

# 顶管施工中顶力与顶程关系及其影响因素分析

向安田, 丁文其, 朱合华

(同济大学地下建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:**以上海某长距离急曲线顶管工程为例, 通过现场实测 4 节管段顶进过程中的顶力, 研究了顶力随顶程的变化规律, 系统分析了顶进过程中顶力的主要影响因素, 得到了一些有用的结论。

**关键词:**非开挖; 顶管; 顶力; 顶程; 变化规律; 影响因素

**中图分类号:** TU81    **文献标识码:** B    **文章编号:** 1672-7428(2006)10-0029-03

**Relation between Jacking Force and Jacking Path in Pipe-packing Construction and Analysis on the Influence Factors/XIANG An-tian, DING Wen-qi, ZHU He-hua** (Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In the construction of a long distance pipe-jacking tunnel with small curvature in Shanghai, jacking forces of four pipes in jacking path are measured. Based on the on-site observation, this article studies the changing pattern of jacking force in different jacking path and analyses the main influence factors to jacking force in construction, some useful conclusions are obtained.

**Key words:** trenchless; pipe-packing; jacking force; jacking path; changing pattern; influence factor

顶力是顶管施工中必须确定的一个重要施工参数, 它直接影响着工作井后背设计、管节的强度要求、中继环的配置数量和间距以及顶进设备的选择。现有的顶力计算公式较多, 在形式上可分为理论公式和经验公式。目前, 一些文献<sup>[1,2]</sup>对顶力的计算给出了各种理论公式, 但由于影响顶管顶力的施工因素复杂多变, 这些公式很难定量考虑诸如轴向偏差、注浆工艺以及土质变化等因素对顶力的影响, 所以导致各自适用条件并不明确, 计算结果差异较大, 设计计算时往往无所适从; 很多经验公式虽然简单明了, 但也只能适用于特定的条件, 如某种土质, 一定的管径范围、顶进长度等。因此, 不断从新的顶管工程中总结有关顶力的定性规律和新经验, 仍具有不可忽视的现实参考意义。本文就上海某长距离大口径急曲线顶管工程施工中 4 节管段各自实测的顶力随顶程变化情况做了一些分析, 以期对其顶力和顶程之间的关系有一个认识, 总结一些规律, 并能为

今后同类顶管工程所借鉴。

## 1 工程概况

工程南起西藏路复兴中路, 沿西藏路向北, 越过苏州河、延伸至西藏路新疆路, 全长约 3.033 km, 是目前国内难度最大的长距离、大口径急曲线顶管。共施做了 8 个工作井, 顶进了 7 节管段。由于顶管施工在上海市中心的商业繁华地段进行, 并在上海第④层灰色淤泥质粘土地层和第⑤<sub>1-2</sub>层灰色粉质粘土地层中穿越, 所以选用了密封性好、开挖面稳定能力强的掘进设备——泥水平衡顶管机。表 1 是本文要分析的 4 段曲线顶管的概况。

## 2 实测顶管推力与顶程的关系分析

顶力包括侧摩阻力和机头的迎面阻力, 顶程为零时的顶力即为初始迎面阻力。理论上讲, 应根据顶管埋深的不同以及地层条件的变化, 不断修正机

表 1 管线顶程设置

序号	顶程	管径/mm	长度/m	备注
1	3~4 号	2700	576	三处平面曲线, 两处曲线半径 300 m, 另一处曲线半径 600 m, 下行落差 2.1 m
2	5~4 号	2700	565	二处平面曲线, 曲线半径 $R=600$ m, 前 100 m 上行落差 5 m, 后 465 m 下行落差 2.6 m
3	6~5 号	2700	376	二处平面曲线, 曲线半径分别为 300、600 m; 一处竖曲线, 曲线半径 2000 m。下行落差 7.9 m
4	6~7 号	2700	416	二处平面曲线, 曲线半径分别为 300、600 m; 一处竖曲线, 曲线半径 2000 m。上行落差 2.4 m

