

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.07.051

大口径平行顶管施工对高速路面沉降的理论及实测分析

陈 鑫^{1,2}

[1.上海水业设计工程有限公司,上海市 200092; 2.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 结合盐城市重大民生工程—盐城新水源地及引水工程,研究了 DN2600 平行顶管穿越高速的顶管套管设置、管顶覆土厚度、顶管壁厚、顶管水平间距及顶管施工纵向最小间距设计参数。并对平行顶管下穿高速公路引起的路面沉降进行理论与实测研究,结合工程实际对大口径平行顶管施工引起的地面变形机理及变形原因进行分析。为大口径平行顶管穿越高等级道路工程设计提供参考。

关键词: 大口径;平行顶管;设计要点;地面沉降;相互扰动;现场实测

中图分类号: TU74

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)07-0188-05

1 工程概况

盐城地处里下河尾水地区,是典型的水质型缺水城市。为从根本上解决盐城优质原水的问题,实施了在京杭运河宝应金汜水段开辟放心水源,将长江水引入盐城的跨区域引水项目—盐城新水源地及引水工程。该工程设计规模 115 万 m³/d,包括宝应取水、恒济、盐龙湖、射阳四座增压泵站。整个工程的管道总长约 213 km,穿越宝应县、建湖县、大丰市、射阳县。

宝应段原水管道采用双管平行敷设,双管总长度约为 96 km,管径为 2×DN2400,设计工作压力为 0.75 MPa。其中,在桩号 BY-B5+270.83 处需穿越京沪高速,在桩号 BY-B5+361.67 处需穿越既有西气东输管线。顶管穿越京沪高速平纵断面见图 1,沉降监测点布置见图 2,本段顶管总长度为 473 m,顶管在 65.83 m 距离进入京沪高速,在 93.43 m 距离穿越京沪高速。

2 工程地质条件

宝应地处江苏省中部、长江三角洲北翼、里下河平原西北部位,属黄淮冲积平原,以京杭运河为界,分成东西两部分,西高东低;沿运河两岸高亢,东西边缘低洼;运河南北两侧略高,中间偏低。境内多数

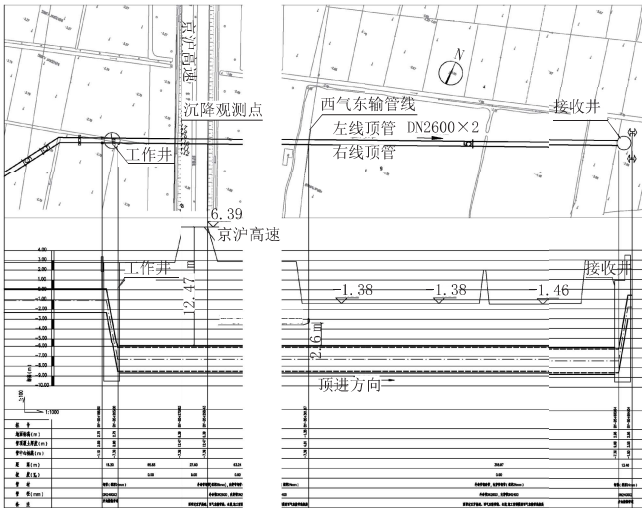


图 1 顶管穿越京沪高速平纵断面图

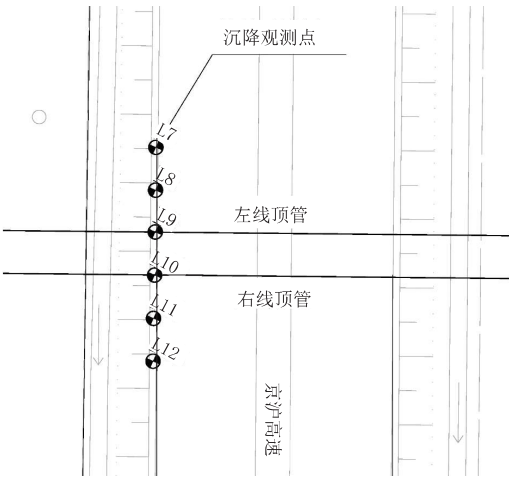


图 2 京沪高速沉降监测点布置图

收稿日期:2021-02-09

作者简介:陈鑫(1988—),男,硕士,工程师,从事建筑设计工作。

地区在海拔两米左右,属里下河沉积平原地貌。自上而下土层按其不同的成因及物理力学性质差异划分

如下:①素填土、②淤泥质粉质黏土、③黏土、④-1 粉质黏土、④-2 粉土、⑤粉土、⑤-1 粉土夹粉砂、⑥粉质黏土、⑦粉质黏土。管线穿越的土层特征描述如下,土层物理力学参数见表 1。

