

文章编号: 1000-7598-(2005) 08-1273-05

顶管施工中管道受力性能的现场试验研究

魏 纲¹, 徐日庆¹, 余剑英², 王 众¹

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027; 2. 浙江大学 城市学院 工程分院土木系, 杭州 310015)

摘 要: 对顶进过程中管道纵向与环向钢筋应力及管土接触压力进行了现场测试。实测数据分析表明, 管节开始顶进时轴力随顶进距离增大而增大, 顶进到一定距离后, 基本维持在一定范围内。管顶和管底的内侧钢筋受拉, 外侧钢筋受压; 管节两侧的内侧钢筋受压, 外侧受拉。钢筋混凝土管道可看作柔性管道。环向钢筋受力很小, 但变动较大。管土接触压力随管道的顶进一开始缓慢上升, 到一定距离后基本保持在一定范围内。注浆对管顶接触压力影响较大, 注浆后压力明显减小, 可取为上覆土重; 对左右两侧接触压力影响较小。注浆前左右两侧跟管顶压力相差不大, 注浆后则明显大于管顶压力。

关 键 词: 顶管; 管道应力; 管土接触压力; 现场监测

中图分类号: TU 473.2

文献标识码: A

Site-based experimental study on pipe behavior during pipe jacking

WEI Gang¹, XU Ri-qing¹, YU Jian-ying², WANG Zhong¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China)

Abstract: Vertical and annular reinforcing steel bar stress and pipe-soil contact pressure during pipe jacking were monitored on the spot. Field data were analyzed. It showed that axis force increased along with pipe jacking at the very start, and it maintained stated basically when jacking to a certain distance. When inner side reinforcing steel bar of tip and bottom pipe were pulled, outer side were pressed. And both sides of pipe were just contrary. Reinforced concrete pipe could be regarded as flexible pipe. Annular reinforcing steel bar bears very little but with great alteration. Pipe-soil contact pressure increased slowly along with pipe jacking, and it also maintained stated basically after some distance. Contact pressure of tip pipe was greatly affected by grouting. The pressure decreased obviously after grouting and it could be adopted as up-earth gravity. Contact pressures of both sides were affected less. Compared with the tip pipe, they were almost the same before grouting and noticeably bigger after grouting.

Key words: pipe jacking; pipe stress; pipe-soil contact pressure; site monitoring

1 引 言

近年来顶管施工技术在中国得到迅速发展, 并广泛应用于给排水管道工程。在顶管施工过程中, 顶进管在管轴方向和横跨管轴方向上同时受到荷载作用^[1], 主要有管道自重、土压力、地下水压力、注浆压力、交通荷载、顶推力、管壁摩阻力、掘进机的迎面阻力等。同时, 顶推力是一种循环荷载, 不断变换地由零上升到最高值, 而后又由最高值下降到零。管道的受力非常复杂, 处于双向应力状态。因此, 了解管道的真实受力特性对于顶管施工与管道构件设计具有实际意义与参考价值。

潘同燕^[2] (2000 年) 对大口径急曲线顶管进行了

现场试验, 牛津大学^[3,4]也作过这方面的研究。冯海宁等^[5] (2003 年) 分析了注浆对接触应力的影响。但目前对埋深较浅的小口径直线顶管的管道受力缺乏研究。本文通过在特定管道中预埋钢筋应力计和土压力盒, 研究了顶管施工中管道纵向与环向钢筋应力及管土接触压力的变化规律。

2 工程概况

杭州市运河污染综合整治工程因截污工程需要, 在石桥路路段铺设污水管, 采用顶管方法施工。石桥路位于杭州市北部, 长约 6 600 m, 路宽约 10~30 m, 是进出杭州的一条重要通道。II 标段 24[#]试验段, 顶进长度为 22.65 m, 管道外径 ϕ 1 440 mm,

