

盾构隧道穿越水底浅覆土施工技术对策

张庆贺¹ 王慎堂¹ 严长征¹ 张 伟²

(¹ 同济大学地下建筑与工程系 上海 200092) (² 上海隧道股份有限公司 上海 200030)

摘要 从盾构开挖面平衡状态及隧道水底抗浮平衡条件着手,推导了土压平衡盾构开挖工作面水土压力与密封舱内压力动态平衡公式,得到了盾构穿越水底浅覆土保持土体及隧道稳定所需的最小覆土厚度。结合南京地铁南北线一期工程,提出超浅覆土情况下水底隧道盾构施工应采取的工程对策。并介绍了南京地铁试验段工程采取的措施及取得的效果。相关结论可供水底隧道、地铁区间隧道浅覆土进出洞盾构施工参考。

关键词 隧道工程,盾构,管片,浅覆土,抗浮板

分类号 TU 94

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)05-0857-05

TUNNELING METHODS THROUGH RIVER(LAKE, SEA) BED UNDER SHALLOW COVERING BY SHIELD

Zhang Qinghe¹, Wang Shentang¹, Yan Changzheng¹, Zhang Wei²

(¹Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 China)

(²Shanghai Tunnel Engineering Company, Shanghai 200030 China)

Abstract By analyzing the equilibrium states of the tunneling face and the tunnel under water, the formulas about the balance between the water and soil pressure in front of working face and the pressure in the cabin given by shield is obtained. The smallest covering depth required by the safety of tunneling face and tunnel is given. Then, based on the Phase One Project of Nanjing Metro North-South Line, some main methods dealing with the shallow underwater ground are provided. The effect of the presented methods is introduced. The obtained conclusion in this paper can be used to the tunnels through river bed and those under shallow covering by shield.

Key words tunneling engineering, shield, segment, shallow covering, anti-buoyancy board

1 引言

法国工程师布鲁诺尔(Mare Isambard Brunel)第一次用一个断面高 6.8 m, 宽 11.4 m 的矩形盾构修建泰晤士河底隧道。经过不断地同塌方、泥水涌入做斗争,改进盾构施工工艺,采用气压与辅助施工技术,终于在 1843 年完成了全长 458 m 的第一条盾构法隧道,前后历时 18 a^[1]。自 20 世纪 70 年

代以来,盾构法隧道施工技术有了很大的进展,土压平衡盾构、泥水平衡盾构、气压(局部气压)盾构等高性能盾构相继问世,使得软土中长距离隧道成为现实。但是,盾构法进行水域(江、河、湖、海)下隧道施工时,仍然面临以下风险和难题:

(1) 浅覆土易产生冒顶通透水流

为了减少线路的坡度,一般河底段覆土极浅。如即将修建的上海黄浦江复兴东路—大连路隧道,最浅覆土仅 5.5 m,不足盾构直径的一半。德国第 4

2001 年 11 月 14 日收到初稿,2002 年 4 月 8 日收到修改稿。

作者 张庆贺 简介:男,59 岁,现任同济大学地下建筑与工程系教授、博士生导师,主要从事地下工程方面的研究与教学工作。E-mail: qhzhang@citiz.net。

条易北河隧道盾构直径 12.33 m,最困难处土层的埋深只有 7 m。如此浅的覆土,在高水头压力情况下,大刀盘前方土压平衡不容易建立。河水常从扰动土体的裂缝中经大刀盘开口及盾尾进入盾构机,造成盾构淹水。这种机损人员伤亡事故时有发生。

(2) 隧道上浮

水域下浅覆土中推进的盾构,上下受到的力不平衡,盾构姿态上扬,压坡困难、隧道上浮,轴线难以控制^[2]。

拼装完成的隧道环脱开盾尾后,由于上部压载及自重无法抵抗地下水引起的浮力使隧道上浮。如果不采取相应加固对策,极易引起隧道局部开裂、漏水。

(3) 流砂、管涌

在砂土、砂质粉土等易液化的土层中施工,由于盾构推进大刀盘旋转切削挤压扰动,加上过高的水头压力(有时可达 0.3~0.5 MPa)。液化砂土随地下水沿盾尾和隧道接缝渗漏进入隧道内,如不及时采取措施,可能出现局部地基掏空,隧道下沉、螺栓断裂、隧道破坏。

(4) 盾构选型困难^[3]

水域底下隧道施工常采用气压盾构、泥水平衡盾构以保证开挖面前方土体稳定。但全气压盾构对操作工人身体健康非常不利,容易引起气压病、关节炎等难以治愈的职业病。而泥水平衡盾构本身及泥水分离设备造价非常昂贵,不适合我国国情。

