

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.038

# 顶管施工引起地表竖向变形分析

苏越, 张敏, 李更召, 张成君, 邢卫民

(天津市勘察院, 天津 300191)

**摘要:** 顶管法在各个城市的地下管线施工中广泛运用,尤其在已建道路下的管线施工中具有优势。顶管穿越路基施工引起管道周围土体变形易对路面造成变形破坏。结合实际工程,分析计算顶管施工正面附加推力、设备与周围土体的摩擦力对地表垂直变形的影响,结合土体损失引起的竖向变形,计算顶管施工引起总的周边地表竖向变形。计算结果与实际监测结果吻合,顶管施工引起周边地表竖向变形呈现前方隆起后方沉降的变化规律。

**关键词:** 顶管;地表竖向变形;正面附加推力;摩擦力;土体损失

中图分类号: U455.47

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)03—0208—04

## Analysis of Soil Vertical Deformation Induced by Pipe Jacking Construction

SU Yue, ZHANG Min, LI Gengzhao, ZHANG Chengjun, XING Weimin

(Tianjin Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** Pipe jacking has been widely used in the underground pipeline construction, especially in the pipeline construction of road engineering. When pipeline passing through the roadbed, the deformation of soil may be so large that destroy the road surface. According to a certain practical engineering, this paper calculated the soil vertical deformation induced by bulkhead additive thrust and the force of friction between jacking device and soil. Combining the formula of ground deformation induced by ground loss, the formula of total soil vertical deformation induced by pipe jacking construction is obtained. The calculated results agrees well with the actual monitoring results, due to pipe jacking construction, the frontal soil of excavation face heave and the rear soil subside.

**Keywords:** pipe jacking; soil vertical deformation; bulkhead additive thrust; force of friction; ground loss

城市市政基础建设中,由于路面交通繁忙,人员密集,地面建(构)筑物及地下管线复杂,敷设新的地下管道采用以往的开槽方案已经越来越困难,为了减少对正常活动的干扰以及房屋的拆迁,非开挖施工已经成为市政管道施工的最佳方案。顶管法是地下管道非开挖施工的一种,利用主顶油缸或管道中继站的推力,把掘进机和管道从工作井内推入土层并一直顶推到接收井内,其优越性在修建穿越河流、道路和已有构筑物的地下通道、管道等地下工程得到体现,但顶管施工也不可避免地造成地面和地下土体的移动,即沉降和位移。

李庆臻<sup>[1]</sup>、肖雁征等<sup>[2]</sup>、曹明明<sup>[3]</sup>通过分析具体案例的地表变形情况,探索顶管施工对周围土体变

形影响机理及影响范围。吴大国等<sup>[4]</sup>、高坤<sup>[5]</sup>、刘莹<sup>[6]</sup>、张海生<sup>[7]</sup>、宋建学等<sup>[8]</sup>通过三维数值模拟,探索顶管引发周围土体变形的主要影响因素,并对实际项目变形提供预测分析。关永平<sup>[9]</sup>、夏永发<sup>[10]</sup>、何桥等<sup>[11]</sup>通过模拟计算,分析不同土体参数及环境参数对变形的影响,认为顶管与建筑物水平间距、建筑物基础埋深以及土体参数是控制变形量的主要参数。任毅<sup>[12]</sup>、刘航军等<sup>[13]</sup>通过实际工程案例,探索地表变形随时间发展情况,认为顶管引发地表变形分为机头到达前沉降、施工扰动沉降、管土间隙沉降及土体固结沉降四个阶段。董晓娟等<sup>[14]</sup>、韩国良<sup>[15]</sup>、潘建立<sup>[16]</sup>对前人工作经验进行总结,提出了刀盘附加推力、摩阻力、注浆压力和土体损失是造成

土体变形的主要影响因子,并提供了若干计算方法。

本文对前人工作进行总结,假定土体不排水,利用弹性力学 Mindlin 解推导了正面附加推力、设备与周围土体的摩擦力对地表垂直变形的影响,结合土体损失引起的竖向变形,得到顶管施工引起的总的土体垂直变形计算方法,并通过天津某地区顶管施工实测数据进行了验证,监测数据与计算结果匹配度较高。

