

顶管施工技术在城镇燃气管道建设中 地层变形控制的应用研究

韩旭

北京市燃气集团有限责任公司工程建设管理分公司

摘要: 随着我国能源结构的调整,天然气作为一种清洁能源,进入了高速发展建设的时期。顶管施工技术在城镇燃气管道建设广泛应用的同时,也会出现竖井变形甚至坍塌、顶进偏差较大、顶进过程遇阻、穿越段路面隆起或沉降等情况,对施工安全、质量造成了很大的影响,对国家公用设施造成了损坏,影响了百姓的正常生活。本文结合顶管施工技术应用在穿越某高速公路燃气管道敷设工程的实际案例,对顶管施工技术的设计计算、施工技术措施、地层变形原因及控制措施等方面进行了分析研究,总结出了可以为今后燃气管道建设中运用顶管施工技术借鉴的经验,为今后顶管施工技术在城镇燃气管道建设中的运用提供帮助。

关键词: 城镇燃气; 顶管施工; 地层变形控制; 应用研究

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.10.118

一、前言

(一) 顶管施工技术在国内的研究和应用

根据相关信息记录,我国的顶管技术研究与应用开始于20世纪50年代的北京,1953年,原北京市市政工程局(现北京市政集团)率先开发并应用了人工顶管法。进入21世纪,随着我国工程技术科研水平的发展,顶管施工技术得到高度重视,在穿越道路、建(构)筑物、河流、管道施工中发挥了越来越重要的作用。

(二) 顶管施工技术在城镇燃气管道建设中的运用优势

对公众和交通干扰小; 1.3.2适用范围广; 环境效益显著; 经济效益高。

二、顶管施工技术简介

(一) 顶管施工技术原理

顶管施工技术较好的运用了予力技术作用原理,它通过顶管机头不断地对顶进管材沿线的岩石、土壤施加予力作用,切割土壤,扰动土壤,对产生预变形的土壤进行变形碎化,然后将其压实,支撑土壤及补偿岩石土壤发生变形,形成土压力,使顶进管材的管外壁与周围土壤或岩石紧密结合,并不断地挤压已顶进的管道,形成管网。

(二) 顶管施工系统组成和工艺流程

顶管施工系统主要由竖井(顶进竖井和接收竖井)、顶管机、主顶设备、顶进管材、基坑导轨、顶铁、后背墙、中继间、起重设备、注浆润滑设备、泥水分离、出土设备及通风照明设备等组成。

城镇燃气顶管施工主要由3部分施工步骤组成,首先是工作竖井的施工,包括顶进竖井、接收竖井,工作竖井施工完成后,进行顶管设备的组装调试。其次是顶管工作,包括机头进洞、试验段顶进、正常顶进、机头出洞四个环节,过程中伴随着管壁注浆、测量纠偏等技术措施。顶进工作完成之后,进行燃气管的穿管工作,主要包括管道焊接、无损检测、防腐、竣工测量等环节。

三、案例研究—顶管施工在城镇燃气管道建设中的应用

(一) 工程概况

北京燃气某工程穿越高速主路及东、西辅路;根据道路产权单位的要求,高速公路为国家级道路,燃气施工过程中不能影响道路的正常通行,需采用顶管方式穿越道路,并保证道路的安全。本工程设计燃气管线管径为DN500,设计压力为0.4MPa,铺设口径1550 mm钢筋混凝土管作为燃气主管线的套管。

表3-1 顶管工程情况统计表

穿越段	套管口径 (mm)	长度 (m)	施工 工艺	工作竖井 尺寸(m)	接收竖井 尺寸(m)
高速主路及东、西辅路	1550	129	机械顶管	13×6×7.1	6×5×7

