

基于FLAC^{3D}对顶管施工引起地表变形影响因素分析

徐琬¹, 杨子川¹, 杨津², 陈韬¹, 李矫榕¹, 王刚¹

1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650032; 2. 中材地质工程勘察研究院有限公司, 北京 100102

摘要: 为研究顶管施工引起地表变形的影响因素, 以云南省昆明市宝象河流域排水收集系统改造工程为背景, 建立FLAC^{3D}数值模型进行分析。结果表明: 顶管开挖导致的地表变形与地下水水位、隧道埋深、隧道半径、顶推力和岩土体性质有关。地表最大沉降量与地下水水位成反比, 随地下水深度的增加而减少; 地表最大隆起值与隧道埋深呈反比, 隧道埋深越浅, 地表最大隆起值越大; 地表最终沉降值与隧道埋深成正比, 隧道埋深越深, 地表最终沉降值越大。隧道直径的变化对地表最终沉降值影响较小, 对地表变形范围和沉降槽宽度影响较大。顶推力与地表最大隆起值和最终沉降值呈正比, 顶推力越大, 地表最大隆起值与最终沉降值越大。顶管穿越弹性模量大或渗透系数小的岩土体时, 地表变形较小。

关键词: 顶管; 地表变形; 影响因素; 数值模拟

中图分类号: P642; U455; U459 **文献标识码:** A

Analysis of Influencing Factors of Ground Surface Deformation Induced by Pipe Jacking Construction Based on FLAC^{3D}

XU Wan¹, YANG Zichuan¹, YANG Jin², CHEN Tao¹, LI Jiaorong¹, WANG Gang¹

1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650032, China;

2. CNBM Geological Engineering Exploration Academy Co. Ltd., Beijing 100102, China

Abstract: In order to study the influencing factors of ground surface deformation caused by pipe jacking construction, a FLAC^{3D} numerical model was established based on the drainage collection system renovation project in the Baoxiang River Basin, Kunming City, Yunnan Province. The results indicate that ground surface deformation induced by pipe jacking excavation is related to groundwater level, tunnel burial depth, tunnel radius, jacking force, and geotechnical properties. The maximum ground settlement is inversely proportional to the groundwater level, decreasing with increasing groundwater depth. The maximum ground heave is inversely proportional to the tunnel burial depth, with shallower depths leading to larger heave values. The final ground settlement is directly proportional to the tunnel burial depth, where deeper tunnels result in greater settlement. Variations in tunnel diameter have minimal impact on the final settlement but significantly affect the deformation range and settlement trough width. The jacking force is directly proportional to both the maximum heave and final settlement, with higher forces amplifying these values. Smaller ground surface deformation occurs when the pipe jacking traverses geotechnical materials with larger

收稿日期: 2024-05-20 改回日期: 2024-06-01

第一作者简介: 徐琬(1999—), 女, 硕士研究生, 从事水文地质与工程地质方面的研究。E-mail: WanXu0329@163.com

引文格式: 徐琬, 杨子川, 杨津, 等. 基于FLAC^{3D}对顶管施工引起地表变形影响因素分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2025, 36(1): 61-68.

XU Wan, YANG Zichuan, YANG Jin, et al. Analysis of influencing factors of ground surface deformation induced by pipe jacking construction based on FLAC^{3D}[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2025, 36(1): 61-68.

elastic moduli or lower permeability coefficients.

Key words: Pipe jacking; Ground surface deformation; Influencing factor; Numerical simulation

0 引言

随着我国高速发展的经济体系和日益增长的人口数量,城市化进程被提升至一个新阶段。城市地面资源及可利用空间不断减少,地上空间越来越拥挤,交通堵塞、环境质量等问题逐渐显露。因此,合理地开发和利用城市地下空间成为解决此类问题的重要途径之一。非开挖施工技术,是指在不开挖路面的前提下,利用各种钻掘技术手段,铺设、探测、检查、修复和更换各类地下管道的一种先进施工方法,它具有不污染环境、不阻断交通、不扰民、不破坏已有建筑物或构筑物、施工速度快、适用范围广等显著优点,主要包括盾构与顶管的施工方式^[1]。但隧道开挖也存在很多不可避免的问题,地表变形就是其中之一。