内径 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$, 管轴线埋深 $4\ \text{m}$, 覆土厚 $3.28\ \text{m}$ 。管道采用单刀盘土压平衡式掘进机施工, 测试管长 $3\ \text{m}$, 其他管节长 $2\ \text{m}$ 。管道穿越 2 层粉土, 如图 1 所示。粉土呈灰黄色褐黄色, 局部呈灰色, 很湿, 稍密, 含云母碎片和少量铁锰质斑点。主要的物理力学指标: 天然含水量 $w=29.5\%$, 孔隙比 $e=0.81$, 重度 $\gamma=19.43\ \text{kN/m}^3$ 。固结快剪强度指标: $c_{\text{cq}}=8.8\ \text{kPa}$, $\varphi_{\text{cq}}=25.0^\circ$, 压缩系数 $a_{1-2}=0.23\ \text{MPa}^{-1}$ 。

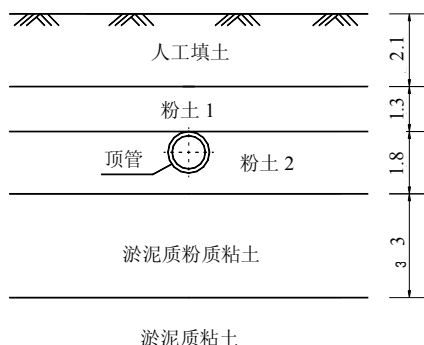


图 1 顶管施工断面图 (单位: m)

Fig. 1 Cross-section of pipe jacking (unit: m)

3 测试内容及布置

3.1 测试内容及方法

管道现场测试内容主要是对管道内力和管土接触压力进行测试。方法是将测试仪器预先安装在一个特制的管道内, 管节长 $3\ \text{m}$, 然后将其安放在掘进机后面第 2 节, 随掘进机一起向前顶进。

3.1.1 管道内力测试

管道内力测试包括管道纵向和环向应力的测试。通过在管道纵向和环向钢筋上安设钢弦式钢筋应力传感器, 测读纵向和环向的钢筋应力值。

钢筋应力传感器采用 GJJ10 系列钢弦式钢筋应力计, 用 ZXY 系列 2D 型钢弦式频率接收仪测试, 为单点手动测量。钢弦式钢筋应力计的安装方法为: 先将连接螺母与受力钢筋进行碰焊连接, 然后将定位杆代替传感器与钢筋一起绑扎, 最后将传感器在下钢筋之前放入, 可以保证放置钢弦式钢筋应力计的质量。

管道内力测点的埋设在管道制作时进行。与管道制作厂家协商, 在埋设断面上预埋 2 个注浆孔供导线引出用, 钢弦式钢筋应力计的导线从该专门预埋的注浆孔中引出, 每根引线都必须严格标上记号, 并记录。导线先沿钢筋引到注浆孔处, 所有传感器的引线分两批分别从 2 个注浆孔引出。测试结束后, 再按常规注浆孔的密封处理方法作防水处理。

测试时, 将传感器的 2 根引出线与频率接收仪的 2 根引出线分别相连, 测读传感器钢弦的振动频率, 再根据预先标定好的频率应力曲线即可推算钢筋所受的应力。测试工作与顶管顶进施工同步, 用以监测施工过程的安全性。

3.1.2 接触压力测试

为取得管道实际承受的水土压力值, 用土压力盒直接测试管道外壁面上的接触压力。测试接触压力采用土压力盒, 其型号为 TYJ 系列钢弦式土压力计, 量程为 $0.5\ \text{MPa}$ 。用 ZXY 系列 2D 单点手动钢弦式频率接收仪测试, 测试方法同前。

埋设工作在管道制作时进行, 土压力盒的固定采用挂布法, 先将土压力盒安装在帆布上, 然后平铺在需要量测土压力的钢筋笼表面并加以固定。由于混凝土在挂帘的内侧, 因而利用液态混凝土的侧向挤压力将挂帘连同土压力盒一起压向钢模。拆除钢模后将显出土压力盒的敏感膜, 将顶管顶入后土压力即直接作用在土压力盒的敏感膜上。引线和防渗方法同钢筋应力传感器^[2]。

