

周军强,凌涛,龙明华,等. 风化地层圆形顶管下穿既有高速公路掘进隆沉变形控制[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(1):35-42. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.01.005

ZHOU J Q, LING T, LONG M H, et al. On Uplift and Subsidence Deformation Control of Circular Jacking Pipe in Weathering Strata Under the Existing Expressway [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(1):35-42. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.01.005

风化地层圆形顶管下穿既有高速公路 掘进隆沉变形控制

周军强¹,凌涛^{1*},龙明华¹,彭学军¹,彭文庆²

(1. 中铁五局集团第一工程有限责任公司,湖南长沙410117;

2. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院,湖南湘潭411201)

摘要: 风化岩层圆形浅埋隧道在掘进过程中岩层表现出隆沉变形状态,而顶进力作为其重要影响因素,分析二者之间的联系对岩层变形控制有重要的意义.以青岛地铁8号线电力线路浅埋隧道采用顶管施工为工程背景,运用理论分析与FLAC^{3D}数值模拟研究在风化岩层圆形隧道开挖施工过程中,分析在不同顶进力作用下岩体与管节变形情况.研究表明:顶进力作为施工过程中重要参数,对岩土变形有着重要影响;顶管处岩土沉降量均大于地表沉降量,但由于顶进力的存在可能会导致岩土先产生隆起之后再产生沉降,且随着顶进力的增大,隆起量也明显增大,但隆起量敏感度高于沉降量;同时顶进力会引起开挖面附近岩土应力变化,但影响范围有限,开挖面左右5~10 m,后方0~10 m为顶进力重要影响区.

关键词: 风化地层;浅埋隧道;数值模拟;顶管施工;隆沉变形

中图分类号:U418.5

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)01-0035-08

On Uplift and Subsidence Deformation Control of Circular Jacking Pipe in Weathering Strata Under the Existing Expressway

ZHOU Junqiang¹, LING Tao¹, LONG Minghua¹, PENG Xuejun¹, PENG Wenqing²

(1. No.1 Engineering Co., Ltd., China Railway No. 5 Engineering Group Company, Changsha 410117, China;

2. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The rock strata of circular shallow tunnel in weathered rock strata show uplift deformation during excavation, and the driving force is an important influencing factor. It is of great significance to analyze the relationship between the two rock strata deformation control. Taking the pipe jacking construction of shallow buried tunnel of Qingdao Metro Line 8 as the engineering background, the theoretical analysis and FLAC^{3D} numerical simulation are used to study the excavation process of circular tunnel under weathered geological conditions, and the deformation of rock mass and pipe section under different driving forces is analyzed. Results show that tunneling force, as an important parameter in the construction process, has an important influence on rock and soil deformation. The rock and soil settlement at the pipe jacking is greater than the surface settlement value, but the existence of tunneling force may lead to rock and soil uplift first and then settlement, and with the

收稿日期:2022-06-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974118)

*通信作者, E-mail: 379664843@qq.com

increase of tunneling force, the uplift is also significantly increased, but the sensitivity of uplift is higher than the settlement; at the same time, the tunneling force will cause the change of rock and soil stress near the excavation face, but the influence range is limited. The excavation face is about 5~10 m, and the range of 0~10 m behind is the important influence area of tunneling force.

Keywords: weathered strata; shallow tunnel; numerical simulation; pipe jacking; uplift and settlement

