

文章编号:1673-9469(2024)04-0001-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.04.001

软土地层大断面矩形顶管施工诱发既有结构变形特性研究

章莘苡¹,王超²,张宇轩²,贾鹏蛟^{1*}

(1. 苏州大学 轨道交通学院,江苏 苏州 215000;2. 中铁上海工程局集团华海工程有限公司,上海 201101)

摘要: 为研究矩形顶管穿越软土地层诱发既有结构变形特性,进一步弄清软土地层中顶管施工引起的变形规律,依托南京某出入口顶管工程,首先开展了矩形顶管施工现场试验,分析了矩形顶管下穿桥基和管线引起的地表及结构变形规律。在此基础上,考虑地层损失对结构变形的影响,构建了矩形顶管动态顶进数值分析模型,分析了土体收缩率、箱涵与顶管间距和掌子面压力对既有结构变形的影响规律。研究表明:随着顶管管节逐级推进,地表横截面与管线呈现中间沉降大、两侧轻微隆起的变形特征,桥基变形特征主要表现为背离管节方向发生偏移;相较于箱涵与顶管间距和掌子面压力,土体收缩率变化对既有结构变形的影响最大。

关键词: 矩形顶管;软土地层;既有结构;地表沉降;结构变形

中图分类号:TU43

文献标识码:A

Research on Deformation Characteristics of Existing Structures Induced by Large Section Rectangular Pipe Jacking Construction in Soft Soil Layer

ZHANG Shenyi¹, WANG Chao², ZHANG Yuxuan², JIA Pengjiao^{1*}

(1. School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215000, China;

2. Shanghai Civil Engineering Co., Ltd. of CREC, Huahai Engineering Co., Ltd., Shanghai 201101, China)

Abstract: To study the deformation characteristics of existing structures induced by rectangular pipe jacking crossing soft soil layers and further clarify the deformation laws caused by pipe jacking construction in soft soil layers, this article is based on a pipe jacking project at an entrance and exit in Nanjing. Firstly, on-site tests of rectangular pipe jacking construction were carried out to analyze the surface and structural deformation laws caused by rectangular pipe jacking crossing bridge foundations and pipelines. On this basis, considering the influence of geological losses on structural deformation, a dynamic numerical analysis model for rectangular top pipe jacking was constructed, and the influences of soil shrinkage rate, box culvert to top pipe spacing, and palm face pressure on the deformation of existing structures were analyzed. The results indicate that as the top pipe section advances step by step, the surface cross-section and pipeline exhibit deformation characteristics of large settlement in the middle and slight uplift on both sides. The deformation characteristics of the bridge foundation mainly manifest as deviation from the direction of the pipe section. Compared to the distance between the box culvert and the top pipe and the pressure on the palm surface, the change in the soil shrinkage rate has the greatest impact on the deformation of existing structures.

Key words: box jacking; soft ground; existing structures; ground settlement; structural deformation

收稿日期:2023-09-22

基金项目:岩土钻掘与防护教育部工程研究中心开放基金资助项目(202310);江苏省自然科学基金资助项目(BK20210721)

作者简介:章莘苡(1999-),女,浙江诸暨人,硕士研究生,从事隧道与地下工程方面的研究。

* 通信作者:贾鹏蛟(1989-),男,河南周口人,博士,副教授,从事隧道与地下工程方面的研究。

矩形顶管相较于圆形顶管具有空间利用率高、适应浅覆土环境等特点,在我国轨道交通和市政工程领域得到广泛应用^[1]。近年来,学者对矩形顶管施工引起的工程问题开展了相关研究。在地层扰动方面,魏纲等^[2]基于 Winkle 地基模型,提出了顶管施工引起管线的极限弯矩、理论弯矩及变形计算方法。刘波等^[3]通过数值模拟和现场试验,得出顶管通道近接穿越既有隧道会使下覆隧道经历 3 个变形阶段。吴垠龙等^[4]以苏州某大断面矩形顶管近距离上穿既有隧道为背景,得出顶管施工对既有隧道影响最大,在轴线下区域 2.5 倍顶管宽度范围内。余振翼等^[5]通过分析顶管施工对相邻平行管位位移影响因素,得出注浆与纠偏压力越大、管线距离顶管越近、管线弹性模量越小,则产生的位移越大。杨朝帅等^[6]通过研究大断面矩形小净距顶管隧道群施工对地层变形的影响规律,得出背土效应会补充前方地层产生的地表隆起变形。Wang 等^[7]在 Mindlin 位移解和随机介质理论的基础上,综合考虑了土体损失、开挖面附加推力、顶管机与土体的摩擦、后续管节与土体的摩擦、注浆压力等影响因素,提出了平行矩形管道顶进引起地层扰动的解析模型。Ma 等^[8]研究了顶管施工中覆土层厚度对地面沉降的影响规律,在顶管中轴线宽度的 0.5 倍范围内,地面累积沉降量随覆土厚度的增加呈线性减小。此外,Ma 等^[9]通过日本两个现场案例,基于实际监测数据,提出了一种新的矩形顶管管土接触模型,提升了管土摩擦力的预测精度。Liu 等^[10-12]采用平面分析研究浅埋条件下顶管法施工中支护压力波动诱发掘进面被动失稳的问题,推导出工作面稳定所需支护压力的上限解和最优破坏模式。王紫娟等^[13]利用“位移控制法”实现顶进全过程数值模拟,并且在充分考虑管土摩擦作用和超挖地层损失影响下进行敏感性参数分析,得到地表变形与摩擦力成正比,与土体内摩擦角、黏聚力成反比。袁心等^[14]依托苏州某矩形顶管工程,分析研究顶管管周压力变化规律,结果显示管周压力在注浆后迅速升高,随后逐步降低且降低速率逐渐减小。

