

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.08.085

软土地区超大断面矩形顶管施工地表沉降分析

冯栋梁

(上海市市政工程建设发展有限公司, 上海市 200025)

摘 要: 依托上海市某矩形顶管工程实测数据,对超大断面矩形顶管施工引起的地表轴线沉降、剖面沉降和随顶进里程变化特点等进行了分析,提出了矩形顶管施工沉降控制要点。同时,结合实测数据探讨了 Peck 公式在超大断面矩形顶管沉降预测中的适用性,为同类工程沉降槽宽度系数、地层损失的取值提供经验参考。

关键词: 超大断面;矩形顶管;地表沉降;Peck 公式

中图分类号: TU990.3 文献标志码: B 文章编号: 1009-7716(2021)08-0326-03

0 引 言

矩形顶管断面空间有效利用率高,对节约地下空间资源、提高地下空间利用率具有十分重要的意义。因此,在地下空间资源紧张的城市核心区,矩形顶管往往具有较强的适用性。20 世纪 90 年代末,该工法在上海地铁 2 号线陆家嘴站 5 号出入口地下人行通道工程中首次成功应用^[1]。随后,在国内地铁车站出入口通道^[2-7]、过街人行地道^[8,9]等许多工程中得到了应用。

近年来,随着超大断面矩形顶管技术的发展,矩形顶管在城市地下通道建设中也得到了应用。矩形顶管的发展呈现出断面越来越多、顶进距离越来越长的趋势。矩形断面与圆形断面相比,在施工时对周边环境的影响更为显著,尤其在城市核心区内,要重点关注矩形顶管施工引起的土体沉降问题。Peck 公式^[10,11]以其经验性和实用性在地下工程沉降预测中得到广泛应用。目前,超大断面矩形顶管长距离穿越案例较少,对其土体沉降实测数据还不多,Peck 公式用于其沉降预测的可靠性需进一步验证。

本文结合上海某顶管工程,分析了大断面矩形顶管施工引起的地表沉降,并对应用 Peck 公式进行矩形顶管沉降预测进行了探讨。

1 工程概况

上海某地下车行通道工程,其中穿越合流污水箱涵段采用超大断面矩形顶管技术实施。如图 1 所示,

该顶管为双线顶管,长度 163 m,断面尺寸 9.8 m×6.3 m(长×高),两根顶管等标高,水平净距 3.4 m,顶管覆土厚度约 12 m。顶管主要下穿构筑物为:9.85 m×4.3 m(长×宽)合流污水箱涵,最小垂直净距约 4.2 m;上部已建地下通道,最小垂直净距约 3.4 m。

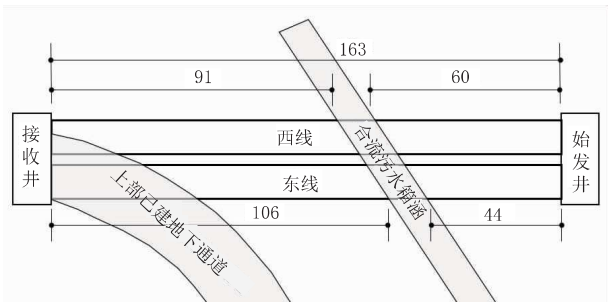


图 1 顶管及周边环境平面图(单位:m)

顶管通道土层分布自上而下分别为②₁层粉质黏土夹粉质粉土、②₃₋₁层粉质砂土、②₃₋₂层粉砂、③层淤泥质粉质黏土、④层淤泥质黏土、⑤₁层粉质黏土。其中,顶管主要穿越②₃₋₁层粉质砂土、④层淤泥质黏土。主要土层参数见表 1。

表 1 主要土层物理参数

编号	厚度 /m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$K/(\text{cm}\cdot\text{s})$
② ₁	1.06	18.9	14	27.5	—
② ₃₋₁	10.84	18.5	6	30.5	4.06E-5~2.06E-4
② ₃₋₂	2.99	18.7	4	30.5	—
③	3.03	17.3	12	15.5	—
④	5.61	16.9	14	11.5	1.24E-5~1.58E-5
⑤ ₁	3.67	18.2	16	20.5	6.96E-6~1.45E-5

