

富水多变灰岩-砾石地层顶管施工 地表变形规律及机理研究

杨子川,徐琬,赵宇鹏,刘柯,李好懿,龚玉蓉*

(昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093)

摘要: 为探讨研究顶管施工引起的地表变形和对地表建筑物或构筑物产生的影响,以云南昆明某工程顶管施工现场为例,通过对工程现场监测,在富水多变灰岩-砾石地层条件下对顶管施工引起的地表变形规律进行研究。分析监测数据表明,土压力、孔隙水压力与顶管轴线距离呈负相关,影响范围在1.5倍管径内。地表变形为先沉降后隆起再沉降,掘进机机头顶至监测点时隆起值达到最大,影响范围在掘进机前方2倍、掘进机后方3倍顶管深度内。顶管推进过程中,由于土体的固结作用导致部分地面沉降,而灰岩地层中不存在固结效应,因此地表的最终沉降量会随着灰岩比例的增加而减小。该研究为后续减小顶管施工对周围环境的影响提供理论基础。

关键词: 顶管;地面变形;现场监测;机理分析

中图分类号: P642;P641;X83 **文献标识码:** A

STUDY ON SURFACE DEFORMATION RULE AND MECHANISM OF PIPE JACKING IN WATER-RICH AND VARIABLE LIMESTONE GRAVEL STRATUM

YANG Zi-chuan, XU Wan, ZHAO Yu-peng, LIU Ke, LI Hao-yi, GONG Yu-rong
(Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: To explore the surface deformation caused by pipe jacking construction and its effects on surface buildings and structures, a case study from a pipe jacking construction site in Kunming, Yunnan was utilized. Monitoring data from the site were analyzed to study the pattern of surface deformation in water-rich, variable limestone-gravel strata. Analysis revealed that soil pressure and pore water pressure negatively correlate with the distance from the pipe jacking axis, with the impact range within 1.5 times the pipe diameter. Surface deformation typically manifests as initial subsidence, followed by uplift, and then additional subsidence. The uplift reaches its maximum when the tunnel boring machine head is directly above the monitoring point, affecting areas up to twice the depth of the pipe jacking in front of the machine and three times behind it. During pipe jacking, soil consolidation leads to partial ground subsidence. However, in limestone strata, the absence of this consolidation effect results in reduced final ground subsidence as the limestone proportion increases. This study offers a theoretical foundation for reducing the environmental impact of pipe jacking construction.

Key words: pipe jacking; ground deformation; on-site monitoring; mechanism analysis

1 引言

随着我国城市化进程的发展,城市地下空间的开发利用也逐渐加强。顶管施工工艺是目前建设城市地下空间工程中最常应用的手段之一,顶管施工具有无需开挖路面,对城市交通、环境、噪音污染较小,施工周期短的优点^[1-2]。但顶管施工过程中可能会造成土体扰动,对周围环境以及临近建筑物与构筑物造成一定影响^[3-5]。顶管施工过程中掘进机的推进会对周围的土体造成影响,若同时顶进岩土性质差异较大的地层,则更易引起地表变形。

针对施工过程中地表变形的规律和因素,已有许多学者开展了相关研究。张顶立^[6]通过工程实例研究地表沉降规律,同时分析地表沉降的原因,指出不同地层的沉降特性,结果表明地层条件、隧道埋深、施工工艺都是地表变形的主要影响因素。韩昌瑞^[7]采用现场监测的方法分析隧道开挖过程中隧道埋深程度、地层分界情况、隧洞间隔距离等因素对地表变形的影响以及在不同因素作用下的地表沉降规律。李炜明^[8]以上软下硬地层为例,研究城市地铁盾构施工中地表沉降的时空演化规律,指出地表沉降量与地层的软硬程度密切相关,施工区上部的软底地层产生的地表沉降较大。

综上所述,对于暗挖法施工引起地面变形规律以及影响地面变形的因素有诸多学者做出了大量工作,但大多作者针对于单一地层,而对于地面发生变形的机理较少,因此本文是在顶管施工变化地层中探究地表变形机理。本文以云南省昆明市宝象河流域排水收集系统的改造工程为例,通过现场监测与后期数据处理,针对宝象河区域灰岩-砾石多变地层顶管施工过程周围地面的沉降规律及机理做系统梳理与研究,深入分析该地区因施工导致土压力、孔隙水压力、地表沉降量的变化规律。研究成果和结论可为工程后期减小顶管施工造成的地表变形提供数据和理论参考。