综上,目前学者多集中于研究矩形顶管施工对地表沉降的影响规律及管土侧摩阻力,而对大断面矩形顶管穿越软土地层引起既有结构变形研究较少。同时,在当前数值模拟中,往往忽略了顶管施工引起的土层损失,未考虑顶管机对临近土体的持续影响,降低了模型的计算精度。基于此,

本文依托南京某出入口顶管工程,首先开展了现场试验,研究了矩形顶管施工对地表沉降、污水管涵及高架桥基的影响规律;随后利用 Plaxis 有限元软件,提出了采用隧道收缩率来模拟顶进过程中的土体损失,并考虑了注浆压力、顶推力和掌子面压力的作用,建立了顶管、土体及邻近既有结构相互作用的三维有限元模型;最后,结合实测数据评估了本文有限元模型的合理性,在此基础上,分析了土体收缩率、箱涵与顶管间距和掌子面压力对既有结构变形的影响规律。

1 工程概况

南京地铁 7 号线应天路站 3 号出入口采用矩形顶管法施工,该出入口通道位于南京市建邺区黄山路与应天大街交叉口,需下穿应天大街和应天大街高架,该区域人流、车流量极大,四周高层建筑密集,地下管线众多。顶管通道全长 55.5 m,截面尺寸为 6.9 m×4.2 m,管节宽 1.5 m,壁厚为 0.45 m,覆土深度为 7.265 m。顶管通道需侧穿应天大街高架桥基,并且同时垂直下穿 3 条污水管线,分别为 DN1500 污水管、DN1000 污水管、DN2300×2800 污水箱涵,通道与桥基的水平间距为 5 m,与地下管线的最小间距为 2.05 m。开始施工前分别在始发井和接收井洞门处进行了土体加固处理,加固土尺寸为 7.9 m×5.2 m×5 m。施工区域内地层地质剖面由上至下分布为①-1 素填土、②-3d3-4 粉细砂、②-4d2 粉细砂、②-5d1 粉细砂、粉质黏土夹粉细砂、中粗砂混卵砾石、泥岩。顶管施工掘进土层主要位于②-4d2 粉细砂层,污水管主要位于②-3d3-4 粉细砂层,见图 1。具体土层参数如表 1 所示。

2 现场试验研究

2.1 监测内容及目的

为研究矩形顶管施工对周围环境的影响,针对顶管施工引起的地表沉降,沿顶管轴线设置 7 个断面(断面 A—G),相邻断面间距为 6.5 m 和 10 m,每个断面设置 7 个沉降点(测点 1—7),相邻测点间距为 3.45 m 和 5 m,合计共设置 49 个地表监测点,见图 2。针对地下管线变形,沿其正上方布设变形监测点,断面间距为 5 m,共设置 11 个监测点;针对桥梁位移,在深度为 9 m 处每根桥基布置一个监测点,见图 3。

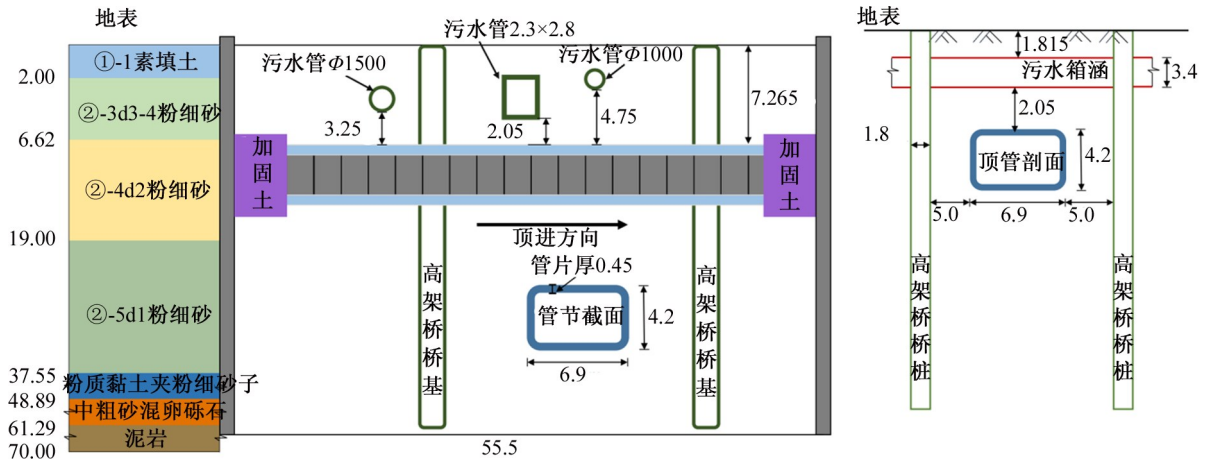


图 1 工程剖面图(单位:m)