针对隧道开挖引起地表变形问题,目前已有学者进行了研究。如刘余欣等^[2]使用 FLAC^{3D}模型对顶管施工引起的地面沉降进行计算,表明顶管管径与地面沉降量和沉降槽宽度成正相关,地面沉降横向受影响区域为距顶管轴线 2~5 倍管径范围。唐少帅等^[3]通过 FLAC^{3D}软件对地下水和地表水共同作用下盾构施工引起的地面沉降问题进行分析,表明地表横向沉降槽呈高斯分布。邱明明等^[4]使用 FLAC^{3D}建立三维盾构力学模型,对富水砂层条件下的盾构施工过程进行动态数值模拟,计算盾构施工引起的地面沉降规律。魏加华等^[5]在济宁市水文地质条件的基础上建立了准三维地下水流模型与地面沉降模型,运用有限元法对地下水渗流场和地面沉降量进行模拟,并预测了地面沉降情况。杨锦涛^[6]使用 FLAC^{3D}软件对盾构施工现场进行模拟,得出隧道洞口上方同一层面上距离洞口越近产生的沉降越大的结论。王冰涵^[7]使用 FLAC^{3D}软件进行动态数值模拟,总结分析因施工而造成的地层横向与纵向的沉降规律。

对于隧道开挖引起地表变形的规律已有大量研究,但鲜有文献系统研究顶管施工影响地表变形的因素。本文基于 FLAC^{3D}数值模拟,针对顶管施工引起地表变形的影响因素进行分析。依托昆明市宝象河流域排水收集系统改造工程,根据岩土工程勘察报告选取公家村调蓄池至小石坝调蓄池部分区段作为研究区域,根据该区段岩土体性质建立

FLAC^{3D}数值模拟模型,研究影响地表变形的因素,为减小顶管施工引起的地表变形提出合理建议。

1 工程概况

昆明市宝象河流域排水收集系统改造工程位于昆明市经济开发区,研究区域位于公家村调蓄池至小石坝调蓄池区段。污水管起点位于公家村调蓄池,沿宝象河右岸铺设,穿越宝象河后沿左岸铺设至小石坝调蓄池。主干管线全长 3 066 m,采用管径为 D1350 钢筋混凝土管,顶管法施工。根据岩土工程勘察报告,该区段地层自上而下可分为:灰黑色杂填土、褐红色粉质黏土、灰黄色圆砾、灰白色灰岩。研究区全程长 70 m,地下水位距地表约 3 m,穿越的主要地层为灰岩层、圆砾层,该区段顶管中轴线距地表约 10 m,掘进机长 2 m,直径 1.64 m。研究区地质剖面图如图 1 所示。

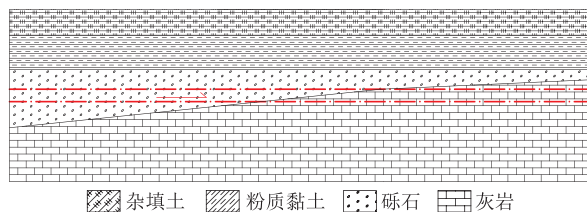


图 1 工程地质剖面图

2 模型建立

本次数值模拟模型根据公家村调蓄池至小石坝调蓄池段勘察报告剖面图建立。顶管施工穿越地层为圆砾层与灰岩层,圆砾层为强透水层,灰岩为隔水层,数值模拟采用流固耦合效应模型。根据现场抽水试验结果,圆砾层的渗透系数设定为 10 m/d。

2.1 建立条件

(1) 根据实际工程,设置模型中顶管施工的循环进尺为 2 m。

(2) 岩土体、钢筋混凝土管、衬砌、注浆液等假设为各向同性材料。

(3) 模型考虑为流固耦合效应计算模型,当位移与应力边界发生改变时,关闭流体场,使应力场和位移场达到平衡再进行流体场计算。即在循环计算过程中先计算应力场再计算渗流场。

(4) 为得到更加精确的计算结果,将不平衡力比达到 5×10^{-9} 作为计算输出条件,模型开挖应力

释放系数取 0.35。

(5) 模型运行不考虑出现土体的极限破坏变形。

(6) 假定掘进机顶进过程中始终沿同一轴线进行,不发生偏斜,不考虑掘进过程中的超挖现象,即模拟顶管开挖过程不考虑顶管纠偏与顶管超挖对地面沉降的影响。

2.2 模型尺寸及参数设置

在数值模拟中,建立与实际工程地质情况完全一致的模型是不切实际的,根据以往学者大量的实测数据和理论分析,隧道开挖横向的主要影响范围是隧道开挖直径的 2~5 倍^[2],范围之外顶管施工影响较小。本项目顶管机直径 1 640 mm,顶管模型 X、Y、Z 方向尺寸设定 20 m×20 m×70 m。为保证在计算精度的基础上提高计算效率,划分模型网格时网格密度由隧道中心向四周放射性减小。三维模型如图 2 所示。