2 工程概况

2.1 地质条件

工程位于云南省昆明市经济技术开发区宝象河流域,截污主管为小石坝调蓄池至普照调蓄池段,起为小石坝调蓄池处上游污水管,终至普照水质净化厂厂外泵房。沿途收集西邑村、普照村沿线污水,同时转输上游污水,管线全长 2 726.0 m,均采用顶管法施工。

研究区穿越的主要地层为灰岩层、圆砾层,且同

一顶管内存在地层变化。该段管线距河道约 6 m,地下水位较浅,为防止地下水对施工过程的影响,顶管施工线路位于地下水位之下。本文选取区域内的 5 个断面进行试验工作,根据岩土工程勘察报告,该测试区段的地层自上而下可分为:①灰黑色杂填土,为近年来河岸建设人工回填,主要以建筑回填卵石、块石等硬物质为主,其余为黏性土,土质结构松散,均匀性差;②褐红色粉质黏土,可塑状态,中高压缩性,土质不均匀,局部含有少许的砾石,干强度及韧性高;③灰黄色圆砾,饱和,河道沿线较普遍分布,形状多为亚圆状及次棱角状,主要充填物为黏性土;④灰白色灰岩,中厚层状构造,由碳酸盐矿物组成,局部可见方解石脉,岩芯破碎,呈碎块状。

2.2 工程条件

研究表明,施工工艺、地层性质、隧道埋深、注浆等都是影响地表沉降的主要因素^[6,9-10]。为保证试验数据的真实性和可分析性,本试验在顶管正面顶推力、隧道埋深等基本因素不变的条件下研究地表变形机理。本研究以昆明市宝象河流域排水收集系统改造工程为背景,在灰岩-砾石变化地层条件下设置监测孔。该区段顶管中轴线平均距地表 12 m,掘进机直径 3 m,长 4 m。通过现场监测对顶管施工过程中引起的土压力、孔隙水压力、地表变形情况进行分析,并研究顶管施工过程对周围环境产生的影响,探究土体变形机理。

3 现场试验及数据分析

3.1 现场监测

本研究针对在顶管推进的过程中掌子面灰岩比例不断变化的条件下进行现场试验与监测。根据地层变化情况每隔 5 m 设置 1 个断面,研究区共设置 5 个断面,如图 1 所示。为研究顶管推进过程中地

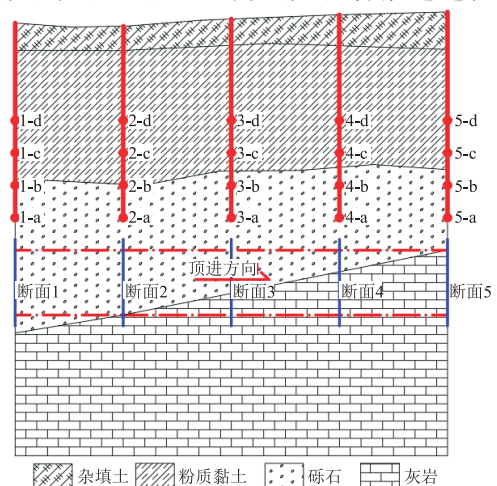


图 1 顶管施工剖面图

层土压力和孔隙水压力的变化,在顶管轴线之上依据断面位置布设土压力计与孔隙水压力计,每个断面距离管壁上方 1.5 m 处开始布置,每间隔 1.5 m 布置一组,共埋设 4 组,共 20 个。如图 2 所示,在断面 1、断面 3、断面 5 左侧每隔 5 m 设置一个地表变形监测点,共 17 个。随着顶管推进的过程,于掘进机机头距离监测断面 20 m 前后对土压力、孔隙水压力进行监测;掘进机机头距离每个断面 35 m 前后对地表变形进行监测,监测结果如图 3~图 5。

