

软土地区长距离大断面矩形顶管平行施工 影响机理研究

胡文

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市200092]

摘要:以上海市陆翔路-祁连山路贯通工程445 m长距离大断面矩形顶管平行施工为背景,分析推导了大断面矩形顶管断面尺寸、极限覆土和平行顶管极限净距取值的计算公式。通过对地表变形、超孔隙水压力、顶管顶力及侧摩阻力实测数据的规律及发展分析,探讨了软土地区长距离大断面矩形顶管平行施工影响机理,为今后类似矩形顶管工程提供借鉴意义。

关键词:矩形顶管;长距离平行施工;地表变形;超孔隙水压力;顶管顶力;顶管侧摩阻力

中图分类号: TU94

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)09-0177-05

0 引言

矩形顶管20世纪70年代初首次在日本东京成功应用于联络通道的施工之中,经过近半个世纪的技术积淀,已逐渐发展成一项可媲美盾构的非开挖技术,在超浅覆土等条件下甚至会比盾构方案更具优越性。随着市政建设的蓬勃发展,近十年来矩形顶管工程已在国内多个城市落地^[1]。

尽管矩形顶管已运用较多,但软土地区大断面矩形顶管平行施工的工程案例相对较少,而系统研究长距离矩形顶管平行施工影响的文献更是鲜有可循。目前关于顶管平行施工机理的研究主要集中在圆形顶管,魏纲^[2]通过实测数据对圆形平行顶管施工引起的地面变形规律进行了分析,推导了圆形平行顶管推进引起的附加荷载计算公式;李博^[3]通过室内试验研究了圆形平行顶管的相互作用。

相对于国内外圆形顶管工程案例,矩形顶管断面尺寸更大,覆土深度与跨度比值 H/D 更小,对地层及周边环境的扰动效应更明显,且由于软土地层自身灵敏度大、压缩性高的特点,平行顶管施工影响效应更显著。

本文以上海市陆翔路-祁连山路贯通工程为背景,探讨研究软土地区大断面矩形顶管平行施工影响机理,可为以后类似平行顶管工程关键参数确定

提供借鉴。本文主要从以下两方面展开:

(1)对工程方案中3个关键顶管尺寸参数进行了分析,研究各参数制约因素及相互影响机理。

(2)通过对平行顶管施工期间地表变形及超孔隙水压力实测数据的分析,探讨矩形顶管平行施工对周边环境的影响及规律。

(3)通过对顶管掌子面支护压力及侧摩阻力实测数据的分析,研究影响顶管顶力的关键因素,并提供相关参数建议取值。

1 工程概况

上海市陆翔路-祁连山路贯通工程是打通区与区之间连接的上海市重点项目,本工程受S20外环高速公路保通要求及顾村公园环境保护限制,在下穿该区间时采用类矩形顶管施工^[4]。

矩形顶管外轮廓尺寸为 $9.9\text{ m}\times 8.15\text{ m}$,两条平行顶管之间净距 10.0 m ,单向顶进长度 445 m ,纵坡 0.3% 。顶管从北端始发井出洞后,沿线连续浅覆土穿越樱花林、公园有轨小火车、明浜、 $\phi 800\text{ mm}$ 次高压燃气管、S20外环高速及 $\phi 1\,400\text{ mm}$ 给水管等众多复杂节点,在S20南侧接收井进洞,本工程平面及纵断面布置见图1。

顶管沿线覆土较浅,最小处厚度仅有 3.5 m ,最小覆土与跨度之比 C/D 仅有 0.35 。顶管全线穿越地层为上海典型的浅层全新世Q4沉积层软土层③层灰色淤泥质粉质黏土和④层灰色淤泥质黏土,流塑状态,土体强度低、压缩性高、含水量高、渗透性差、灵敏

