

顶管穿越高速公路路基变形控制及道路安全措施

王 漾

北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京 100071

[摘要]顶管法在穿越高速公路路基的过程中,其引发的变形控制一旦失效,将会对道路结构的稳定状态和运营阶段的安全保障构成非常显著地威胁。本研究深入地、系统性地剖析了导致路基变形的几个最为核心的诱因,它们包括地层损失带来的不利影响、施工扰动区域形成机制、土体内部应力路径发生的复杂变化以及地下水渗流造成的各种各样的影响。

[关键词]顶管施工;高速公路路基;安全控制

DOI: 10.33142/aem.v7i6.16992

中图分类号: TU942

文献标识码: A

Deformation Control and Road Safety Measures for Pipe Jacking Crossing High-speed Roadbed

WANG Yang

Beijing National Highway Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing, 100071, China

Abstract: Once the deformation control caused by the pipe jacking method fails during the process of crossing the highway subgrade, it will pose a significant threat to the stability of the road structure and the safety guarantee during the operation stage. This study thoroughly and systematically analyzed several of the most core causes of roadbed deformation, including the adverse effects of geological loss, the formation mechanism of construction disturbance areas, the complex changes in stress paths within the soil, and the various impacts caused by groundwater seepage.

Keywords: pipe jacking construction; highway subgrade; safety control

引言

顶管法施工能够避免明挖开槽,对周围环境影响较小,在穿越既有建筑物、河道、道路及地下管线时具有极大优势,现已成为我国管线工程建设的重要方法。然而,顶管法施工不可避免扰动土体,产生地层位移,严重时还会影响周围建(构)筑物的稳定。高速公路作为典型条状构筑物,对路面沉降控制严格。顶管穿越高速公路施工引起土体扰动和地层损失效应,将直接影响上覆路基结构的变形稳定以及高速公路运营安全性。目前,针对顶管穿越高速公路路基变形的专项研究相对较少,路基变形特征及沉降控制理论亟待系统完善。

1 高速公路路基变形控制的重要性

高速公路承载着区域和国家经济社会运行所必需的交通量,它的路基直接支撑着路面结构并将车辆荷载传递下去。即使是路基自身发生的微小不均匀沉降变形,也完全可能在路面层产生显著地反射效应,导致路面平整度急速劣化。这会诱发车辆行驶时剧烈颠簸,显著增大轮胎磨损速度,并且严重威胁行车安全性与乘坐舒适性。特别值得注意的是,超出设计容许范围的过量沉降,它们甚至可能引发路基结构渐进性的失稳破坏,例如边坡发生滑移、挡墙出现倾覆或者路基整体遭遇剪切破坏等灾难性后果^[1]。这些破坏会造成交通主动脉彻底中断,带来难以估量的直接经济损失以及广泛深远的负面社会影响。因此,在顶管下穿施工这类外部扰动介入情形下,确保高速公路路基变形被

严格限制在安全阈值之内,这绝不仅仅是单纯的技术目标,它更是关乎公共安全与社会经济正常运转的重大责任,必须将其置于工程决策与施工管控的绝对优先地位去考虑。

2 顶管施工引致路基变形的机理分析

2.1 地层损失效应

顶管机在土体中掘进并安装管节的过程,客观上在管道外壁和开挖洞周土体之间形成环状空隙。如果未能及时足量地通过同步注浆或后续二次注浆工艺完全填充补偿此环隙空间,便会产生实质性的地层体积损失。最终在上覆土体自重与附加应力联合作用下,地表形成以管道轴线为中心轴并呈现近似沉降槽形态分布的沉降场。沉降槽的宽度深度及其影响范围,直接关联于地层损失率大小、土体自身的黏聚力、内摩擦角、压缩模量等物理力学特性以及管道埋置深浅程度。对于埋深较浅且土质条件较差比如高含水率、低强度软黏土或松散砂层的顶管工程,即便微小地层损失率也极易诱发显著地表沉降,对浅埋其上并对变形极为敏感的高速公路路基构成直接威胁。