3.2 试验数据结果分析

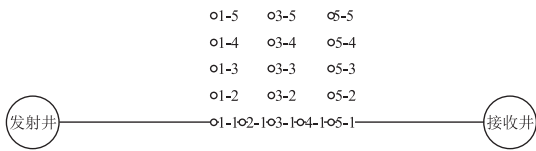
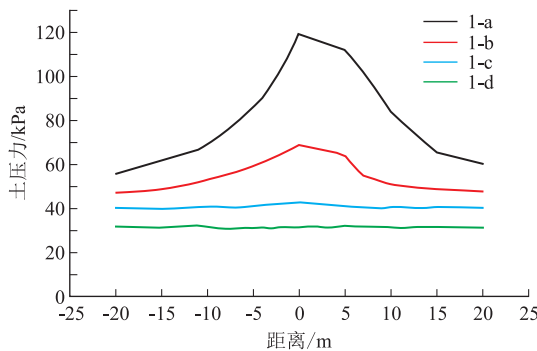
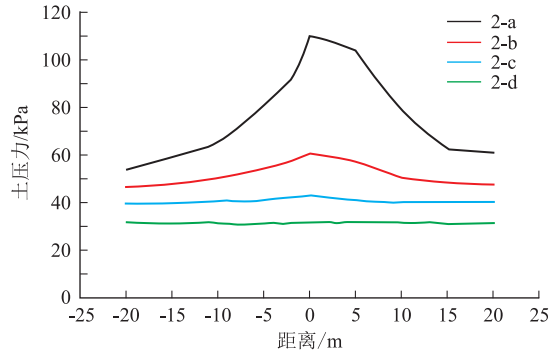