## 1 工程概况

天津某雨污水管道工程某标段,管线沿道路中心线穿越城区一交通要道,采用顶管施工,车辆照常通行。本场地地势总体较平坦,地基土分布较尚稳定,埋深 20 m 范围内主要土层如下:①<sub>2</sub> 素填土层,厚度 1.5 m,可塑状态,中压缩性土;④<sub>1</sub> 粉质黏土层,厚度 2.5 m,软塑—可塑状态,中压缩性土;⑥<sub>2</sub> 淤泥质粉质黏土层,厚度 8.5 m,软塑—流塑状态,高压缩性土;⑥<sub>4</sub> 粉质黏土层,厚度 7.5 m,中压缩性土;表层地下水属潜水类型,静止水位埋深 1.0 m。

该标段顶管长度 53 m,管顶覆盖土层厚度 2.6 m,采用泥水平衡顶管方法进行施工,顶管外径 2.4 m,管节厚 180 mm,采用预制 C40 混凝土管节,每节长度为 3 m,如图 1 所示。

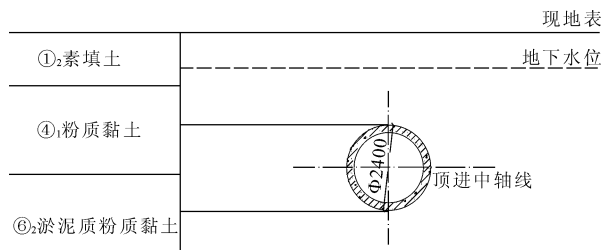


图 1 顶管剖面示意图

## 2 顶管施工对地表竖向位移影响因素分析

顶管施工中引起土体变形的因素主要有:

(1) 地层损失造成沉降。顶管顶进时,掘进面土体应力较大,土体会向顶管内移动塌落,由于土体的松动范围超出工具管范围,会造成顶管周围的土层也被松动,因此地层有了损失。注浆填充可减缓土体损失但并不能完全消除此因素影响。

(2) 正面附加推力与土压力无法保持平衡。开挖临空面依靠附加推力与土压力的平衡保证稳定的出土,实际操作中,由于临空面土质条件复杂,会有附加推力与土压力偏差较大情况出现。若附加推力

大于土体的被动土压力,会造成土体的挤压变形,若附加推力小于土体的主动土压力,则会造成土体的坍塌。

(3) 顶管与土体摩擦力带动周围土体移动。顶进过程中掘进机以及后续管节均会对周围土体产生摩擦力,一般情况掘进机与土体的接触面积更大从而产生更大的摩擦力,后续管节通过注浆等工序可以降低摩擦力。

## 3 顶管施工引发土体变形计算

### 3.1 基本假定

(1) 本文仅考虑施工期间的变形,土体为不排水固结变形。

(2) 为简化计算,对顶管上方土体参数取加权平均值,简化为均质线弹性半无限体黏性土。

(3) 顶管推进面附加推力为圆形均布荷载。

(4) 顶管与周围土体的摩擦力均匀分布。

### 3.2 地层损失造成沉降计算

Peck 提出地面沉降槽呈正态分布,假定土体体积不可压缩,则土体损失量即为沉降槽体积,地面沉降计算公式为:

$$S(x) = S_{\max} \left[ \Phi \left( \frac{x - x_i}{i} \right) - \Phi \left( \frac{x - x_f}{i} \right) \right] \quad (1)$$