层号	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	固结快剪 (标准值)		地基承载力 f_{ak} /kPa	泊松比 μ	变形模量 E_0 /MPa
		C_k/kPa	ϕ/k°			
①	(18.1)	(6.5)	(8.5)			
②	17.7	13.8	9.8	70		
③	18.4	31.6	13.6	120		
④-1	19.1	34.6	14.8	160		
④-2	18.6	20.3	18.8	120	0.30	3.71
⑤	18.5	10.2	25.3	130	0.30	4.35
⑤-1	18.5	9.2	26.4	170	0.29	4.65
⑥	19.3	39.3	13.8	160	0.32	3.84
⑦	19.6	45.8	14.1	200	0.29	5.01

⑤粉土:灰黄色,湿,稍~中密,中等压缩性,无光泽。摇震反应迅速,干强度低,韧性低,该层分布不稳定,土质不均匀;

⑤-1 粉土夹粉砂:灰黄色,很湿,中密,中等压缩性,无光泽。摇震反应迅速,干强度低,韧性低,该层分布不稳定,土质不均匀,夹少量淤质黏性土团块及密实状粉砂薄层(单层厚 3~10 mm),局部互层,具层理,拟建场地该层土分布不均匀;

⑥粉质黏土:灰黄色,可塑,中等压缩性,稍有光泽,局部见少量铁锰氧化物斑点。无摇震反应,干强度中等,韧性中等,该层分布不稳定,土质不均匀。

3 大口径平行钢顶管过高速设计要点

3.1 顶管套管

输水管道在穿越高等级道路时,为了避免管道事故漏水影响道路路基现象发生,一般需设置套管。本工程输水管道为 2×DN2400 钢管,顶管采用 2×DN2600 钢管套管穿越京沪高速。顶管施工结束后,内穿 DN2400 钢管。为确保内穿钢管受力均匀,在两管空隙间采用环氧水泥砂浆填充,见图 3。

3.2 顶管埋深

根据《给水排水工程顶管技术规程》(CECS246:2008)^[1]5.3 节,空间交叉管道的净间距,钢管不宜小于 0.5 倍管道外径,且不应小于 1.0 m。由 5.4

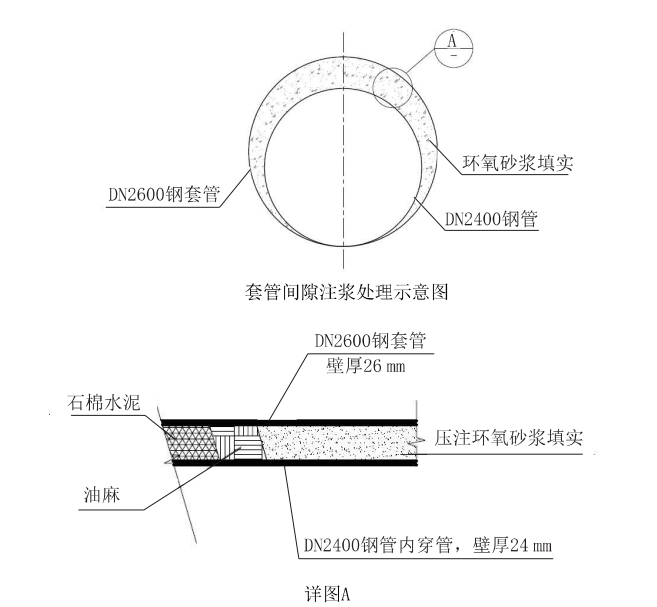


图 3 顶管套管及其空隙填充示意图

节,管顶覆盖层厚度在不稳定土层中宜大于管道外径的 1.5 倍,并应大于 1.5 m。穿越江河水底时,覆盖层最小厚度不宜小于 1.5 倍管道外径,且不宜小于 2.5 m。