顶管穿越范围内为潜水,离地面 -1.5~0.3 m,年平均地下水水位埋深离地面 -0.7~0.5 m。

收稿日期: 2021-05-18
作者简介: 冯栋梁(1989—),男,硕士,工程师,长期从事重大工程项目管理、科研工作。

顶管始发井和接收井洞门设置三轴搅拌桩进出洞加固,宽度 9 m。针对顶管穿越主要土层(②₃₋₁ 层粉质砂土)流动性较强的特点,对穿越箱涵范围内采用了综合性加固方案。在箱涵和支管底部进行 MJS 加固托衬,并在穿越箱涵范围采用双轴搅拌桩等加固工艺形成顶管隔离仓,减少土层液化时对周边环境的影响范围。

2 地表沉降监测数据分析

2.1 顶管施工引起的地表纵轴线沉降分析

图 2、图 3 分别为东线、西线顶管轴线的地表沉降曲线。可以看到:

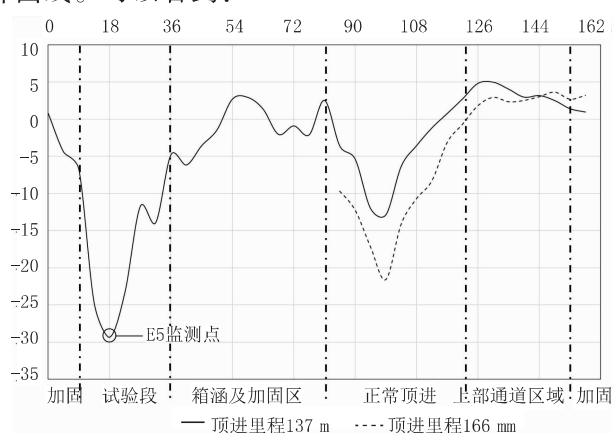


图 2 东线顶管轴线地表沉降曲线

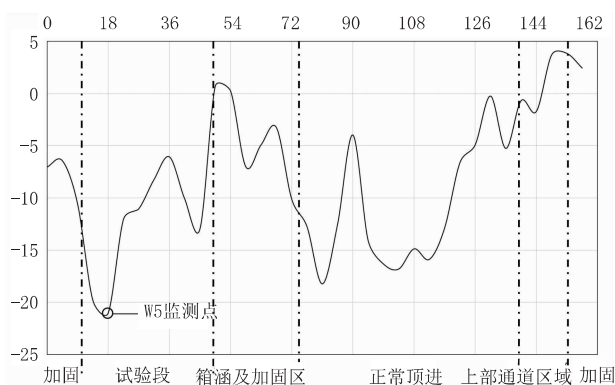


图 3 西线顶管轴线地表沉降曲线

(1) 进出洞加固、箱涵加固对减少顶管扰动效果明显。箱涵范围、已建上部通道区域由于既有结构存在,对顶管扰动产生隔离效果,相关区域地表变形显著减小。

(2) 在未加固区域,试验段最大沉降量大于正常顶进段沉降量,沉降随顶进距离而发展,体现了顶管施工工艺特点。

(3) 东线、西线地表沉降最大点均位于试验段 5 号(E5、W5)监测点附近,E5 点最大沉降约 29.3 mm (顶进里程 137 m,此时已趋于稳定),W5 点最大沉降约 21.0 mm。

2.2 地表沉降随顶进里程变化分析

图 4 为 E5 监测点沉降随顶进里程变化曲线。地层损失产生的主要阶段发生在切口到达监测点至盾尾离开监测点这一过程,其后在泥浆套减摩和保压作用下,沉降趋于稳定。因此,在矩形顶管施工中,扰动最大的过程为机头穿越过程。其后随着管节推进持续对土体进行扰动,但在泥浆套作用下,管节推进带来的土体扰动可达到稳定值。

