DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260455

输水管道顶管下穿公路施工影响分析

杨天池
(高邮市交通产业投资集团有限公司,江苏 扬州 225600)

摘 要: 以扬州市某长距离输水管道下穿公路工程为例,基于数值模型还原顶管施工全过程,选取覆土厚度、管道直径、掘进压力及注浆压力4个参数开展单因素敏感性分析,并确定最优施工工艺参数。结果表明:覆土厚度与管道直径对路面沉降影响最为显著,掘进压力与注浆压力的影响相对较弱。综合确定最优参数组合为覆土厚度14.0 m、管道直径3.5 m、掘进压力200 kPa、注浆压力100 kPa,该工况下路面最大沉降为8.24 mm,满足10 mm的规范限值要求。现场实测最大沉降为8.45 mm,与数值模拟结果相对误差仅2.55%,验证了数值模型及优化方案的准确性与可行性。

关键词: 长距离输水管道;顶管施工;下穿高速;数值分析;施工技术
中图分类号: TU990.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2026)11-0359-05

Analysis on Impact of Water Conveyance Pipeline Jacking Construction under Highway

YANG Tianchi
(Gaoyou City Transportation Industry Investment Group Co., Ltd., Yangzhou 225600, China)

Abstract: Taking the project of a long-distance water conveyance pipeline passing under a highway in Yangzhou City as an example, the entire process of pipe jacking construction is restored based on numerical models. Four parameters of soil cover thickness, pipe diameter, tunneling pressure and grouting pressure are selected for single-factor sensitivity analysis to determine the optimal construction process parameters. The results indicate that soil cover thickness and pipe diameter have the most significant impact on the pavement settlement, while the influence of tunneling pressure and grouting pressure is weaker. The optimal parameter combination is comprehensively determined as soil cover thickness 14.0 m, pipeline diameter 3.5 m, tunneling pressure 200 kPa, and grouting pressure 100 kPa. Under these conditions, the maximum pavement settlement is 8.24 mm, meeting the 10 mm specification limit. Field measurements show that a maximum settlement is 8.45 mm, with a relative error of only 2.55% compared to numerical simulation results, verifying the accuracy and feasibility of the numerical model and optimization scheme.

Keywords: long-distance water conveyance pipeline; pipe jacking construction; passing under expressway; numerical analysis; construction technology

0 引 言

在长距离输水管道建设过程中,受城市基础设施、地形环境、地下控制布置等因素的影响,无法采用传统的明挖法施工。顶管法凭借无需大面积开挖、对地面交通干扰小、施工安全性高、适配长距离地下穿越工程等优势,成为输水管道下穿交通干线的首选施工工艺[1-2]。但扬州地区广泛分布粉质黏土、淤泥质软土,土层压缩性高、稳定性差、含水量大,顶管掘进过程中极易产生地层扰动,引发路面沉降、路基开裂等病害,严重影响高速公路通行安全,同时威胁输水管道结构完整性[3-4]。Attewell等较早建立了顶管施工引起地表沉降的经验预测方法,Peck公式及其修正形式被广泛应用于沉降槽形态描述;Shin等通过现场实测与数值模拟对比,分析了顶管掘进过程中地表沉降的时空演化规律;同时,国内学者围绕顶管施工引起的地层扰动与路面沉降问题也开展了大量的研究工作,吴森阳等[4]针对既有公路下穿管道顶管施工及大断面矩形顶管地铁车站施工,开展了施工安全控制与风险管控研究马鹏等[5]对矩形顶管技术的研究现状与发展趋势进行了综述,围绕顶推力预测、注浆减阻、地层响应模式及沉降计算等关键技术问题进行了系统梳理;郑鹏程