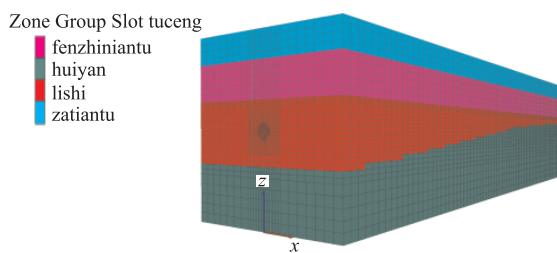


图 2 三维模型图

数值模拟中,各土层的重度、黏聚力、内摩擦角、泊松比等参数根据实际工程勘测数据以及相关学者的研究进行取值。岩土体及材料参数取值见表 1。

表 1 岩土体及材料参数

地层名称	厚度 /m	泊松比	弹性模量 /Pa	重度 /kN·m ⁻³	黏聚力 /kPa	内摩擦角/°
杂填土	3	0.15	1.5×10 ⁷	18	5	10
粉质黏土	4	0.25	1.8×10 ⁷	18	30	10
砾石	1~6	0.3	5.0×10 ⁷	18.5	5	28
灰岩	6~12	0.35	5.0×10 ⁹	21	200	35
注浆体	0.2	0.34	2.0×10 ⁸	22	—	—
衬砌	0.17	0.2	3.45×10 ¹⁰	22	—	—

2.3 本构模型和边界条件

岩土体本构模型,是对土体做一系列相关试验和理论分析后最终得到的应力-应变关系,目前实际工程中大多将岩土体视为弹塑性材料。为得到更加精确的模拟结果,本模拟选取摩尔-库伦模型作为岩土体的本构模型,摩尔-库伦准则作为土体屈服判据,工具管、注浆体及顶管机采用各向同性弹性模型。空模型指被开挖的材料,其内部体力和应力自动为零,可用其他材料模型代替进行回填模拟,除模

型上表面,其余都进行位移约束。

FLAC^{3D}流固耦合作用可分为渗流模型和无渗流模型两种,渗流模型包含各向同性、各向异性和不透水模型。根据实际工程岩土及地下水性质,流体模型选用均质流体。本模拟采用流固耦合效应模拟-各向同性渗流模型,模型表面设为透水边界,底面及四周设为不透水边界,地下水位距地表 3 m,因此将 Z=17 m 处的孔隙水压力设为 0 kPa,静水压力随水位以下深度线性增加。顶管过程中存在灰岩层,故将灰岩层设为隔水层。

2.4 计算步骤

为提高 FLAC^{3D}的计算效率,模拟时需简化顶管施工过程。针对实际研究内容,主要对岩土体开挖、衬砌支护以及注浆内容进行模拟。建立模型、设置参数及边界条件、定义本构模型后,进行初始状态计算。初始条件计算完成,形成初始应力场与初始孔隙水压力场,位移场和应力场清零,顶管开挖。模型中顶管施工的循环进尺为 2 m,总长 70 m,循环 35 次。隧道开挖模拟中,开挖部分采用“空模型”,每顶进 2 m 时掌子面处形成支护力,用于平衡前方的土体压力,随后形成衬砌支护和注浆,再进行力学、流固耦合计算。以上过程反复循环至开挖工作结束。

3 模型正确性验证及差异分析

3.1 建立模型正确性验证

顶管施工是一个非常复杂的工程,岩土体材料的性质也较为复杂。为确保后续研究的准确性,完成数值模拟后需用现场监测地表变形的部分数据与数值模拟结果进行对比,验证模型的准确性。本文选取模型中 Y=35 m 断面处顶管轴线正上方进行验证。

图 3 表示 Y=35 m 处,监测断面位于顶管轴线正上方监测点的现场监测和数值模拟中地表变形随顶管推进过程的变化曲线,纵坐标表示顶管开挖过程中的地表变形量,横坐标表示掘进机距 Y=35 m 监测断面的距离。现场监测与数值模拟中地表最大隆起量均出现在顶管推进至监测断面处。现场监测数据显示,最大隆起量为 24 mm,最大累计沉降量出现在顶管机顶离 1 号监测断面 35 m 处,为 31 mm。数值模拟结果显示,最大隆起量为 20 mm,最大累计沉降量为 28.5 mm。对比二者结果,现场监测数据与数值模拟计算结果中最大沉降量相差 10% 以内,数值模拟模型的建立正确。

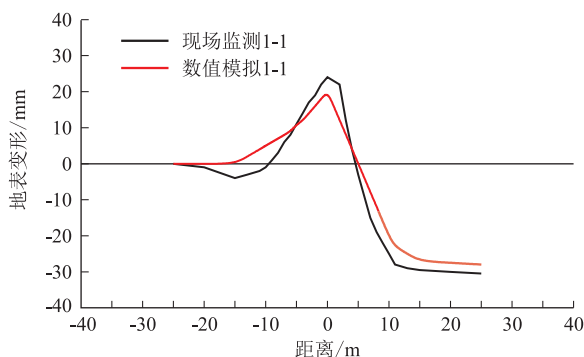


图3 现场监测与数值模拟计算结果地表变形对比图

3.2 现场监测与数值模拟计算结果对比分析

由图3可知,现场监测地表的最终沉降量与数值模拟结果差距较小,但地表变形曲线的拟合程度较差,甚至个别数据相差较大。原因可能为现场监测过程中受到场地条件制约,水准仪操作不当等,导致现场监测数据存在误差。除此之外,研究场地地形复杂,地层可能存在微弱起伏,建立模型时并未考虑上述地层的起伏情况,存在简化模型的行为,是导致数据产生误差的原因之一。

