和圆角过渡等措施,降低应力集中与渗流通道;(2)接缝处以止水胶条或端面压缩胶圈作为主密封路径,并结合内外加强层与节点化构造(沉降缝、转角、连接箱等关键部位),使密封层与受力路径在几何上同向,在变形上协调;(3)结构外包采用“一刚一柔”的2道防水组合(如卷材/涂层/防水板与柔性密封材料合理搭配),以形成外部的连续水密屏障,并将渗流路径拉长、压差分散。

设计阶段按材料参数、形状系数、搭接长度和压缩率等进行等效验算或小样试验确认,使接缝在设计位移和转角工况下仍满足水密与耐久要求。

纵向拼接缝防水和外包防水示意图见图 5、图 6。

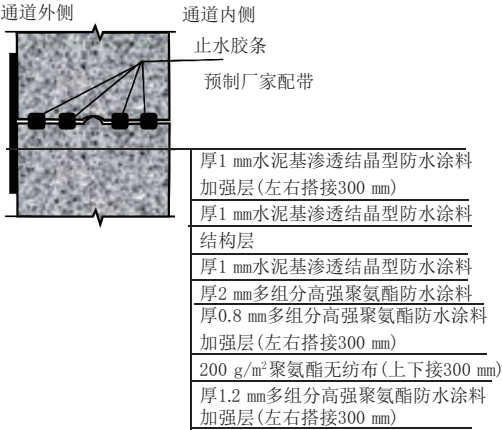


图 5 纵向拼接缝防水

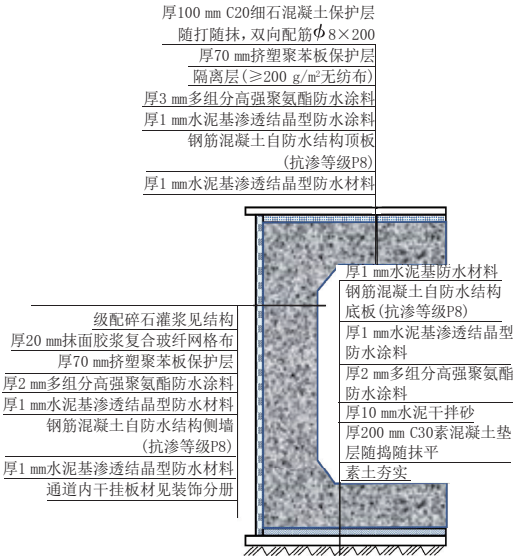


图 6 外包防水

2 连接受力对比与优选

2.1 涵片连接受力和变形

在涵片(纵向)连接层面,承插类接头(平缝、圆铰和榫接)因端部受力特性近似铰接,无法有效传递弯矩,导致跨中弯矩和上顶板拉应力显著偏大,常以顶板底缘先行拉裂进入弯曲破坏。综合承载力排序为平缝式>榫接式>圆铰式。工程上需配合端部加厚或圆角过渡、缝口错台/缝宽控制及对称压紧与密封补强,以提高整体抗弯和抗剪能力并抑制渗漏隐患。

弯曲螺栓连接通过“张拉夹持+端面压紧”形成半刚性作用,能在端部承担一定负弯矩并削弱承插接头的铰接效应,使整体受力更接近整体式箱涵;但因与混凝土的接触面有限,当局部受力较大时易诱发角隅开裂,需要在扭矩控制、间距复核、端角加强上严格把控。对地基条件较差或不均匀沉降敏感的区域,更宜采用预应力连接,以降低残余变形并提升整体刚度。

预应力连接因在安装后施加拉力锁结,其残余变形和强度损失较小,与不良地基的适配性优于弯曲螺栓或纯承插构造。当预应力连接结合局部现浇带时,可进一步改善跨中弯矩分布和缝口转角控制,整体性和耐久性表现更好。

2.2 不均匀沉降/偏心荷载下对比

环向(节段间)连接方面,柔性接头(如橡胶圈、钢承口)在位移和转角适应性、抗渗稳定性上具有优势,尤其钢承口通过钢套环埋入混凝土,其刚度大、接头张角范围宽,适合曲线或弧形段以及地下水丰

富路段。弱点在于制作复杂、钢-混界面防腐及施工质量要求高。

当采用纵向约束(预应力)将相邻节段串联成整体后,接头虽以橡胶圈密封,但力学属性趋于刚性。其对缝口张开和错台的抑制效果明显优于纯柔性接头。贯穿式张拉可在整个断面上形成预压以抵消基础沉降引起的附加应力,而相邻式张拉仅在局部形成端面压紧,未在管体内建立有效预压,对不均匀沉降的抵抗能力较弱,更易在中部出现竖向裂缝甚至折断。因此,在沉降敏感或偏心荷载显著的工况下,应优先考虑贯穿式纵向约束或与企口等形成“面压-咬合-拉结”的组合接头,兼顾抗渗和整体受力。