收稿日期:2026-04-27
作者简介:杨天池(1983—),男,学士,工程师,从事高速公路下穿施工技术与管理工作。

等[6]基于北京地铁12号线浅埋矩形顶管下穿机场高速工程，采用数值模拟分析了机头支护压力、地层损失及注浆压力等施工参数的敏感性；李季等依托砂砾地层大直径圆形顶管下穿既有高速公路工程，建立三维数值计算模型分析了顶管掘进的地表变形扰动规律。现有的研究成果大都聚焦于单一工艺参数或缺乏系统的现场验证，未综合考虑覆土厚度、管道直径、掘进压力及注浆压力等关键参数对顶管施工控制的影响。基于此，以扬州市某输水管道下穿公路工程为例，基于扬州地区典型的软土地质特征及既有路面沉降控制需求，综合考虑覆土厚度、管道直径、掘进压力及注浆压力四个核心施工参数，采用MIDAS GTS NX建立三维精细化模型，还原顶管施工全过程，通过单因素敏感性分析，定量揭示各参数对路面沉降的影响规律及敏感性，明确最优工艺参数组合；进一步将数值模拟结果与现场实测沉降数据进行对比验证，以期为同类工程施工管控提供参考。

1　工程及地质概况

1.1　工程概况

某长距离输水干线改扩建项目位于扬州市经济技术开发区，新建管道K12+230—K12+680段采用顶管法施工，其中K12+386—K12+522段需要穿越既有公路及市政道路，顶管工作井分别位于桩号K12+386及K12+522处，顶管总长度136.0 m，采用泥水平衡顶管法施工工艺。

下穿既有公路路面为双向6车道，路基宽度42.0 m，设计时速80 km/h，下穿既有市政道路为双向2车道，路基宽度为15.0 m，设计时速80 km/h，路面设计沉降限值为10 mm，施工期间需保障高速公路正常通行，严禁出现明显不均匀沉降与路面开裂。

1.2　地质概况

根据工程地质勘察报告，钻孔深度内主要土层均为第四纪湖相沉积物，自上而下土层依次为素填土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、黏土及粉土层，各土层物理力学参数见表1。

场地地下水类型为潜水，埋深为1.8～2.5 m，主要赋存于浅部土层中，水量丰富、渗透性中等，其中淤泥质粉质黏土层厚度大、压缩性高、承载力低，是顶管施工主要穿越土层，极易受施工扰动产生固结沉降。

2　三维有限元数值模型建立

2.1　模型构建

采用MIDAS GTS NX岩土专用有限元软件建立三维数值模型，为消除模型边界效应影响，结合顶管施工影响范围，确定模型整体尺寸为136 m×80.0 m×30.0 m（长×宽×高），其中长度方向为输送管道顶管掘进方向，宽度方向为公路横向。土体采用三维实体单元模拟，遵循摩尔-库伦本构模型；输水管道采用线弹性本构模型，壳体单元模拟；公路及市政道路路基、路面均采用实体单元模拟[7-8]。网格划分采用精细化分区划分方式，顶管掘进区域、公路、市政道路路面等核心区域网格加密，网格尺寸0.5 m，模型共128 632个单元，235 716个节点。长距离输送管道顶管法施工有限元模型见图1。

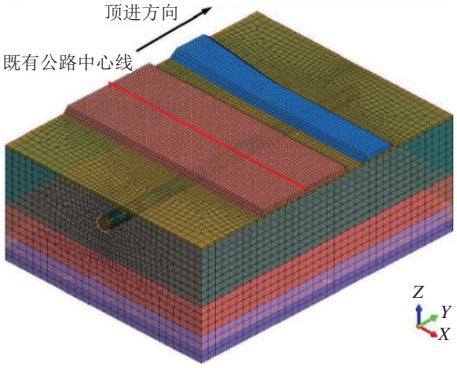


图1　长距离输送管道顶管法施工有限元模型

2.2　顶推力模拟

顶管施工顶推力采用工作面均布压力加载法还原掘进顶推作用，在顶管机头掘进掌子面施加垂直于工作面的均布掘进压力[9]。施工模拟采用分步开挖激活方式，按照现场施工步序，每掘进6 m为一个施工步，钝化对应位置土体单元，激活管道单元与工作面顶推压力，模拟顶管渐进式掘进过程，还原地层应力释放与重分布全过程[10]。开挖面顶推力模拟见图2。

表1　各土层物理力学参数

层次	土层名称	平均层厚/m	天然重度/(kN·m)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
①	素填土	0.8	18.23	8.2	0.32	12.2	17.6
②	淤泥质粉质黏土	15.3	17.81	6.2	0.35	15.8	16.1
③	粉质黏土	7.4	18.61	12.0	0.30	22.1	20.5
④	黏土	3.5	19.02	18.0	0.26	35.0	26.3
⑤	粉土	2.7	18.68	15.5	0.28	13.6	18.6