图3表示顶管距监测断面15~20 m时现场监测与数值模拟结果存在的差距。现场监测数据显示顶管开挖距监测断面15~20 m时地表开始沉降,距监测断面15 m时地表沉降达到最大值。数值模拟结果显示此区间地表并未发生明显变形。这是由于顶管开挖到达监测断面前,由于刀盘发生切削、搅拌及振动作用,导致附近土体产生扰动。杂填土、粉质黏土、砾石层中空隙率较大,扰动过程中地层土体颗粒发生移动,空隙中的一部分水和气体被排出,土体压缩,最终导致地面产生沉降。数值模拟并未考虑顶进过程中刀盘的切削、搅拌等作用,因此模拟顶管开挖距监测断面15~20 m时并未发生地表沉降。其余部分结果基本拟合,可以作为研究地表变形影响因素的基础。

4 地表变形的原因

4.1 地表隆起的原因

顶管推进的过程中掘进机的顶推力为 F ,推进过程中受到的阻力主要有掌子面前方的压力、掘进机外侧与周围岩土体的摩擦力、掘进机刀盘切削土体时产生的阻力、衬砌管片与掘进机之间的摩擦力等。假设顶管推进过程中受到总的阻力是 f ,当 $F \geq f$ 时,掘进机前方的岩土体受到挤压作用而产生弹性变形,在推进过程中顶推力过大引起地面隆

起,也是图3中掘进机开挖至监测面过程中地面产生隆起的原因。

4.2 地表沉降的原因

(1) 地层损失

地层损失是指顶管施工过程中实际开挖体积与理论开挖体积之差,包括管道周围注浆体的体积。顶管施工过程中掘进机、管道与地层之间发生摩擦作用,为减小摩擦力,刀盘及掘进机的直径大于设计管道直径。顶管施工超挖导致的地层损失,是由于地质、施工条件等客观因素造成的。图3现场监测曲线中掘进机尾部脱离监测点时,地表迅速发生沉降。

(2) 土体固结沉降

当掘进机机头靠近某一点时,土压力、孔隙水压力增加,管道周围岩土体受挤压作用而形成超孔隙水压力区。掘进机远离该点区域后,超孔隙水压力下降,孔隙水消散,土体发生固结作用,体积减小,地表产生沉降,为主固结沉降^[8]。掘进机远离该点一段距离后,主固结沉降完成,但土体仍在蠕变,沉降继续发生,为次固结沉降。图3掘进机远离监测面后,地表沉降的速度逐渐降低,主固结沉降转为次固结沉降。

5 顶管开挖对地表变形影响因素

顶管施工是一个非常复杂的过程,引起地表变形的因素也多种多样,宝象河流域排水收集系统改造工程中穿越的地层多为富水圆砾地层,施工过程中引起的地表变形更为明显。为控制顶管施工过程中引起的地表变形问题,本文选取模型中 $Y=35$ m断面进行研究,从地下水、管道埋深、管道半径、顶推力、土层性质5个方面进行模拟,分析各种因素对地表变形的影响。

5.1 地下水对地表变形的影响

研究地下水对地表变形影响作用时,只改变模型中地下水水位埋深,其余参数不变,分别设置地下水水位距地表3 m、5 m、7 m此3种情况进行模拟。由图4可知,不同地下水水位模型中顶管开挖引起的地表变形趋势基本一致,均为先隆起再沉降,且最大隆起值基本相同,表明地下水水位变化基本不会影响地表隆起量。地下水水位距地表3 m时地表沉降最大,地下水水位距地表7 m时地表沉降最小。不同地下水水位中顶管开挖造成的地表变形曲线相差较大,表明地下水对地表变形的影响较大。顶管开挖引起的地表最大沉降量随地下水水位深度的增加而减少,