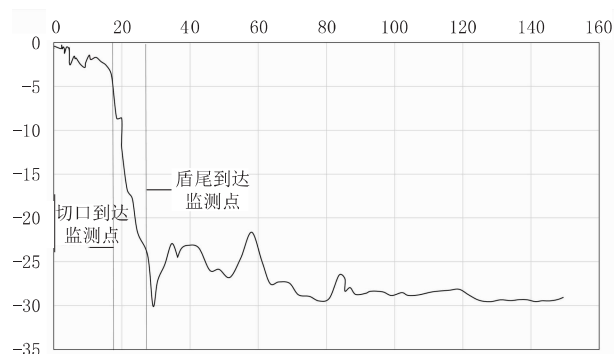


图 4 东线 E5 监测点沉降随顶进里程变化曲线

2.3 顶管施工引起的地表横剖面沉降分析

选取东线、西线地表沉降变化最大点的横剖面进行地表横剖面沉降分析。图 5 是 E5 (里程为 18 m) 监测点剖面在不同工况下的沉降曲线。图中 5 条曲线分别为顶管切口到 E5 监测点前(12.344 m)、切口到达 E5 监测点(18.409 m)、机尾到达 E5 监测点(27.543 m)、切口到达 36.278 m 及顶管切口到达 149.451 m 五种工况下的地表剖面沉降曲线。顶管穿越前,正面土压力控制较好,地表略有沉降;自 18.509~27.543 m 为顶管机身穿越阶段,沉降量较大,最大沉降 24.44 mm。顶管穿越后,管片在减摩泥浆的减摩和保压作用下,顶进扰动较小,地表沉降呈现出逐渐收敛态势,最大沉降 29 mm。

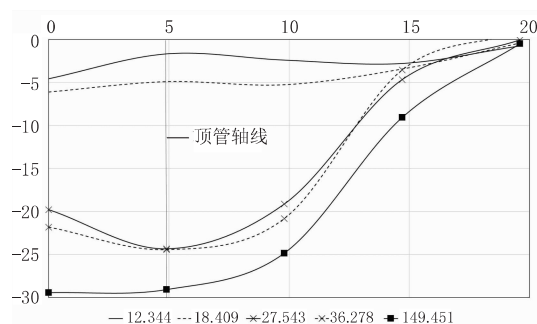


图 5 东线 E5 监测点剖面沉降曲线

图 6 为 W5 监测点和 E5 监测点地表剖面沉降曲线。沉降曲线均呈现沉降槽变形模式,在顶管轴线位置沉降量最大,距离轴线越远,沉降量逐渐减小,沉降槽宽度均为 30 m,且不随沉降量变化而变化。

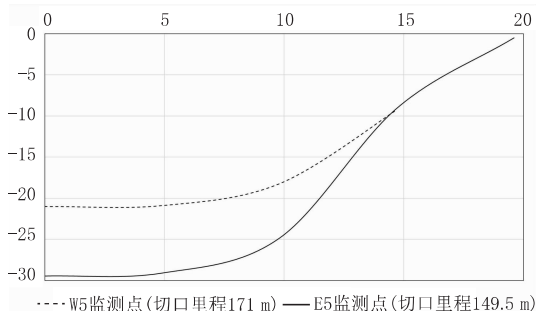


图6 W5、E5监测点剖面沉降曲线

3 Peck 公式在超大断面矩形顶管沉降预测应用的探讨

矩形顶管施工引起地表沉降与顶管断面、深度、长度、施工工艺、地质条件等多方面因素有关,特别是施工工艺参数具有较强的经验性。Peck 公式是在总结了大量隧道实测数据基础上提出的,其所参考的实测资料以圆形隧道为主,在矩形顶管中的应用需要进一步通过实测数据验证。

Peck^[10]提出,在不排水条件下,地表变形由地层损失引起,沉降槽体积即地层损失体积,地表沉降槽近似高斯曲线分布,并给出了地面沉降预测的 Peck 公式,表示如下:

$$S_x = S_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2 \cdot i^2}\right)$$

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \approx \frac{V_s}{2.5 \cdot i}$$