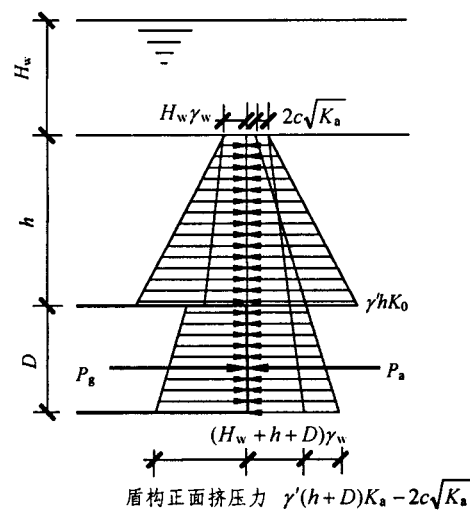
“十五”期间我国城市地铁和高速公路进入建设高峰期,许多线路无法避开河道、湖泊,如南京地铁穿越秦淮河、玄武湖;广州地铁穿越珠江等。文中针对土压平衡盾构穿越水底浅覆土提出的对策和方法,对于穿越河底隧道的安全施工具有一定的指导意义。

2 河底盾构隧道推进时的浅覆土最小厚度

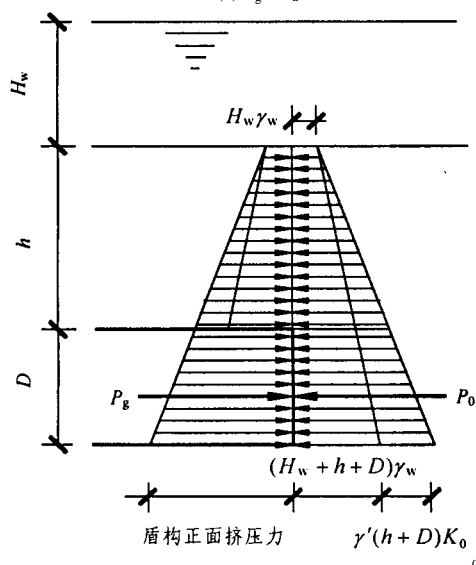
2.1 土压平衡盾构在河底浅覆土中推进的受力分析

盾构机在河底饱和粘土土层中推进时,有工作面挤压力合力等于主动土压力、挤压力合力等于静止土压力和挤压力合力等于被动土压力 3 种临界受力平衡状态^[4]。这 3 种临界受力平衡状态如图 1 所示(无粘性土层中 $c=0$)。图 1 中:

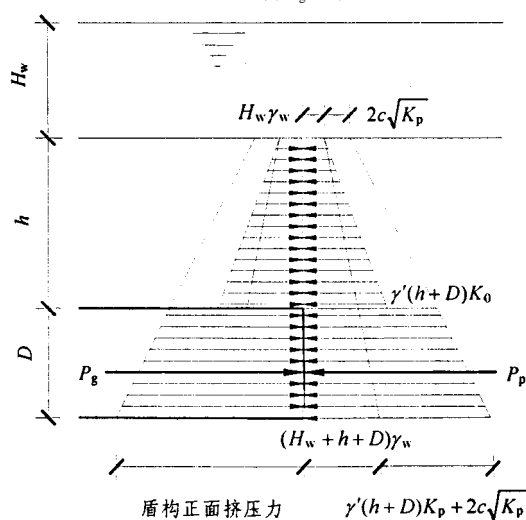
$$P_g = F_t - F_f \quad (1)$$



(a) $P_g = P_a$



(b) $P_g = P_0$



(c) $P_g = P_p$

图 1 河底饱和粘土中盾构工作面的 3 种临界平衡状态

Fig.1 Three critical equilibrium states of the shield working face with tunneling through saturated clay under river