Fig. 1 Engineering profile drawing(unit:m)

表 1 土层材料参数

Tab. 1 Material parameters of soil layer

土层名称	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 ϕ /($^\circ$)	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa
①-1 素填土	19.0	6.0	14.0	4.93	4.93	14.79
②-3d3-4 粉细砂	18.4	1.0	30.9	11.27	11.27	33.81
②-4d2 粉细砂	18.6	0.0	31.2	12.67	11.40	34.20
②-5d1 粉细砂	19.5	0.0	32.4	11.56	11.56	34.68
粉质黏土夹粉细砂	19.2	20.0	15.7	5.89	5.89	17.67
中粗砂混卵石	22.2	19.4	40.0	40.00	40.00	120.00
泥岩	22.2	120.0	40.0	40.00	40.00	120.00
加固土	18.9	20.0	40.0	25.00	20.00	60.00

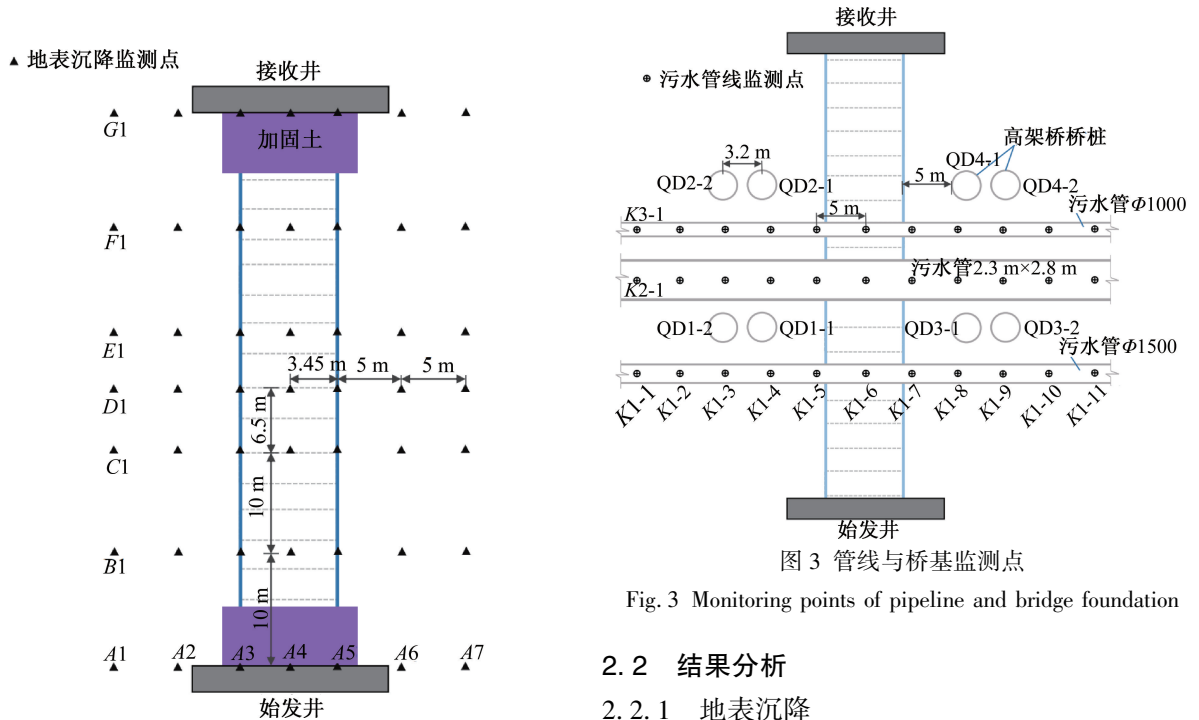


图 2 地表监测点

Fig. 2 Monitoring points of ground settlement

2.2 结果分析

2.2.1 地表沉降

(1) 纵向地表沉降

顶管顶进至 15、30、45 m 时轴线上方 (A4—

G4)的地表沉降,见图4。由图可知,顶管顶进时前方土体出现明显的隆起变形,已顶进区域的地表则出现明显的沉降,隆起量和沉降量有一定的差异,最大隆起量约为1.3 mm,最大沉降量约为5.9 mm。这是由于顶管顶进过程中,顶管机前方土体受到挤压作用,土体向上移动,形成隆起现象;而当管节顶进后,卸荷作用使其产生土体损失,从而隆起量逐渐降低,并逐渐转向沉降趋势。顶管贯通后,顶管轴线上方地表总体沉降,最大值约为5.9 mm,最小值为2.7 mm。沉降值出现先减小后又增大的趋势,且沉降量减小的区域发生在污水箱涵上方,这是由于污水箱涵的刚度大于土体,起到了加固周围土体的作用,致使这部分地表变形要小于其他区域。