随着我国城市地下轨道交通发展的不断推进,在施工与规划方面提出了更加严格的要求.一方面既要保证施工安全与质量,另一方面又要保证绿色施工,尽量避免由于施工给地上正常活动带来影响^[1].明挖法作为传统施工方法,存在着诸多弊端,且施工效率与安全性都无法满足当前要求.顶管施工技术作为非开挖技术的一种,仅需开挖始发井与接受井,可以在不开挖地面情况下布置管道,从而不会对周边建筑与人类正常活动带来影响;目前顶管法施工已经发展有百年历史,管节截面已由圆形发展至多元化截面,而圆形顶管技术在国内外发展最多,技术最为成熟.例如,在技术方面,马龙飞等^[2]对国内外顶进力的计算方法进行了系统的分析研究,指出不同计算方法适用条件的局限性;薛振兴^[3]对顶管施工顶力计算进行了细致的理论分析,并对土柱法、普氏卸荷拱法、太沙基法及马斯顿法等4种常见的土压力计算方法进行对比分析.而对于复杂地质条件下,彭仁^[4]在工程中遇到承压水流砂地层条件,分析了顶管施工在流砂条件中产生问题的各种原因,表明在承压水流砂地质条件下采用泥水平衡式顶管施工技术是可行的;刘陈凤等^[5]则是针对深厚淤泥质土,运用数值模拟的方式得出由施工引起的沉降范围;刘洁^[6]在夹杂巨型卵石碎石层中采用顶管施工,给出此类型地质条件下一些工程经验;苏妮等^[7]在砂姜黏土地层采用双排顶管施工,研究顶管施工的沉降变形规律;曹淑学与刘俊新^[8-9]同样研究了复杂地质条件下顶管施工各种难点,提出一定工程经验,具有借鉴意义;周健民^[10]根据理论公式和经验公式的影响因素,提出了公式的适用范围和计算中应注意的问题,为顶力计算提供相应参考和指导;王宏伟^[11]对曲线顶管技术的相关控制措施进行简单介绍以及施工重点进行阐述;刘锦洲等^[12]则在强风化地质条件下采用手掘式顶管进行施工,取得较好效果.

综上所述,在不同的工程条件下顶管施工有着不同的要求,运用传统顶进力估算公式难以满足当今工程需求,在应对复杂多样的工程与实际情况,有关顶进力如何取值以及如何给周边岩土甚至管节带来影响的研究尚有不足.本文以青岛地铁8号线电力线路顶管泥水平衡掘进机施工为工程背景,运用太沙基公式进行推导顶进力计算公式,以及采用FLAC^{3D}对顶进力影响机理进行分析,通过位移监测、应力变化等方面进行研究,对相似工程具有一定借鉴意义.

1 工程背景

青岛地铁8号线电力线路迁改工程电缆隧道采用顶管穿越G15(沈海高速),穿越处G15高速公路桩号为K589+573,顶管与高速公路交叉角88°,东侧顶管工作井距离高速公路栅栏为30 m,西侧顶管工作井距离高速公路栅栏31 m.线路下穿G15沈海高速公路采用机械顶管施工法进行施工,管材采用“F”型钢承口钢筋混凝土成品管,管材参数如下:顶管内径3.00 m,壁厚275.00 mm,外径3.55 m,每节长度为2.00 m,单节自重约14.70 t.管节接口为柔性钢承口,采用钢筋混凝土Ⅲ级管,顶管长115.50 m.高速公路路面下顶管敷设深度为13.00 m,高速公路路堤坡脚处顶管敷设深度9.00 m,平面示意图如图1所示.

1.1 工程地质条件

如图2所示,标高0~1.2 m为素填土:表面见少量植物根系,局部含少量黏性土,下部夹大量灰白色块石,成分多为石英、长石,磨圆度差,块径2~3 cm;1.2~4.0 m为全风化泥质砂岩:砖红色,泥质粉砂结构,层状构造,矿物蚀变非常强烈,原岩结构基本破坏;4.0~6.0 m为强风化泥质砂岩:砖红色,泥质粉砂结构,层状构造,主要矿物成分为长石、石英、黏土矿物,矿物蚀变强烈;6.0~5.0 m为中风化泥质砂岩:砖红色,泥质粉砂结构,层状构造.由于顶管下穿沈海高速公路,高速公路车流量较大,为保证行车安全,需重点加强顶管施工过程中道路沉降控制,严格控制掘进参数.