## 2.3 设计建议与优先

从敏感性看,孔径增大、覆土升高均会放大跨中弯矩和缝口转角,对“纯柔性+承插”的不利程度更为明显;斜交角越大,端角的剪-弯耦合越强,角隅开裂和错台风险上升,需通过端部加厚/圆角、加强筋或半刚/刚性连接分担;构件刚度提升(如采用预应力或增加板厚)可显著减少裂缝和变形,但对地基差异沉降的容忍度反而下降,宜与“柔-刚组合接头+沉降缝”协同配置。在此基础上提出分场景的推荐:(1)小孔径、地基条件良好且线形顺直的区段,可采用“承插(平缝/榫接)+双橡胶圈”的方案,以获得较高装配效率;(2)曲线或弧形段、地下水丰富路段,优先采用“钢承口+双圈密封”,以保证张角和抗渗;(3)大孔径或沉降敏感区段,采用“企口+纵向预应力”组合或贯穿式纵向约束,使面压密封与整体受力兼得;(4)当以螺栓半刚性连接替代预应力时,须结合角隅加强与扭矩-间距控制策略,并与外包防水形成多道设防闭合水路。

### 3 BIM技术应用

BIM 技术为解决铁路沿线大量存在的斜交涵洞角度不一问题提供了系统性解决方案。传统二维设计模式下,每个不同角度的斜交涵洞都需要独立设计和出图,导致模板种类繁多,构件标准化程度低,经济性差。利用 BIM 的参数化建模功能(见图 7),设计人员可以创建智能化的涵洞构件族库,将交叉角度、构件尺寸、壁厚等关键参数作为变量进行设置。当需要设计新角度的涵洞时,仅需修改参数,模型便能自动更新并生成对应的三维模型、加工图纸和材料清单。这种方式不仅极大地提升了设计效率,更重要的是,它使得对不同角度构件进行归类和优化

成为可能。设计团队可以在 BIM 环境中对全线所有涵洞进行统筹分析,通过微调设计,将大量角度各异的非标构件整合为有限的几种标准或系列构件,从而显著减少预制模板的种类和数量,为工厂的规模化、集约化生产创造了前提条件。

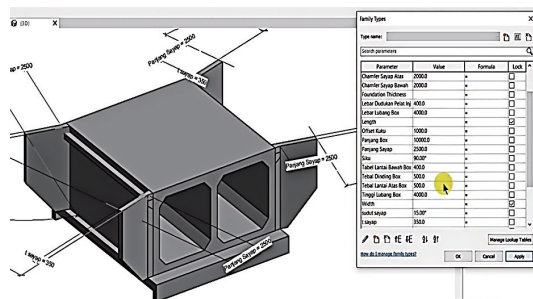


图7 BIM参数化设计示意图

在深化设计和多方协同方面,BIM模型作为一个统一的信息平台,发挥着不可替代的作用。装配式涵洞的接缝构造、钢筋排布、预埋件位置等细节直接关系到结构的安全和耐久性,而传统的二维图纸难以清晰直观地表达复杂的空间关系,容易产生误解。BIM模型提供了一个所见即所得的三维可视化环境(见图8),设计人员、预制厂技术人员和现场施工人员可以共同围绕模型进行讨论,对节点构造进行三维剖切和漫游,直观地检查钢筋是否碰撞、预埋件定位是否准确、拼装接口是否匹配。这种可视化的技术交底方式,确保了各方对设计意图和施工要求的理解高度一致,有效避免了因图纸理解偏差造成的返工和浪费。

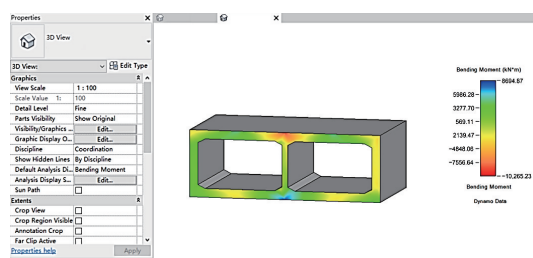


图 8 三维可视化交底

更进一步,将三维模型与施工进度计划即时间维度相关联,即可进行4D施工模拟,动态模拟预制构件从运输、吊装到拼装就位的全过程(见图9),从而实现对工程量和造价的动态管理和精确控制。最终,BIM模型的价值也可以延伸至项目的运维阶段。竣工后,一个包含所有真实构件信息、材料信息和施工记录的竣工模型被交付给运维单位。这个模型成为实体涵洞的数字孪生体,为后续的养护维修、结构健康监测和改扩建提供准确的数据支持,实现了资产的全生命周期信息化管理。

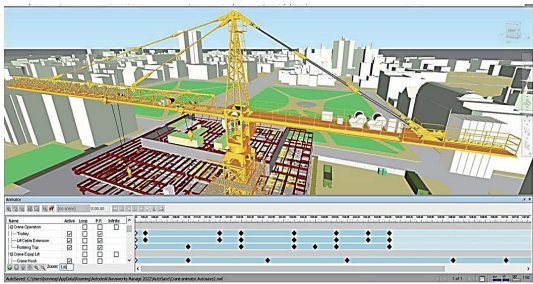


图9 施工模拟示意

4 结 语

(1)小孔径(1~3 m)涵洞优先整体式装配并配“双道橡胶圈+外包2道防水”,以兼顾效率和抗渗;大孔径(4~6 m)涵洞建议“四构件式/左右拼接现浇式”,沉降敏感区采用“企口+纵向预应力”或贯穿式约束以抑制缝口张开和错台。