3.2 测试布置

测试用管道采用内外两层钢筋, 布置了 2 个监测断面。每个监测断面的环向和纵向各 4 个方位的内外两侧钢筋上各布设一个钢筋应力传感器, 每个断面共设 16 个。为便于布置和利于管道安全, 环向和纵向钢筋应力传感器纵向相距 $30\ \text{cm}$, 共埋设钢筋应力传感器 32 个, 具体布置如图 2 所示^[6]。图中方型为纵筋, 圆形为环筋, T 为土压力盒预留孔, z 为导线预留孔, 环向钢筋应力计距管节顶端距离为 $560\ \text{mm}$, 纵向为 $530\ \text{mm}$ 。

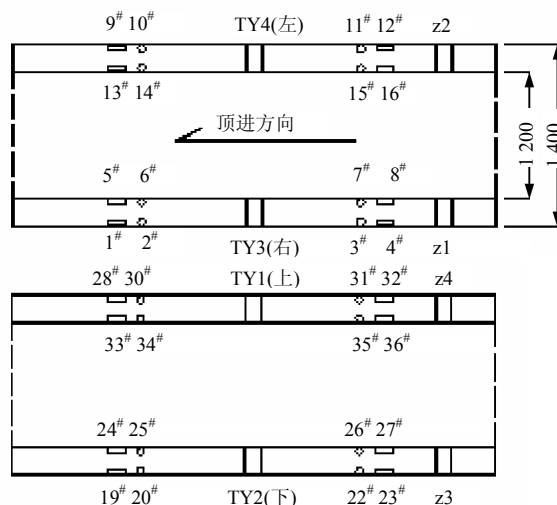


图 2 管道应力测点布置示意图 (单位: mm)

Fig. 2 Distribution of pipe stress testing spots (unit: mm)

在管道的中间部位布置管土接触压力计 4 个, 分别布置在管道的顶部、底部以及左右两侧。土压力盒采用预埋处理(编号 TY1~TY4), 如图 3 所示。

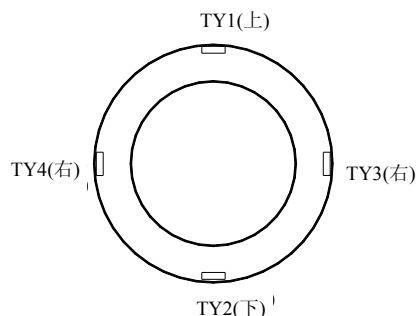


图 3 土压力盒布置图

Fig. 3 Distribution of earth pressure cells

4 测试结果及分析

4.1 管道纵向受力分析

顶管施工时顶进力的传递是由千斤顶传给顶铁, 然后作用在纤维垫圈上, 把顶进力传递到管道接头上, 最后一节一节的传递到掘进机。管道纵向受到顶进力、开挖面迎面阻力和管道、掘进机与周围土体之间摩擦阻力的作用。随着顶进距离的增加, 越后面的管节受到的顶进力越大。对某一特定管节来说, 根据受力平衡, 它受到的顶进阻力是一个相对的定值, 也就是说它受到的阻力应该是开挖面迎面阻力加上前面管节和掘进机的周围摩擦阻力之和。

由于变形协调条件, 混凝土的应变值应等于钢筋的应变值, 则管道某一截面总的作用力:

$$F = \varepsilon(E_c A_c + E_s A_s) \quad (1)$$

式中 E_c 为混凝土的弹性模量; E_s 为钢筋的弹性模量; A_c 为混凝土的截面面积; A_s 为钢筋的截面面积; ε 为测到的钢筋应变值, $\varepsilon = \sigma / E_s$ 。

如图 4 所示, 两个截面之间的总作用力之差为

$$F' = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)(E_c A_c + E_s A_s)}{E_s} \quad (2)$$