根据测量、物探资料及现场调查,京沪高速路面标高为 6.39 m,西气东输管道管底标高为 -3.48 m。为保证西气东输管道安全, DN2600 钢顶管与西气东输管道净距控制在 1 倍管径,即 2.60 m, DN2600 钢顶管中心标高为 -7.39 m。顶管在穿越京沪高速段覆土厚度为 12.47 m。根据工程实践经验,一般情况下管道穿越高等级道路时覆盖层厚度不小于 3 倍管道外径且不小于 4 m 时,顶管施工对道路的影响很小。

3.3 顶管壁厚

根据《给水排水工程顶管技术规程》(CECS246:2008)^[1],作用在管道上的竖向土压力采用修正的太沙基模型,土弧基座采用 120°支承角。由于钢管的侧向弹性抗力是通过钢与土的弹性模量比来反映的,不再计入侧向水土压力的作用。根据顶管在施工期和使用期的不同作用组合,对钢管环向应力、纵向应力以及最大组合折算应力进行计算。经计算,本工程顶管壁厚取 26 mm。钢顶管传力面允许最大顶力计算值约为 12 000 kN。

3.4 平行顶管水平间距

对于平行顶管,顶管顶进时水平方向相互干扰,扰动区外侧边界可以认为由两个顶管扰动区叠加而成。根据平行顶管水平中心距与顶管扰动区宽度理论^[2],一般认为顶管顶部扰动区宽度小于或等于平行顶管中心距即是安全的,见图 4。

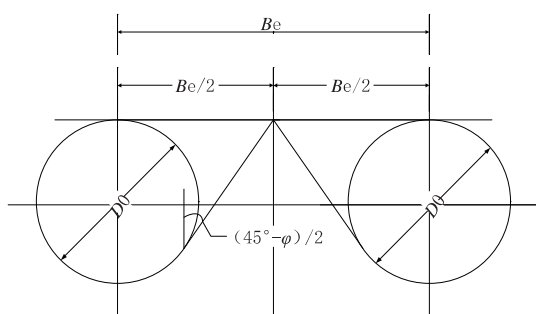


图4 平行顶管横向扰动示意图

$$B_e = D_0 \frac{1 + \sin\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (1)$$

式中: B_e 为顶管顶部土体扰动宽度(m); D_0 为顶管外径(m); φ 为土的内摩擦角($^\circ$)。

本工程顶管土层的加权平均内摩擦角为 25° , 顶管外径 2.62m。

$$B_e = 2.62 \times \frac{1 + \sin\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{\cos\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} = 4.78 \text{ m}, \text{ 本工程平行}$$

顶管中心间距取 5 m。

3.5 平行顶管施工纵向最小间距

在顶管实施过程中,受工期制约,一般希望平行顶管能够同时进行顶进。两顶管施工纵向最小间距的合理确定,对于减少两管相互干扰及管间土体的扰动至关重要。施工前采用以下方法来估算平行顶管纵向间距 $L_{\min}$, 见图 5。

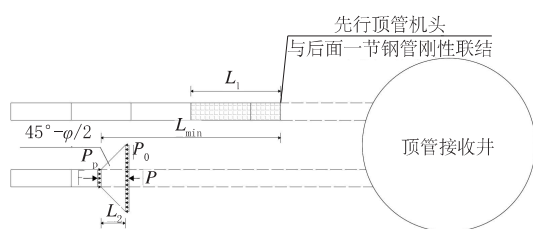


图5 平行顶管纵向扰动示意图

$$L_{\min} = \gamma \times (L_1 + L_2) \quad (2)$$

式中: $L_{\min}$ 为平行顶管纵向间距的最小值, m; L_1 为前方顶管长度, 本工程顶管机头与后面一节钢管做刚性联结, L_1 为机头长度与后面一节钢管长度之和, m; γ 由土质性质决定的系数, 取 1.5 ~ 2.0。

顶管施工引起的土体扰动是通过施工产生的附加应力作用于土体产生, 顶管机头正前方土体受到千斤顶产生的挤压力、刀盘切削产生的剪切力等作用, 应力状态较复杂。一方面, 土体由于开挖卸土导致应力释放, 使土体水平应力减小; 另一方面, 由于顶进推力及泥水平衡压力使土体水平应力增大^[3]。