原因可能是土体固结沉降导致的。随着地下水位的降低,土体发生固结沉降的区域越来越小,地表沉降量减少。因此,在顶管施工前可以通过排水等方法

减少岩土体中地下水含量,或在施工过程中尽量减少对地下水的扰动,有效控制顶管施工引起的地表变形。

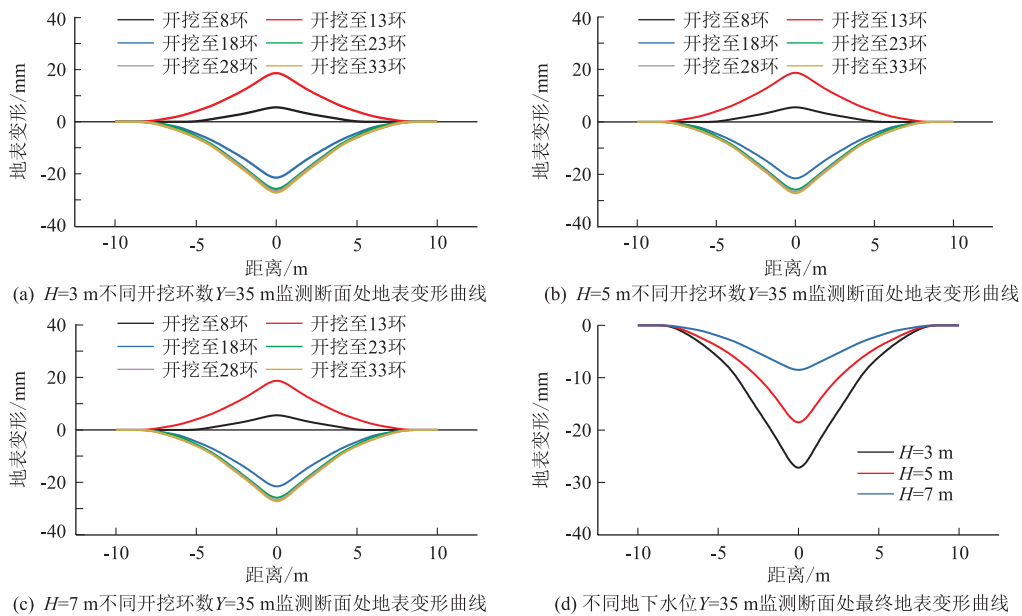


图 4 不同地下水位 Y=35 m 监测断面地表变形曲线

5.2 隧道埋深对地表变形的影响

为研究隧道埋深对地表变形的影响,设置模型时只改变隧道埋深,其余参数不变,分别设置隧道开挖距地表 10 m、8 m、6 m 此 3 种情况进行模拟。由图 5 可知,不同隧道埋深、顶管开挖引起地表变形趋势基本一致,均为先隆起再沉降,但最大隆起值与沉降值相差较大。隧道埋深与地表最大隆起值呈反比,隧道埋深越浅,地表最大隆起值越大;隧道埋深与地表最终沉降值呈正比,隧道埋深越深,地表最终

沉降值越大。产生这种现象的原因是隧道开挖时不同埋深对周围土体影响范围基本一致,越接近隧道,土体受到扰动越大,地表隆起值越大。地表发生沉降是因为孔隙水消散导致土体固结沉降,在不超出土体变形范围内,隧道埋深越深,土体发生固结沉降的部分越多,地表最终沉降量增加。不同隧道埋深开挖后引起地表变形的范围不同,隧道埋深越浅沉降槽宽度越小,反之越大。因此,可以通过适当增加隧道埋深,减小对地表变形的影响。