收稿日期:2021-12-12

作者简介:胡文(1987—),男,硕士,工程师,国家注册土木工程师(岩土),从事地下结构工程设计与研究工作。

度高,具有触变性和流变性特性。

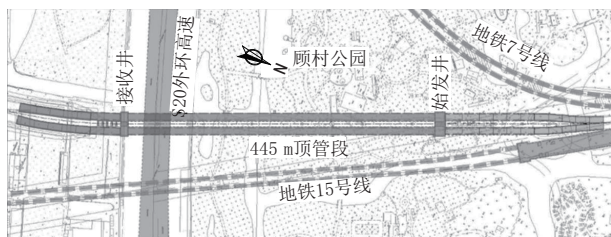


图1 陆翔路平行顶管平面布置图

2 矩形顶管工程尺寸参数及极限值

平行矩形顶管工程在方案决策过程中,从工程可行性、安全性及经济性角度出发,应重点考虑、确定以下几个关键尺寸参数。

2.1 顶管断面尺寸

顶管结构为道路通行提供空间,其断面尺寸除受道路车道规模的影响外,还受建筑、暖通、消防、电气及监控等众多专业功能的限制。由于顶管断面尺寸的增加不仅会提升工程造价,也会给道路展线、顶管施工带来不利因素,同时更会影响后序相关顶管参数的决策,因此确定合适的顶管断面尺寸成为首先需要解决的问题。

以陆翔路顶管为例,车道规模双向4车道,城市主干路,设计时速50 km,单向车道建筑限界宽度为8.0 m,限高4.5 m。综合考虑设备及建筑装饰空间,横向净宽两侧各取0.25 m(部分设备箱体需要特殊订制);竖向考虑风机尺寸、管线桥架布置、底部铺装及类矩形起拱等因素,结构内净空尺寸达8.5 m×6.75 m,如图2所示。考虑结构壁厚0.7 m,外轮廓尺寸达9.9 m×8.15 m,参考国际隧道协会(ITA)分类原则已达大型隧道规模。

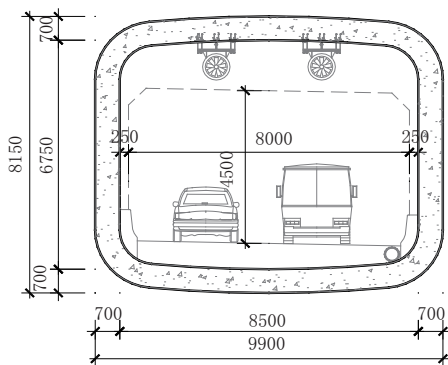


图2 类矩形顶管断面布置图(单位:mm)

因此,在保证道路限界的情况下,应合理安排内部配套设备、桥架及消防管线等布置,选用空间需求较小的建筑装饰方案,以降低顶管断面尺寸需求。

2.2 顶管覆土厚度与极限值

覆土厚度对顶管施工安全性的影响主要在于顶

管掌子面稳定性和背土效应。对顶管掌子面稳定性的影响可参考盾构隧道相应的研究理论,但相比于常规盾构隧道埋深,矩形顶管覆土与跨度之比C/D更小,掌子面支护压力及失稳机制受覆土厚度的影响更明显^[5]。顶管顶进过程中的背土效应受覆土厚度影响亦显著。尤其对于浅覆土情况,由于顶管上方卸载拱无法形成,顶部全覆土荷载施加于顶管顶板结构,当顶管顶部侧摩阻力超过土体抗剪承载力时,将导致正上方土体伴随管节整体平移,发生整体背土破坏。

因此,从工程安全角度出发覆土厚度不宜太小。在满足结构抗浮稳定需求下,增加覆土厚度不仅会导致顶管断面尺寸及配筋的提升,亦会显著增加工作井及两侧接线明挖段的工程造价。

从防止整体背土效应发生角度出发可推导出顶管极限覆土厚度 h_{cr} ,对于长距离浅覆土顶管,背土前方土压力占比较小可忽略不计(见图3):

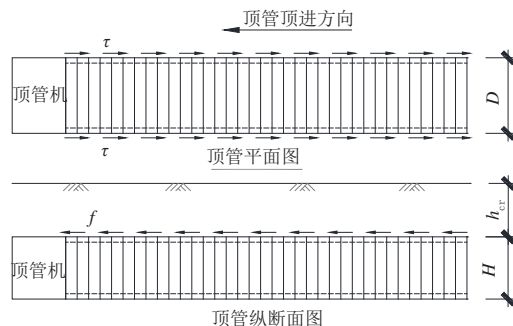


图3 顶管背土效应产生机理示意图

$$\int_0^{h_{cr}} 2\tau dh = \int_0^{h_{cr}} 2(c + k_0 \gamma h \tan \phi) dh = \eta f D \quad (1)$$