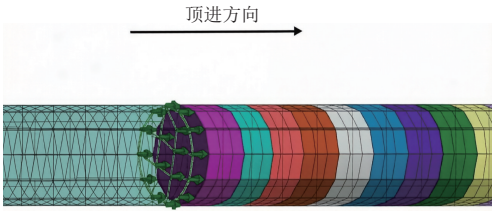


图 2　开挖面顶推力施工模拟

2.3　注浆压力模拟

顶管同步注浆压力模拟通过在管道外壁与土体接触的环形间隙区域施加均布注浆压力实现工况还原[11-12]。数值模拟中,待单段管道掘进完成、土体应力初步释放后,钝化间隙空单元,同步激活注浆压力与注浆层硬化参数,模拟浆液填充、渗透、固结的全过程,还原注浆对地层的加固作用与沉降抑制效果[13]。顶管法注浆压力模拟见图 3。

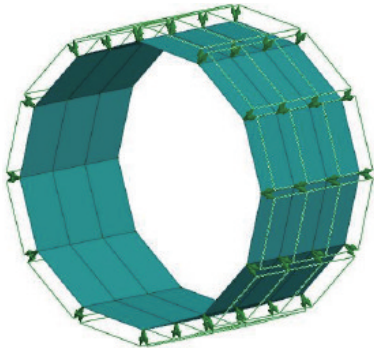


图 3　顶管法注浆压力模拟

3　数值计算方案及结果分析

3.1　数值计算方案

结合本项目的实际工况,选取覆土厚度、管道直径、掘进压力、注浆压力等 4 个施工核心工艺参数开展单因素敏感性分析,每个参数分为 4 个水平[14-15]。采用控制变量法开展单因素分析,数值计算参数水平见表 2。

表 2　数值计算参数水平

核心参数	核心参数水平			
	第 1 水平	第 2 水平	第 3 水平	第 4 水平
覆土厚度/m	10.0	12.0	14.0	16.0
管道直径/m	2.5	3.5	4.5	5.5
掘进压力/kPa	100	200	300	400
注浆压力/kPa	75	100	125	150

3.2　数值计算结果与影响规律分析

3.2.1　覆土厚度的影响

固定管道直径 3.5 m、掘进压力 200 kPa、注浆压力 100 kPa,不同覆土厚度条件下公路路面沉降曲线见图 4。

根据图 4,随着覆土厚度增大,公路路面最大沉降值持续减小,但减小速率逐渐放缓。覆土厚度 10.0 m 时,路面沉降 12.86 mm,超出 10 mm 的规范限值,不满足施工安全控制要求;厚度提升至 12.0 m 时,沉降降至 10.52 mm,接近规范限值;厚度 14.0 m 时,沉降量降至 8.24 mm,满足规范要求;而当厚度增至 16.0 m 时,沉降仅小幅下降至 7.91 mm,沉降控制提升效果不明显。