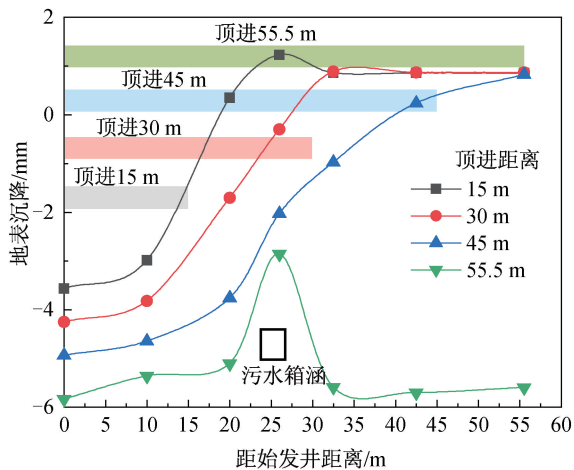


图4 顶管轴线上方地表沉降

Fig. 4 Ground surface settlement above pipe jacking

(2) 横向地表沉降

顶管施工完成后,距始发洞口0、26.5(污水箱涵上方)、33、55.5 m处的横向地表沉降,见图5。由图可知,管节上方不同位置的横向地表主要发生沉降变形,呈现两边小、中间大的趋势,且在远离顶管的两侧出现轻微的隆起。距始发洞口0、33、55.5 m处的地表沉降曲线几近重合,最大沉降值约6 mm左右,这是因为顶管顶进的区域地层参数基本一致,顶进参数也基本相同,进而产生了相似的地表沉降曲线。而距始发洞口26.5 m处的地表沉降与其他断面出现较大差异,最大沉降值仅为2.5 mm,降低了58.3%,这是因为该断面处于污水箱涵正上方,污水箱涵的刚度远远大于周围土体,限制了上方土体向下的变形。

2.2.2 污水管涵变形

顶管顶进诱发地下管线的变形规律,见图6。

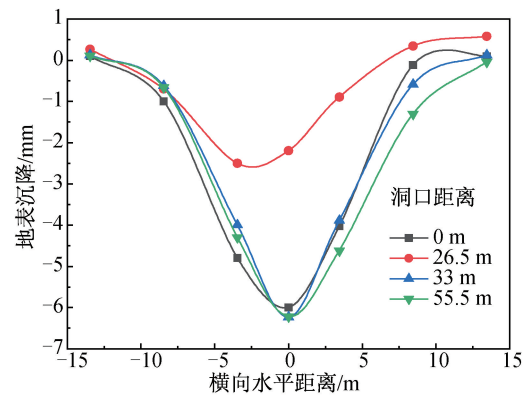


图5 不同位置的横向地表沉降

Fig. 5 Transverse ground surface settlement at different positions

由图可知,当顶管近距离下穿既有管线时,管线向着顶管轴线方向偏移,沉降最大值出现在顶管正上方。这是因为顶管顶进过程中引起地层损失,顶管正上方受扰动最大,使上部管线发生沉降变形。当顶管穿越管线后管线的变形基本稳定, $\Phi 1500$ 污水管变形最大,约5.5 mm; $\Phi 1000$ 污水管变形其次,约4.8 mm;污水箱涵变形最小,约2.8 mm。这是因为相较于 $\Phi 1000$ 污水管, $\Phi 1500$ 污水管距离顶管较近,顶管顶进对 $\Phi 1500$ 污水管造成的扰动更大。同时由于污水箱涵的截面较大(刚度大),虽其距顶管最近,但污水箱涵的变形仍较小。由于顶管顶进30 m时尚未到达 $\Phi 1000$ 污水管下方,故其在顶进30 m和顶进完成后,管线的竖向变形相差较大,而此时顶管已经穿越 $\Phi 1500$ 污水管和污水箱涵,顶进区域土体已基本稳定,所以顶进30 m时 $\Phi 1500$ 污水管和污水箱涵竖向沉降较顶进完成后没有太大变化。