式中 σ_1 , σ_2 分别为钢筋应力计 1, 2 的应力值; F' 值应等于两个截面之间的管壁摩擦阻力, 由其可以求出平均摩擦应力。

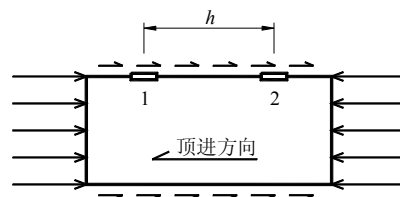


图 4 管节受力分析

Fig. 4 Force analysis of jacked pipe

4.2 管道内力测试结果及分析

4.2.1 管道纵向内力测试结果及分析

本次试验中, 掘进机后面第 1 节管道为注浆管, 第 2 节为试验管。测试时间是在试验管及其后面两节管道顶进时, 在管道测试过程中没有采取注浆减摩措施。图 5 为顶力随顶进距离变化曲线, 管道测试是在顶距为 2~9 m 之间, 该过程中顶力慢慢由 9.5 MPa 上升到 10.5 MPa。根据实测数据, 计算得到顶管在粉土层中顶进时的管壁平均摩擦应力约 16~19 kPa。由于仪器安装、制作过程复杂, 加上受施工影响, 有个别钢筋应力计无法测读。图 6 为实测纵向钢筋应力随时间变化曲线, 正值为钢筋受拉, 负值为受压(以下同)。

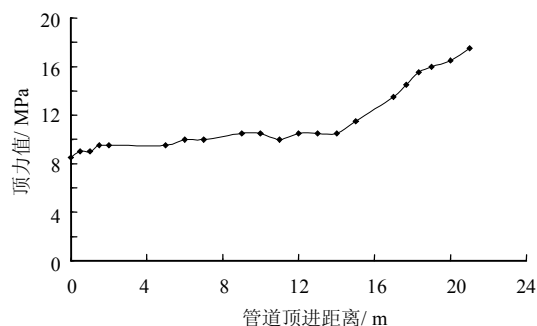


图 5 顶力随顶进距离变化曲线

Fig. 5 Curve of jacking force vs. jacking distance

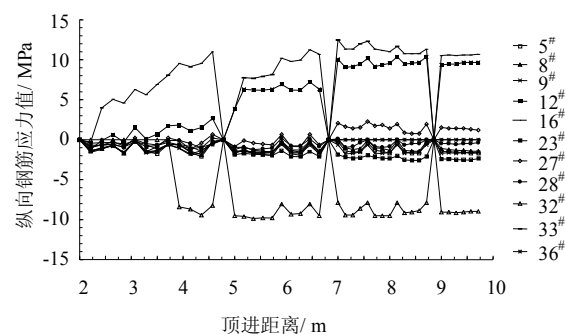


图 6 纵向钢筋应力随时间变化曲线

Fig. 6 Relation of vertical reinforcing steel bar stress to time

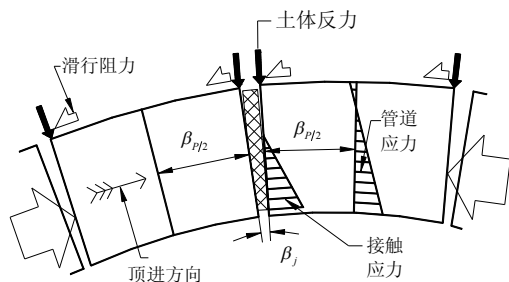


图7 荷载施加后的管道与接头处受力模型
Fig.7 Mode of pipe and joint with load applied

当管节一开始顶进时，钢筋应力随顶进距离增大而增大。当顶进到一定距离以后，应力基本保持不变。更换管节时，主千斤顶卸载，此时应力为零。管道内一部分钢筋应力计受压，一部分受拉，且基本保持对称。随着顶距的增加，测点维持受压或受拉状态，只有27[#]测点发生改变，先受压后受拉，但应力值很小。管道产生拉应力的原因是管道发生偏斜，接头处产生应力集中现象，管道弯曲，产生拉应力，如图7所示^[7]，表明钢筋混凝土管道在顶进过程中可以看成是柔性管道。