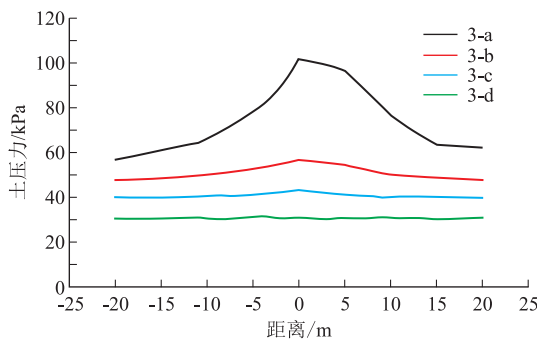
图 2 地表变形监测点布置图



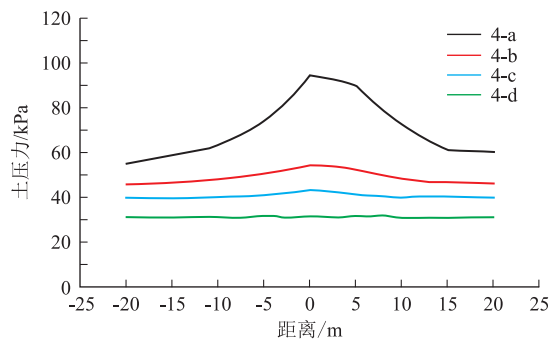
(a) 断面1监测点土压力变化曲线



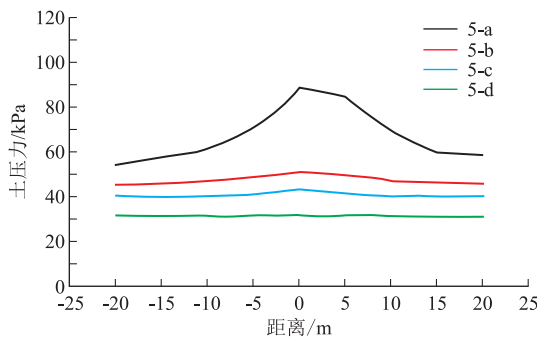
(b) 断面2监测点土压力变化曲线



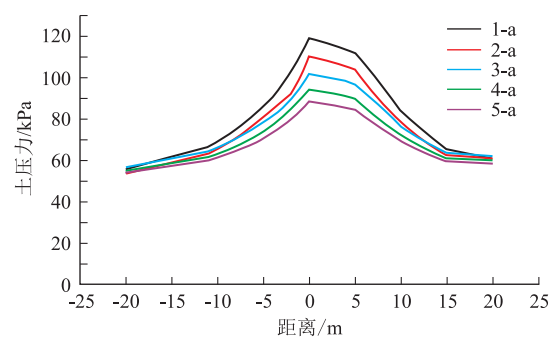
(c) 断面3监测点土压力变化曲线



(d) 断面4监测点土压力变化曲线



(e) 断面5监测点土压力变化曲线



(f) 各断面a监测点土压力变化曲线

3.2.1 顶管施工引起土压力的变化

土压力的测量采用钢弦式土压力盒。如图 1 所示,根据断面设置 5 个监测孔,每个监测孔埋设 4 个土压力盒。图 3(a~e)表示各断面中监测点土压力随顶管推进过程的变化曲线。监测孔中土压力的变化值与掘进机距监测点的距离呈负相关,掘进机机头距监测断面越近,土压力越大,掘进机到达监测断面时土压力达到最大值,后随机头的继续推进而减小。同一监测孔中的土压力距顶管轴线越近时受到的影响越大,反之越小,土压力的影响范围大致在 1.5 倍管径之内,距管壁 4.5 m 时土压力几乎不受影响,但距管壁最近的土压力则超出原有土压力的 1 倍。图 3(f)为 5 个监测孔中距管壁最近的土压力变化曲线,可以得出随着地层中灰岩所占比例的增加,监测孔 1~5 的土压力峰值呈下降趋势。

图 3 土压力变化曲线

3.2.2 顶管施工引起孔隙水压力的变化

如图1所示,孔隙水压力计与土压力计的布置位置及编号均相同。图4(a~e)表示各断面监测点孔隙水压力随顶管进程的变化曲线,监测孔中孔隙水压力的变化值与掘进机距监测点的距离呈负相关,掘进机机头距检测断面越近,孔隙水压力越大,掘进机到达监测断面时孔隙水压力达到最大值,后随机头的继续推进而减小。同一监测孔中的孔隙水

压力距离轴线越近变化越大,越远变化越小,直至无明显变化。图4中距管壁4.5 m处的孔隙水压力受到影响较小,距离管壁6 m处的孔隙水压力则不受顶管推进的影响,其影响范围约为1.5倍管径。图4(f)为断面中距管壁1.5 m处孔隙水压力的变化曲线,断面1~5地层中灰岩所占比例逐渐增高,孔隙水压力峰值逐渐减小。