收稿日期: 2006-03-10; 改回日期: 2006-09-20

作者简介: 向安田(1973-), 男(土家族), 湖北利川人, 同济大学博士研究生在读, 岩土工程专业, 从事隧道和边坡方面的研究工作, 上海市密云路 528 弄同济大学博士生 3 号楼 1302-3 室, 13524616822, xat1973@sina.com。

头压力(等于迎面阻力),以防止机头压力过大而导致地表过度隆起,或过小而使掘进面失稳,引起地表过大沉降。取顶管平均埋深处机头中心位置静止土压力的1.00~1.05倍作为机头压力的设定值,并利用泥水平衡顶管机良好的调节和控制开挖面水土压力的能力使其在顶进过程中维持在恒定状态,既有利于加快施工进度,在保护环境方面也是可行的。顶进过程中虽然没有将地表沉降完全控制在预先制定的10 mm的严格标准内,但最大位移仅15 mm,顺利穿越了地铁2号线,保证了地表建筑和地下管线的安全运营<sup>[3]</sup>。所以,每节管段顶进过程中的迎面阻力即为初始迎面阻力,侧摩阻力的波动规律与总顶力的完全一致。

第1管节迎面阻力为1250 kN,顶力整体呈间歇性剧烈震荡上升趋势,在120~150 m段高位震荡(最高达6300 kN)后,其后的150~370 m段顶力并没有随顶程增大而出现增大的趋势,而是基本维持在4150 kN下并作平缓低幅震荡,370 m以后震荡加剧并高幅震荡上升,在顶程为500 m时顶力最大,达8100 kN,对应的最大侧摩阻力6850 kN,约是迎面阻力的5.6倍(见图1)。

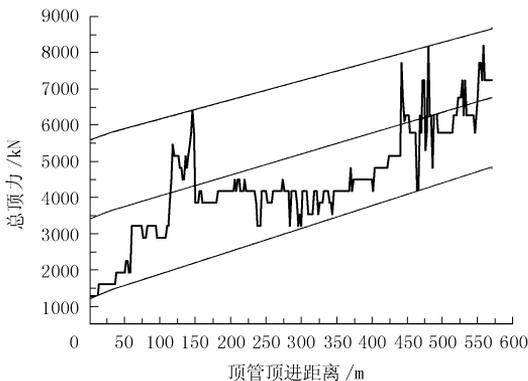


图1 第1节顶管顶力-顶程关系图

第2管节迎面阻力1300 kN,顶力整体呈震荡上升趋势,震荡频率和幅度相对较为均匀,在68 m处顶力就跃升到4120 kN,在475 m处顶力最大,达6120 kN,对应的最大侧摩阻力4820 kN,约是迎面阻力的4倍(见图2)。

第3管节迎面阻力3230 kN,顶程初段顶力就迅速攀升并剧烈震荡,在77 m处即达到8560 kN,与顶程末段的顶力基本持平,然后剧烈下降至92 m的4560 kN,92~250 m段呈较为激烈的震荡上升趋势,250 m处顶力最大,为8620 kN,对应的最大侧摩阻力5390 kN,约是迎面阻力的1.7倍,250 m以后顶力维持在850 kN左右并作平缓低幅震荡(见图