$$F_f = \delta D L P_r m \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} P_a &= \left[\left(H_w + h + \frac{D}{2} \right) g_w + \left(h + \frac{D}{2} \right) g' K_a - 2c\sqrt{K_a} \right] \frac{\delta D^2}{4} \\ P_0 &= \left[\left(H_w + h + \frac{D}{2} \right) g_w + \left(h + \frac{D}{2} \right) g' K_0 \right] \frac{\delta D^2}{4} \\ P_p &= \left[\left(H_w + h + \frac{D}{2} \right) g_w + \left(h + \frac{D}{2} \right) g' K_p + 2c\sqrt{K_p} \right] \frac{\delta D^2}{4} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} K_a &= \tan^2 \left(45^\circ + \frac{j}{2} \right) \\ K_0 &= 1 - \sin j' \\ K_p &= \tan^2 \left(45^\circ + \frac{j}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上面诸式中： P_g 为盾构正面挤压力； F_f 为盾构推力实测值； F_f 为为盾构摩擦力计算值； L 为盾构长度； D 为盾构外径； m 为盾构外周与土壤的摩擦系数，亚粘土中， $m=0.4$ ，淤泥质粘土中， $m=0.3$ ； P_r 为盾构外周平均径向土压力； P_a 为主动土压力； P_0 为静止土压力； P_p 为被动土压力； K_a 为主动土压力系数； K_0 为静止土压力系数； K_p 为被动土压力系数； H_w 为水深； g_w 为水容重； h 为覆土厚度； g' 为土浮重度； c 为土粘聚力； j 为土内摩擦角； j' 为有效内摩擦角。

当盾构正面挤压力 P_g 小于工作面主动土压力 P_a 时(图1(a))，开挖面土体将向土仓内坍塌，引发覆土塌陷，地面沉降明显，河水将沿塌陷裂缝进入土仓造成涌水事故；当盾构正面挤压力 P_g 介于主动土压力 P_a 和静止土压力 P_0 之间($P_a < P_g < P_0$)时，盾构前方的覆土层将有一定的沉降。与后续工序造成的沉降叠加，将不利于控制隧道总沉降，同时，由于前方土体受到扰动，使盾构控制困难，盾构正面土压力合力作用点难以与前方土压力合力作用点重合在一条直线上。适合盾构正常推进的工况是正面挤压力 P_g 介于静止土压力 P_0 和被动土压力 P_p 之间^[5]，使前方覆土层有一定的隆起，用以补偿后续工序引起的沉降，又不至于将覆土层顶裂；当正面挤压力 P_g 大于被动土压力 P_p 时，前方覆土将被顶裂产生裂缝，河水沿裂缝涌入盾构造成工程事故。

2.2 浅覆土最小厚度

根据以上分析，土压平衡盾构施工时，应将土仓压力保持在静止土压力与被动土压力之间，即

$$P_g < P_p \quad (6)$$

由式(1)，(5)，(6)可得到为验算盾构安全推进所需的最小覆土厚度的公式：

$$h > \frac{4P_g - 2c\sqrt{K_p} - H_w g_w}{g_w + g' K_p} - \frac{D}{2} \quad (7)$$

3 河底隧道抗浮控制

隧道穿越饱和土层，会受到水的浮力，当浮力超过隧道上覆土重量和隧道及隧道内设备自重时，隧道将上浮。当管片脱离盾尾时，隧道被包围在壁后注浆的浆液中，受到浆液的浮力比在饱和土中受到的浮力要大得多。同时，盾构推进挖出土方导致地基卸载，拼装好的隧道会受到地基回弹的作用向上偏离中心轴线。在浮力和地基回弹共同作用下，隧道上覆土产生隆起，若最大隆起值得不到有效控制，覆土层将被顶裂，产生透水裂缝，河水沿透水裂缝涌入盾尾将严重影响隧道和隧道施工的安全。

考虑盾构推进时产生的地层损失与地基回弹对隧道的影响的抵消作用，隧道抗浮可以用下式控制：

$$P + q < F_y \quad (8)$$

式中： q 为支护管片重， $q = \delta(R_0^2 - R_i^2)g_c$ ， R_0 为隧道外半径， R_i 为隧道内半径， g_c 为混凝土容重； F_y 为浆液浮力， $F_y = g_y \delta R_0^2$ ， g_y 为壁后注浆容重； P 为上覆土重， $P = 2R_0 h g'$ 。

由式(8)可以推出阻止隧道上浮所需的最小覆土厚度为

$$h > \frac{\delta R_0^2 g_y - \delta(R_0^2 - R_i^2)g_c}{2R_0 g'} \quad (9)$$

4 盾构穿越河底浅覆土可采取的技术措施

当河底浅覆土厚度不满足式(7)，(9)两种情况之一时，应采取河底覆土加固措施。常用的措施有

(1) 河底抛土，加大隧道上覆土层厚度

这种方法一般用于深水河底隧道加固中，其

中,包括著名的德国易北河隧道加固。它既能满足盾构推进、隧道安全所要求的最小覆土厚度,又节约成本,简便易行。

(2) 河底注浆加固

由于航运及排水的要求,在浅水河道中加固隧道浅覆土不宜采用河道抛土的办法。因此,河底注浆加固及设置抗浮板是浅水河道加固的首选。通过注浆,河底覆土形成一层不透水的硬壳层,同时, c , j 值相应增大。从式(7)中可以看出,覆土为不透水层时,及 c , j 增大能有效减小盾构推进时所需的最小覆土厚度的计算值。覆土层为不透水层时,河水的压力将有效作用在覆土层上,阻止隧道上浮;从式(9)可以看出,用上层覆土的实际重度代替浮重度亦可增加隧道覆土重量,阻止隧道上浮,减小最小覆土厚度计算值。