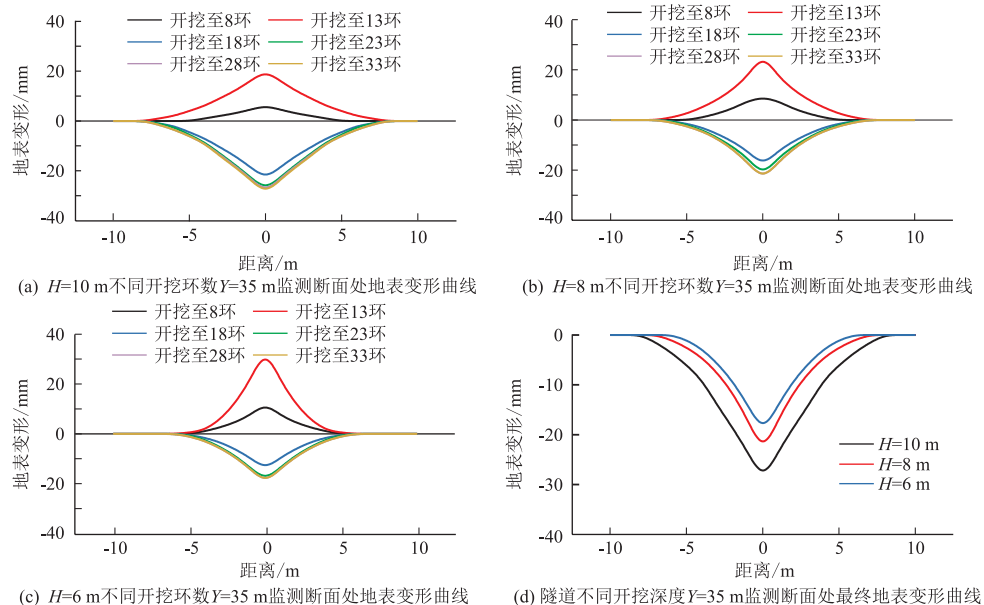


图 5 隧道不同开挖深度 Y=35 m 监测断面地表变形曲线

5.3 隧道直径对地表变形的影响

为研究隧道直径对地表变形的影响,设置模型时只改变模型中隧道直径,其余参数不变,设置隧道直径 $D=1.14\text{ m}$ 、 1.64 m 、 2.14 m 此3种情况进行模拟。由图6可知,不同隧道直径模型中顶管开挖引起地表变形基本一致,均为先隆起再沉降,最大隆起值与最终沉降值变化均较小。地表最大隆起值随隧道直径的增大而增加,但地表最终沉降值变化较

小。原因与5.2节基本一致,在不改变隧道埋深的情况下增大隧道直径,导致隧道更靠近地表,地表土体受到的扰动更大,地表最大隆起值增大。不同隧道直径开挖后引起地表变形的范围不同,隧道直径越大,沉降槽宽度越大,反之越小。因此,可以在符合管径要求的前提下通过减小隧道直径的方式降低对地表的影响。