(2)斜交和曲线段宜选“钢承口+双圈密封”,以扩大允许转角并保证水密;在地下水丰富和长期渗压作用环境下,在接缝主密封之外配置“一刚一柔”的外包2道防水并按节点化做法闭合水路。

(3)BIM技术的应用,将装配式涵洞的各个环节紧密联系在一个统一的数字化平台之上。通过参数化设计,解决了非标构件的标准化难题;通过多维度模拟,增强了项目管理的可预见性和安全性。

参考文献:

[1] GEBREMEDHN Z, QIAO G, LI J. Finite element modeling and analysis of precast reinforced concrete u-shaped box culvert using ABAQUS[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2018, 6(5): 162.  
[2] CHEN X, LI J, ZHANG Z. The simplified model and numerical investigation of U-section precast concrete box culverts[C]// Proceedings of the Structures. Amsterdam: Elsevier, 2025, 74: 108565.

[3] 张朝,刘杰,许有俊,等.预制装配式综合管廊不同连接件承插接头抗剪性能试验研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(12): 5175-5185.  
[4] 凌同华,余彬,谷淡平,等.节段预制拼装综合管廊承插式接头抗弯性能研究[J].中国公路学报,2024,37(8):179-190.  
[5] KASAPOGLU B, SEZEN H, WHITE K. Exterior protection of precast reinforced concrete culvert structures[M]//Bridge Safety, Maintenance, Management, Life-Cycle, Resilience and Sustainability. Boca Raton: CRC Press, 2022: 1353-1360.  
[6] SHARMA P. Evolution of precast box culvert joint and sealing[C]// Proceedings of the Symposium on Concrete Pipe and Box Culverts. West Conshohocken: ASTM International, 2017: 118-134.  
[7] 曹海明.基于循环频率特征的预制管廊装配式拼接节点渗漏位置检测方法[J].结构工程师,2025,41(5):67-72.  
[8] 魏杰,王思琦,梁勇,等.预制装配式涵洞施工技术研究[J].施工技术(中英文),2022,51(19):89-92.  
[9] 吴素清.岩土混合地层综合管廊深基坑支护设计优化研究[J].铁道建筑技术,2025(7):78-81;99.  
[10] LI J L, CHEN X. Design and mechanical properties of U-section precast concrete box culverts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 127(1): 104572.  
[11] 张超哲,刘松玉.地下空间预制装配式结构研究现状综述[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(1):236-245.  
[12] 何亮,钟铨.基于可信度理论的高速公路装配式涵洞施工安全风险评估[J].湖南交通科技,2022,48(4):153-157.  
[13] 朱三凡,胡超,夏樟华,等.预应力连接UHPC预制拼装管廊受力性能试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2025,33(1): 289-299.  
[14] BARTONEK D, BURES J, VYSTAVEL O, et al. Case study of remodelling the as-built documentation of a railway construction into the BIM and GIS environment[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2023, 13(9): 5591.  
[15] LIU W. Intelligent identification and construction system of prefabricated tunnel structure based on BIM technology[J]. Automation in Construction, 2022, 2022(1): 9173929.

(上接第 53 页)

桥与防洪,2025(7):184-190.  
[8] 史佳媛.InfoWorks ICM在排水系统能力评估及提标改造中的应用[J].中国市政工程,2025(2):68-72.  
[9] 王俊.基于InfoWorks ICM的汇水区排涝能力与渍水风险评估分析[J].供水技术,2026,20(1):35-41.  
[10] 周小伟.基于Infoworks-icm的城市管网规划改造研究[J].城市道桥与防洪,2021(5):303-305.  
[11] 薛蕊.基于Infoworks ICM模型的某排水系统洪涝模拟及改造方案研究[J].中国防汛抗旱,2024,34(增刊1):28-31.  
[12] 刘华超,梁风超,徐薇,等.基于Infoworks ICM的城市排水(雨水)系统排水能力及内涝风险评估[J].城市道桥与防洪,2021(12): 71-74.  
[13] 周继阳.老旧小区海绵化改造研究及应用探索[J].城市建筑,2026,23(6):10-13.  
[14] 陈培王.海绵城市背景下老旧小区给排水系统改造思路[J].住宅与房地产,2026(10):90-92.  
[15] 李政江.海绵城市理念在住宅小区给排水系统中的应用与优化设计研究[J].居舍,2026(8):100-103.  
[16] 汤钟,刘枫,程鹏,等.城市更新背景下老旧小区海绵城市改造探索与实践[J].水利规划与设计,2026(3):11-16.  
[17] 黄怡.高密度低更新建成区海绵城市规划中源头减排策略研究——以上海市黄浦区为例[J].城市道桥与防洪,2017(12):82-85.