(3) 加设抗浮板,为盾构推进及阻止隧道上浮提供反力

在特别浅的覆土区域,应在注浆加固的同时增设抗浮结构,如抗拔桩及抗浮板,用于平衡盾构推进时土体产生的侧向压力以便盾构能以较适当的推进力及推进速度快速通过河底危险区。

5 工程实例

南京地铁南北线一期工程试验段南起饮马巷,北至三山街,由4部分组成,从南向北分别为敞开段、暗埋段、盾构工作井和盾构段。盾构段长679.35 m,其中,穿越内秦淮河段是本段施工的重点。盾构穿越处内秦淮河河道宽16.8 m,河底标高距隧道顶仅0.97 m,不足隧道直径的1/6,是典型的河底浅覆土隧道施工案例。

5.1 工程地质条件及隧道设计、施工参数

根据工程勘察报告,盾构穿越上覆土层为淤泥质粉质粘土,内摩擦角 $j = 12.3^\circ$,内聚力 $c = 8.9$ kPa,饱和重度 $g_{\text{sat}} = 17.7$ kN/m³,覆土以上河水深 $H_w = 2.0$ m。

隧道钢筋混凝土管片:

外径: $R_0 = 3.2$ m;内径: $R_i = 2.75$ m。

盾构施工参数:

本工程采用土压平衡盾构施工,土仓最小平均土压力为180 kPa,盾构长 $L = 8.4$ m。

推进时壁后注浆浆液参数:

$g_y = 12.5$ kN/m³,注浆压力为0.2~0.3 MPa,注浆量为2.5~3.5 m³。

5.2 最小覆土厚度验算

将以上参数带入式(7)得到控制盾构正常推进不上飘、不涌水所需最小覆土厚度为 $h = 2.83$ m;将参数带入式(9)得到隧道抗浮所需的最小覆土厚度为 $h = 4.06$ m。取 $h = 4.06$ m为隧道安全所需的最小覆土厚度,因此需要采取河底加固措施。

5.3 加固措施

本工程因疏浚及航道要求,采用加设抗拔桩和抗浮板并进行河底注浆的加固方法,见图2。

钢筋混凝土抗浮板及抗拔桩不仅能防止隧道上浮,还能在盾构推进时为盾构提供反力防止盾构上浮。注浆深度为底板以下7 m,采用AB液,A液是水灰比为0.7的水泥浆,B液为水玻璃,A液与B液体积比为1:0.8~1.0,双液混合后控制初凝时间在90 s左右。注浆的目的是为了防止盾构推进时河水通过浅覆土缝隙倒灌进入工作面引起工程事故。另