表1为纵向钢筋应力计测试结果，通过对数据的整理发现，管顶和管底的内侧钢筋应力计受拉，外侧受压；管节两侧的内侧钢筋应力计受压，外侧受拉。绝大多数测点符合该规律，其中27[#]先受压后受拉，基本符合规律。只有9[#]和36[#]测点不符合，但其数值很小。由表1可知，32[#]测点受压最大，压力为9.88 MPa。测试结果表明，对于管道的内侧钢筋来说，起决定作用的主要是管道顶部的内力，而外侧钢筋则决定于管侧区域中的内力。

表1 纵向钢筋应力计测试结果
Table 1 Testing results of stress gages for vertical reinforcing steel bars

编号	位置	最大应力/MPa	最大应变
5	断面1、右侧内部	-2.14	-23
8	断面2、右侧内部	-1.89	-17
9	断面1、左侧外部	-1.79	-22
16	断面2、左侧内部	-1.94	-21
28	断面1、上侧外部	-1.24	-13
32	断面2、上侧外部	-9.88	-108
36	断面2、上侧内部	-1.72	-20
27	断面2、下侧内部	-1.52/2.27	-14/21
23	断面2、下侧外部	-2.59	-47

4.2.2 管道环向内力测试结果及分析

环向钢筋主要承受自重、土压力、地下水压力和注浆压力等，它的受力反映了管道横截面的受力情况。图8为环向钢筋应力随时间变化曲线，测试结果表明，环向钢筋受力很小，应力值基本在-1~

2 MPa之间。钢筋主要承受拉应力，最大应变为20，说明管道上、下、左、右位置的应力分布较均匀，管道变形很小。由于土质变化、管道偏斜、注浆压力等影响，管道受到的围压经常发生变化。钢筋应力要不断地进行调整，数据波动较大，规律性不强。

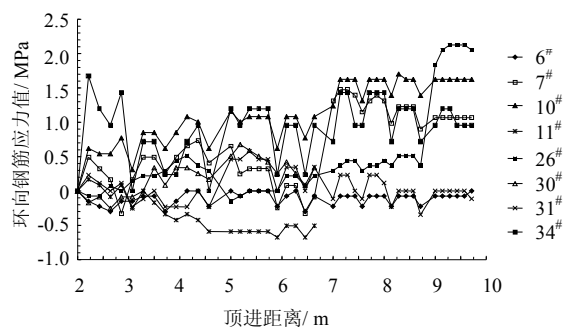


图8 环向钢筋应力随时间变化曲线
Fig.8 Relation of annular reinforcing steel bar stress with time

4.3 管土接触压力测试结果及分析

现场试验中，管道顶进到17 m时即通过紧随掘进机后面的注浆管注浆，注浆压力为0.3 MPa。管道在顶进时向右侧偏斜。测试结果如图9所示，其中管底的土压力盒受损，无法测读。

由图9可见，在开始的一段时间内，由于应力调整，接触压力波动很大，都是随着顶进距离的增大而增大。顶部接触压力最大值为155 kPa，注浆后由于土体变得稳定，加上泥浆在重力作用下先流到下方，因此管顶的接触压力在注浆后会随着土体的稳定而不断地减小，最小达到36.5 kPa，最后平均读数约为66 kPa。计算上覆土重 $\gamma H = 64$ kPa，说明注浆后管道顶部的竖向荷载可取为上覆土重，这与文献[2]的测试结果相符。顶部土压力盒测得的接触压力为土体竖向压力和注浆压力之和。