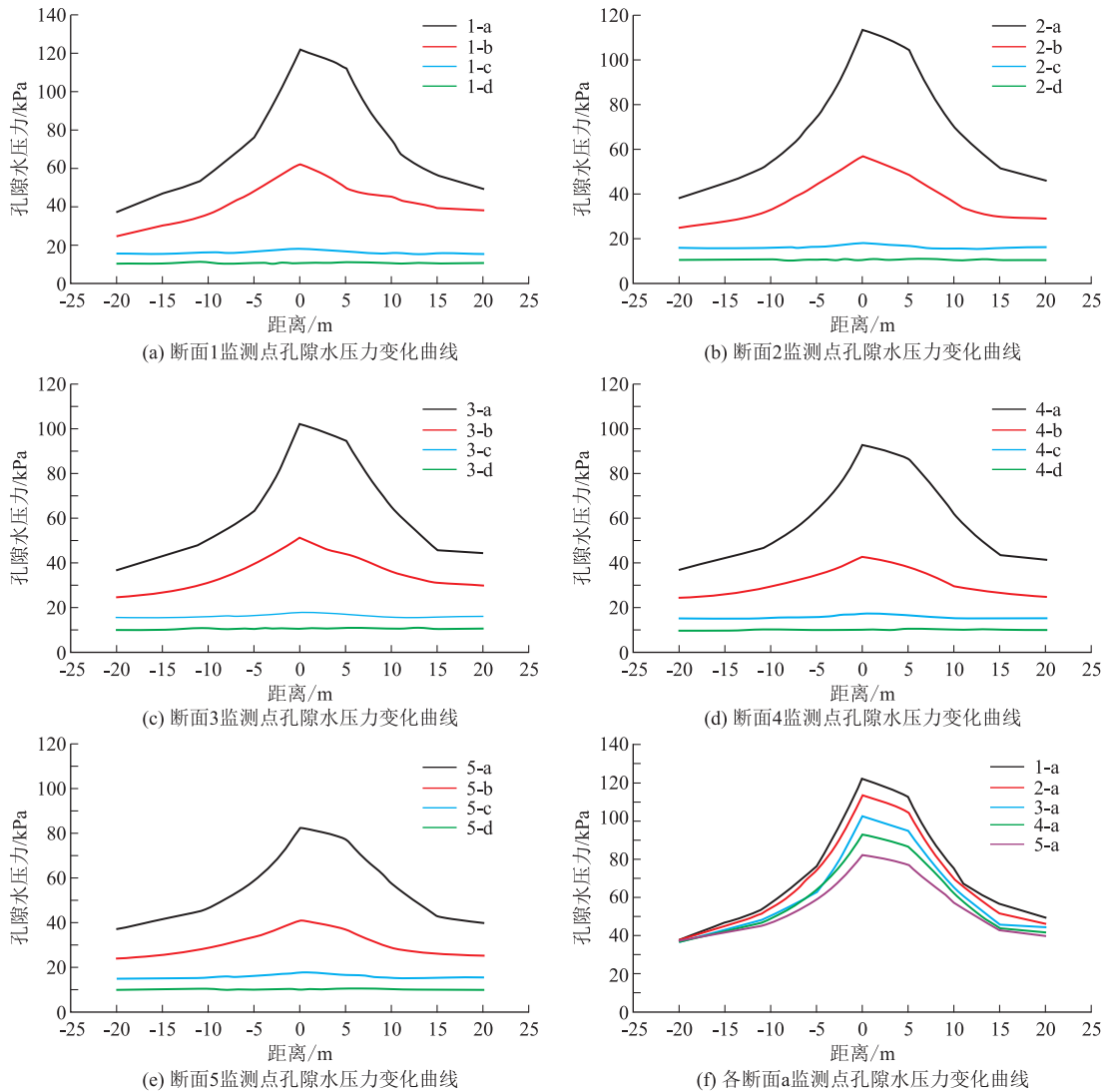


图4 孔隙水压力变化曲线

3.2.3 顶管施工对地表变形的影响

如图2所示,为探究顶管施工对地表变形的影响范围及影响规律,根据断面沿顶管轴线、垂直顶管轴线布置了17个地面沉降监测点。

图5(a~c)为3个断面中垂直顶管轴线的各个测点地表变形的变化曲线。结果表明,顶管施工对地表变形有较大影响。掘进机推进过程中,地表土体的隆沉趋势为先隆起后沉降,掘进机机头到达监

测点时隆起值最大,此时的隆起速率也为最大值。掘进机机头远离过程中,监测点的地表隆沉趋势由隆起转变为沉降,且与顶管顶进深度呈正相关,逐渐变大直至稳定;地表沉降速率由缓转快再逐渐变缓,其中地表沉降速率最快阶段为机头远离监测点至4~10 m处,此阶段为掘进机机尾脱出阶段,该阶段沉降量占沉降总值的40%~60%。同一监测断面中的地表变形量与轴线距离呈负相关,距轴线越近

的变形量越大,越远变形量越小,如图 5 中 1-5、3-5、5-5 监测点在距顶管轴线 20 m 已不受掘进机机头推进的影响,其影响范围约在 1.5 倍的顶管深度、5 倍管径内。

图 5(d)为 5 个断面顶管轴线正上方各监测点地表土体变形曲线,地表土体变形规律为沉降-隆起-沉降。第一阶段为掘进机机头距监测点 20~10 m 处,该处地表土体表现为轻微沉降;第二阶段为掘进机机头抵达监测点处,该处表现为地面隆起;第三阶段为掘进机机头远离监测点位置,该处表现为

地面沉降,地面沉降速率由缓变快再变缓。

由图 5(d)可知,掘进机沿顶管轴线方向顶进至监测点的过程中,距监测点约 20 m 处开始发生地面沉降,沉降过程在掘进机远离监测点 30 m 处后基本结束。由此可知,掘进机至监测点前方的影响范围为 2 倍顶管深度内,掘进机至监测点后方影响范围为 3 倍顶管深度内。且因断面 1~5 地层中灰岩所占比例增高,第一阶段中的沉降量降低,最高隆起值减小,导致最终沉降量减小。