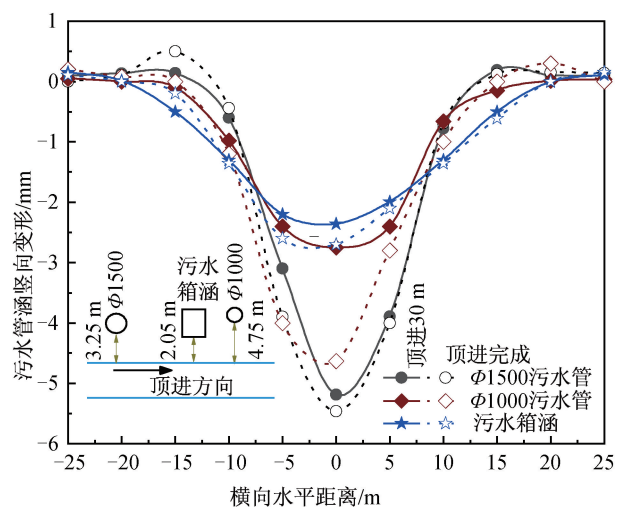


图6 管线竖向变形

Fig. 6 Vertical deformation of pipeline

2.2.3 高架桥桩变形

顶管施工引起临近桥基的侧向变形规律,见图 7。由图可知,当顶管顶进约 16 m 时,QD1 与 QD3 四根桥基开始出现明显变形,靠近顶管侧桥基(QD1-1、QD3-1)变形速率大于较远侧桥基(QD1-2、QD3-2),顶管继续推进约 10 m 后,桥基变形趋于稳定,不再有明显变化;当顶管顶进约 33 m 时,QD2 与 QD4 四根桥基开始发生明显变形,同样是位于内侧桥基变化速率大于外侧桥基,且在继续推进 10 m 左右后,变形趋向稳定。顶管施工会使邻近桥基发生偏离顶管方向的变形,两侧桥基水平变形呈相对对称状态,说明顶管在顶进过程中会对两侧土体产生挤压,导致桥基外扩。靠近顶管一侧的桥基最大水平位移约为 1.3 mm,较远一侧桥基最大水平位移约为 0.6 mm,且相应 4 根桥基最大变形几乎相同。

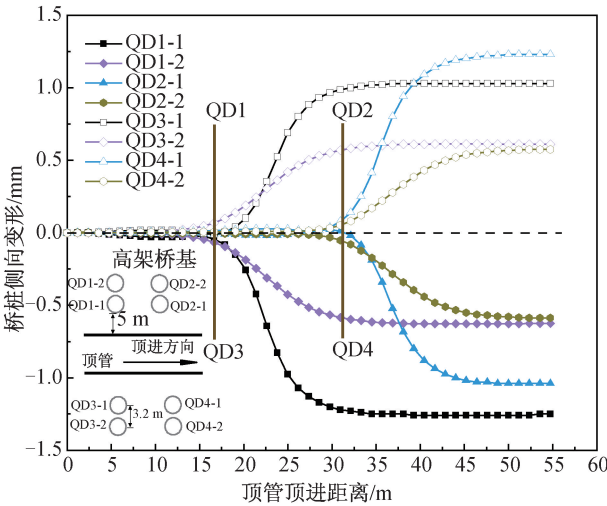


图 7 桥基水平变形

Fig. 7 Horizontal deformation of bridge foundation

3 敏感性参数分析

3.1 数值模型建立

采用 Plaxis 3D 数值软件进行三维建模,见图 8。模型尺寸为 50 m×55.5 m×70 m(X×Y×Z),模型底部土体为完全约束状态,模型顶部为自由边界,其余方向固定其法向位移。土体采用实体单元和小应变土体硬化模型(HSS model)模拟,假设土层各向均匀分布;顶管管片、高架桥基和污水箱涵采用实体单元和各向同性线弹性材料模拟。考虑到污水管与梁的受力情况相似,污水管采用嵌入梁单元进行模拟,简化为均匀混凝土管,具体材料参数如表 2 所示。模型共划分 326 749 个节点,

202 994 个单元。设置界面单元用来模拟管片、桥桩和污水箱涵与土体间的相互作用,界面单元的强度折减因子取 0.67^[15],并通过隧道收缩率模拟实际施工中的土体损失。

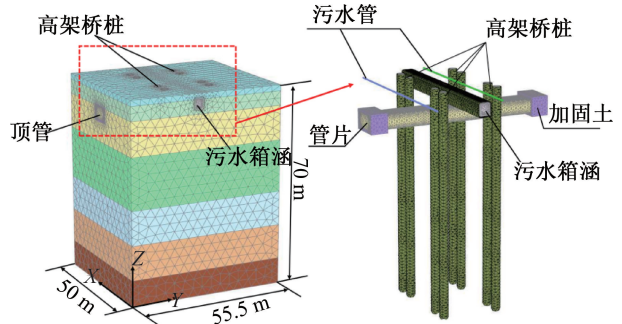


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

表 2 结构参数

Tab. 2 Structural parameters

结构名称	重度 γ / (kN · m ⁻³)	弹性模量 /GPa	材料厚度 /m
顶管管片	25	35.0	0.45
高架桥桥基	24	34.5	—
2.3 m×2.8 m 污水箱涵	24	25.5	0.30
Φ1000 污水管	24	31.5	0.10
Φ1500 污水管	24	31.5	0.20

在分阶段施工模块先平衡初始地应力,再分别将既有污水管涵、桥桩和加固区土体激活,最后进行顶管顶进。其中,模拟顶管动态顶进共分为以下 3 步:①冻结土体;②激活界面、掌子面压力、隧道收缩和用于模拟掘进机的板单元;③激活管片。计算模型时假设管片连续连接,不考虑土体时间效应,只考虑顶进和开挖空间距离的变化^[16]。在模拟施工过程时,根据现场施工实测值,在开挖面施加按梯度增长的面荷载来模拟掌子面压力,最大值为 160 kPa,增长梯度为 10 kPa/m。

3.2 模型验证

3.2.1 地表变形

顶管施工完成后距始发洞口 0、26.5 (污水箱涵上方)、33、55.5 m 处的横向地表沉降计算值与实测值对比,见图 9。由图可知,数值计算所得地表沉降趋势与实测结果基本一致,计算值与实测值最大误差为 22.4%,y=0 m 和 y=26.5 m 处地表位移计算值与实测值较为接近,验证了该有限元模型的准确性。