式中: τ 为土体抗剪强度,kPa; c 为土体内摩擦角,kPa; ϕ 为土体内摩擦角, $(^\circ)$; γ 为土体重度,kN/m³; k_0 为土体侧压力系数; f 为(减摩注浆)侧摩阻力,kPa; η 为安全系数,建议取1.5~2.0; h 为覆土厚度,m; D 为顶管跨度,m。

以本工程为例: $c=10$ kPa, $\phi=12^\circ$, $\gamma=17.5$ kN/m³, $k_0=0.75$, $f=5$ kPa(预估), $\eta=1.5$, $D=9.9$ m,计算极限覆土 $h_{cr}=3.0$ m。

当顶管覆土接近极限覆土时,顶管顶进过程中应采取减摩注浆、地表堆载或加固隔断等措施,防止突发性的整体背土破坏发生。

2.3 平行顶管净距及极限值

双线平行顶管荷载分布模式与单线顶管存在较大差异,因此为减小相邻顶管间的相互影响,控制顶管施工对周边环境扰动,减小后行顶管对先行顶管隧道的影响,宜适当确保平行顶管净距。尤其对于长

距离顶管隧道,由于施工工期长,顶管侧向扰动一直存在,合理设置顶管净距的意义更加明显。

在道路两侧展线允许的情况下,参考盾构经验,平行隧道净距建议不宜小于 $1.0D^{[6]}$,否则将增加施工风险,导致工期及技术措施费用增加。但由于矩形顶管较难完成曲线顶进以实现类似盾构在工作井逐步减小净距的目的,因此从提升两侧道路行车舒适度、降低工作井及明挖接线段造价等角度出发,不宜将顶管间距设置太大。

从土体力学平衡角度分析,当减摩注浆达到式 2 效果时,即可保证顶管间土体的相对稳定:

$$f \leq \tau \tag{2}$$

式(2)中参数意义同式 1。

为避免后行顶管泥膜形成受先行顶管泥膜的影响,顶管净距极限值 d_{cr} 可取泥膜形成过程中受泥浆渗透影响的土层厚度的 2 倍:

$$d_{cr}=2 \lambda c_s \tag{3}$$

式中: λ 为泥膜厚度与受泥浆渗透影响土层的厚度的比值; c_s 为泥膜厚度,m。

泥膜的形成与周围土体的渗透性密切相关[7],文献[8]提供了平均泥膜厚度的计算公式,黏性土层中泥膜厚度大约为 0.05 m, λ 一般取 5~10,因此平行顶管极限净距可取 0.5~1.0 m(见图 4)。

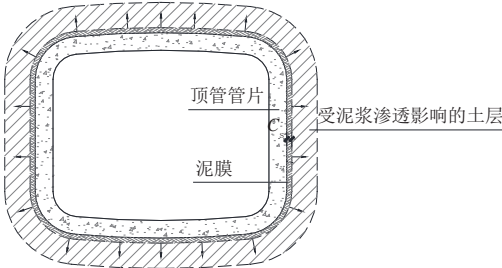


图 4 顶管周围泥膜及泥浆渗透示意图

2.4 顶管工程案例

国内外与本工程矩形顶管类似规模的已建顶管工程案例相关参数取值如表 1。

表 1 国内外矩形顶管工程典型案例参数对比

顶管案例	时间	长度 /m	断面尺寸 /m	最小覆土 /m	间距 /m
美国波士顿中央大道顶管	1989	112	7 × 5	2.0	-
郑州市中州大道顶管	2014	105	10.1 × 7.25	4.0	1.0
上海市陆翔路—祁连山路顶管	2019	445	9.9 × 8.15	3.5	10.0
嘉兴市下穿南湖大道顶管	2020	100.5	14.8 × 9.426	5.85	1.2
上海市淞沪路—三门路顶管	2020	163	9.8 × 6.3	11.6	4.4