式中: S_x 为距离隧道中线为 x 处的地表沉降量,mm; $S_{\max}$ 为隧道中线上方的地表沉降量,mm; x 为距离隧道中线的距离,m; i 为沉降槽的宽度系数,m; V_s 为沉降槽面积,m²。

3.1 关于沉降槽宽度系数取值的探讨

沉降槽宽度的取值除与土层条件直接相关,还受到隧道埋深和尺寸因素的影响。其中,隧道尺寸影响往往在浅埋、超浅埋情况下较明显($z_0/D < 1.0 \sim 1.5$, z_0 为隧道中心埋深, D 为隧道直径),本工程等效 $z_0/D = 1.7$,属于一般埋深。因此,剔除隧道尺寸因素的影响,仅考虑埋深。韩焜、李宁等^[11]搜集了上海地区 6 个样本,给出了 $i=0.5z_0$ 的建议值。结合本工程实测情况和矩形顶管地层损失集中在顶部的特点,建议 z_0 取实际埋深,则 $i=6$ m。沉降槽宽度为 $5i=30$ m,与本工程实测数据较吻合。

3.2 关于地层损失取值的探讨

矩形顶管地层损失与工程地质、水文地质、顶管尺寸、顶管机性能、泥浆套性能、施工工艺参数、施工管理水平等多种因素有关,经验性、离散性较强。东

线最大沉降 29.47 mm,沉降槽面积 $V_s=0.442$ m²,顶管截面积 55.78 m²,则地层损失比为 0.79%。西线最大沉降 21 mm,最大地层损失比为 0.55%。后续同类项目可参考进行土体沉降估测。

4 结 语

(1)合理采用土体预加固措施可显著降低顶管施工对于土体扰动影响,从而保证顶管穿越构筑物的安全。

(2)矩形顶管施工过程中,机头穿越阶段扰动影响最大。在顶管机设计制造过程中应充分考虑全断面切削、同步注浆、改良孔、间隙等措施,减少机头穿越期间引起的沉降。同时可考虑穿越前控制切口前方土体微隆起状态的沉降控制策略,降低最终沉降量。在管节持续推进过程中,泥浆套的保压、减摩性能至关重要。在其作用下,管节持续移动带来的影响可达到稳定收敛状态。

(3)在一般埋深、深埋情况下,顶管外形、尺寸对沉降槽影响较小,Peck 公式依然适用于矩形顶管沉降预测,在浅埋情况下的适用性有待进一步探讨。本次两根顶管地层损失比分别约为 0.79%、0.55%,可供后续同类工程进行沉降预测时进行参考。

参考文献:

- [1] 吕建中,杨磊.土压平衡式矩形顶管顶进工法(YJGF15—2000)[J].施工技术,2002,31(9):28-30.
- [2] 鲍永亮,郑七振,唐建忠.软土地层矩形顶管推进施工措施分析[J].铁道建筑,2009(8):75-78.
- [3] 宋杰,侯艳春.上海地铁 9 号线七宝站矩形顶管法应用与设计[J].山西建筑,2010,36(26):298-299.
- [4] 温锁林.大断面矩形顶管施工对环境影响研究[J].中国市政工程,2011(5):37-39.
- [5] 施文捷.复杂环境下大截面矩形顶管施工管线保护技术[J].城市道桥与防洪,2011,40(7):179-182.
- [6] 曹海军.大断面矩形顶管施工技术例析[J].建筑,2014(7):65-66.
- [7] 陶涛.大断面矩形顶管复杂工况下斜交进洞施工关键技术[J].城市道桥与防洪,2015(8):150-153.
- [8] 吕建中,石元奇,楼如岳.大断面矩形隧道偏心多轴顶管机的设计和应用[J].上海建设科技,2004(2):16-18.
- [9] 孙亚峰.上海地区某大口径矩形顶管施工周边环境的影响监测分析[J].城市勘测,2015(1):165-168.
- [10] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft surface[C]// Proceedings of 7th Int Conf SMFE, Mexico City. State-of-the-Art, 1969: 225-290.
- [11] 韩焜,李宁, R S J. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J].岩土力学,2007,28(1):23-28.