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

式中:  $x$  为计算点沿顶管方向坐标,  $m$ ;  $x_i$  为隧道开挖面起始点,  $m$ ;  $x_f$  为当前隧道开挖面位置,  $m$ ;  $\Phi$  为标准正态分布函数查表获得;  $S(x)$  为沿顶管方向计算点竖向沉降量,  $m$ ;  $S_{\max}$  为顶管轴线正上方最大竖向沉降量,  $m$ ;  $i$  为地面沉降槽宽度系数,  $m$ , 取值如下:

$$i = R(h/2R)^n \quad (3)$$

$R$  为掘进机外半径,  $m$ ;  $h$  为顶管轴线至地面距离,  $m$ ; 软黏土中,  $n = 1$ 。

$V_{\text{loss}}$  为隧道单位长度土体损失量,根据经验方法<sup>[5]</sup>选择合适的挖掘面百分率来估算土体损失:

$$V_{\text{loss}} = \pi R^2 \eta \quad (4)$$

黏土中,  $\eta$  取值为 0.5% ~ 2.5%, 结合本地区施工及监测经验,本次计算  $\eta$  取值为 1.5%。

### 3.3 正面附加推力造成土体垂直变形计算

图 2 为正面附加推力造成土体垂直变形计算模型,采用弹性力学明德林解计算圆形均布荷载作用下,土体中任一点  $(x, y, z)$  在  $z$  方向产生的位移计算如下:

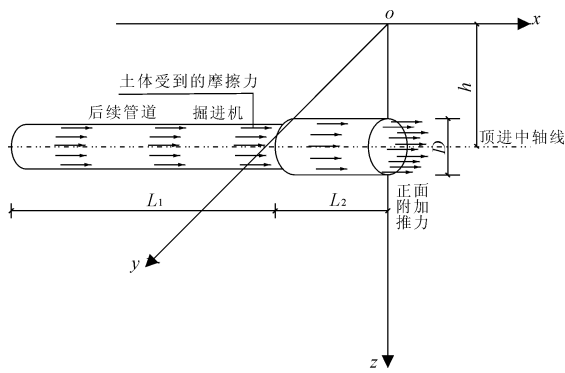


图 2 力学模型简图

$$w_1 = \frac{Px}{16\pi G(1-\mu)} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{D}{2}} \left[ \frac{z-h+\gamma\sin\theta}{M_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z-h+\gamma\sin\theta)}{N_1^3} - \frac{6z(h-\gamma\sin\theta)(z+h-\gamma\sin\theta)}{N_1^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_1(N_1+z+h-\gamma\sin\theta)} \right] \gamma d\gamma d\theta \quad (5)$$

式中,

$$M_1 = \sqrt{x^2 + (y + \gamma\cos\theta)^2 + (z - h + \gamma\sin\theta)^2}$$

$$N_1 = \sqrt{x^2 + (y + \gamma\cos\theta)^2 + (z + h - \gamma\sin\theta)^2}$$

式中:  $P$  为掘进正面附加推力, kPa;  $D$  为掘进机外圈直径, m;  $h$  为管道中轴线至地面距离, m;  $G$  为土的剪切模量, MPa。

$$G = \frac{(1-2\mu K_0)E_s}{2(1+\mu)} \quad (6)$$

式中:  $E_s$  为土体压缩模量, MPa;  $K_0$  为静止土压力系数;  $\mu$  为土体泊松比。

### 3.4 摩擦力造成土体垂直变形计算

由模型图 2 可以看出, 顶管对周围土体的摩擦力, 分为掘进机和后续管道两部分, 因两者均是圆柱体, 取表面微分面积  $Rdrd\theta$ , 利用明德林解积分土体中任意一点  $(x, y, z)$  沿  $z$  方向的位移为:

$$w_2 = \frac{pR}{16\pi G(1-\mu)} \int_0^{2\pi} \int_0^L (x+r) \left[ \frac{z-h+R\sin\theta}{M_2^3} + \frac{(3-4\mu)(z-h+R\sin\theta)}{N_2^3} - \frac{6z(h-R\sin\theta)(z+h-R\sin\theta)}{N_2^5} + \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N_2(N_2+z+h-R\sin\theta)} \right] d\gamma d\theta \quad (7)$$

式中,

$$M_2 = \sqrt{(x+r)^2 + (y+R\cos\theta)^2 + (z-h+R\sin\theta)^2}$$

$N_2 = \sqrt{(x+r)^2 + (y+R\cos\theta)^2 + (z+h-R\sin\theta)^2}$   
式中:  $p$  为圆柱体与周围土体之间单位面积摩擦力, kPa, 等于法向应力乘以摩擦系数, 法向应力近似取最大埋深处的垂直土压力, 摩擦系数根据桩土界面系数取值。