表中所列工程案例中除美国波士顿案例为单线顶管外,其余案例均为平行顶管。嘉兴市顶管案例断面尺寸最大;波士顿顶管案例断面相对最小,覆土最浅接近本文公式计算极限覆土值。郑州市及嘉兴市两平行顶管水平净距最小,均已接近本文建议的极限净距值。

3 顶管实测结果分析

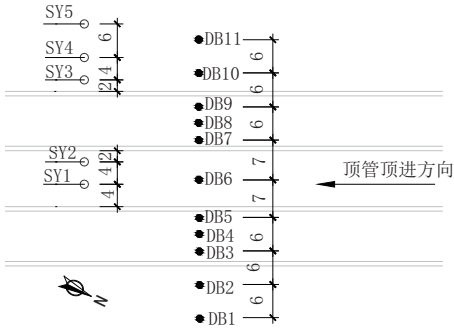
3.1 监测方案及测点布置

顶管施工会改变周围地层的初始应力分布,对周围土体产生扰动。为分析研究顶管施工对周边环境的影响及平行顶管施工影响机理,本工程在顶管中间典型区段布置了以下监测点:

(1)地表沉降监测点:DB1~DB11。

(2)超孔隙水压力监测点:SY1~SY5。

以上监测点均沿顶管横向布置,顶管覆土厚度约 5.05 m,各测点平面布置如图 5 所示。



注:孔隙水压力监测点在东线顶管施工完成后埋设。

图 5 顶管监测点布置平面图

3.2 地表变形及发展规律分析

顶管施工引起的地层扰动会随顶进逐步积累,其发展是一个三维动态的过程,顶管施工对地层扰动影响程度可以直观反映在地表变形上。

采用 Peck 公式^[9]来拟合顶管引起的地表变形已被学术及工程界广泛接受:

$$S(x)=\frac{V}{i\sqrt{\pi}}\exp(-\frac{x^2}{2i^2}) \tag{4}$$

式中: $S(x)$ 为距离顶管中心线 x 处地表变形; V 为地层损失体积; i 为地表沉降槽宽度系数;Peck 建议 $i/R=(z/2R)$, z 为隧道中心埋深, R 为隧道(等效)半径,软黏土地层建议取 $n=0.8$ 。

图 6、图 7 分别对应顶管横向实测地表变形图及顶进地表变形进程曲线图。

分析得到如下规律:

(1)先行顶管计算地层损失率约 0.77%,后行顶管计算地层损失率约 0.82%,反应出先行顶管对后

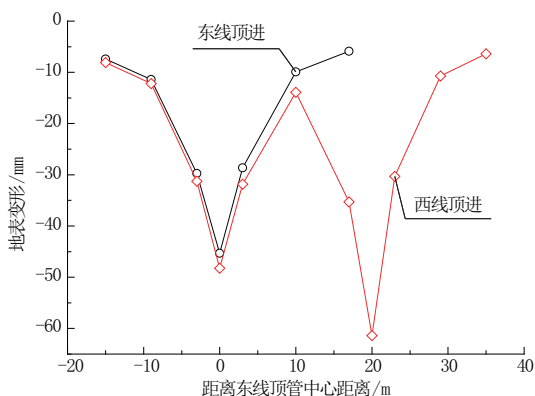


图6 顶管横向实测地表变形图

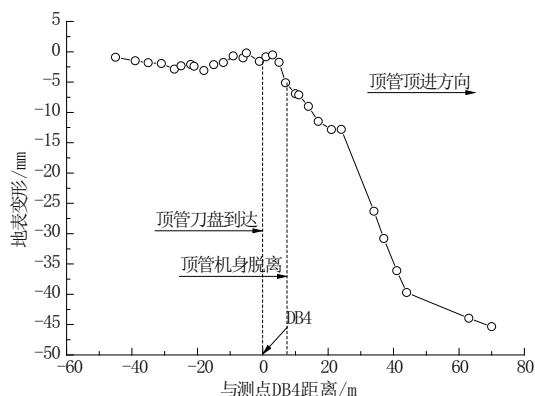


图7 顶管地表变形进程曲线图

行顶管扰动具有一定影响,但由于平行顶管净距已达1D,因此相互影响效应已较弱。

(2)单线顶管施工引起的地表变形采用Peck公式拟合确定的沉降槽宽度系数 $i=2.8\text{ m}$, $n=0.84$,与建议计算公式接近。

(3)平行顶管地表变形为不对称的 ω 曲线,与采用两者线性叠加公式拟合曲线吻合度高:

$$\Sigma S(x) = S_1(x) + S_2(x-x_0) \quad (5)$$

式中: x_0 为平行顶管中心距; S_1 、 S_2 分别对应于先行顶管、后行顶管施工引起的地表变形分量;由于先行顶管对地层的先期扰动效应,当预测顶管变形时后行顶管地层损失率 r_2 一般较先行顶管对应 r_1 取值大。