当两种作用引起的土体水平应力变化达到平衡时, 顶管施工对土体的扰动最小; 当土体水平应力减小值大于主动土压力, 掌子面的土体将发生坍塌, 导致地面沉降变形, 此时机头前端附加应力扩散角约为 $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$, 与主动土压力角一致; 当土体水平应力增加值大于被动土压力, 掌子面的土体将发生挤压, 导致地面隆起变形, 机头前端附加应力扩散角约为 $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$, 与被动土压力角一致。

显然, 顶管机头对土体的作用力为被动土压力时为最不利情况, 此时顶管施工对土体纵向扰动的影响范围最大。顶管施工对正面土体的施力按 $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$ 向前方 360° 扩散, 其施工影响距离由施工中控制压力上限控制, 推算如下:

$$P = F,$$

$$P = P_0 \times \pi \times \left[D_0/2 + L_2 \times \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \right]^2,$$

$$P = P_p \times \pi \times D_0^2/4$$

推导得出,

$$L_2 = D_0/2 \times [\sqrt{P_p/P_0} - 1] / \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (3)$$

式中: P_p 为土的被动土压力 (kPa); P_0 为土的静止土压力 (kPa)。

根据式(3)计算得出

$$L_2 = 1.31 \times [\sqrt{2.46/0.58} - 1] / \tan\left(45^\circ - \frac{25^\circ}{2}\right) = 2.18 \text{ m}$$

$$L_{\min} = 2.0 \times (4.5 + 9 + 2.18) = 31.36 \text{ m}$$

出于安全考虑, 在图纸中明确: 施工过程中两平行顶管纵向间距 $L_{\min}$ 至少控制在 50 m 以上。

4 大口径平行顶管地面沉降理论分析

目前顶管施工产生的地面沉降, 常采用 Peck 提出的地面沉降槽理论进行估算, 该理论通过对大量地面沉降数据及工程资料进行分析, 首先提出地面沉降槽呈拟正态分布的概念, 认为土体移动由土体损失引起, 施工引起的地面沉降是在不排水条件下发生的, 所以沉降槽体积应等于土体损失体积, 地面沉降估算公式为:

$$S(x) = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (4)$$

$$S_{\max} = \frac{V_{\text{loss}}}{\sqrt{2\pi} i} \quad (5)$$

式中: $S(x)$ 为地面沉降量 (m); x 为离顶管轴线的水平距离 (m); $S_{\max}$ 为管道轴线上方的最大地面沉降量 (m); i 为地面沉降槽宽度系数 (m); V_{loss} 为顶管单位

长度的土体损失量(m^3/m),通常采用开挖面面积百分率来估算土体损失的大小,令 η 为土体损失百分率,则 $V_{\text{loss}}=\pi R^2\eta$,土体损失产生的沉降已有较多学者进行了研究,一般取土体损失率为 $0.5\%\sim 2.5\%$,本工程为直线顶进,且采用泥水平衡顶管机,施工质量相对可控,故土体损失百分率取 1% 。

利奇在1985年对沉降槽宽度系数进行了修正, $i=0.64+0.48h\pm 1.01$, h 为地表到顶管中心线的深度。

本工程顶管外径为 2.62 m ,穿越京沪高速处地表到顶管中心线的深度为 13.78 m ,那么: $i=0.64+0.48\times 13.78\pm 1.01=7.25\pm 1.01$,安全起见, i 取 6.24 。

$$V_{\text{loss}}=\pi\times(2.62/5)^2\times 1\%=0.054$$

$$S_{\text{max}}=0.054/\sqrt{2\pi}/6.24=3.45\text{ mm}$$

目前,对双排平行顶管沉降曲线的研究尚处于初步阶段,根据胡熹竹^[2]的实测分析,考虑先施工顶管对后施工顶管的影响,认为后施工顶管引起的土体损失量要大于先施工顶管,一般后施工顶管的最终沉降面积比先施工顶管大 50% 左右。由此,后施工顶管土体损失百分率 η_2 取 1.5% ,土体损失量 $V_{\text{loss}2}=0.081$, $S_{\text{max}2}=5.18\text{ mm}$ 。

简单估算地面沉降由两根平行顶管地面沉降叠加产生,本工程因平行顶管间距为 5 m ,所以取 2.50 m 和 5.00 m 两处进行沉降计算。

先施工顶管:

$$2.50\text{ m处}:S_1=3.45\times e^{-\frac{2.50^2}{2\times 6.24^2}}=3.18\text{ mm}$$

$$5.00\text{ m处}:S_1=3.45\times e^{-\frac{5.00^2}{2\times 6.24^2}}=2.50\text{ mm}$$

