

一个顶管法穿越高速公路的施工方 案

崔京浩 陈肇元 宋二祥

(清华大学土木系 北京 100084)

(Civil Dept. of Tsinghua University)

林炎新

(深圳力艺市政公司 深圳 518055)

(Shenzhen Niyi Municipal Company)

摘要 广州地铁二号线要穿越华南路,华南路是一条高速公路,施工时地面交通不能中断,本文建议采用顶管法穿越。全文共分 6 段:1. 概述;2. 工作坑;3. 顶力计算;4. 后背土抗力计算;5. 减阻;6. 其它。该文虽然只是一个施工方案,但对顶管法考虑的尚属全面,可供参考。

关键词 顶管法 地下穿越

ABSTRACT Guang-zhou the Underground 2nd Line will pass through Hua-nan Express Way. During construction communication of the express way should not be cut off. Pipe-jacking method is suggested. There are 6 sections. 1. General; 2. Operation pit; 3. Calculation of jacking force; 4. Calculation of back resisting earth pressure; 5. friction; 6. Others. Some completeness is considered for this construction project and suggested for reference.

KEYWORDS Pipe jacking Tunnelling

一、概述

地铁建设属城市地下工程,它碰到的首要问题是不能影响城市正常运转,特别是城市交通,这里讨论的顶管法穿越高速公路就是针对广州地铁二号线提出的建议性方案。

1. 先例:我国自 1953 年开始采用顶管法施工以来,经过几 10 年的工程实践,已比较成熟。1981 年我国在浙江甬江的顶管技术已达到可顶管径 2600mm,单边连续一次顶进达 581.9m,成为当时继美国依里诺斯州单边一次顶进 558m 之后,世界上单边一次顶进最长的顶管工程,图 1 为穿越甬江顶管工程示意图。1997 年我国上海又成功地完成了 2 条长 756m 穿越黄浦江的倒虹管,管径 2.2m,从浦西至浦东处于黄浦江底-26m 深的位置,示于图 2。

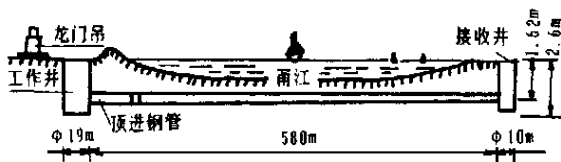


图 1 穿越甬江顶管工程示意

顶管法不仅用于排水圆管的顶进,也适用于其他断面。我国早在 70 年代天津修地铁需要穿越长达 60 多 m 的列车货场就采用了顶管法,断面为双车道矩形断面。竣工后效果良好,地表未见严重的沉降,基本上没有影响货车的通行。

2. 顶管技术的优点

(1) 占地面积少,与同断面的开槽施工法相比,可节约用地;

- (2) 地面活动不受影响,可保持交通运输畅通无阻;
- (3) 减少沿线的拆迁工作量;
- (4) 容易做到不破坏现有的管线和构筑物,不影响其正常使用;
- (5) 施工噪音低,减少对沿线环境的污染。

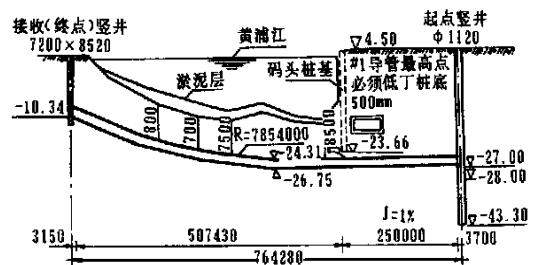


图 2 穿越黄浦江的倒虹管顶管

3. 顶管的分类

按照前方挖土方式的不同,顶管分为 3 种:

- (1) 普通顶管 管前用人工挖土,设备简单,能适应不同的土质,但工效低些,见图 3。
- (2) 机械化顶管 工作面采用机械挖土,工效高,但对土质变化的适应性差,该方法又分为全面挖掘式和螺旋钻进式 2 种。亦可与人工挖土相结合。
- (3) 水射顶管 为使用水力射流破碎土层,工作面要求密闭,破碎的土块与水混合成泥浆,用水力运输机械运出管外。多用于穿越河流的顶管,现场要求有供水源和排水道。这种顶管的机头是密封的。