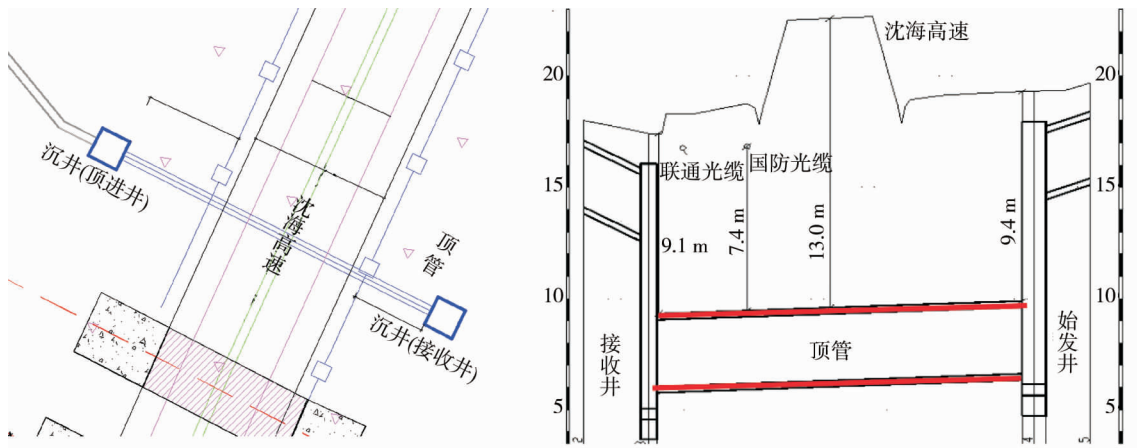


图 1 顶管施工



图 2 地质剖面图(单位:m)

2 风化地质条件下顶进力计算

在顶管施工过程中,顶进力的确定是尤为关键的部分,总体而言顶进力就是用来克服管端阻力与管壁摩擦力所需的总推力,如图 3 所示,其影响因素有很多,例如地质条件、水文条件、埋深以及管身材料等.顶进力过小导致管节无法前进,过大则使掘进速率太快,引起大量变形.所以确定顶进力的大小是施工前必备的工作.

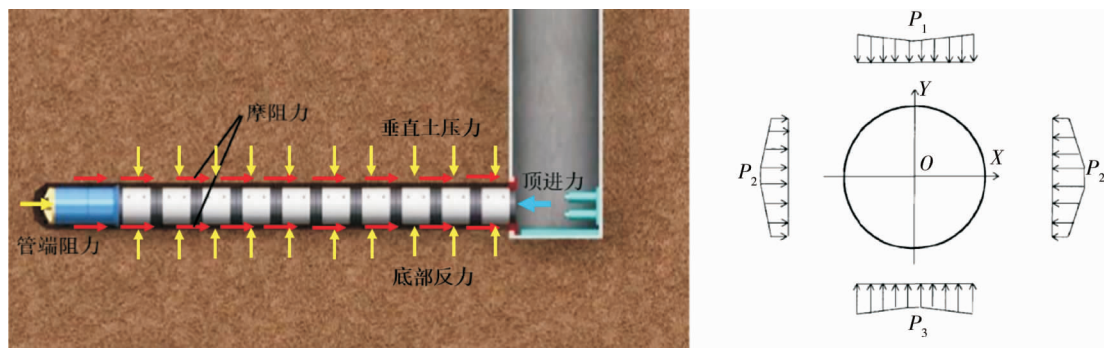


图 3 顶管受力分析

对于圆形截面的顶管施工而言,基于经典土力学已有诸多理论公式,但由于在理论计算中有必要对实际情况进行简化甚至忽视客观影响,导致理论公式得出的计算结果通常大于实测值,表 1 为部分顶管顶进力理论过程.