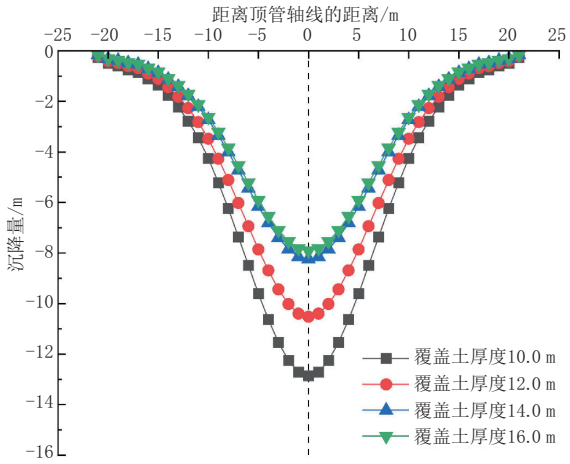


图 4　不同覆土厚度条件下公路路面沉降曲线

覆土厚度对路面沉降的控制作用主要源于上覆土层的应力扩散与衰减效应。覆土厚度较小时,卸荷应力尚未得到充分衰减即传递至路面,加之浅层土体通常固结程度较低、结构性强,在扰动下易发生体积收缩与剪切变形,因而路面沉降显著。随着覆土厚度增加,上部土层厚度增大,扰动应力在穿越上覆土层时经历多次反射、折射及土体内部摩擦耗散,可有效分散、衰减顶管施工产生的地层应力扰动,抑制路面沉降;同时,较厚的上覆土层能够形成更为有效的压力拱效应,将开挖引起的卸荷荷载部分转移至两侧稳定土体,从而降低传递至路面的竖向应力分量。当厚度超过 14.0 m 后,应力衰减趋于稳定,继续增加覆土厚度对沉降控制的增益效果有限,且会增加施工成本与难度[14]。

3.2.2　管道直径的影响

固定覆土厚度 14.0 m、掘进压力 200 kPa、注浆压力 100 kPa,不同管道直径条件下公路路面沉降曲线见图 5。

根据图 5,管道直径对路面沉降影响最为显著,沉降值随管径增大呈线性快速增长趋势。管径 2.5 m 时,沉降仅 6.12 mm,远小于 10 mm 的规范限值,公路路面沉降控制效果最优;管径 3.5 m 时,公路路面沉降增加至 8.24 mm,但仍可满足规范限值要求;而当管径达到 4.5 m 及 5.5 m 时,公路路面沉降分别达到

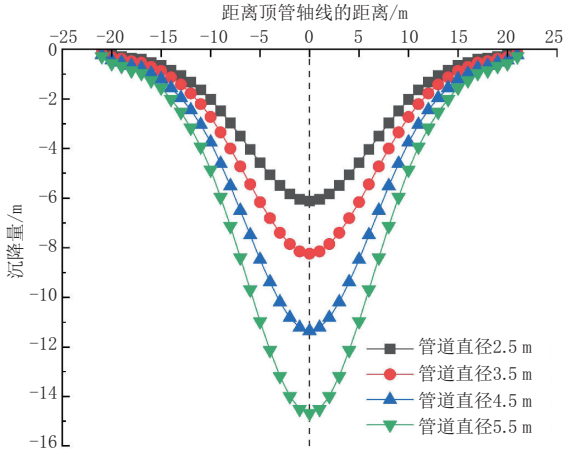


图 5　不同管道直径条件下公路路面沉降曲线

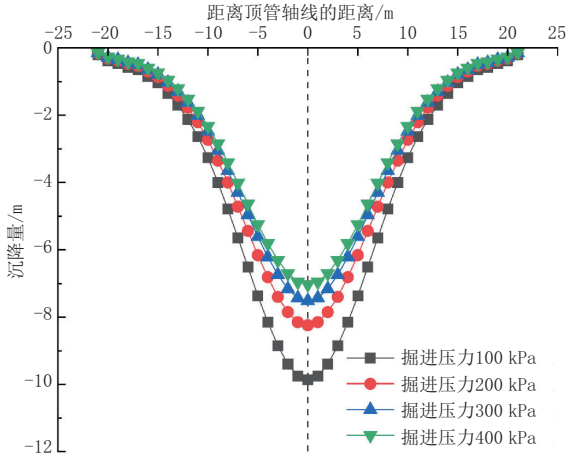


图 6　不同掘进压力条件下公路路面沉降曲线

11.35、14.68 mm,均超出规范限值,顶管施工风险较高。

管道直径增大直接导致开挖断面面积呈平方倍增加,单位进尺内被切削、扰动的土体体积显著扩大[17]。顶管施工存在超挖间隙,实际开挖直径始终略大于管道外径,且超挖体积与管道直径呈正比例关系,因此大直径顶管施工产生的理论地层损失体积呈几何级数增长;同时,在顶进过程中,超挖间隙、管节外壁与地层间的建筑空隙以及同步注浆填充不足等问题,均会随着管径增大而被显著放大,导致更多的原状土体被置换或流失。与此同时,大直径顶管施工打破了原有地层的应力平衡状态,使开挖面周边土体的初始应力场发生重分布:一方面,开挖面前方的主动土压力因临空面的形成而急剧降低,地层拱效应迅速弱化乃至消失;另一方面,管顶上方覆盖土层的自重应力及附加荷载需通过更长的应力传递路径向两侧地层转移,应力释放的影响范围随之向深部和四周扩展,扰动程度也更为显著,进而对上部路基路面的平整度、结构完整性及长期服役性能构成较大威胁。