后施工顶管:

$$2.50\text{ m处}:S_2=5.18\times e^{-\frac{2.50^2}{2\times 6.24^2}}=4.77\text{ mm}$$

$$5.00\text{ m处}:S_2=5.18\times e^{-\frac{5.00^2}{2\times 6.24^2}}=3.75\text{ mm}$$

简化考虑,则平行顶管最大沉降出现在两管中心正上方,最大沉降量 $S=S_1+S_2=3.18+4.77=7.95\text{ mm}$ 。

5 大口径平行顶管地面沉降实测分析

京沪高速沉降数据分析:

取不同日期的道路地面沉降数据绘制成图6,根据图6分析可知:

(1)1月24日,左线顶管刚好进入京沪高速,路面出现轻微沉降,由图6可知左线顶管正上方沉降量约 1.6 mm ,右线顶管正上方沉降量约 1.4 mm 。地面沉降曲线未呈现明显的“沉降槽”现象。

(2)1月26日,左线顶管穿越京沪高速,由图6可知左线顶管(L9沉降监测点)最大沉降量约 4.3 mm ,

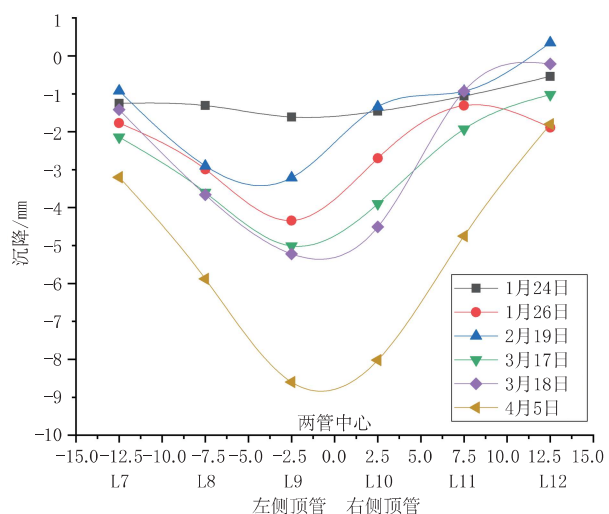


图6 顶管穿越京沪高速地面沉降实测曲线

增加了 2.7 mm ,位置位于顶管正上方;右线顶管(L10沉降监测点)最大沉降量约 2.7 mm ,增加了 1.3 mm ,实测地面沉降值较Peck公式计算结果偏大。地面沉降曲线呈现出明显的“沉降槽”现象。

(3)2月19日,左线顶管全线贯通,结合施工记录,左线顶管施工过程中,为了降低左线后续顶管对土体的扰动,减小地面沉降,施工单位通过调整注浆压力、控制膨润土注入,同时适当提高顶管速度,地面变形表现出一定的隆起现象。由图6可知,此时左线顶管(L9沉降监测点)的沉降最大值约 3.2 mm ,隆起了 1.1 mm ,右线顶管(L10沉降监测点)的沉降最大值约 1.3 mm ,隆起了 1.4 mm 。据此分析,在考虑有效施工控制因素的情况下,实测地面沉降值与Peck公式计算的最大地面沉降量十分接近。

(4)3月17日,右线顶管刚好进入京沪高速,由图6可知,右线顶管(L10沉降监测点)正上方沉降量约 3.9 mm ,右线顶管顶进造成其正上方沉降量达 2.6 mm ,较1月24日左线顶管顶进时L9沉降监测点产生的地面沉降大。此时左线顶管(L9沉降监测点)最大沉降值约 5.0 mm ,增加了 1.8 mm ,最大沉降点并未发生明显偏移,仍位于左线顶管正上方,地面沉降槽曲线宽度较左线顶管时加宽。

造成这一现象的主要原因是左线顶管施工时对周边土体产生扰动,右线顶管施工引起土体二次扰动,造成土体损失加剧,因此在同样条件下后施工顶管的最大地面沉降量要大于先施工顶管,沉降槽宽度也相应增大。但右线顶管刚进入高速,对总体沉降产生的影响有限,故最大沉降值未发生明显偏移。