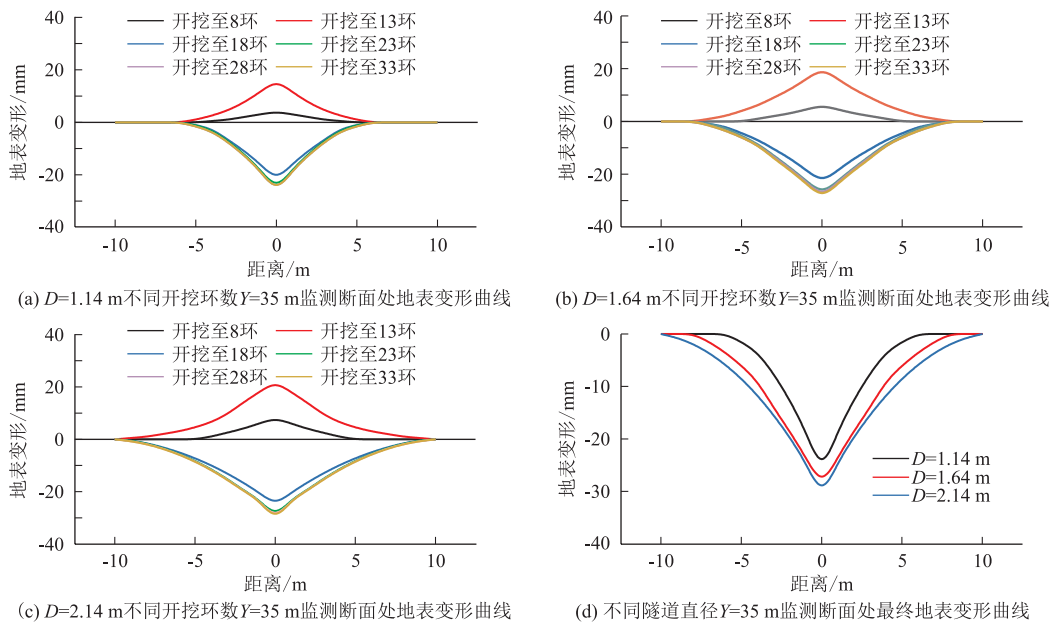


图6 不同隧道直径 $Y=35\text{ m}$ 监测断面地表变形曲线

5.4 顶推力对地表变形的影响

为研究顶推力对地表变形的影响,设置模型时只改变模型顶推力,其余参数不变,设置初始顶推力

的0.8倍、1倍、1.2倍3种情况进行模拟。由图7可知,不同顶推力模型中顶管开挖引起地表变形趋势基本相同,地表土体先隆起再沉降,最大隆起值变

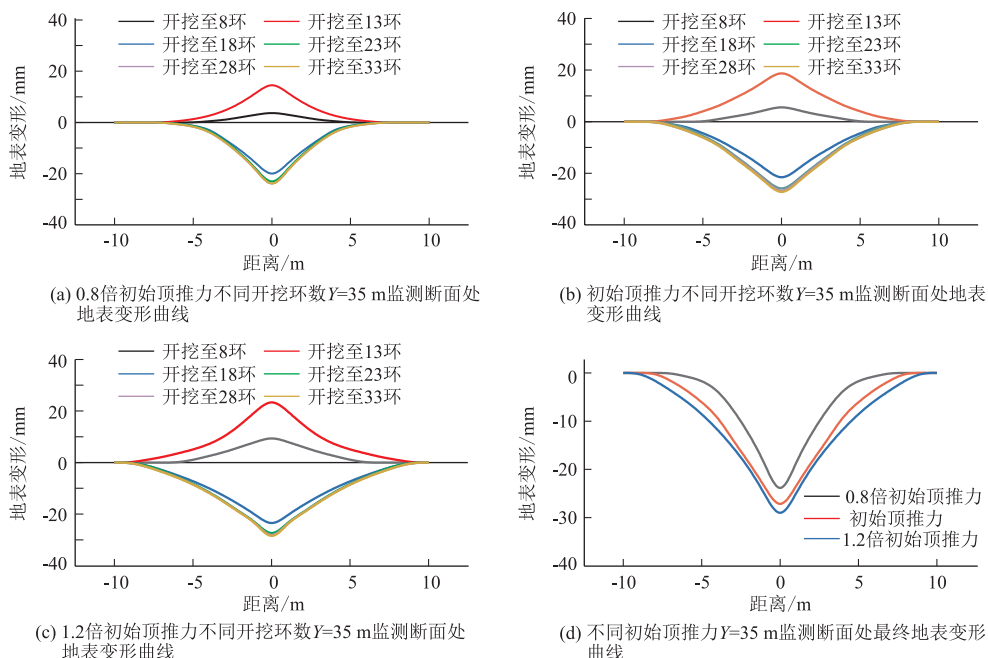


图7 不同初始顶推力 $Y=35\text{ m}$ 监测断面地表变形曲线

化较大,最终沉降值变化较小。顶推力与地表最大隆起值和最终沉降值呈正比,顶推力越大,地表最大隆起值与最终沉降值越大。0.8 倍初始顶推力引起地表最大隆起值为 16 mm,最大沉降值为 20 mm;1.2 倍初始顶推力引起地表最大隆起值为 25 mm。如图 7(d)可知,不同顶推力开挖后引起地表变形的范围不同,顶推力越大,沉降槽宽度越大,说明顶推力扩大顶管开挖对周围土体扰动的范围增大。因此,可以通过减少顶推力的方式降低其对地表变形的影响。

5.5 岩土体性质对地表变形的影响

(1) 弹性模量对地表变形的影响

岩土体的弹性模量是岩土体对应力作用下发生弹性变形能力的指标,也是影响土体横向位移的因素之一。在原有计算模型的基础上,只改变圆砾层的弹性模量,分别选取圆砾层弹性模量为 40×10^6 Pa、 50×10^6 Pa、 60×10^6 Pa 进行模拟,计算结果如图 8 所示。当圆砾层弹性模量为 40×10^6 Pa 时,顶管开挖引起地表最大沉降值为 31.5 mm;弹性模量为 50×10^6 Pa 时,地表最大沉降值为 29 mm;弹性模量为 60×10^6 Pa 时,地表最大沉降值为 26.7 mm,表明地表最大沉降值随弹性模量的增大而减小。除此之外,圆砾层弹性模量的变化会引起沉降槽宽度的变化,当圆砾层弹性模量增大时,沉降槽宽度减小。由此可得,弹性模量越大,顶管开挖引起地表最大沉降值越小,对地表变形的影响范围越小。

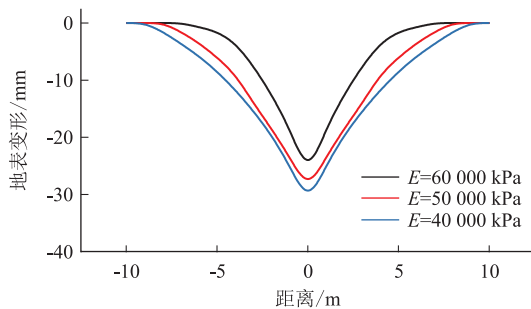


图 8 不同弹性模量 $Y=35$ m 监测断面处最终地表变形曲线

(2) 渗透系数对地表变形的影响

根据现场抽水试验,测得圆砾层渗透系数为 10 m/d,为研究渗透系数对地表变形的影响,在原有计算模型的基础上增加圆砾层渗透系数为 6 m/d、8 m/d 进行计算,结果如图 9 所示。当圆砾层渗透系数为 10 m/d 时,顶管开挖引起地表最大沉降值为 29 mm;圆砾层渗透系数为 8 m/d 时,地表最大沉降值为 26.2 mm;圆砾层渗透系数为 6 m/d 时,地表最大沉降值为 23.4 mm。由此可得,渗透系数越大,顶管开挖引起地表最大沉降值越大。且渗透