2.2 施工扰动区形成机制

顶管机刀盘切削前方土体时施加的巨大推进力和旋转扭矩,不可避免地会对刀盘前方及周围一定范围土体造成显著地挤压剪切与重塑作用。这个受施工直接影响的区域被定义为施工扰动区。区内土体原始微观结构单元比如颗粒排列孔隙分布胶结状态等,会遭受不同程度破坏甚至解体。宏观上表现为土体强度指标如抗剪强度发生衰减、变

形模量显著降低、渗透性能也可能改变。扰动区范围大小及内部土体劣化严重程度,受到顶管机选型比如敞开式土压平衡式或泥水平衡式、掘进参数设定比如刀盘转速、推进速度、总推力、土仓压力控制精度以及原始地层固有特性比如密实度、含水量、矿物成分等多重复杂因素共同制约^[2]。施工扰动区存在极大地削弱管道周边土体支承能力,如同在路基下方形成力学性质相对薄弱的软化带,为后续施工期及工后运营期路基潜在变形埋下了隐患。

2.3 土体应力路径变化

顶管掘进这一动态过程,对管道周围土体而言相当于经历应力状态与传递路径剧烈调整。在顶管机头部前方区域,土体主要承受刀盘推进带来的强烈挤压作用,其内部应力水平急剧升高,主应力方向也发生显著旋转。在已安装管节上方及侧方土体那里,由于管道结构取代原有土体空间,部分原有土体承担荷载逐步转移至管体结构及其周围土体,形成复杂的应力重分布现象。管道尾部区域,因为环状空隙存在加上注浆体未达设计强度,该区域土体一定时间内处于局部卸荷或应力释放状态。土体是典型应力历史依赖型材料,其对加载卸载再加载等不同应力路径响应行为存在显著差异。顶管施工诱发复杂多变且具空间差异性特点的应力路径变化,会导致不同位置土体产生差异显著地压缩、剪切、蠕变等变形响应,其综合效应最终反映为路基整体不均匀沉降或侧向位移。

2.4 地下水渗流影响

在赋存地下水岩土层中进行顶管施工,其扰动效应常打破原有地下水渗流场平衡状态。顶进作业可能破坏相对隔水层连续性,或改变含水层与隔水层相对位置关系,进而形成新的有时是短时效的地下水渗流通道。地下水流动对土体产生渗透力作用,当渗流方向不利比如向上或侧向冲刷时,可能导致土体细颗粒成分迁移流失即潜蚀现象,造成土体孔隙率增大有效应力降低结构强度弱化。在砂性地层中,这种潜蚀效应尤为显著,极易引发地层损失加剧甚至局部塌陷。饱和软黏土地层中,施工扰动破坏土体结构使其触变液化,导致孔隙水压力骤升有效应力剧降土体抗剪强度瞬间丧失,进而诱发显著塑性流动变形。

3 路基变形控制核心技术

3.1 掘进参数优化

精细调控顶管掘进参数是实现微扰动施工抑制路基变形关键技术的关键。关键在于建立土仓压力设定值与前方原始土压力地下水压力动态平衡精准控制机制,最大程度抵消开挖面应力释放效应。推进速度需根据地层条件实时调整,软弱敏感地层应采用低速匀速推进模式,降低对前方土体瞬时冲击扰动强度。刀盘转速扭矩匹配优化也至关重要,确保切削效率同时避免过度剪切扰动土体。总推力施加必须精确平稳,减少对已安装管节周围土体反复挤压作用。纠偏操作幅度频率应严格控制,姿态调整力求平

缓渐进,最大限度减少轴线纠偏造成超挖或额外挤压扰动。这要求建立基于土压力姿态扭矩等实时监测反馈参数动态优化模型,实现掘进过程从经验驱动向数据驱动智能转变,有效抑制地层损失施工扰动范围扩大。

3.2 注浆加固技术

注浆作为补偿地层损失改良土体性能核心手段,其效果直接决定沉降控制成败。同步注浆要求浆液在管节脱离盾尾瞬间迅速饱满填充环状空隙,浆液需具备良好的流动性适当初凝时间微膨胀特性,实现即时支撑目标。二次补浆针对同步注浆不足工后沉降趋势进行精准补充,常采用渗透性好收缩率低化学浆液超细水泥浆液,深入渗透土体孔隙微小裂隙^[3]。高速公路穿越段路基稳定性要求极高,可考虑管道顶部特定范围实施袖阀管分段前进式注浆深层定点高压注浆进行主动加固,显著增强上方路基支撑刚度从而约束沉降发展。注浆压力流量配比时序精准,是确保注浆效果避免无效注浆扰动加剧重中之重。