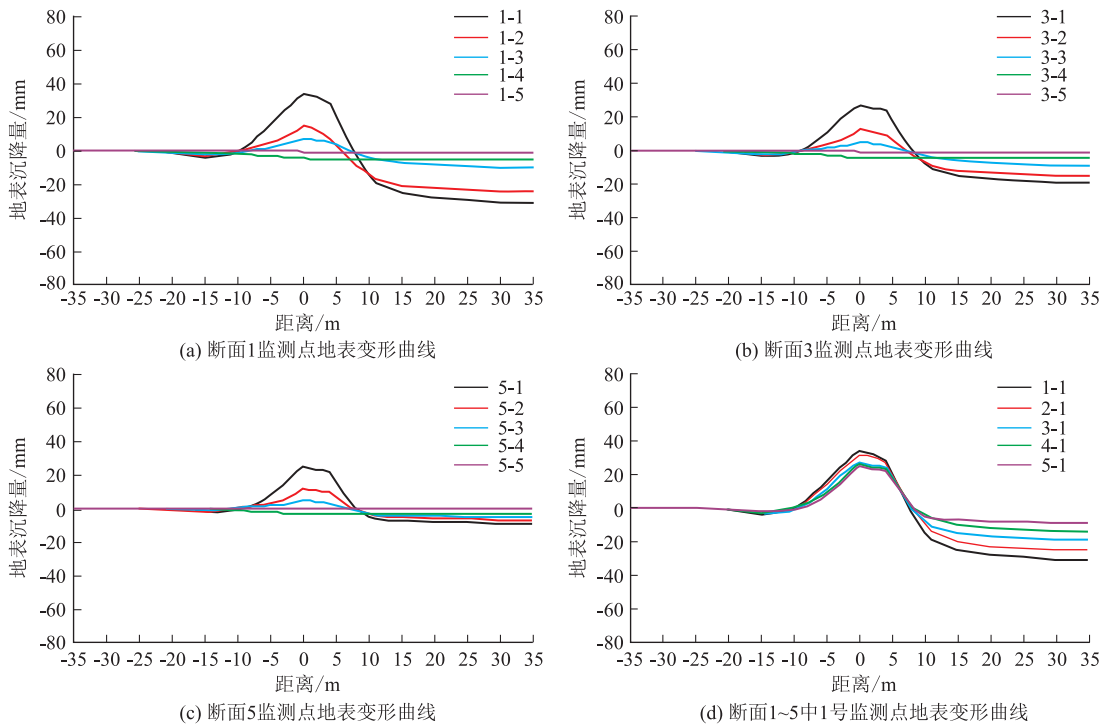


图 5 地表变形曲线

4 地表变形机理

顶管施工对周围土体的扰动是顶管推进过程中地面产生变形的根本原因,根据地表变形曲线大致可将土体变形分为 3 个阶段:掘进机机头到达监测点前的地表沉降;到达监测点时的地表隆起;远离监测点时的地表沉降。

掘进机机头到达监测点前,由于刀盘的切削、搅拌以及振动作用,导致掘进机附近的土体产生扰动。杂填土、粉质黏土、砾石层中的空隙率较大,在扰动的影下,地层中的土体颗粒产生移动,空隙中的一部分水和气体可能会被排出,使土体产生一定的压缩,导致地面产生沉降。如图 3、图 4、图 5 所示,掘进机机头距监测点 10~20 m 时,土压力、孔隙水压力增加,地表会产生微弱的沉降。

掘进机机头到达监测点时,位于掘进机正前方的土体受到机头推力的挤压作用,且地面开挖会导致土体应力重分布,表现为水平应力减小,这两方面引起的水平应力值大于被动土压力时,使土体向外挤出,导致地面出现隆起。如图 3、图 5 所示,掘进机机头距离监测点 10 m 之内时,土压力迅速增加,地面隆起的频率增大,速率增快。

掘进机机头远离监测点时,地面沉降的原因与掘进机的所处位置密切相关。开始时掘进机并未完全脱离监测点,振动作用导致的土体压缩和超孔隙水压力降低导致土体发生的固结作用是地面沉降发生的原因,此时地面沉降速率较慢。

随着掘进机的继续推进,当掘进机尾部通过监测点后,因掘进机的直径超过后续管道直径,为填补掘进机超挖的土体,管道周围的土体会向管壁移动,

这个过程会导致地表发生沉降。如图 5 所示,掘进机机头远离监测点 4~10 m 处时候,土体受到的挤压作用降低,孔隙率增加,此时地表沉降速率达到最大值。如图 3、图 5 所示,掘进机机头远离监测点 0~10 m 范围内,土压力降低,地表发生沉降,且沉降速率由缓变快。