表1 顶管顶进力理论计算公式^[13]

序号	公式来源	表达式
1	经典公式	$P = P_F + P_f$
2	德国规范	$P = \frac{\pi}{4} D^2 B + \pi D L f_k$
3	日本规范	$P = P_F + \pi D (q f_k + C) L + W f_k$
4	北京经验公式	$P = K(34B - 21)L$
5	上海经验公式	$P = (8 \sim 12) \pi B L$
6	给排水管道工程施工及验收规范	$P = P_F + \pi D L f_k$

式中: P_F 为端部阻力; P_f 为摩擦阻力; D 为管节外径; B 为单位面积下掌子面所受平均阻力; L 为掘进距离; f_k 为单位面积下管壁所收受平均摩阻力; q 为土体均布荷载; W 为管道自重。

而在青岛地铁8号线中,顶管穿越的岩层为风化程度不同的砂岩,土柱理论只考虑上覆岩层的重量,且尚未考虑土拱效应以及两侧土体的相互作用,同时砂岩仍具有一定黏聚力,故采用太沙基理论来计算垂直土压力,如图4所示。

垂直土压力可表示为^[14]

$$P_1 = \frac{b_1(\gamma - c/b_1)}{k_a \tan \varphi} (1 - e^{-k_a(\tan \varphi)(H/b_1)}) \quad (1)$$

式中: P_1 为垂直土压力; b_1 为土体扰动半径; k_a 为主动土压力系数; H 为地面至掘进机中心的高度; γ 为土的重量; c 为岩土黏聚力.其中 b_1 的表达式为

$$b_1 = \frac{b}{\cos\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \left[1 + \sin\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \right] \quad (2)$$

而考虑黏聚力情况下管节的侧向土压力值 P_2 的表达式为

$$P_2 = \left(P_1 + \frac{H\gamma}{2} \right) - 2c\sqrt{k_a} \quad (3)$$

顶管下方的岩土反力 P_3 为

$$P_3 = P_1 + nG \quad (4)$$

式中: n 为管节数量; G 为单节顶管重量.联立式(1)~式(4)式可出顶管侧端摩阻力为

$$P_f = \frac{DL(2P_1 + 2P_2 + nG)}{2} \quad (5)$$

而对于管节的管段阻力而言,其计算公式为

$$P_F = \frac{(P_1 k_p + 2c\sqrt{k_p} + \gamma H) \pi D^2}{4} \quad (6)$$

式中: k_p 为被动土压力系数。

综上所述,顶进力为管段阻力与侧端摩阻力之和,按最大顶距 116 m 计算, H 取 14.8 m, γ 取 1900 kN/m³,得出顶进力为 813 t,折算成应力表达形式为 1150 kPa。

2.1 后靠背验算

因为工作井是钢筋混凝土沉井,为了使作用于井壁上的油缸反力扩散,保护井壁不受损伤和消除顶管轴线与井壁的夹角.在井壁前加上 5 cm 厚钢后靠背(4.2 m×4.2 m)钢板,对于顶力较大的主油缸的压力扩散,有必要进行后靠背验算受力分析,如图5所示,依据式(7)可得后靠背允许顶进力为 1518.7 t,其值大于顶进力数值故符合设计要求。

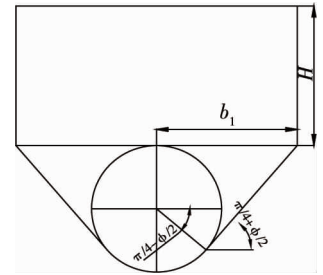


图4 圆形顶管垂直土压力计算

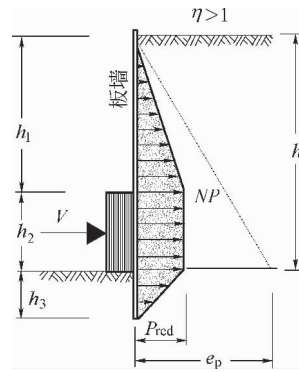


图 5 始发井后背分析

$$F = \frac{k_p \gamma b h}{2\eta} (h_1 + 2h_2 + h_3) \tag{7}$$

式中: F 为后靠背允许顶力; K_p 为被动压系数 (综合考虑取 2.04); γ 为重量 (综合考虑取 19.63 kN/m^3); b 为后靠宽度 (取 4.2m); h 为工作井底板至地面的深度 (13.4 m); η 为安全系数 (通常取 ≥ 1.5 , 计算取 1.8); h_1 为后靠背顶至地面高度 (取 8.3 m); h_2 为后座高度 (取 4.2 m); h_3 为工作井底至底板顶高度 (取 1.9 m)。