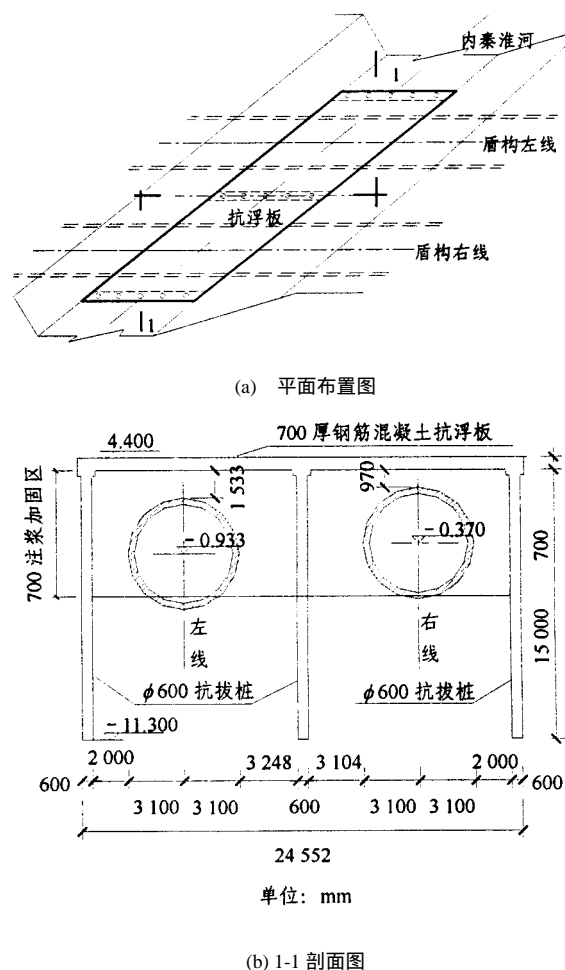


图2 抗浮板、抗拔桩及注浆加固区布置图

Fig.2 Layouts of anti-buoyancy slab and piles, and grouting area

外在抗浮板及盾构机、隧道管片间形成较为坚硬的介质层,将盾构机推进产生的侧压力或隧道上浮的浮力传递给抗浮板,加固注浆区域如图2(b)所示。

5.4 盾构施工技术措施

在盾构穿越河底前,组织施工单位、监理和监测单位分别对轴线及盾构姿态进行复测,将盾构姿态调整到最佳状态;盾构进入河底后保持平稳掘进,减少纠偏,减少对土体的扰动,出土量保持为97%左右,掘进速度保持在5 cm/min;盾尾油脂及时加注以避免盾尾涌水,控制适宜的壁后注浆压力,避免压浆压力大于盾尾密封压力时浆液残留固结在密封区;土仓设定土压力根据静止土压力的变化进行了及时的调整,使土仓土压力始终保持在静止土压力与被动土压力之间,以避免超挖或欠挖;加大注浆量,注浆系数采用1.5,减少注浆量不足带来的地层损失。

5.5 取得的效果

通过采取以上措施,盾构作业仅用了4 d时间

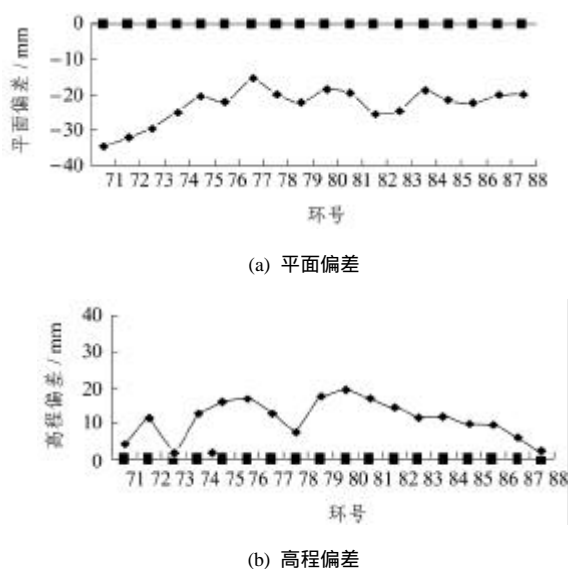


图3 实测轴线偏差

Fig.3 Deviation between the actual and design axes

便顺利通过内秦淮河河底。经检查,拼装好的隧道管片无一损坏,无一渗漏水点。实测轴线偏差(与设计轴线偏差)如图3。

图3中,73~86环为河底段,可以看出,施工后的隧道向上偏离轴线设计高程最大仅2 cm,平面轴线由于处于地铁轨道转弯弧线上,盾构长度较大而转弯半径较小仅500 m,转弯不灵敏造成平面偏差,但均不超过盾构施工规范允许的5 cm。可以说,以上所采取的技术措施在控制盾构机上飘、隧道上浮方面起到了预期的效果。

6 结 论

(1) 在通过浅覆土河道的隧道施工中,要综合平衡考虑全线的地质、水文、地面构筑物、地下障碍物等情况选用盾构机型,然后根据所选的机型与河道覆土、水文情况、航道要求采取相应的施工措施,安全施工并保证以后运营时的隧道安全。

(2) 采用土压平衡盾构机进行河底浅覆土隧道施工时要验算隧道上覆土的安全厚度。

(3) 浅覆土厚度不足时,河底注浆加固与设置抗浮板是有效措施之一。

(4) 在盾构推进时根据实际情况调整盾构推进参数,对减小轴线偏差、控制地面沉降、保证盾构机及隧道安全有重要影响。

参 考 文 献

- 1 于书翰,杜谟远. 隧道施工[M]. 北京:人民交通出版社,2001
- 2 刘建航,侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京:中国铁道出版社,1991
- 3 沈永东. 临江过江隧洞盾构掘进的问题与对策[J]. 世界隧道,1998,(3):48~52
- 4 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 北京:清华大学出版社,1993
- 5 张庆贺,柏 炯. 上海软土隧道的设计与施工[J]. 世界隧道,1998,(2):11~25