掘进机机头靠近监测点的过程中,土压力、孔隙水压力增加,管道周围土体因受到挤压作用而形成超孔隙水压力区。掘进机远离监测点区域后,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,地面出现沉降,为主固结沉降^[11]。掘进机远离监测点一段距离后,受到扰动的圆砾层和粉质黏土缓慢稳定,因土体仍在蠕变,沉降继续发生,为次固结沉降。

如图 4、图 5 所示,掘进机机头远离监测点时,孔隙水压力降低,地面沉降量增加。地层性质不同,地表沉降量不同,随着掘进机推进过程中,灰岩所占比例逐渐增大,圆砾层厚度逐渐变小,因灰岩强度较高,顶管推进的过程中灰岩的变形可以忽略,灰岩中不存在孔隙水与固结效应,因此顶管推进过程中存在的固结沉降效应逐渐减小。随着顶管的推进,平行于轴线方向上监测点的最终沉降量逐渐减小。如图 5(d)所示,断面 1 至断面 5 中地层灰岩所占比例逐渐增高,最终沉降量逐渐减小。

5 结论

本文以宝象河流域排水收集系统改造工程为背景,在灰岩-砾石变化地层中设置监测孔,通过现场监测对顶管施工过程中引起的土压力、孔隙水压力、地表变形情况进行研究,得到以下 3 点结论:

(1) 顶管推进过程中,土压力与孔隙水压力变化基本一致,随着掘进机的推进先增大后减小,当掘进机机头达到监测孔时土压力、孔隙水压力达到最大值。同一监测孔中的土压力、孔隙水压力距离顶管轴线越近受到的影响越大,影响范围为 1.5 倍管径内。沿顶管轴线方向,随着地层中灰岩比例增加,土压力与孔隙水压力峰值逐渐减小。

(2) 随顶管的推进,位于顶管轴线上地表土体的变形表现为沉降-隆起-沉降,掘进机机头顶至监测点时隆起值达到最大,影响范围为掘进机前方 2 倍顶管深度内、掘进机后方 3 倍顶管深度内。沿顶管轴线方向,随着地层中灰岩比例增加,地表最终沉降值逐渐减小。垂直于顶管轴线方向越靠近轴向受到的影响越大,其影响范围为 1.5 倍的顶管深度内。

(3) 掘进机靠近监测点的过程中,土压力、孔隙水压力增加,管道周围土体受到挤压作用形成超孔隙水压力区。掘进机远离监测点后,超孔隙水压力下降,孔隙水消散,土体发生固结作用,土体体积减小,地面出现沉降现象。灰岩地层中不存在固结效应,因此在顶管推进的过程中,随着灰岩比例逐渐增加,地表最终沉降值逐渐减小。

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] 孙桂玉, 何威, 范家良, 等. 中国非开挖技术的现状及前景展望[J]. 四川建材, 2023, 49(5): 103-104, 107.
- [3] 冉红玲. 顶管施工对既有城市轨道交通路基变形影响及控制研究[D]. 北京交通大学, 2008.
- [4] 谭师好. 管幕结构法施工引起地层及建筑物变形研究[D]. 北京交通大学, 2021.
- [5] 郭明, 谢璨, 宋曙光, 等. 新建市政隧道下穿多线运营铁路施工地表沉降研究——以郑州火车站操场街隧道工程为例[J]. 铁道勘察, 2024, 50(2): 117-125.
- [6] 张顶立, 黄俊. 深圳地铁浅埋暗挖隧道地层变形分析[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 88-93.
- [7] 韩昌瑞, 贺光宗, 王贵宾. 双线并行隧道施工中影响地表沉降的因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 484-487, 495.
- [8] 李炜明, 任虹, 孙义涛, 等. 上软下硬地层盾构施工多源沉降数据演化规律[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(9): 78-84.
- [9] 魏纲. 顶管施工中土体性状及环境效应分析[D]. 浙江大学, 2003.
- [10] 余振翼, 魏纲. 顶管施工对相邻平行地下管线位移影响因素分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 441-445.
- [11] 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.

作者简介: 杨子川(1998—), 男, 河北人, 硕士研究生, 主要从事工程地质与地质灾害方面研究工作。

E-mail: yzc15731617949@163.com

通讯作者: 龚玉蓉(1976—), 女, 湖南人, 博士, 讲师, 主要从事电磁法数据处理。E-mail: 20347840@qq.com