(4)经分析地表变形在顶管到达以前发展较小,以东线上方DB4测点竖向变形发展曲线为例,前期变形占比不足10%,地表变形主要发生在顶管机到达及脱离以后的阶段。

(5)由于顶管顶进过程中会对周边土体产生持续扰动,施工引起的地表变形发展持续时间长,顶管机头穿越此监测点达4倍顶管跨度时地表变形仍在发展,这是与盾构引起的地表变形规律差异最为显著的特征。

3.3 超孔隙水压力分布及发展规律分析

顶管顶进时会对周边地层产生挤压,形成超孔

隙水压力,由于软土地层渗透性差,超孔隙水压力消散较慢,因此通过对超孔隙水压力监测能分析顶管对周边土体的扰动情况。

图8、图9分别对应西线顶管施工期间超孔隙水压力监测点进程、时程发展曲线,图10为超孔隙水压力横向分布图。

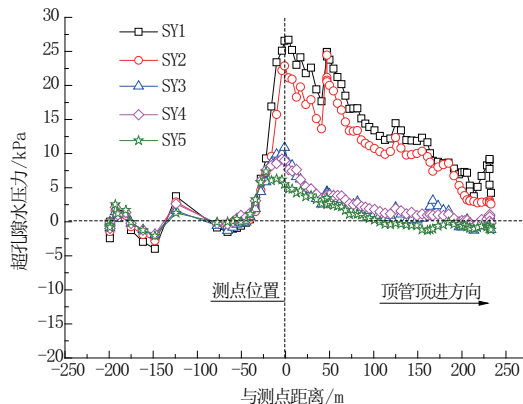


图8 SY1~SY5 超孔隙水压力进程发展曲线图

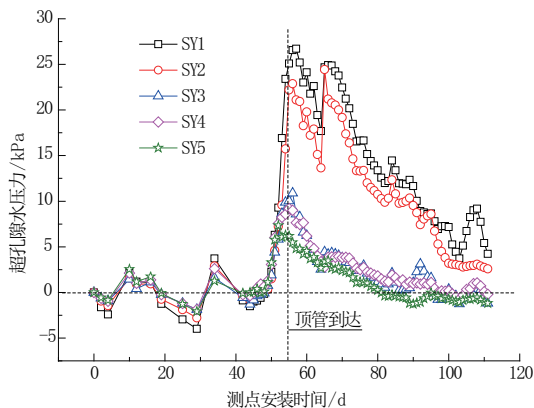


图9 SY1~SY5 超孔隙水压力时程发展曲线图

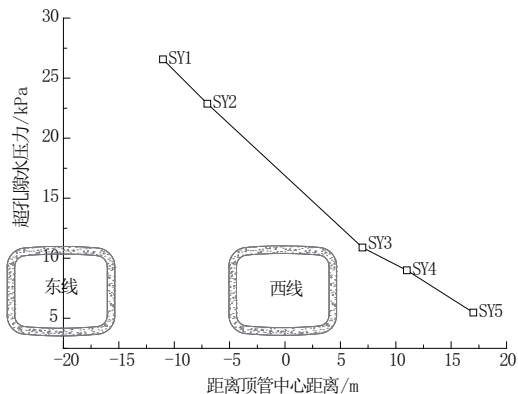


图10 SY1~SY5 顶管到达阶段超孔隙水压力横向空间分布图

分析可知具有以下规律:

(1)最大超孔隙水压力发生在顶管接近至到达期间,在顶管到达前约2倍顶管跨度时已产生超孔隙水压力,这是与地表变形规律不同之处,也可反应出软土地层中顶管扰动引起的地表变形存在一定滞后性的特点。