穿越华南路由于距离不长计划采用第(1)种普通顶

管。图3为普通顶管示意图。

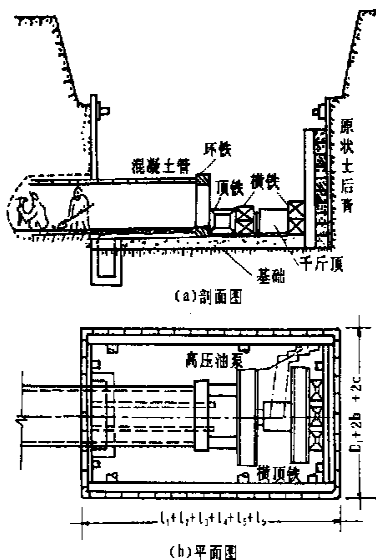


图3 普通顶管

二、工作坑

如图3所示在华南路西侧施作工作坑,按线路坡度($i=3\%$)方向逆向顶进便于地下水渗出时有组织地排出。

需顶进的是一个钢筋混凝土框架每节取为4m,见图4。每一节相当于一个管节,下文凡提到“管节”均指这种4m的框架段。

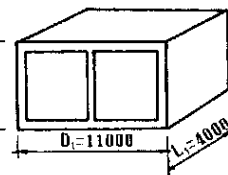


图4 框架段(管节)

1. 坑宽(见图5)

$$B = D_1 + 2b + 2c \quad (\text{m})$$

式中 B —工作坑底宽度(m);

D_1 —顶进管节的直径(m),本工程为矩形断面, D_1 代表断面的宽度11m,下同;

b —工作坑内两侧的工作空间(m),当 $D_1 < 1000\text{mm}$ 时, $b = 1.20\text{m}$; $D_1 > 1000\text{mm}$ 时, $b = 1.6\text{m}$,由于矩形断面的宽度较大建议取 $b = 2\text{m}$;

c —支撑材料的厚度(m),木撑板时, $c = 0.05\text{m}$;木板桩时, $c = 0.07\text{m}$ 。

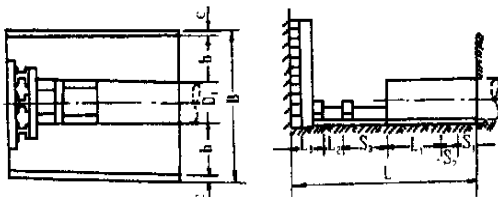


图5 工作坑尺寸

2. 工作坑长度及深度

工作坑长度与管节长度、千斤顶长度及后背尺寸有关,还与顶进运土工具有关。其长度一般按下式计算(见图5):

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + S_1 + S_2 + S_3$$

式中 L —工作坑底的长度(m);

L_1 —管节长度(m);

L_2 —千斤顶长度(m);

L_3 —后背厚度(m);

S_1 —顶进管节预留在导轨上的最小长度,视管节长度而定:钢筋混凝土管 $0.3 \sim 0.5\text{m}$;钢管 $0.6 \sim 0.8\text{m}$;

S_2 —管内出土操作,在管尾留出的空间长度,视出土工具而定:土斗车 $0.6 \sim 1.0\text{m}$;手推车 $1.2 \sim 1.8\text{m}$;