(二) 地质条件

顶管机头穿越段的土质为砂质粉土、粉砂②层。在竖井开挖和顶进施工中,均位于无水状态。

(三) 土压平衡机械顶管施工

1. 选择适宜的顶管施工工艺

本工程需要穿越高速公路,通过对施工区域的土质特征进行研究分析,结合产权管理单位要求,选择土压平衡法。

2. 顶管竖井施工

顶管竖井主要由锁口圈梁施工、井身施工和封底三部分组成,其中井身施工需要随着开挖的深度,逐层安装钢格栅、连接筋和钢筋网片进行支护,并采用喷射混凝土的方式稳定土体结构。工作竖井的施工原则为快速开挖、强力支护、小分块、短进尺、早成环。

3. 机械设备安装调试

(1) 顶力计算

$$F_p = \pi D_0 L f_k + N_f \quad (3-1)$$

$$N_f = \frac{\pi}{4} D_g^2 P \quad (3-2)$$

式中： F_p ——总顶力（KN）； D_0 ——管道外径（mm）； D_g ——顶管机外径（mm）； L ——顶距（m）； f_k ——管道外壁与土的单位接触面积的平均摩阻力（KN/m²）； N_f ——顶管机的迎面阻力（KN）； P ——土仓压力（KN/m²）。

本工程的各项取值：

$D_0=1.84\text{m}$ ； $D_g=1.86\text{m}$ ； $L=129\text{m}$ ； $f_k=8.0$ （KN/m²），砂质粉土、粉砂； $P=100$ （KN/m²），最大设定土仓压力。

则总顶力计算值为：

$$N_f = \frac{\pi}{4} \times (1.86)^2 \times 100 = 271.58(\text{KN}) \quad (3-3)$$

$$F_p = \pi \times 1.84 \times 129 \times 8.0 + 271.58 = 6237.06(\text{KN}) \quad (3-4)$$

根据顶力计算数值，主顶油缸选用4台200t双级等推力油缸，主顶推力为800吨（7840 KN），顶镐总推力大于计算总顶力，因此不需加设中继间。

（2）顶管设施安装

①后背墙施工

后背墙的土抗力核算：主顶油缸施加的顶进力是通过后背墙均匀地作用在工作竖井的土体上，为确保后背墙在顶进过程中的安全，后背墙的反力是顶力 F 的1.2倍以上，反力采用下述公式计算：

土抗力 R 为总推力 F 的1.2~1.6倍，以确保安全， R 为

$$R = \alpha B(\gamma H^2 K_p / 2 + 2CH\sqrt{K_p} + \gamma HK_p) \quad (3-5)$$

表3-2 顶管后背墙核算统计表

序号	顶管竖井	H	C	h	R	总顶力 F_p	倍数
1	京开高速	4.0	12	2.1	7913.6	6237.06	1.3

经计算：土抗力为总顶力的1.3倍，后背墙的设计满足施工要求。

根据顶力计算数值（总顶力 $F_p=6237.06$ KN），主顶油缸选用4台200t双级等推力油缸，主顶力为800吨（7840 KN），顶镐总推力大于计算总顶力，因此不需加设中继间。经计算，土抗力（ $R=7913.6\text{KN}$ ）为总顶力的1.3倍，后背墙的设计满足施工要求。

4. 顶管施工

顶管初始顶进的前30m作为试验段，本工程顶进速度控制在30mm~50 mm/min，顶管机采用较低速度，正常顶进后，适当提高顶进速度。

在顶进作业过程中，顶力控制的重点是尽可能的减小顶进阻力，为了降低管道所受的摩擦阻力，通过位于管道内壁的注浆孔向管道外侧注入泥浆，在土壤和顶管机、顶进管道之间形成具有一定厚度的泥浆套，顶管机和顶进的管道在泥浆套中向前顶进以达到减阻目的。在注浆过程中遵循须先注浆后顶进，边压浆边顶进，及时补充浆液的原则。

经计算，每节套管的理论注浆量约为0.17立方米，考虑到泥浆的损失，实际注浆量需要增加50%左右。

在试验段顶进时，每顶进30cm，测量一次；正常顶进后，每顶进3米，在竖井底部使用全站仪完成一次测量。顶管机操作人员通过监控设备不断地观察光靶上的激光点是否发生偏移。当顶管机发生偏转时，可以通过改变刀盘的转向来纠正，刀盘随着顶管机偏转的方向转动，也可以通过液压千斤顶纠偏，纠偏时要做到勤纠偏、微纠偏。