3)。

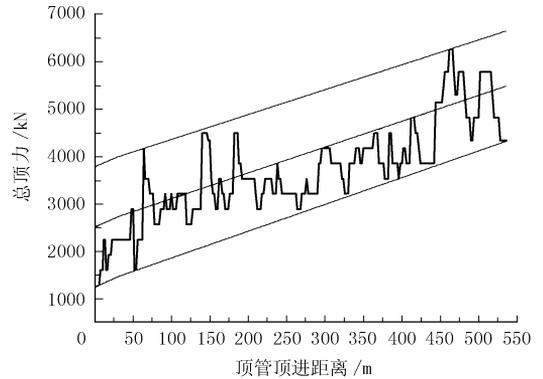


图2 第2节顶管顶力-顶程关系图

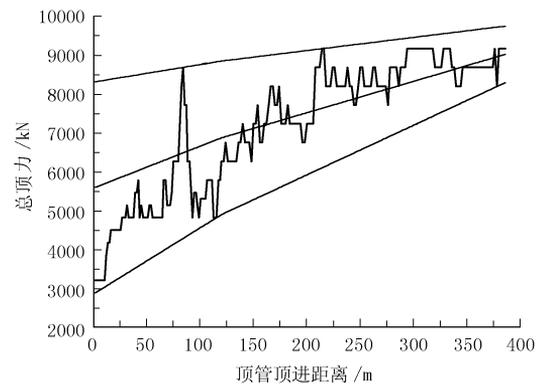


图3 第3节顶管顶力-顶程关系图

第4管节顶力整体呈低幅平缓震荡上升的趋势,迎面阻力1300 kN,在350 m处顶力出现急促的跳跃,并达最大值8570 kN,对应的最大侧摩阻力7270 kN,约是迎面阻力的5.5倍,然后剧烈下降至4200 kN左右,并一直延续到顶程末端(见图4)。

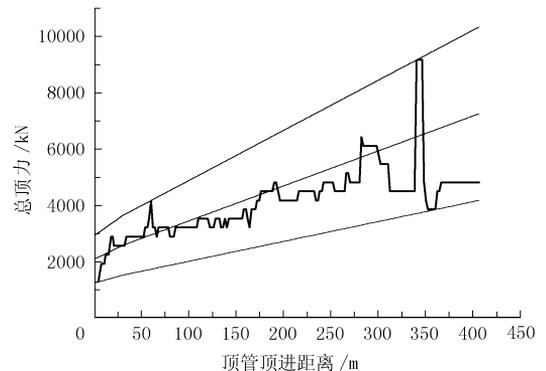


图4 第4节顶管顶力-顶程关系图

4节管段的顶力在初始阶段都有快速爬升的趋势,由于施工尚未稳定,如泥浆套还未成型、管道轴线的不断调整,初始阶段的顶力往往震荡比较剧烈,出现第一次峰值。顶程后段为出洞做准备而进行的施工调整使顶力最大峰值并不是在顶程最大时出

现,而是在后段某个阶段出现。顶进过程中迎面阻力基本恒定,侧摩阻力变化是引起长距离急曲线顶管顶力波动的根本原因,通过注浆减摩、轴线控制等手段来降低侧摩阻力和保证其相对稳定,是降低顶力,防止顶力大起大落,保证施工顺利进行的最关键环节。

在迎面阻力基本稳定的情况下,如果其他条件一致,顶力应该随顶程增加而线性增大,这一点已在短距离直线顶管中得到印证<sup>[4]</sup>。影响长距离急曲线顶管顶力的因素是多方面的、错综复杂的,再加上这些影响因素的施工控制难度大,顶力整体上虽呈随顶程增大而增大的趋势,但震荡较为剧烈,震荡幅度较大,频率较高,顶力与顶程的关系比较复杂,很难精确地定量描述。

### 3 顶进过程中影响顶力的主要因素

长距离急曲线顶管顶进过程中影响顶力的因素是多方面的、错综复杂的,归纳起来,有以下一些主要因素。

#### 3.1 地层条件和地下水

顶程中地层的的变化对顶力的影响是非常复杂和显著的。掘进面稳定性随地层变化而变化,地层不同,作用在刀盘或工作仓的土压力也不一样。不同类型地层和同类型管壁之间的摩阻力往往差别很大,钢筋混凝土顶管与粗砂之间的摩擦系数是与软土的 2~3 倍。