S_3 —调头顶进时的附加长度,一般要大于 0.5m ,单向顶进时 0.5m 。

工作坑的深度由设计结构底板下皮高程及垫层厚度而定。

本工程底板下皮高程为 -3.4 ,再考虑 200mm 垫层的厚度,工作坑的深度应挖至高程 -3.6 ,如果还要考虑碎石导滤层则应将导滤层的厚度计入。

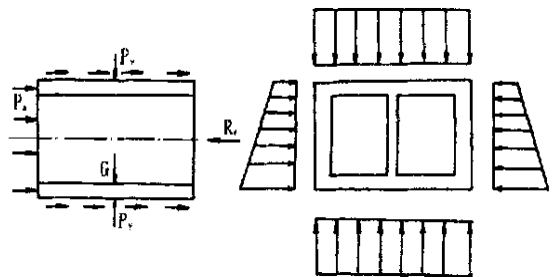
3. 集水井

考虑到该地区地下水位较高,开挖顶进过程会有地下水不断地从掌子面渗入。应有组织地排入集水井,集水井一般为圆形,内径 $1.2 \sim 1.5\text{m}$ 即可,视水量多少及时抽取。集水井位置视工作坑环境而定以不影响工作坑操作为度。

三、顶力计算

千斤顶的顶力值 R_f 需要克服下列几种作用于管道的外力,统称为顶进阻力,包括贯入阻力、摩擦阻力、管节自重产生的摩擦阻力。

管道在顶进过程中,作用于管节上的阻力,如图6所示。



f —管壁与土间的摩擦系数,见表 1;

P_A —管端部的贯入阻力(kN);

K —安全系数,一般采用 1.2。

表 1 摩擦系数 f 值

土的种类	钢筋混凝土管			钢管		
	干 燥	湿润	一般值	干燥	湿润	一般值
软 土		0.20	0.20		0.20	0.20
粘 土	0.40	0.20	0.30	0.40	0.20	0.30
砂粘土	0.45	0.25	0.35	0.38	0.32	0.34
粉 土	0.45	0.30	0.38	0.45	0.30	0.37
砂 土	0.47	0.35	0.40	0.48	0.32	0.39
砂砾土	0.50	0.40	0.45	0.50	0.50	0.50

管顶覆土的垂直压力计算公式为:

$$P_y = K_y H D_1 L \quad (\text{kN})$$

式中 K_y —垂直土压力系数;

—土的容重(kN/m^3);

H —管顶覆土深度(m);

D_1 —顶入管节宽度(m);

L —顶进管节总长度(m)。

施工前应沿管线进行钻探,取土样进行试验,求出有关土的各项性能指标。

四、后背土抗力计算

后背土体受压后产生的被动土压力按下式计算:

$$p = K_p h \quad (\text{kPa})$$

式中 p —被动土压力(kPa);

K_p —被动土压力系数,见表 2;

h —后背土的高度(m);

—后背土的容重(kN/m^3)。

在考虑后背土的土抗力时,按下式计算土的承载能力:

$$R_C = K_r B H \left(h + \frac{H}{2} \right) K_p$$

式中 R_C —后背土的承载能力(kN)

B —后背墙的宽度(m);

H —后背墙的高度(m),见图 7、8;

h —后背墙顶至地面的高度(m),见图 7、8;

—土的容重(kN/m^3);

K_p —被动土压力系数;

K_r —后背的土抗力系数。

表 2 土的主动和被动土压系数值

土名称	当量内摩擦角 ($^\circ$)	被动土压系数 K_p	主动土压系数 K_a	K_p/K_a
软 土	10	1.42	0.70	2.03
粘 土	20	2.04	0.49	4.16
砂粘土	25	2.46	0.41	6.00
粉 土	27	2.66	0.38	7.00
砂 土	30	3.00	0.33	9.09
砂砾土	35	3.69	0.27	13.67

后背结构形式不同,使土受力状况也不一样。为了保证后背的安全,根据不同的后背形式,采用不同的土抗力系数值。

1. 管顶覆土浅 后背不需要打桩,而背身直接接触

土壤面,见图 7。计算土的承载力时,土抗力系数采用 0.85。

2. 管顶覆土深 后背打入钢板桩,顶力通过钢板桩传递,见图 8。此时土抗力系数取决于不同的后背形式及后背的覆土高度。覆土高度 h 值越小,土抗力系数 K_r 值越小,有板桩支撑时,应考虑在板桩的联合作用下,土体顶力分布范围扩大导致集中应力减少,因而土抗力系数 K_r 值又会增加。此时 K_r 值要从图 9 中查取。图 9 是在不同后背的板桩支撑高度 h 值与背高度 H 的比值下,相应的土抗力系数 K_r 值的关系曲线。