管道顶进完毕后，为防止顶进区域地表发生沉降，需要对顶进管道与周围土壤间存在的空隙注入浆液。注浆采用水、粉煤灰、水泥的混合物。

5. 施工措施

（1）全过程沉降观测

①竖井的位移和沉降观测

为了保证顶管施工的安全及顺利进行，在工作竖井及接收竖井施工期间，实时监测竖井边坡位移，从而及时掌握边坡位移的改变情况，这也正是整个工程的关键环节。经过测量，竖井的沉降和水平位移值满足设计和国家规范的要求。

②路面及地下障碍物的沉降观测

路面变形控制要求：在顶管施工影响范围内，路面的最大隆起值小于5mm，最大沉降值小于10mm，沉降坡度不大于1‰，同时满足沉降速率小于2mm/d，可维护路基稳定、满足相关规范的路面平整度控制要求。

路面裂缝控制要求：为保证路面使用年限，要求路面原有病害不发生恶化，裂缝宽度增加、增加支缝和龟裂块度变小、沉降变形加剧等现象，且不产生新的裂缝，以维持道路现状，保证道路正常通行。

监测点布置图：第一排监测点布置距顶管竖井10m位置（试验段范围内），第二排检测点布置在双排水管上方，对排水管进行沉降监测，第三排监测点布置在西侧辅路东马路牙附近，第四排监测点布置在东侧辅路西马路牙附近，第五排监测点布置在东侧排水沟东侧上坡边。同时与第三方监测单位同点监测，互为校核。

顶进施工及注浆结束后，对填充注浆的密实度进行雷达检测，地面沉降在允许偏差范围内。

四、顶管施工中地层变形原因分析及控制措施

（一）顶管施工地层变形原因

1. 地层变形的主要原因分析

（1）超量出土造成顶进压力小于土体压力，使挖掘面失稳，上层土体松动下落，地面出现沉降；出土量过少时，上部土体受到的挤压力过大，引起地面隆起，甚至开裂。

（2）掘进机外径与管道外径之差使得管道外壁有一个环形空间，这一空间不能对上层土体支承时，地面出现沉降。

（3）润滑泥浆压力降低，不足以支承上层土质，土体向管壁塌落。

（4）纠偏时掘进机拐弯会形成一定的空隙，研究

发现空隙与纠偏角之间呈现显著的正相关关系。在顶进过程中，一旦空隙内涌入坍塌的土壤极易产生沉降现象。

2. 地层变形机理

研究发现，顶管所在的区位直接影响了其通过特定断面的地层变形时间曲线，具体参见图4-1。整个曲线由五个不同的阶段构成，不同阶段对应的变形原因存在明显的差异性。

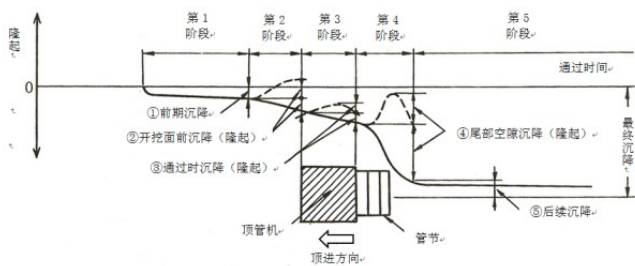


图4-1 顶管施工地层变形阶段示意图

在第1阶段中，是在顶管机尚未到达此断面时，其突出特点是地下水位不断下降，并出现固结沉降；在第2阶段中，是在顶管机通过此断面前，一旦土压控制不到位，需要对正前方由于土体变形引起的底层改变进行开挖；在第3阶段中，是在顶管机通过此断面前，受纠偏、摩擦等因素引发的地面沉降；在第4阶段中，是在顶管机通过此断面后，一旦洞体和管节外部之间的空隙未能及时填充，将会引发应力释放，从而引发沉降；一旦填充的泥浆压力过大，那么将造成地表隆起；在第5阶段中，是在顶管机通过此断面后的较长时间，受施工影响产生地表松弛、波动，尤其是对于质地较软的黏性土壤而言这种现象是最为显著的。