3.3 土体改良措施

针对富水砂层高灵敏度软黏土等不良地层,顶管掘进前或施工中对刀盘前方顶进轴线周边土体实施主动改良,提升土体自身抗力抑制扰动效应关键策略。降水固结技术需施工影响区外围科学布设降水井群,适度降低地下水位促使土体有效应力增长,增强强度变形模量,同时削弱富水地层潜蚀流砂风险,该方案必须审慎设计避免诱发过大附加沉降。化学改良依托硅酸钠即水玻璃丙烯酸盐聚氨酯等化学浆液渗透灌注土体内部,借助胶凝反应土颗粒间构建三维网状胶结结构,提升土体内聚力抗渗性能整体稳定性,此方法尤其适用于渗透性良好砂层粉土地层。冷冻法对极软弱高富水高渗透性地层如流砂层高承压水地层具有不可替代作用,通过人工冻结形成临时冻结帷幕,切断地下水渗流路径非稳定土体转化为高强度冻土,为顶管穿越创造刚性支护环境,尽管效果显著却面临成本高昂能耗巨大现实制约。地基预处理要求顶管轨迹正上方路基下方预先施工微型桩树根桩深层搅拌桩等竖向增强体,构筑隔离帷幕结构体系,直接承担部分上覆路基荷载阻隔施工扰动波传递路径,此措施对沉降控制标准严苛路段效果较好。

3.4 微扰动施工工艺

微扰动理念必须贯穿顶管穿越高速公路施工全过程,核心目标依托精细化、信息化管理最大程度削弱周边土体干扰强度。管节接口密封优化要求采用高性能橡胶密封圈严格控制管节端面平整度,压缩相邻管节错台量最低限度,消除顶进过程接口缝隙产生额外地层损失源。连续匀速顶进工艺严格禁止频繁启停、急加速、急减速操作,维持掘进过程机械运动平稳性,降低土体反复加卸载冲击扰动。姿态精准控制预报融合高精度导向系统实时监测数据地质超前预报信息,动态规划最优顶进轨迹,削减轴线纠偏诱发超挖量附加土体扰动。出土量实时监控平衡管理构成

地层损失控制核心量化手段,要求实际出土量精确计量理论值实时比对分析,土压平衡式顶管机需精细协调排土量顶进速度耦合关系,泥水平衡式顶管机必须精准调节进排泥流量压力平衡状态。环境智能监控反馈施工路基管线沿线布设沉降测点倾斜仪孔隙水压计等密集监测网络,构建数据驱动智能预警平台,基于实时变形反馈数据动态调整掘进参数注浆策略,形成感知分析决策执行闭环控制系统,此技术将被动防护转化为主动控制,成为实现微扰动目标根本保障,施工团队执行力直接决定工艺成效达成度。

4 高速公路运营安全保障体系

4.1 施工期道路监测系统

构建覆盖全面精度可靠自动化监测网络是保障高速公路运营安全的重要措施。监测系统需立体化布设,路基表面沉降、水平位移采用高精度电子水准仪、全站仪、静力水准仪,深层土体分层沉降水平位移使用测斜仪分层沉降磁环,关键结构物如桥梁墩台涵洞变形应力应变状态安装应变计倾角仪,路面平整度变化采用激光断面仪。监测频率根据施工阶段动态调整,穿越核心风险期应提升至近乎实时小时级。所有监测数据实时传输中央数据平台进行自动分析阈值比对可视化展示,为预警决策提供即时客观依据。