3 数值模拟

3.1 模型建立

为了能够让所建立的模型尽可能地与原始地质条件相吻合,同时为了方便计算,所以需要原始的地质条件进行一定的设想与简化.结合实际工程概况,把数值模型中的岩土设定为连续均匀的介质,模型的尺寸为长度×宽度×高度 = 80 m×120 m×50 m,顶管直径 3 m.由于为浅埋隧道故取侧压系数为 1.0,模型边界条件为四周水平位移约束,底部固定位移约束,具体的模型如图 6 所示,土层参数如表 2 所示.

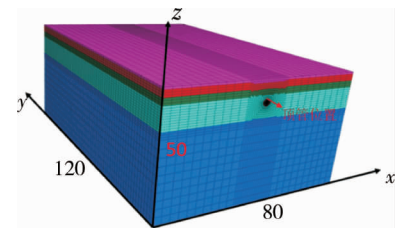


图 6 数值模型 (单位:m)

表 2 土层物理力学参数

序号	岩石名称	体积模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa	密度/(kg/m ³)
1	素填土	4	0.16	11	0.56	0.75	1 310
2	全风化泥质砂岩	4	0.20	14	1.00	1.50	1 500
3	强风化泥质砂岩	25	0.25	25	2.16	1.75	1 850
4	中风化泥质砂岩	25	0.25	25	2.16	1.50	1 850
5	次级岩体	25	0.25	25	2.16	1.75	1 850

同时为了模拟不同顶进力的影响,需要说明的是 FLAC^{3D}中施加的为应力,需将式(3)得出的 813 t 推进行折算,得到同等作用在工作面上应力值为 1 150 kPa,为研究不同顶进力作用下岩土变形规律,本次模拟进行 5 种工况进行对比分析,如表 3 所示.

表 3 工况表

序号	顶进力/kPa
工况 1	500
工况 2	800
工况 3	1 150
工况 4	1 500
工况 5	2 000

在实际顶管案例中整个施工流程可分为开挖、注浆与管节掘进这 3 个步骤,故在数值模拟中采用 null 本构模型对相应部分开挖,由于 FLAC^{3D}为有限元分析软件无法真实模拟注浆层泥浆具体状态,所以采用

shell 结构单元替代,最后通过赋予管节参数给 shell 单元实现添加顶管^[15-16].每次开挖深度为 2 m,利用编制内置 fish 语言实现循环开挖以及循环掘进,如图 7 所示,其中结构单元模拟参数如表 4 所示.

表 4 数值模拟结构单元参数

名称	单元类型	密度/(g/cm ³)	弹性模量 E	泊松比 μ	厚度/m
泥浆套	Shell 单元	2.2	0.024	0.17	0.20
管节	Shell 单元	2.5	20.000	0.27	0.04

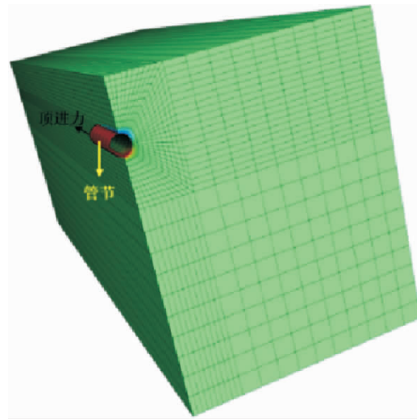


图 7 顶管掘进时模拟

3.2 模拟结果分析

如图 8 所示为工况 3 时,顶管上表面下沉量为 18.95 mm,底鼓量为 11.29 mm,顶底移进量为 30.24 mm.当施加的顶进力数值为 1 150 kPa 时,顶管上表面下沉量为 15.12 mm,底鼓量为 10.81 mm,顶底移进量为 25.93 mm.这表明顶进力越大给岩土带来的变形量也就越大.