在顶管施工中,除了土与管壁之间的摩擦系数对顶力有影响外,土的自支撑能力也是个关键因素。对于无粘性土来说,由于工作面的开挖所造成孔隙水的负压很快地消散,若泥浆套支撑能力不足,上部土层会在开挖之后很快塌落到管道上而增大摩阻力,甚至将顶管抱死。当顶管穿越地层埋深大于临界埋深时,由于“土拱效应”,作用在顶管上的土压力为拱下的土柱重力;反之,“土拱效应”则不能形成,作用在顶管上的土压力为顶管以上全部地层的重力。不同地层产生拱效应的临界深度不一样,粘性地层临界深度比非粘性地层的小很多。

在地下水位以下地层中施工时,地下水位的变化,必然引起作用于管壁上的正压力的变化而导致管壁侧摩阻力的变化。地下水还通过作用于掘进面的水压力而影响顶进阻力。

#### 3.2 施工停顿

顶进过程中若停歇时间过长,四周土体可能会坍落在管壁上而影响顶进阻力,同时水分也会从减

阻浆液中离析出来,使减阻作用失效,则重新启动时顶力会增大。经常性的施工停顿后的顶管施工会发生由静摩擦到滑动摩擦的加速转变,这样不可避免地会出现所需顶力的峰值。一些顶力记录结果显示<sup>[5]</sup>,在经过较长时间的停顿之后,重新启动顶进时的顶力一般要比原来高很多。

#### 3.3 注浆工艺

注浆工艺对顶力的影响主要体现在泥浆的制备质量、泥浆套的完整性和稳定性以及注浆压力上。根据工程的泥浆试验研究,钢筋混凝土管与粘土的摩擦系数可以达到其与膨润土泥浆之间摩擦系数的 5 倍,若泥浆配比不合理、泥浆静置时间不足或注浆前搅拌不充分,则泥浆的减阻性能得不到充分发挥,影响减阻效果。顶管密封性不好、地层为非粘性地层或进出洞时未采取有效的封闭措施都容易导致漏浆,若不及时补浆,则形不成完整泥浆套而使顶管推力增大。注浆压力越大,作用在管壁上的压力相应增加,摩阻力也就越大。注浆压力过小,泥浆不能有效扩散到顶管周围形成完整泥浆套,则侧阻力会增大。

#### 3.4 超径比

顶管和施工中的超径比是指施工中的超挖量与所铺设管道直径的比值。美国拉伯运工业大学研究了砂层中圆形顶管超径比对顶进力的影响,发现当超径比大于最优超径比时,顶进力维持在一个较低的水平,但当超径比不断减小时,顶进力则急剧升高。太沙基通过砂层和淤泥层中方形顶管顶力的测量研究,得到了类似的结论<sup>[5]</sup>。

#### 3.5 管道状况

顶力随着管径的增大而增大,管道外表面材质的粗糙程度、管接头的平滑与否以及管道润滑涂层的减阻性能对顶进摩阻力都会产生很大的影响。

#### 3.6 管线方向偏离

管线方向偏离对顶力的影响是与泥浆套厚度紧密相关的。管线偏离往往导致管体和周围土体直接接触,从而会增大侧摩阻力。轴线偏差过大时,在顶进过程中还要克服由于扰动土体产生的被动土压力,偏离值越大,扰动范围越大,顶力就越大。目前尚未见定量评价轴线偏差对顶力影响的相关文献。

## 4 结语

长距离大口径急曲线顶管顶力虽整体上呈随顶程增大而增大的趋势,但震荡较为剧烈,震荡幅度较

(下转第 34 页)

液浸泡下产生膨胀。

由于钻孔内的钻屑和泥浆必须清出,在回扩钻孔过程中必须边扩边推,将钻孔内的泥浆和钻屑清出钻孔。待钻孔回扩工序完成后,将回扩头拆下,换上直径与钻孔等同的橡胶托盘反推清渣。当托盘单次清出的钻屑量小于 $1\text{ m}^3$ ,所含块状物的直径小于 $5\text{ cm}$ ,且呈流体状时方可认为孔内沉渣基本被清出。