4.2 分级预警与应急响应机制

构建基于实时监测数据预设变形控制标准涵盖允许沉降量、沉降速率阈值,深度融合多级预警模型通常划分为蓝、黄、橙、红四级,构成运营安全保障核心决策框架。监测指标接近预警阈值触发蓝色关注级响应,需加密监测频率通报警示相关责任方进入预备状态。变形发展至黄色预警级即指标突破预设预警值,立即启动现场技术核查诱因分析程序,同步准备实施预定初步控制措施如动态调整顶进参数提升注浆强度。数据持续恶化进入橙色警戒级阶段表现为指标快速逼近控制值变形趋势显著加剧,必须执行强化干预措施,包括实施限速管控,封闭部分车道,同时要求项目主要领导现场指挥组织专家会诊制定风险控制策略。最严峻红色行动级响应由监测值突破控制极限突发危及结构安全紧急状况如路基瞬时沉陷路面裂缝剧增触发,立即启动最高级应急预案实施全面交通管制包括封闭车道中断道路,组织塌陷区快速填充结构临时支撑抢险,紧急疏散滞留人员车辆,联动路政交警消防医疗多部门开展应急救援协同作战。

4.3 交通组织方案

为平衡顶管下穿施工道路安全管控通行服务需求,必须设计执行科学严密交通组织体系。限速车道管控作为基础措施,要求施工影响区段设置醒目限速标志强制降至60km/h 更低,削弱车辆动荷载冲击,保护敏感期路基,必要时临时封闭高风险车道如超车道引导车流安全通道通行^[4]。临时交通标志引导系统需施工区上游足够距离布设连续警示标志、限速标识、车道变窄提示引导标线,配

合电子情报板实时发布施工动态引导驾驶员提前减速变道,夜间强化照明反光设施确保可视性。施工区域安全布控严格执行警告区、上游过渡区、缓冲区、工作区、下游过渡区标准化分区设置,工作区采用水马防撞桶等防撞设施物理隔离保障人员设备安全,配置专职交通协管员现场疏导指挥。应急预案通道保障要求应急救援车辆如救护车、消防车专用通行路径,地方应急管理部门建立即时联动机制确保救援力量快速抵达。

4.4 路基稳定性修复预案

针对可能发生超预期路基变形局部失稳风险,必须预先制定操作性强修复快速的预案,险情发生后立即组织专家团队结合监测数据、现场勘探结果,使用探地雷达等技术,迅速判定失稳范围内沉降、隆起、滑移原因,判断注浆效果是否达到预期效果等,为后续行动提供决策依据。快速加固技术储备根据风险类型预设针对性方案,局部沉陷采用速凝混凝土高聚物材料即时填充,路基滑移承载力不足启用微型钢管桩树根桩实施托换加固,土体流失空洞运用低压可控注浆工艺填充固结,含水地层扰动采用水玻璃水泥双液浆快速止水固结。应急资源保障需明确抢险队伍设备、注浆材料、钢管桩保障机制,确保资源黄金救援期内高效投用。修复后采用限载限速措施保障通行,通过持续监测最终恢复原设计通行条件标准。

5 结束语

顶管法下穿高速公路路基是集施工精度高、技术难度大、工程地质复杂、运营安全要求高于一体的系统性高风险工程。有效控制路基变形保障道路安全畅通,核心在于对地层损失效应、施工扰动区演化、土体应力路径变迁、地下水渗流耦合作用等关键机理的深刻认知和科学预测。要求将微扰动控制理念贯穿掘进参数、智能化调控注浆体系、不良土体主动改良精细化施工管理全链条。同时构建以自动化监测、多级预警的保障运营安全主动防御体系。将顶管穿越施工对高速公路生命线工程结构完整性威胁运营安全风险降至最低,确保国家交通大动脉持续畅通安全运行。

【参考文献】

- [1]张一曼.顶管施工技术在穿高速公路工程中的应用[J].交通世界,2024(10):37-39.
- [2]陶东辉.泥水平衡顶管下穿高速桥梁施工关键技术研究[J].建筑技术开发,2024,51(5):122-124.
- [3]王琦.水利工程下穿高速全断面破岩顶管施工技术研究[J].工程技术研究,2024,9(11):75-77.
- [4]陈彦佳.大直径平行顶管下穿高速公路桥梁安全影响分析[J].福建交通科技,2024(11):94-99.

作者简介:王漾(1987.3—),毕业院校:同济大学,所学专业:道路与铁道,当前就职单位:北京国道通公路设计研究院股份有限公司,职务:副所长,职称级别:高级工程师。