### 3.5 土体总的垂直变形计算

去除注浆、纠偏等施工过程中不可控因素, 地表竖向变形主要由以上三部分即地层损失、正面附加推力、摩擦力造成, 总的地表竖向变形为:

$$w = S_{\text{loss}} + w_1 + w_2 \quad (8)$$

## 4 计算结果分析

本项目参数取值:  $h = 3.8$  m,  $R_1 = 1.2$  m,  $D = 2.42$  m,  $L = 3$  m,  $L_1 = 50$  m,  $P = 20$  kPa,  $p_{\text{掘进机}} = 20$  kPa,  $p_{\text{后续管道}} = 4$  kPa,  $E_s = 2.5$  MPa,  $\mu = 0.35$ ,  $K_0 = 0.51$ ,  $G = 0.6$  MPa,  $\eta = 1.5\%$ ,  $i = 1.9$  m,  $x_i = -53.0$  m,  $x_f = 0$  m。

计算  $y = 0$  时土体损失、正面附加推力、掘进机及后续管道摩擦力单独作用以及共同作用下引起的地面纵向垂直变形, 计算结果如图 3 所示。

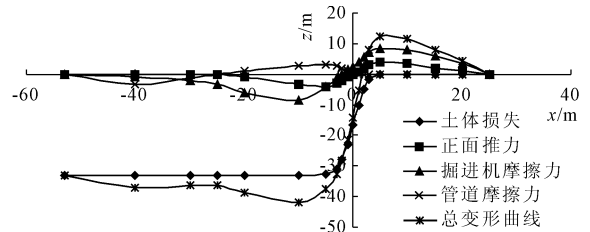


图 3 各因素引发地表纵向变形曲线

图中计算结果显示如下规律:

(1) 地面沉降主要由土体损失造成, 当  $x > 3D$  时, 地表变形受土体损失影响较小接近于 0, 当  $x \leq 3D$ , 沿  $x$  轴反方向沉降逐渐增大, 开挖面位置沉降量为最大沉降量的 50%, 至  $x = -3D$  沉降达到最大值并趋于稳定。

(2) 正面推力造成地表竖向变形表现为前方隆起, 后方沉降, 并以开挖面为轴线反对称分布。

(3) 摩擦力造成地表竖向变形同样表现为前方隆起, 后方沉降, 但是对称轴线分别为掘进机中线位置和后续管道中线位置。

(4) 受综合因素影响, 地表纵向变形曲线可分为: 隆起区—急速沉降区—沉降稳定区—沉降回弹区, 最大隆起位置在开挖面前方  $2.5D$  位置处, 最大沉降值出现在距离开挖面  $1.3h$  后方。

计算不同纵断面处地表沿横断面变形曲线, 选

取  $y = -5\text{ m}, 0\text{ m}, +5\text{ m}$ , 分别对应纵向沉降极值位置、开挖面位置、纵向隆起极值位置, 计算结果如图 4 所示。

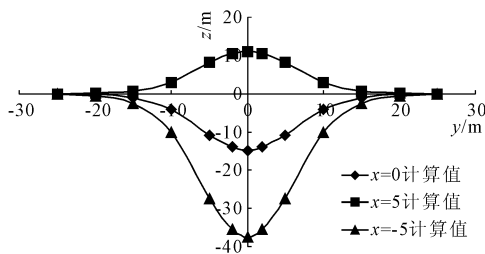


图 4 不同纵断面处地表沿横断面变形曲线

由图 4 计算结果显示如下规律:

(1) 无论是隆起或是沉降, 顶管正上方位置变形最大, 向两侧方向逐渐消散。

(2) 在横断面  $5h$  范围之外, 地面变形接近于无, 可认为 5 倍顶管深度范围外变形不受顶管影响。

### 5 实际监测结果对比

为对比试验结果, 顶管施工期间在地表布设竖向位移监测点测量地面变形, 监测点位布设如图 5 所示。

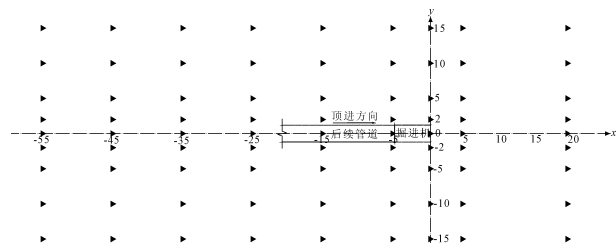


图 5 监测布点图

监测点以顶管轴线对称布置, 各测点距离中轴线分别为  $2\text{ m}, 5\text{ m}, 10\text{ m}, 15\text{ m}$ 。共布设 5 个断面, 分别位于顶进面正上方、正前方  $5\text{ m}, 20\text{ m}$ 、正后方  $5\text{ m}, 15\text{ m}, 25\text{ m}, 35\text{ m}, 45\text{ m}, 55\text{ m}$ 。测量此施工节点各测点变形稳定值, 并与计算结果对比, 对比结果如图 6、图 7 所示。

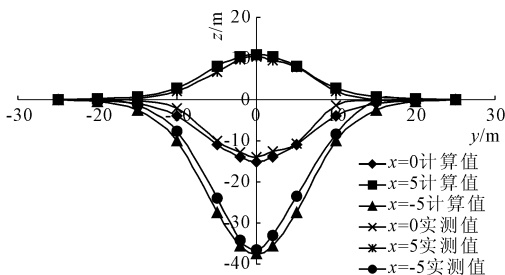


图 6 地表横断面变形实测值与计算值对比图

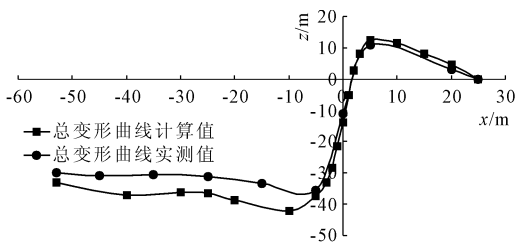


图 7 地表纵断面变形实测值与计算值对比图

由以上结果可以看出, 各断面最大变形实测值略小于计算值, 是因顶管推进过程中桩土界面摩擦系数减小导致, 曲线形状基本吻合, 说明本文计算方法正确, 理论值偏于保守。

### 6 结 论

本文假定土体为均质线弹性半无限体, 变形形式为不排水固结, 并假定顶管与土体之间作用力均匀分布, 引入 Peck 公式计算土体损失引起的变形, 并采用明德林解积分正面推力以及摩擦力造成的土体变形, 此三者共同作用, 使得顶管上方地表呈现规律性的垂直位移, 并把计算结果与实测值进行对比, 验证了本计算方法的正确性。

此次研究仅针对某一特殊节点地表的变形分布规律, 关于顶管施工期间地表变形随时间的推进而呈现的变化规律未作研究, 另外, 因现场条件限制, 未能对比地表下土体的变形规律, 可作为今后研究方向。

### 参考文献:

- [1] 李庆臻. 顶管下穿高速公路软基段变形监测实例分析[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2017, 16(2): 5-8.
- [2] 肖雁征, 雷鸣. 顶管施工对周围土体影响的机理分析[J]. 山西建筑, 2017, 43(6): 110-112.
- [3] 曹明明. 顶管施工引起的地表沉降问题研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- [4] 吴大国, 彭建和, 候高峰. 顶管近接施工对邻近建筑物的影响分析[J]. 安徽建筑, 2018, 24(5): 125-127.
- [5] 高 坤. 顶管施工引起地面沉降的机理分析及数值模拟[J]. 安徽建筑, 2018, 24(4): 141-143.
- [6] 刘 营. 顶管施工对周围土体扰动范围影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [7] 张海生. 超浅层顶管施工诱发地表沉降规律分析[C]// 中国地质学会非开挖技术专业委员会. 2014 年非开挖技术会议论文集. 北京: 非开挖技术杂志, 2014: 6.
- [8] 宋建学, 张瑞鑫, 孙宇赫. 机械顶管施工中超挖和地面超载引起的地表沉降规律研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(11): 134-139.