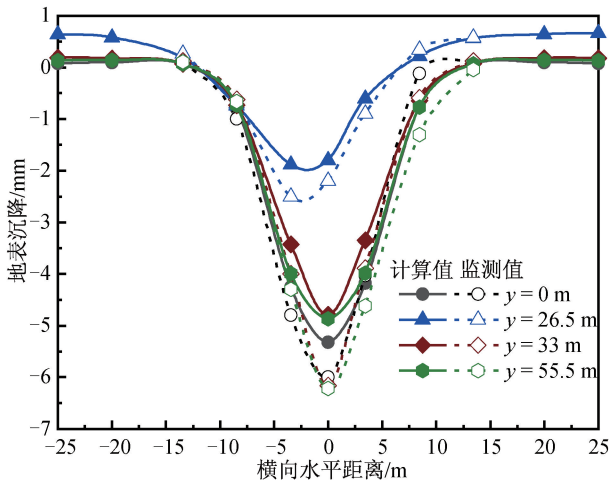


图9 地表沉降计算值与实测值对比

Fig. 9 Comparison between the calculated and measured ground surface settlement values

3.2.2 污水管涵变形

顶管顶进完成后,污水管和箱涵的数值和实测结果,见图10。由图可知,两者变形规律基本一致,污水管 $\Phi 1500$ 、 $\Phi 1000$ 以及污水管涵的最大误差分别是 11.3%、26.9%及 10.9%,表明本文的数值模型能很好地反映顶管施工引起既有管线的变形特性。

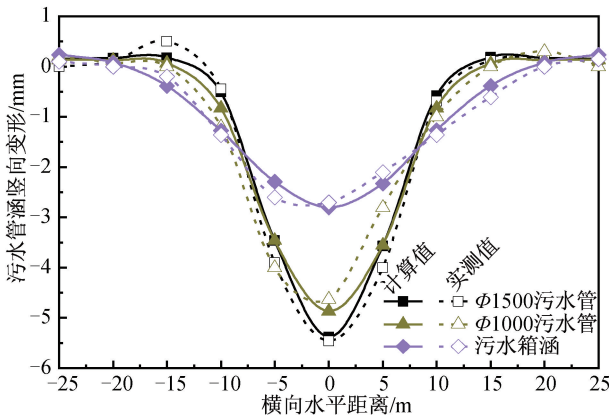


图10 管线竖向变形计算值与实测值对比

Fig. 10 Comparison between the calculated and measured vertical deformations of pipelines

3.2.3 高架桥基变形

由于高架桥基的变形具有对称性,现选取4根桥基(QD1-1、QD1-2、QD2-1、QD2-2)进行对比分析,桥基水平变形的计算值与实测值,见图11。由图可知,当顶管顶进时,数值计算的高架桥基水平变形趋势与实测结果基本一致,两者最大误差约 23.9%。

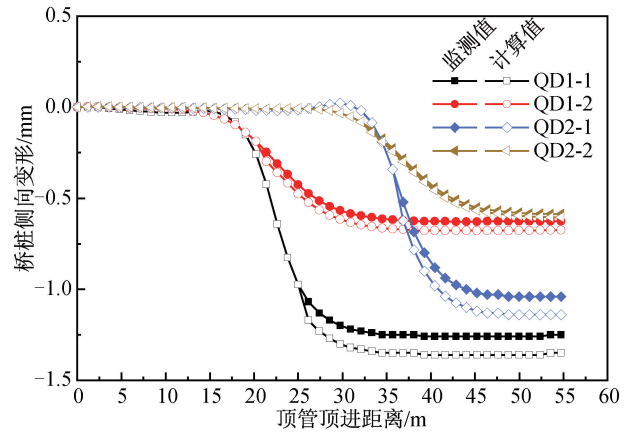


图11 桥基水平变形计算值与实测值对比

Fig. 11 Comparison between the calculated and measured horizontal deformations of bridge foundation

3.3 土体收缩率对既有结构变形的影响

为研究顶管顶进时不同土体收缩率对既有结构变形的影响,本文共设计5组模型,土体收缩率分别为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和 0.5%。选取箱涵变形最大点 K2-6 与桥基监测点 QD1-1 进行分析,见图12、图13。由图可知,隧道收缩率越大,对箱涵和桥基的影响也就越大,其变形也就越大。当收缩率为 0.5%时,污水箱涵最大变形约为 3.0 mm,桥基最大水平位移约为 1.3 mm。当顶管顶进 26 m 左右,即开始穿越箱涵时,由于顶管机前方土体受到挤压向上隆起,限制了污水箱涵的变形,故出现图12中箱涵竖向位移向上突变的趋势。不同的隧道收缩率对箱涵和桥基的影响趋势相同,隧道收缩率越大,对二者的变形影响也就越大。