综合而言,管道直径是控制路面沉降的最敏感因素,这与 Peck 沉降公式的研究成果相一致,即地表沉降槽的最大沉降量与地层损失率呈正比,而地层损失率受开挖半径影响最为显著。

3.2.3　掘进压力的影响

固定覆土厚度 14.0 m、固定管道直径 3.5 m、注浆压力 100 kPa,不同掘进压力条件下公路路面沉降曲线见图 6。

根据图 6,随着掘进压力增大,路面沉降值缓慢减小,参数影响敏感度显著低于管道直径与覆土厚度,各掘进压力下公路路面的最大沉降量均小于规范限值。掘进压力 100 kPa 时,工作面支护压力不足,土体出现轻微坍塌现象,路面最大沉降 9.86 mm;压力提升至 200 kPa 时,沉降降至 8.24 mm;压力继续增大至 300、400 kPa 时,沉降持续小幅降低,但降幅明显收窄。

在顶管施工中,掘进压力是控制掌子面稳定与地层变形的关键技术参数,通过在开挖面前方形成主动支护反力,与原始侧向土压力、孔隙水压力及地面附加荷载相平衡,从而维持掌子面的极限平衡状态。适当提高掘进压力,能够有效补偿因顶进扰动引起的应力释放,抑制开挖面前方土体的塑性区扩展与松弛变形,减少工作面土体的水平位移与体积损失。但掘进压力过大易导致上部土体隆起、地层挤压扰动加剧,同时增加顶管施工阻力与设备负荷,因此无需盲目增大掘进压力。

3.2.4　注浆压力的影响

固定覆土厚度 14.0 m、固定管道直径 3.5 m、掘进压力 200 kPa,不同注浆压力条件下公路路面沉降曲线见图 7。

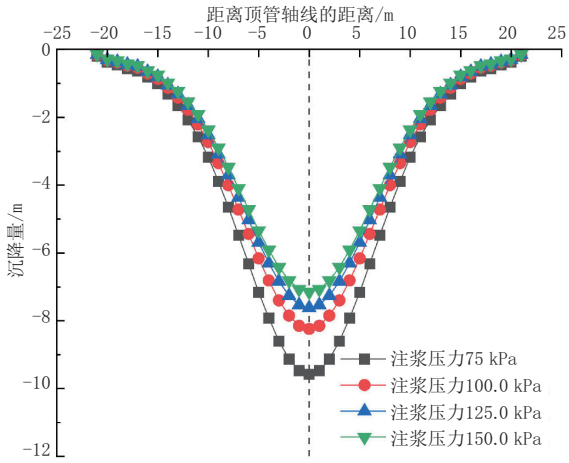


图 7　不同注浆压力条件下公路路面沉降曲线

如图 7 所示,注浆压力与路面沉降呈负相关关系,随着注浆压力的增加,路面沉降量越小,且各注

浆压力下公路路面的最大沉降量均小于规范限值。注浆压力 75 kPa 时,浆液填充密实度较差,顶管管壁与土体间存在间隙空洞,路面最大沉降为 9.58 mm;压力提升至 100 kPa 时,浆液可完整填充环形间隙,有效加固扰动地层,沉降降至 8.24 mm;继续提升压力压力,路面沉降呈现小幅降低确实,通过增大注浆压力控制路面沉降的增益效果有限。

注浆压力是同步注浆或二次补偿注浆的核心控制参数,直接决定了浆液在地层间隙中的扩散动力与充填范围。适当提高注浆压力,浆液在盾尾间隙、超挖空隙及土体孔隙中的流动性显著增强,扩散半径随之扩大,能够更为充分、密实地填充顶管机尾隙、管壁与地层之间的环形空间以及因施工扰动产生的松散区,有效补偿因土体损失造成的体积亏空,从而减小因工后固结沉降、瞬时沉降及次固结沉降叠加所致的地表变形。