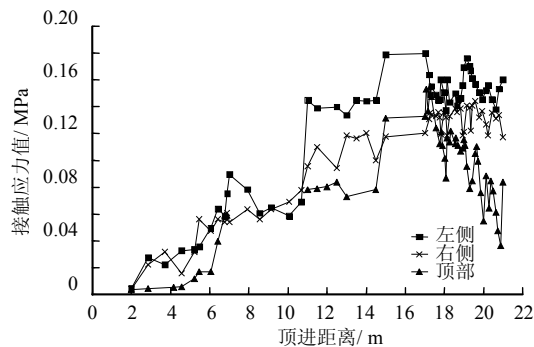


图9 管土接触压力随顶进距离变化曲线
Fig.9 Curves of pipe-soil contact pressure vs. jacking distance

左侧接触压力值一开始缓慢上升, 随后开始波动, 注浆后略有减小。顶进到一定距离后, 压力值基本保持在一定范围内, 最大值为 189 kPa, 平均压力为 150 kPa。右侧接触压力值随着顶进距离的增加缓慢上升, 注浆后没有什么影响。顶进到一定距离后, 压力值开始保持在一定范围内, 最大值为 144 kPa, 平均应力为 135 kPa。由于管道向右侧偏斜, 造成左侧外壁与土体之间的空隙较右侧大, 为了形成浆套, 要求左侧的注浆量大于右侧。因而左侧注浆压力要比右侧大很多, 实测得到的接触压力结果也验证了这一点。对于管道底部的接触压力, 文献[3]的测试结果表明管道底部与顶部的接触压力比较接近, 在大多数情况下底部的接触压力都比顶部的大。文献[8]认为, 管道底部土体反力与顶部相同, 可不计管道自重, 测试结果表明, 管土接触压力的大小主要取决于土压力和注浆压力, 其中注浆压力起控制作用。注浆对管道顶部接触压力影响很大, 对左右两侧接触压力影响很小; 左右两侧接触压力在注浆前跟顶部压力相差不大, 注浆后左右两侧压力则明显大于顶部压力。

5 结 论

(1) 管道一开始顶进时, 轴力会随顶进距离增大而增大, 但到一定距离以后, 基本维持在一定范围内。管顶和管底的内侧钢筋受拉, 外侧受压; 管道两侧的内侧钢筋受压, 外侧受拉。环向钢筋主要承受拉应力, 但受力较小。

(2) 管土接触压力随顶进距离的增加而缓慢上升, 到一定距离后, 基本维持在一定范围内。注浆对管顶接触压力影响较大, 注浆后压力明显减小, 对左右两侧接触压力影响较小。

(3) 分析表明, 管道在顶进阶段主要承受轴力作用, 由于钢筋笼的存在, 使管道可承受较大的拉应力作用, 减小了管道被撕裂的可能性。顶进管

最易破损的位置出现在管道接头部位, 该处截面小, 应力易集中, 容易被压碎, 因此在制造时应作加强处理。环向受力主要由混凝土承受, 拉应力很小, 只需配构造钢筋即可。

参 考 文 献

- [1] 马·谢尔勒. 顶管工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- [2] 潘同燕. 大口径急曲线顶管施工力学分析与监测技术研究[硕士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [3] Milligan G W E, Norris P. Site based research in pipe jacking-objectives, procedures and a case history[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1996, 11(1): 3—24.
- [4] Milligan G W E, Norris P. Pipe-soil interaction during pipe jacking[J]. **Geotechnical Engineering**, 1999, 137(1): 27—44.
- [5] 冯海宁, 温晓贵, 魏纲, 等. 顶管施工对土体影响的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 781—785.
FENG Hai-ning, WEN Xiao-gui, WEI Gang, et al. In-situ test research on influence of pipe jacking on soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 4(5): 781—785.
- [6] 魏纲. 顶管施工中土体性状及环境效应分析[硕士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [7] Haslem R F. Structural interaction at joints in pipe-jacked tunnels[J]. **The Structural Engineer**, 1996, 74(10): 165—171.
- [8] 蒋洪胜, 候学渊. 软土地层中的圆形隧道载荷模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 651—658.
JIANG Hong-sheng, HOU Xue-yuan. Study of the loading pattern on circular tunnel in soft ground[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(4): 651—658.