系数的变化对地表变形的范围也存在一定影响,渗透系数越小,顶管开挖对地表变形的影响范围越小。

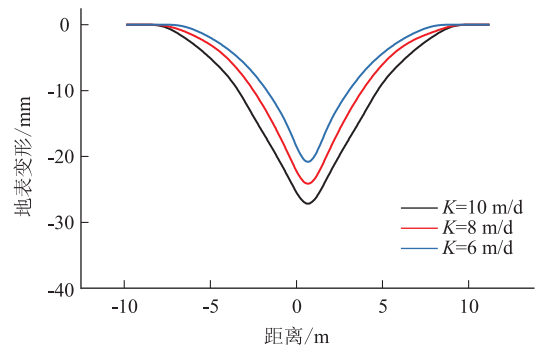


图 9 不同渗透系数 $Y=35$ m 监测断面处最终地表变形曲线

6 结论

本文基于 FLAC^{3D}数值模拟,深入研究地下水、管道埋深、管道半径、顶推力、土层性质 5 个方面对地表变形的影响。根据研究结果在顶管开挖设计中提出相应地表变形的控制措施,结论如下:

(1) 顶管施工过程中地下水对地表变形影响较大。顶管开挖引起的地表最大沉降量与地下水位成反比,随地下水位的增加而减少。顶管施工前可通过排水等方法减少岩土体中地下水含量,使岩土体在顶管施工前先完成一定程度的排水固结效应,或在顶管施工的过程中尽量减少对地下水的扰动,可有效控制顶管施工引起的地表变形。

(2) 隧道埋深与隧道直径的变化对顶管施工引起的地表变形存在较大影响。隧道埋深与地表最大隆起值呈反比,隧道埋深越浅,地表最大隆起值越大;与地表最终沉降值呈正比,隧道埋深越深,地表最终沉降值越大。隧道直径的变化对地表最终沉降值影响较小,主要影响地表变形范围,隧道直径越大,沉降槽宽度越大。为了更好地控制顶管开挖造成的地表变形,顶管设计阶段在满足必要条件下可以适当增加隧道埋深,减小隧道直径。

(3) 顶管过程中的顶推力对地表变形造成较大的影响。顶推力与地表最大隆起值和最终沉降值呈正比,顶推力越大,地表最大隆起值与最终沉降值越大。实际施工过程中可以适当降低顶推力减小其对地表变形的影响。

(4) 岩土体性质对地表变形存在较大影响。顶管穿越弹性模量大、渗透系数较小的岩土体时,相应的地表变形也较小。在选择顶管穿越的地层时,可以通过选择合适地层的方式降低顶管施工对地表变形的影响。

参考文献

- [1] 靖向党. 非开挖地下管线施工技术的发展现状与对策[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2001, 2(3): 8-11.
- [2] 刘余欣, 易飞, 徐裕华, 等. 基于 FLAC^{3D}的顶管施工诱发地表沉降作用机理研究[J]. 安徽建筑, 2020, (7): 13-18.
- [3] 唐少帅, 洪勇, 李苍松, 等. 考虑流固耦合的富水软土盾构施工地表沉降分析[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(1): 21-27.
- [4] 邱明明, 姜安龙, 舒勇. 城市地铁盾构施工地层变形三维数值模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(2): 161-167.
- [5] 魏加华, 崔亚莉, 邵景力, 等. 济宁市地下水与地面沉降三维有限元模拟[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(4): 376-380.
- [6] 杨锦涛. 基于 FLAC^{3D}的地铁盾构施工地表沉降分析[J]. 河南科技, 2023, 42(8): 61-64.
- [7] 王冰涵. 基于 FLAC^{3D}隧道盾构施工变形规律模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- [8] 魏纲, 徐日庆, 屠玮. 顶管施工引起的土体扰动理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 476-482.

《地质灾害与环境保护》征订启事

本刊主管单位: 四川省教育厅; 主办单位: 成都理工大学、地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室。学术性期刊, 季刊。1990年创刊, 国内外公开发行人。大16开, 每期128页, 约26万字。欢迎订阅。

定价: 2008~2025年每期定价15元, 全年4期, 年定价60元; 2005~2007年每期定价10元, 全年4期, 年定价40元; 1991~2004年过刊每套定价154元(包括: 总第3期~总28, 30~53期, 计42册); 也可分年分期选订: 1991~1993年, 半年刊, 每册定价1.00元; 1994~1997年, 季刊, 每册定价2.00元; 1998~1999年, 季刊, 每册定价3.00元; 2000~2001年, 季刊, 每册定价4.00元; 2002~2004年, 季刊, 每册定价5.00元。

订阅办法

1. 2000年起开始邮发, 邮发代号62-140, 可在全国各地邮局订阅。
2. 本刊已参加“全国非邮发报刊联合征订”, 代号5314号。
3. 向本刊编辑部订阅: 请用邮局汇款。收款单位: 《地质灾害与环境保护》编辑部。

地址: 成都市成华区二仙桥东三路1号 成都理工大学; 邮政编码: 610059。

编辑部联系电话: (028)84078481。

《地质灾害与环境保护》编辑部

2025年3月25日