(2)超孔隙水压力随着顶管机头远离逐渐消散,消散曲线近似与时间呈线性关系,且超孔隙水压力增幅越大,消散斜率绝对值亦越大。

(3)顶管横向最大超孔隙水压力发生在 SY1 测点,约 26.6 kPa。分析认为由于东线顶管存在隔离阻挡作用导致两顶管中间超孔隙水压力无法向外界传递,因此导致 $SY1 > SY2, SY2 > SY3$, 相比地表变形更能直观反映出软土地区平行顶管的相互影响。

(4)西线顶管右侧由于没有地下结构阻挡,可以间接反应出由单线顶管引起的超孔隙水压力空间的分布情况,其规律为近似随距离呈线性递减分布。最小超孔隙水压力发生在与西线顶管外侧 1.2 倍跨度的 SY5 测点,约为 5.5 kPa,仅削减至 SY3 的 50%,可知超孔隙水压力对顶管施工的扰动更敏感。

3.4 顶管掌子面支护压力及侧摩阻力规律分析

顶管顶力由掌子面支护压力和侧摩阻力两部分组成,关于前者的研究可参考盾构开挖面稳定的相关研究^[10],但关于侧摩阻力的取值及文献系统研究较少。因此侧摩阻力取值成为长距离大断面顶管方案确定过程中的关键因素^[1],影响顶管顶力计算、后靠及中继间的布置。

图 11~ 图 13 为本工程顶管掌子面支护压力及侧摩阻力进程曲线。

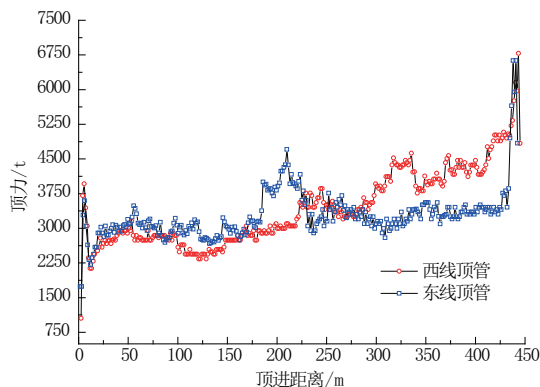


图 11 顶管顶进顶力进程曲线图

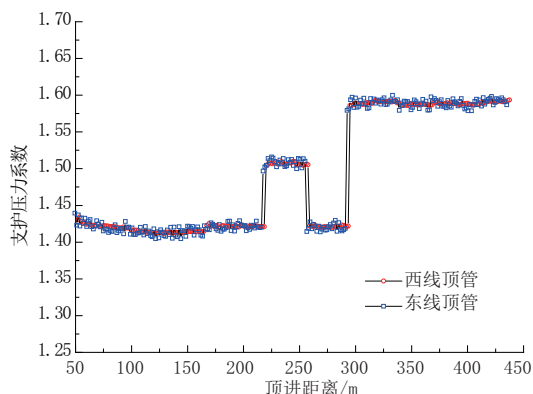


图 12 顶管支护压力系数进程曲线图

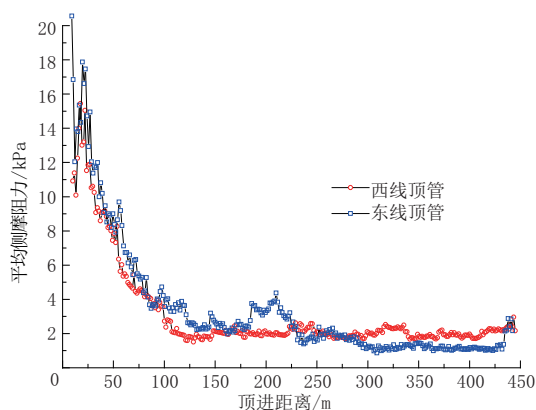


图 13 顶管平均侧摩阻力进程曲线图

分析可知具有以下规律:

(1)东、西顶管最大值约 6 700 t,均发生在顶管进洞期间,最大顶力与前期根据规范^[11]所预测的值存在一定差异。东线顶管施工受新冠疫情及春节影响施工进度放缓,顶管周围泥膜局部流失,导致在 175~225 m 顶进期间出现顶力大幅增加。西线顶管施工进度顺利,顶力平稳增长。顶管进洞前期筹备工作导致顶进放缓,顶力曲线进洞期间大幅增长,涨幅接近 30%。

(2)掌子面支护压力系数在 1.4~1.6,与朗肯被动土压力系数取值接近。掌子面支护力受施工进度因素影响小,主要受覆土厚度及穿越地层情况影响,软黏土地区可采用水土合算。

(3)在前期顶进阶段,由于顶管周围泥膜处于形成期,泥浆套未能完全闭合,平均侧摩阻力较大,平均达到 5~15 kPa,因此对于短距离的顶管,在顶力估测时应适当考虑此因素导致的顶力放大效应。

顶管后期顶进阶段,由于泥浆套逐步稳定闭合,平均侧摩阻力减小至 1.7~4.6 kPa,全线顶管平均侧摩阻力约 3.0 kPa。

(4)本工程由于平行顶管净距已达 1 倍顶管跨度,因此先行顶管施工对后行顶管支护压力及侧摩阻力无明显相关影响。

4 结 语

通过陆翔路-祁连山路贯通工程,本文分析研究了大断面矩形顶管断面尺寸、极限覆土和平行顶管极限净距取值,通过对地表沉降、超孔隙水压力分布及发展规律、顶管顶力及侧摩阻力实测结果的系统分析,探讨了平行顶管施工影响机理。主要得到以下结论:

(1)从防止顶管发生整体背土效应角度出发,推导了长距离矩形顶管极限覆土厚度 h_{cr} 。

(2)从泥膜形成角度提出了平行顶管极限净距的建议公式,能较好地为目前国内已有顶管案例取值提供理论依据。

(3)软土地区顶管引起的地表变形在顶管接近前不明显,主要发生在顶管机到达及脱离以后的阶段,且具有持续时间长的特点。地层损失率约0.8%。

(4)平行顶管引起的地表变形呈不对称的 ω 曲线,采用Peck公式线性叠加能较好地拟合,后行顶管引起的地层损失率大于先行顶管。

(5)软土地区顶管引起的超孔隙水压力在顶管到达前即已开始产生,随着顶管机头远离逐渐呈线性消散。超孔隙水压力在顶管周围空间分布随距离亦呈线性递减分布。

(6)顶管施工期间临时放缓或停滞会大幅提升顶管顶力,掌子面支护压力系数可按朗肯被动土压力取值,平均侧摩阻力计算值在顶管前期泥浆套形成闭环以前取值较大,后期阶段逐步较小,软土地区平均取值约3.0 kPa。

参考文献:

- [1] 彭立敏,王哲,叶艺超,等.矩形顶管技术发展与研究现状[J].隧道建设,2015,2015(1):1-8.
- [2] 魏纲,魏新江,屠毓敏.平行顶管施工引起的地面变形实测分析[J].岩石力学与工程学报,2006,(S1):3299-3304.
- [3] 李博,许焯霜,马磊,等.平行顶管近接施工的室内试验研究[J].地下空间与工程学报,2014(1):67-71,155.
- [4] 胡文.软土地区大断面矩形顶管浅覆土下穿高速变形控制分析研究[J].城市道桥与防洪,2021,264(4):108-114,17.
- [5] 付亚雄,郑宏.软黏土地层顶管隧道掌子面稳定性数值研究[J].地下空间与工程学报,2017(S2):623-632.
- [6] DG/T J08-2033—2017,道路隧道设计标准[S].
- [7] 胡欣雨,张子新,徐营.黏性土层中泥水盾构泥浆作用对开挖面土体强度和侧向变形特性影响研究[J].岩土工程学报,2009(11):1735-1743.
- [8] 尹鑫晟.泥水盾构成膜规律及开挖面稳定性[D].杭州:浙江大学,2017.
- [9] Peck R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]//Proc. 7th Int International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1969: 225-290.
- [10] 张子新,胡文.黏性土地层中盾构隧道开挖面支护压力计算方法探讨[J].岩石力学与工程学报,2014,33(3): 606-614.
- [11] DG/T J08-2049—2016,顶管工程施工规程[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com