#### 4.3.8 套管回拖

套管是本工程拉索的穿越通道,直径为 $200\text{ mm}$ 。为防止拉索铺设后产生锈蚀,在回拖过程中套管内不能进入钻屑和泥浆。套管管材是HDPE管,由于后续对拉施工时,拉索套管是随钢箱拉进而被人工拆除的,其壁厚应尽量小,本工程采用 $6\text{ mm}$ 壁厚。拉管时管头用钢套筒加玻璃胶密封。套管回

(上接第28页)

#### 4.7 高压旋喷施工

高压旋喷作业由2台DEJ30型高喷台车进行施工,采用二管法旋摆结合施工工艺。两套跟管钻机的钻孔进度基本能够跟上旋喷进度。由于工期提前,后来增加了一套高喷机和3台岩心钻机(3台岩心钻机才能满足一套高喷机的钻孔要求)。

### 5 施工效果

正式开工日期为2005年12月18日,完工日期为2006年1月25日,其中跟管钻机共完成进尺 $3860\text{ m}$ ,钻孔偏斜率 $<1\%$ ,钻孔孔位偏差 $<2\text{ cm}$ ,达

(上接第31页)

大,频率较高。由于顶进过程中顶力所受影响因素复杂多变,各种影响因素如轴线偏差、注浆工艺以及施工停顿等对顶力的影响很难量化,施工控制远不如短距离直线顶管那样容易,要较为准确地计算和预测顶力随顶程的变化规律仍然比较困难,现有的理论计算对长距离急曲线顶管顶力的估算甚至都没有参考意义。因此,要保证长距离大口径急曲线顶管的顺利顶进,就必须配置留有足够余地的顶进设备,使液压系统不在满负荷下工作,以便形成良性循环状态。要做好现场施工记录,根据出现的顶力异常情况影响因素分析和施工方案的调整。

拖时与一般水平定向钻铺管不同之处在于:(1)要求拉管过程中不能重新扩孔产生新的钻屑;(2)要求能喷出冲洗液,润滑套管管壁;(3)回拖时拉管的速度不宜太快,以免套管在回拖过程中变形而影响后续拉索穿越。

### 5 结语

拉索作为钢箱对拉贯通施工工艺重要的组成部分,其铺设的精度直接关系到整个工艺的成败。采用目前比较先进的非开挖水平定向钻进施工工艺铺设拉索,可从导向孔和钻孔两方面进行控制,能满足拉索铺设的精度要求。如果条件允许,该种施工方法应进一步完善,机具需进一步改良,必将在一些小型的隧道、桥涵施工中发挥更大的作用。

到了设计要求。

经高喷打孔注水检查,抗压强度满足设计要求( $R_{28}=8\sim 10\text{ MPa}$ )。2006年3月10日围堰开挖抽水结束,完全达到了预期效果,防渗效果很理想。

### 6 结语

潜孔锤跟管钻进技术在卵石层高压旋喷灌浆工艺当中的造孔施工,施工进度、质量都取得了非常好的效果。实践证明,跟管钻进技术在卵石层(含大量漂石)高喷施工或其他造孔施工具有较好的推广应用前景。

### 参考文献:

- [1] 余彬泉,陈传灿.顶管施工技术[M].北京:人民交通出版社,1998.
- [2] 夏明耀,曾进伦.地下工程设计施工手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [3] 同济大学隧道及地下工程研究所.大口径三维急曲线顶管的环境保护与控制技术[R].2004.
- [4] 何莲,刘灿生,帅华国.顶管施工的顶力设计计算研究[J].给水排水,2001,(7).
- [5] 马保松,D. Stein,蒋国盛,等.顶管和微型隧道技术[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [6] 汤华深,刘叔灼,莫海鸿.顶管侧摩阻力理论公式的探讨[J].岩土力学,2004,(增刊).
- [7] 赖冠宙,房营光.顶管顶力的理论计算与分析[J].广东土木与建筑,2003,(9).
- [8] 安关峰,殷坤龙,唐辉明.顶管顶力计算公式辨析[J].岩土力学,2002,(6).