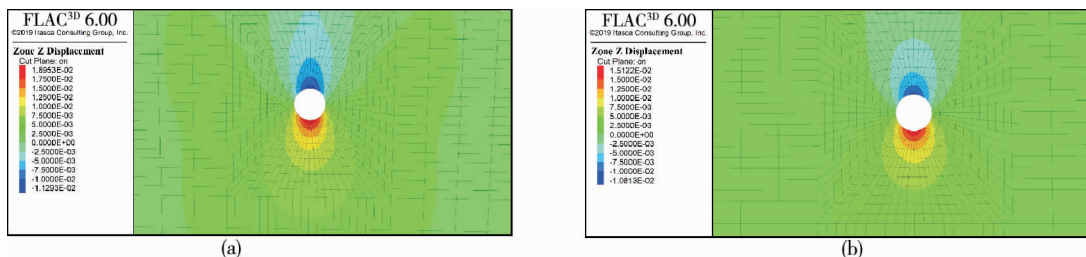


图 8 顶管垂直位移曲线位移

图 9 为工况 3 时顶管上表面位移监测曲线(沉降为正),沿着始发井至接受井路线上每隔 20 m 设置 1 个测点,监测结果如图 9 所示.由图 9 可知:在始发井处,当顶管机开始施加顶进力时第一节顶管便开始产生沉降,且增长速率快,在 8 000 计算步时达到最大值 14 mm,而随着顶管不断掘进沉降量趋于稳定值 11 mm;而对于距始发井 20,40,60,80 m 的测点,其位移曲线有着相似规律,以距始发井 20 m 测点曲线为例,当顶管掘进至 20m 前位置时,由于存在 1 150 kPa 顶进力的作用,该位置岩土产生一定量隆起,最大隆起值为 3.5 mm,而当顶管工作面经过后,受到后面开挖影响逐渐开始沉降,最后趋向于稳定;对于距始发井 100 m 测点,由于靠近接受井故最终沉降值小于其他测点沉降量,仅为 3 mm 左右.

图 10 为工况 3 时地表位移监测曲线(同样以沉降为正),图 10 的趋势与图 9 相似,地表沉降监测是顶管施工时最重要的步骤,沉降量过大不仅会影响地表行为正常展开,而且可能导致坍塌,由图 10 可得:在该工况下最大沉降量为 6 mm,地表也呈现出先隆起在沉降趋势.

图 11 为顶管施工模拟结束后,在始发井与接受井之间设置一条位移测线,可得出两井之间各位置沉降量,由图 11 可知:顶管沉降量均大于地表沉降量,且它们在前 70 m 的沉降曲线比较平缓,而在靠近接收井位置达到峰值,间接表明在顶管施工过程中,危险段在靠近接收井位置.