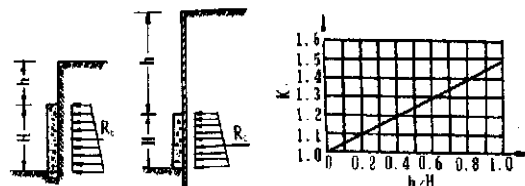


图 7 无板桩支 图 8 板桩后背 图 9 土抗力系数曲线
承后背

五、减阻

1. 中继接力

当顶进阻力和管壁外周摩擦阻力之和超过主千斤顶的容许总顶力或管节容许的极限压力或工作坑后土体极限反推力,无法一次达到顶进距离要求时,应采用中继接力顶进技术,实行分段实施使每段管道的顶力降低到允许顶力范围内。

本工程顶进距离不长,与我国一些成功的顶管范例相比算是比较短的,如武钢 3# 管顶距 107.26m,甬江越江管顶距 255.67m(管径 2.648m),宝钢 1#、2#、3# 管顶距都在 160m 以上(管径均为 3.056m),但华南路顶进的是一个宽 \times 高 = 11 \times 6.33m 的矩形框架,断面大且形状也比圆管有更大的摩擦阻力,故中间要用中继环接力。

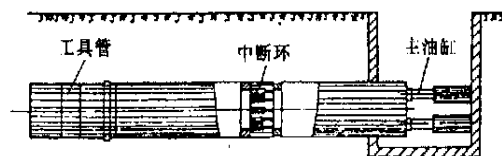


图 10 中继环示意

采用中继接力时,将管道分成数段,在段与段之间设置中继环,见图 10。中继环将管道分割成前后 2 个部分,中继油缸工作时,后面的管段成为后座,前面管段被推向前方。采用中继接力技术以后,管的顶进长度不再受后座顶力的限制,只要增加中继环的数量,就可延长管道顶进的长度。中继接力技术是长距离顶管不可缺少的技术措施。

2. 触变泥浆

在长距离顶管工程中,迎面阻力占顶进总阻力的比例较小,如上海市水厂顶管工程中该比例值仅为 6%。更为重要的是尽可能降低顶进中的管壁外周摩阻力。采用管壁外周加注触变泥浆,在土层与管道及工具管之间形成

一定厚度的泥浆层,使工具管和顶进的管道在泥浆层中间向前滑移以达到减阻的目的。管道外周空隙主要有 3 个因素所致:一是顶管工具管比管道外径略大;二是工具管纠偏;三是工具管及管道外周附着的粘土。在管道外周空隙形成后而土体落到管体上以及土压力增大至全值以前必须将触变泥浆填充于其中才能使其达到支承土体和减阻的目的。一般压浆量为管道外周空隙的 1.5~2.0 倍。压浆压力应根据管道深度 H 和土的天然重度而定,一般为 2~3 H 。压浆孔位布置和压浆方向,见图 11。

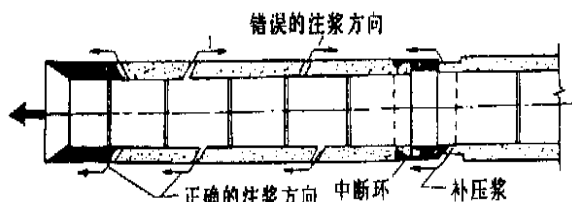


图 11 压浆方向

在 100m 左右距离的顶管中,触变泥浆可采用同一种浆液,其性能见表 3。

表 3 普通泥浆性能表

配方	膨润土	纯碱	CMC	漏斗粘度 (s)	视粘度 (cp)	失水量 (mL)	终切力 10^{-8} kPa	密度 (kN/m ³)
普通	20%左右	10%左右	试验定	塞流~36	20~25	12~15	160左右	1.1左右