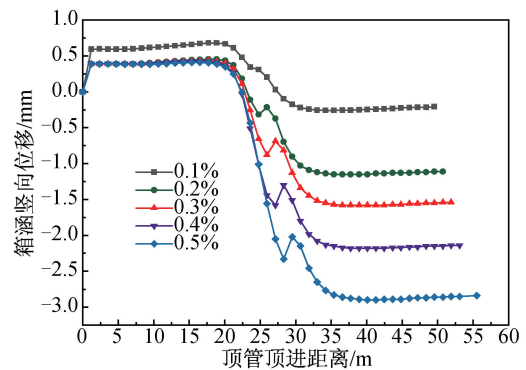


图12 不同隧道收缩率下箱涵变形

Fig. 12 Deformation of box culvert under different shrinkage rates of tunnel

3.4 箱涵与顶管间距对既有结构变形的影响

为研究管线与顶管之间不同间距对既有结构变形的影响,通过改变模型中 2.3 m \times 2.8 m 污水

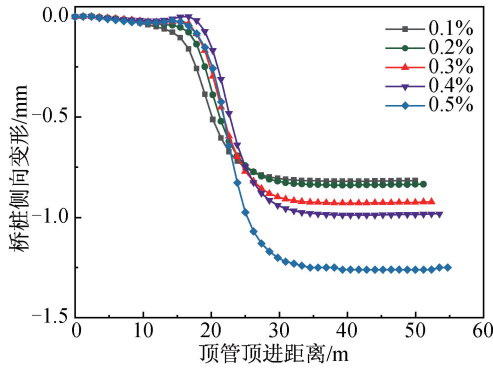


图 13 不同隧道收缩率下桥基水平变形

Fig. 13 Horizontal deformation of bridge foundation under different shrinkage rates of tunnel

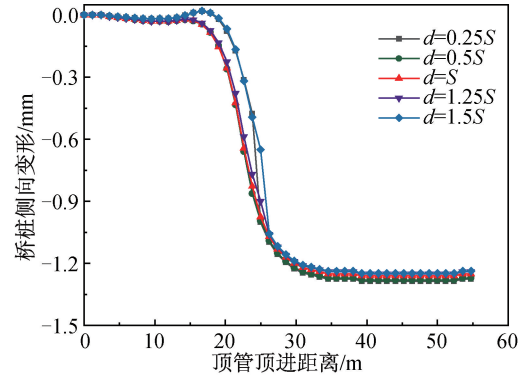


图 15 不同间距下桥基水平变形

Fig. 15 Horizontal deformation of bridge foundation under different spacing

箱涵与矩形顶管的间距 d 进行模拟,共设置 5 组模型,分别为 $0.25S$ 、 $0.5S$ 、 S 、 $1.25S$ 和 $1.5S$,其中, $S=2.0$ m (初始距离)。不同间距下箱涵(K2-6)与桥基(QD1-1)的变形规律,见图 14、图 15。由图 14 可知,间距 d 越小,顶管施工对箱涵的扰动越大,随着 d 的增加,箱涵的变形逐渐减小。当 d 为 $0.25S$ 时,箱涵最大变形约为 3.1 mm,当 d 为 $1.25S$ 和 $1.5S$ 时,箱涵最大沉降几乎相同,这说明当间距增大到一定距离后,顶管施工对箱涵的影响较小,维持在稳定区域。由图 15 可知,箱涵与顶管间距的变化,对临近桥基变形影响十分微小。

的增加,桥基的侧向变形规律基本一致,呈现逐步增大趋势,但增加速率较低,掌子面压力从 $0.1P$ 增加到 $2P$,变形最大增幅仅为 0.5 mm。表明,掌子面压力的增加,对箱涵变形有影响,但对桥基变形影响较小。

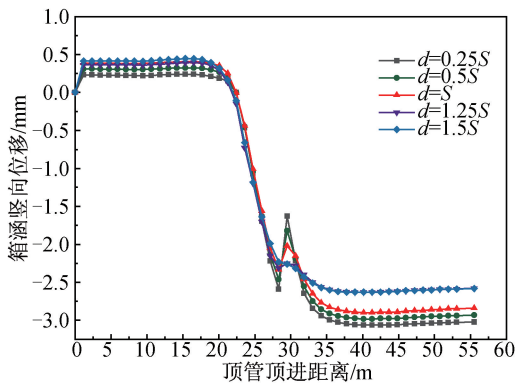


图 14 不同间距下箱涵变形

Fig. 14 Deformation of box culvert under different spacing

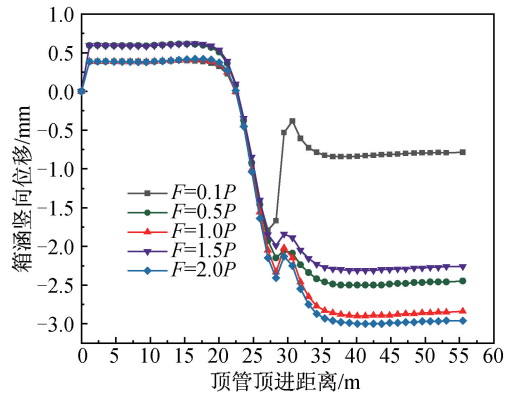


图 16 不同掌子面压力下箱涵变形

Fig. 16 Deformation of box culvert under different support pressures

3.5 掌子面压力对既有结构变形的影响

为研究不同掌子面压力对既有结构变形的影响,通过更改模型中的掌子面压力 F 进行模拟,共设置 5 组模型,分别为 $0.1P$ 、 $0.5P$ 、 P 、 $1.5P$ 和 $2P$, $P=160$ kPa (初始掌子面压力)。不同掌子面压力下箱涵(K2-6)与桥基(QD1-1)的变形规律,见图 16、图 17。由图 16 可见,当 F 为 $0.1P$ 时,箱涵的变形明显小于 $0.5P$ 对应的变形;而当 F 大于 $0.5P$ 后, F 的增加对箱涵变形几乎没有影响。随着 F