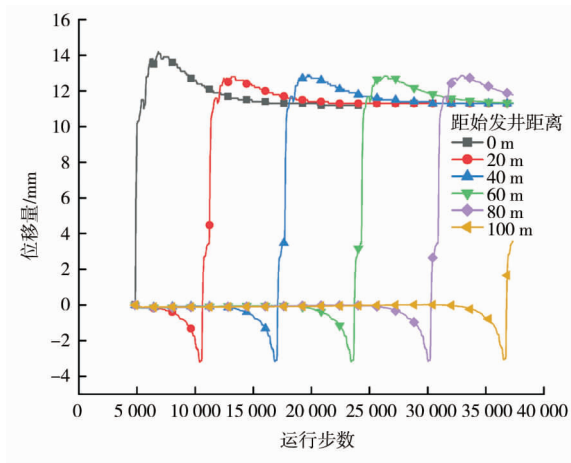


图 9 顶管上表面位移监测曲线

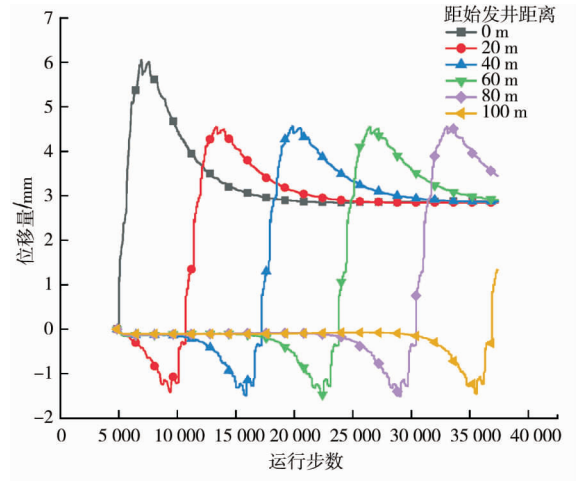


图 10 地表位移监测曲线

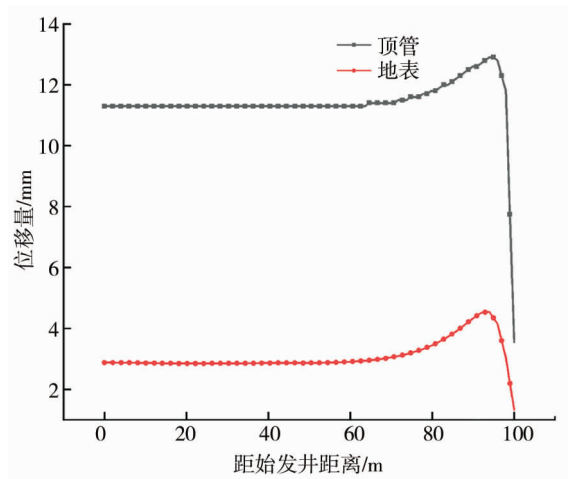


图 11 顶管施工完毕时各位置顶管、地表沉降曲线

图 12a 为在不同工况下距始发井 40 m 处顶管位移曲线,由图 12a 可知:顶进力与顶管变形量成正比,但是与最大沉降量相比,顶进力对顶管的隆起影响程度更高;图 12b 为不同工况下顶管与地表的隆起量曲线,可知顶进力的存在会对岩土产生挤压进而引起隆起现象,而随着顶进力的增大隆起现象也越来越明显,因此有必要选择合适的顶进力大小,另一方面管节的变形量稍大于地表变形,所以在管节取材方面应选取容许小变形。

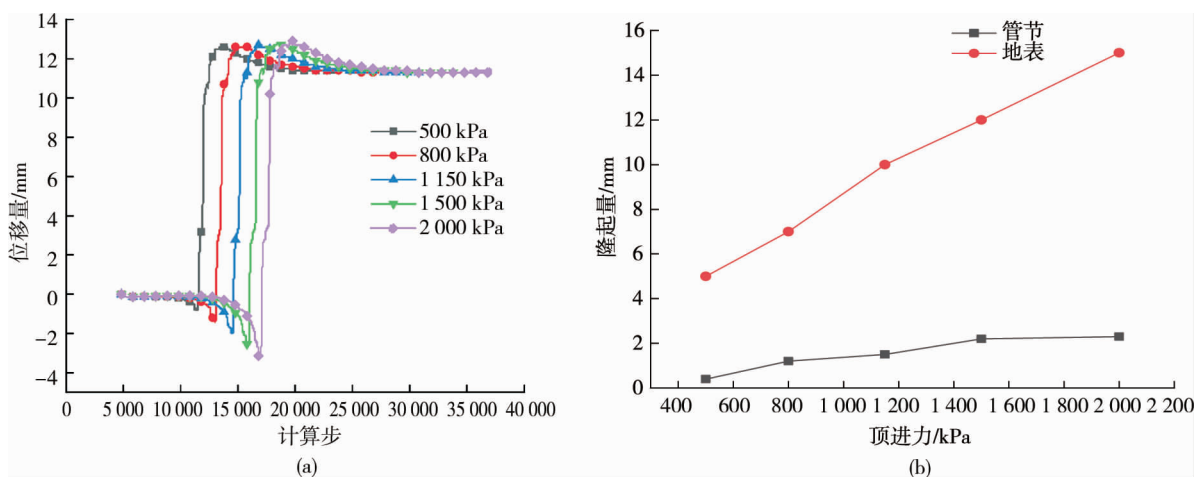


图 12 不同顶进力作用下地表与顶管隆起曲线

图13为当开挖面为20 m时,在顶进力影响下横截面 $y=20,22,25,27,29$ m时的附加应力 σ_y 曲线,由图13可知:靠近顶管开挖面附近的岩土呈现应力集中状态,随着 x 方向远离开挖面应力值快速减少,而通过不同横截面应力曲线对比可知,随 y 方向远离开挖面应力值也呈现减少趋势,这表明距开挖面越远的岩土受到顶进力的影响越小。