4　最佳施工工艺确定及现场实施效果分析

4.1　最佳施工工艺确定

结合各参数影响规律、规范沉降限值及工程经济性、施工可行性,综合确定最优施工工艺参数。覆土厚度采用 14.0 m,兼顾沉降控制效果与施工成本,相较于 16.0 m 厚度可减少土方开挖与施工难度,且路面沉降控制科满足规范要求;管道直径采用 3.5 m,在满足工程输水能力的前提下,有效控制地层扰动,路面沉降小于规范限值;掘进压力采用 200 kPa,可有效平衡掌子面水土压力,沉降控制效果良好,避免压力过大造成的施工损耗;注浆压力采用 100 kPa,浆液可填充管道外壁与土体间的控制,沉降抑制效果最优,且无地层隆起风险。最终确定最优施工参数组合:覆土厚度 14 m、管道直径 3.5 m、掘进压力 200 kPa、注浆压力 100 kPa,该施工工艺参数组合下路面最大沉降量为 8.24 mm,满足公路沉降控制规范要求。

4.2　现场实施效果分析

为验证优化施工工艺的可行性,在工程下穿高速段路面布置监测点位,沿管道掘进中心线、高速公路横向对称布设 25 个沉降监测点,每施工步监测 1 次,施工完成后持续监测 7 d。现场沉降监测成果与数值模拟结果对比见图 8。

根据图 8,最优参数工况下,数值模拟沉降值与现场实测值最大相对误差仅 2.55%,吻合度极高。现场实测最大路面沉降值为 8.45 mm,小于 10 mm 的规范限值,无路面不均匀沉降、开裂等病害,公路运营状态良好,充分验证了本次数值模型的准确性及优化施工工艺的可行性、安全性。

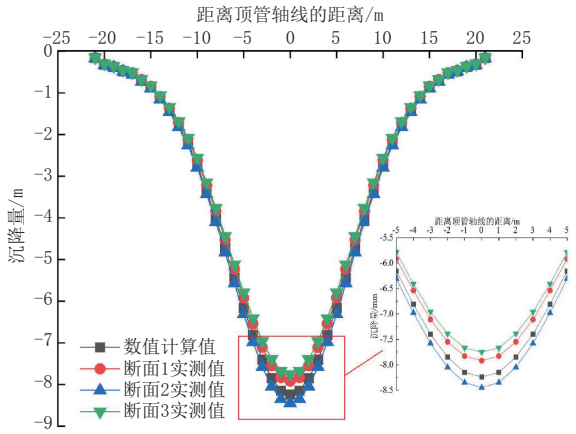


图 8　数值模拟与现场实测沉降数据对比

5　结　论

以扬州市某长距离输水管道顶管法下穿公路工程为例,采用 MIDAS GTS NX 建立了三维精细化有限元模型,分析了覆土厚度、管道直径、掘进压力及注浆压力等工艺参数对高速公路路面沉降的影响规律,确定了最优施工工艺参数组合。主要结论如下:

(1)随着覆土厚度增大,路面最大沉降值持续减小,但减小速率逐渐放缓;管道直径是影响路面沉降的最敏感因素,路面沉降值随管径增大呈快速增长趋势;

(2)掘进压力与注浆压力对路面沉降的影响相对较弱,掘进压力过低易导致工作面土体坍塌,过高则可能引起上部土体隆起并增加设备负荷;注浆压力过低会造成环形间隙填充不密实,适当提高可有效补偿土体损失;

(3)综合沉降控制效果、工程经济性及施工可行性,确定本工程最优施工工艺参数组合为:覆土厚度 14.0 m、管道直径 3.5 m、掘进压力 200 kPa、注浆压力 100 kPa。该组合下数值模拟路面最大沉降为 8.24 mm,现场实测最大沉降为 8.45 mm,满足 10 mm 的规范限值要求,且公路运营状态良好,验证了数值模型的准确性及优化施工工艺的安全性与可行性;

(4)单因素敏感性分析法可直观反映各单一参数变化时的沉降响应,为工程实践提供明确的技术指导,但未考察各因素之间的交互影响,后续研究可基于正交试验法,通过极差分析与方差分析,定量评价各因素的主效应及两两因素间的交互效应,确定参数耦合作用下的全局最优工艺组合。

(下转第 384 页)