由于矩形管节的断面过大,如果中继环和触变泥浆仍不能有效地克服顶进阻力,一个可行的方案是将图 4 所示的管节由双孔改为单线单孔,这样摩阻力可以减少将近 1/2。

六、其他

1. 工作台

工作台设在工作坑上方,工作台一般由型钢支架而成,平台主梁应通过计算选用。计算荷载有管重、人重及冲击荷载。平台口的尺寸按下式确定:

$$B = D_1 + 0.8 (m)$$

$$L = L_1 + 0.8 (m)$$

式中 B —平台口宽度(m);

D_1 —管节宽度(m);

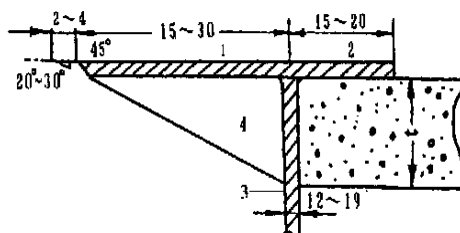
L —平台口长度(m);

L_1 —管节段长度(m),本工程 $L_1 = 4m$ 。

2. 刀脚

刀脚装于管节前端由外壳、内环和肋板 3 部分组成。外壳以内环为界分成 2 部分,前面称遮板,后面为尾板,见图 12。

刀脚外壳套于顶进管外部,外伸长度取决于土质。遮板端部呈 20°~30°角,尾板长度 15~20cm。用肋板增加其刚度,钢板厚度为 9~16mm,肋板厚为 12~19mm,多数肋板按中心角 10°~15°位置作放射形设置,这些是用于圆形管节的经验数据。由于本工程管节如图 4 所示的矩形断面,其刀脚形状及材料选用,将专门另行设计。

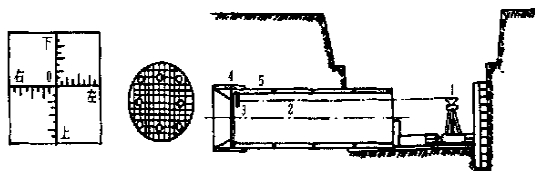


1. 遮板;2. 尾板;3. 环梁;4. 肋板

图 12 刀脚端部

3. 测量

开始顶进前,要选好基线(即管道设计的中心线)和基点(即临时水准点)。基线和基点一定要设置牢靠,在整个施工过程中不能发生移动,特别是基线,若方向稍有移动则可能形成很大的误差。基线设置好后,就以此基线为准测量顶管的中线。



(a) 方形靶 (b) 装有硅光电

池的圆形靶

1. 激光经纬仪;2. 激光束;

3. 激光接收靶;4. 刃角;5. 管节

图 13 接收靶

图 14 激光测量

近代多采用激光测量就是将激光器与经纬仪或水准仪机械部件组合在一起固定于望远镜上。测量时,对工作坑内安装激光发射器,按照管线设计的坡度方向将发射器调整好。同时管内装上接受靶,靶上刻有尺度线,见图 13。当顶进的管道与设计位置一致时,激光点直射靶心,说明顶进质量良好,没有偏差,见图 14。

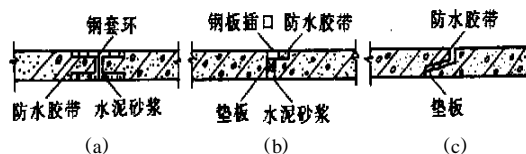


图 15 混凝土排水管接口详图

4. 防水

管节是地面预制的远较通常的现浇砼要密实,其自防水性能是可以得到保证的,对节与节之间的防水问题,参照普通排水管道施工时的防水方案,见图 15。穿越华南路计划采用图 15 中的方案 C。

参考文献

- [1] 张正威,崔京浩. 基坑支护结构形式及设计计算.《工程力学》增刊,1999,1:495-501.
- [2] 马英明,崔京浩. 地铁建设中力学与结构问题.《工程力学》增刊,1995.9.
- [3] 房延懋. 发展顶管技术. 开拓市政领域. 中国港湾建设, 2000.1.
- [4] 徐昂都. 穿越黄浦江钢筋混凝土倒虹管顶管. 水运工程, 2000,3:23-28.