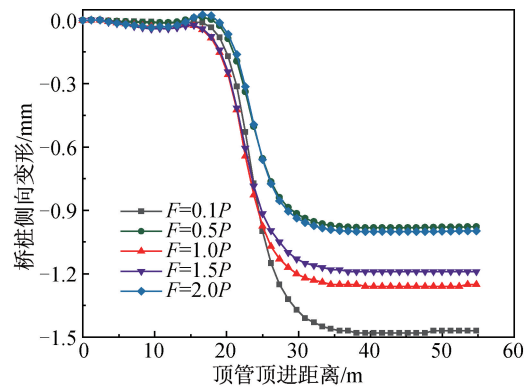


图 17 不同掌子面压力下桥基水平变形

Fig. 17 Horizontal deformation of bridge foundation under different support pressures

4 结论

1) 顶管施工会使上部管线出现中间沉降大, 两端轻微隆起的现象, 管线具体变形量取决于管线与顶管的距离以及其自身材料性质; 当顶管到达桥基时, 由于土体受到顶管挤压, 桥基主要发生远离顶管方向的水平位移, 靠近顶管侧桥基的变化速率大于较远一侧, 且变形在顶管继续顶进 10 m 后趋于稳定。

2) 建立了基于注浆压力、顶推力、掌子面压力及土体损失的顶管、土体及临近既有结构相互作用的三维有限元模型, 计算结果与工程实测误差约 20%。

3) 既有结构与地表变形受土体收缩率影响较大, 随着土体收缩率的增加, 既有结构的竖向变形呈线性增加, 因此在顶管施工过程中应注意超挖引起过大的土体损失。当间距 d 小于 $1.25S$ 时, 随着 d 的增加, 箱涵变形逐渐减小; 但当 d 大于 $1.25S$ 后, d 的增加对箱涵变形不再有明显影响。当掌子面压力 F 为 $0.1P$ 时, 箱涵的变形明显小于 $0.5P$ 对应的情况, 而当 F 大于 $0.5P$ 后, F 的增大对箱涵和桥基变形不再有较大影响。

参考文献:

- [1] 马鹏, 岛田英树, 马保松, 等. 矩形顶管关键技术研究现状及发展趋势探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(10): 1677-1692.
- [2] 魏纲, 朱奎. 顶管施工对邻近地下管线的影响预测分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(03): 825-831.
- [3] 刘波, 章定文, 刘松玉, 等. 大断面顶管通道近接穿越下覆既有地铁隧道数值模拟与现场试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(11): 2850-2860.
- [4] 吴垠龙, 刘维, 贾鹏蛟, 等. 矩形顶管近距离上穿既有隧道施工扰动分析[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(6): 1968-1978.
- [5] 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(03): 441-445.
- [6] 杨朝帅, 邹翀, 潘岳. 大断面矩形小净距顶管隧道群施工地层变形规律研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(05): 111-117.
- [7] WANG Y, ZHANG D, FANG Q, et al. Analytical solution on ground deformation caused by parallel construction of rectangular pipe jacking[J]. Applied Sciences, 2022, 12(7): 3298.
- [8] MA S, LI M, JIN J, et al. The influence of shallow buried double-line parallel rectangular pipe jacking construction on ground settlement deformation[J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(1): 1911-1916.
- [9] MA P, SHIMADA H, SASAOKA T, et al. A new method for predicting the friction resistance in rectangular pipe-jacking[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 123: 104338.
- [10] LIU W, WU B, SHI P, et al. Analysis on face stability of rectangular cross-sectional shield tunneling based on an improved two-dimensional rotational mechanism[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(11): 3725-3738.
- [11] 刘维, 吴奔, 史培新, 等. 浅埋矩形隧道掘进面被动失稳混合破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S1): 2673-2683.
- [12] LIU W, SHI P, YU M, et al. Analysis of working face stability during obstruction removal from a box tunnel machine[J]. Acta Geotechnica, 2022, 17(10): 4627-4639.
- [13] 王紫娟, 严佳佳, 秦龙, 等. 矩形顶管掘进地层变形规律数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15349-15357.
- [14] 袁心, 马保松, 赵阳森, 等. 矩形顶管施工中管周压力的实测与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1225-1233.
- [15] 张治成, 林思, 王金昌, 等. 矩形管廊顶管施工对邻近管线的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 244-249.
- [16] 冯海宁, 龚晓南, 徐日庆. 顶管施工环境影响的有限元计算分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(07): 1158-1162.

(责任编辑 周雪梅)