数。应预留足够的套筒长度,套筒表面宜设置螺纹。建议预埋螺栓套筒来接长锚筋,减少下预埋钢板连接锚筋的数量。

(4) 锚筋与下预埋板的连接是保证节点抗剪强度的重要因素。建议采用螺纹连接,同时下预埋板设置销钉。

(5) 下预埋钢板的开孔需要改进。建议加大浇注孔直径和数量以及增设排气孔。

**说明:**本项目的研究合作单位尚有,福建泉大建设有限公司、厦门市同安区第一建筑工程公司。

### 参考文献:

- [1] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [2] 潘毅,时胜杰,常志旺,等.近断层脉冲地震动对基础隔震结构放大效应的量化分析[J].土木工程学报,2018,51(11):8-16.
- [3] 建筑隔震工程施工及验收规范:JGJ 360—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [4] 福建省工程建设地方标准.福建省建筑工程隔震橡胶支座和装置施工及验收规程:DBJ/T 13—252—2016[S].福建:福建省住房和城乡建设厅,2016.
- [5] 日本免震构造协会编.JSSI 隔震施工规范 2009[S].陈禧耘,汪向荣译.台湾:科技图书出版社,2011.
- [6] 宋俊杰,李志民,邓焜,等.隔震支座下支墩及其埋件

- 施工方法研究[J].建筑施工,2017(5):598-600.
- [7] 吴应雄,张东鹏,苏文庭,等.建筑隔震工程隔震橡胶支座安装施工工艺分析[J].施工技术,2018,47(16):143-146.
- [8] 许勇,张季超,陈原.广东科学中心巨型钢结构基础隔震施工技术[J].施工技术,2009(8):100-102.
- [9] 杜永锋,赵丽洁,张韬,等.超长复杂隔震结构施工力学及全过程检测研究[J].工程力学,2015,32(7):1-10.
- [10] 袁秦标,袁美翠,张雷,等.高烈度区域新型限位隔震支座安装工艺研究[J].施工技术,2017,46(9):67-70.
- [11] 李海兵,刘汉朝,张显达,等.北京新机场航站楼减隔震系统施工技术[J].建筑技术,2018,49(9):956-958.
- [12] 唐际宇,吴代奖.昆明新机场航站楼大直径橡胶隔震支座施工技术[J].施工技术,2009,38(11):3-5.
- [13] 潘毅,季晨龙,韩徐扬,等.隔震支座主要参数对基础隔震结构双向地震响应的影响[J].土木建筑与环境工程,2014,36(4):28-35.
- [14] 吴应雄.某工程底层柱顶隔震结构抗震性能评价[J].水利与建筑工程学报,2015,13(5):41-46.
- [15] 吴应雄,黄净,祁皓,等.建筑隔震构造设计与应用现状[J].土木工程学报,2018,51(2):62-73.
- [16] 钢筋机械连接技术规程:JGJ 107—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [17] 钢结构高强螺栓连接技术规程:JGJ 82—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

(上接第 211 页)

- [9] 关永平.隧道开挖对周边建筑物变形的影响分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):227-232.
- [10] 夏永发.输水管道顶管施工在不同因素下的地表沉降分析[J].水利技术监督,2017,25(4):108-112.
- [11] 何桥,叶明亮,田凯,等.浅埋暗挖隧道施工过程数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):36-41.
- [12] 任毅.顶管施工穿越城市道路实测变形分析[C]//中国城市科学研究会数字城市专业委员会智慧结构学组、中城科数智慧城市规划设计研究中心.第二届

- 全国智慧结构学术会议论文集.北京:北京国建信文化发展中心,2016:4.
- [13] 刘航军,曹振生,刘宗志,等.顶管施工土体扰动的实测分析研究[J].混凝土与水泥制品,2016(6):78-81.
- [14] 董晓娟,林峰.顶管施工对市政道路工程的影响分析[J].市政技术,2018,36(4):179-182.
- [15] 韩国良.顶管施工引起的地面变形问题研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [16] 潘建立.顶管施工引起土体变形的计算方法及应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2016,46(5):1458-1465.