(5)3月18日,右线顶管穿越京沪高速。由图可知,通过左线穿越京沪高速的经验积累,在采取了有

效的施工控制措施后,右线穿越京沪高速时右线正上方(L10 沉降监测点)地面沉降量约 4.5 mm,仅增加了 0.6 mm,左线正上方(L9 沉降监测点)地面沉降量约 5.2 mm,增加了 0.2 mm,此时沉降槽曲线最大沉降值明显向右侧顶管偏移,最大沉降值约 5.5 mm。

随着右线顶进,右侧顶管对总体沉降产生的影响逐渐增加,使最大沉降量向右侧偏移。施工时采取有效控制措施明显降低了因土体损失产生的地面沉降。

(6)4月5日,右线顶管全线贯通。此时,左线正上方最终地面沉降量约 8.6 mm,增加了 3.4 mm,右线正上方最终地面沉降量约 8.0 mm,增加了 3.5 mm,沉降槽曲线最大沉降值位于两管中轴线偏左侧位置,最大沉降值约 8.8 mm,实测地面沉降值与 Peck 公式计算的 maximum 地面沉降量比较接近,沉降槽曲线宽度明显增加。

由于右线后续顶管对周围土体的持续扰动,地面沉降量进一步增加。采取有效施工控制措施虽然可以减小地面沉降量,但毕竟作用有限,从左右线顶管正上方的沉降增加量及 Peck 沉降计算分析可知,有效控制措施对于减小顶管正上方沉降量的作用效果明显优于对顶管两侧土体沉降量的影响。右线顶管施工对已完成的左线再次进行扰动,且左线土体受扰动程度更严重,因此最终的沉降槽曲线最大值仍位于两管中轴线左侧。

6 结 论

(1)结合盐城新水源地及引水工程,研究了大口径平行顶管穿越高速的套管设置、顶管壁厚、顶管水平间距及顶管施工纵向最小间距等设计要点,补充了目前顶管设计规范尚未明确的相关内容,为大口径平行顶管穿越高等级道路工程设计提供参考。

(2)根据 Peck 地面沉降槽理论对平行顶管施工引起高速路面沉降进行理论分析,认为后施工顶管引起的土体损失量比先施工顶管大 50%左右,再分别独立计算出两平行顶管的地面沉降量,然后叠加

得到平行顶管施工引起的高速路面沉降。在不采取有效施工控制措施的情况下,实测地面沉降值较 Peck 公式计算结果偏大,采取有效施工控制措施后,实测地面沉降值与 Peck 公式计算的 maximum 地面沉降量较接近。

(3)采取有效控制措施虽然可以减小地面沉降量,但作用有限。同时有效控制措施对于减小顶管正上方沉降量的作用效果明显优于对顶管两侧土体沉降量的影响。

(4)先施工顶管对周边土体产生扰动,后施工顶管引起土体二次扰动,造成的土体损失加剧,因此在同样条件下后施工顶管的 maximum 地面沉降量要大于先施工顶管,沉降槽宽度也相应增大。

(5)施工第一根顶管时,地面沉降槽曲线最大值位于先施工顶管正上方。随着后施工顶管顶进,后施工顶管对总体沉降产生的影响逐渐增加,地面沉降槽曲线最大值向后施工顶管方向偏移。但最终的沉降槽曲线是非对称的,沉降量最大值位于两管中轴线偏向先施工顶管一侧。这是由于后施工顶管对先施工顶管再次进行扰动,使先施工顶管土体受扰动程度更严重造成的。

参考文献:

- [1] CECS 246:2008, 给水排水工程顶管技术规程[S].
- [2] 胡熹竹.大口径管道前后同步平行顶进施工法初探[J].上海市政工程,1999(1):30-33.
- [3] 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.
- [4] DG/TJ 08-2049—2016,顶管工程施工规程[S].
- [5] 王恒栋,凌兴安.青草沙水源地原水工程大口径平行顶管设计研究[J].给水排水,2009,35(10):55-57.
- [6] 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,2006,25(1):3299-3304.
- [7] 魏纲,徐日庆,郭印.顶管施工引起的地面变形计算方法总数[J].市政技术,2005,23(6):350-354.
- [8] 李进.双排顶管工程穿越京杭运河应考虑的因素[J].中国给水排水,2011,27(14):105-108.