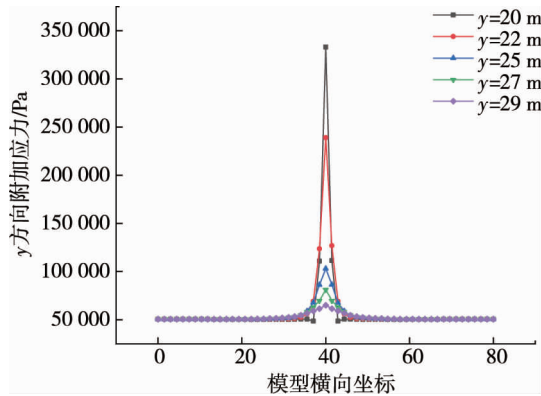


图13 y 方向附加应力随 x 轴变化曲线

4 结论

1) 在顶管施工过程中,出现沉降现象是无法避免的,且顶管处岩土沉降量均大于地表沉降量,但由于顶进力的存在可能会导致岩土先产生隆起之后再产生沉降,且随着顶进力的增大,隆起量也明显增大,同时顶进力对隆起量更为敏感。

2) 顶进力会引起开挖面附近岩土应力变化,但影响范围有限,开挖面左右 $5\sim 10$ m,后 $0\sim 10$ m为顶进力重要影响区。

参考文献:

- [1] 孙彦青. 市政工程顶管施工技术及其质量控制[J]. 居舍, 2022(8): 60-62.
- [2] 马龙飞, 马保松. 顶管顶进力计算方法综述与探究[J]. 特种结构, 2019, 36(3): 26-35.
- [3] 薛振兴. 顶管施工顶力计算与力学特性研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
- [4] 彭仁. 承压水流砂地层条件下顶管施工技术分析[J]. 江西建材, 2022(4): 264-266.
- [5] 刘陈凤, 季圣博, 相福颖, 等. 深厚淤泥质土层地下管道掘进施工数值分析[J]. 四川建材, 2022, 48(4): 126-128.
- [6] 刘洁. 夹杂巨型卵石碎石层大直径长距离顶管施工控制措施[J]. 工程机械与维修, 2022(1): 205-207.
- [7] 苏妮, 曹广勇. 砂姜粘土地层双排顶管施工的沉降变形规律[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2021, 39(6): 6-9.
- [8] 曹淑学, 吴发展. 复杂周边环境下顶管接收施工技术[J]. 建筑技术, 2022, 53(2): 227-229.
- [9] 刘俊新. 复杂地质条件下市政给排水顶管施工技术研究[J]. 工程机械与维修, 2021(6): 226-227.
- [10] 周健民. 顶管顶力计算方法的对比分析与总结研究[J]. 城市道桥与防洪, 2016(5): 214-218.
- [11] 王宏伟. 曲线顶管技术控制措施[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(6): 103-105.
- [12] 刘锦洲, 霍少磊, 葛云峰. 强风化岩中顶管施工顶力计算的理论分析[J]. 山西建筑, 2010, 36(10): 123-124.
- [13] 王洪恩. 顶管法施工顶进力计算模拟研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [14] TERZAGHI K. Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door [C]// Proceedings of First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge, Massachusetts, 1936: 307-311.
- [15] 金鑫. 大断面矩形顶管下穿京杭大运河土体扰动规律及控制技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [16] 李文江, 王用波, 阎伟龙, 等. 软黏土顶管工后沉降数值模拟与模型试验[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2): 710-716.