（二）土压（泥水）平衡式顶管地层变形控制措施

1. 前期沉降控制

在这一时期，地下水压的维持是非常重要的，在对水压进行控制的过程中应当从下述几个方面入手：

（1）对土压的控制值进行精准调控，保持在顶进期间的稳定，从而确保水压和土压的均衡。

（2）对泥土塑流化进行优化调整能够有效地保障土压式顶管开挖面土压的稳定。泥浆性能则是泥水式顶管开挖压力稳定的基础，在施工过程中需要对不同的地质状况确定相应的泥浆材料，并对配比进行调整。

（3）要避免地下水的渗漏，例如从管节、顶管机等部位。这就对设备的维护提出了较高的要求，确保顶管机密封、驱动、铰接状态良好，各部件之间连接牢固。

（4）在土层地下水位较高并且渗透性突出时，应当提前预防，介入一定的防喷涌手段，避免渗水。

2. 开挖面前方沉降（隆起）控制

在进行土层开挖之前务必做好沉降（隆起）的控制，通常利用的原理是以土压（泥水压）控制实现平衡，具体方法如下：

（1）对土压（泥水压）控制值的大小进行调控，保证在施工时恒定不变，从而确保水压和土压大小一致。

（2）泥浆性能则是泥水式顶管开挖压力稳定的基础，在施工过程中需要对不同的地质状况确定相应的泥浆材料。

（3）强化排土量的管控。

（4）针对土压式顶管，还应当充分考虑对其他参数的调控，例如刀盘扭矩、顶力值、顶进速率等。

3. 通过时沉降（隆起）控制

在顶进通过过程中的应对方法如下：

（1）强化顶管机姿势的管控，防止在顶进过程中出现偏差。一旦操作失误，需要遵循“勤纠、少纠、适度”的理念进行纠偏。

（2）对于土壤较为松散的区域，一旦设备和土体间的摩擦阻力较大，则需要利用注浆的方式降低阻力。

4. 尾部空隙沉降（隆起）控制

在发生尾部空隙沉降（隆起）时应当利用注浆的方式进行防范，具体措施如下：

（1）尽快补注浆。（2）做好尾部空隙的填充。

（3）强化注浆压力的调控，确保注浆量达标。

5. 后续沉降控制措施

对于土壤较为松散的区域，施工完毕后容易出现后续沉降现象，常见的应对措施如下：

在前期作业过程中，充分降低对地层的干扰。顶管施工完毕后，需要立即实施泥浆置换，强化注浆压力的调控，确保注浆量达标。

结语

本文结合顶管施工技术应用在穿越高速公路燃气管道敷设工程的实际案例，对城镇燃气管道建设中顶管施工技术的设计计算、地层变形原因及控制措施等方面进行了分析研究，为顶管施工技术在城镇燃气管道建设中的运用提供参考。

（1）在工程实例中，演算了顶管施工技术中顶力、后背墙反力等关键环节的理论计算过程，再次说明前期设计、理论计算及设备选择的重要意义。

（2）通过分析顶管施工过程中地层变形的原因，总结出控制地面沉降、隆起的控制措施，采用技术措施和监测相结合的方式，减少顶管施工对地上物、道路等的影响，为今后燃气管道建设中运用顶管施工技术借鉴的经验。

参考文献

[1] 戴景祥. 长距离连续非开挖铺设管线方式研究: [北京建筑大学硕士论文]. 北京: 北京建筑大学, 2015.
 [2] 曾超. 探究恶劣地质中顶管施工的应对处理措施 [J]. 中国科技期刊数据库 工业A. 2016 (16).
 [3] 张国京. 顶管穿越道路沉降控制研究: [中国(北京)非开挖技术国际交流]. 2012.

作者简介: 韩旭 (1987.2-), 男, 汉族, 北京, 工程师, 主要从事燃气工程建设项目管理。