

浅谈富水砂层盾构掘进施工措施

宋艳江

北京城建中南土木工程集团有限公司 北京 100020

DOI:10.12238/etd.v3i4.5273

摘要：盾构施工的前提条件是掌子面稳定，因此，掘进过程中必须建立土仓压力平衡，即掌子面土体平衡。目前，建立土仓平衡有三种模式：纯土压加压平衡、气垫式加压平衡和混合模式。本工程采用的是土压平衡模式，掘进过程中，详细记录盾构掘进各项参数，施工中再根据各种参数及地质条件变化范围内进行调整、优化。本文结合南通轨道交通1号线某标段地层盾构掘进的工程实例，对掘进过程中的各项参数进行优化并提出了相应措施，为类似地层施工提供参考。

关键词：土仓模式；参数；优化；措施

中图分类号：TU722 **文献标识码：**A

Discussion on Shield Tunneling Construction Measures in Water-rich Sand Layer

Yanjiang Song

Beijing Urban Construction Zhongnan Civil Engineering Group Co., Ltd. Beijing 100020

Abstract: The prerequisite of shield construction is the stability of the palm surface, so the pressure balance of the soil bunker must be established in the process of tunneling, that is, the soil balance of the palm surface. At present, there are three modes to establish soil warehouse balance: pure soil pressure balance, air cushion pressure balance and mixed mode. The project adopts the soil pressure balance mode. During the tunneling process, the parameters of shield tunneling shall be recorded in detail, and then adjusted and optimized according to the change scope of various parameters and geological conditions. Based on the engineering examples of shield tunneling in a certain section of Nantong Rail Transit Line 1, the parameters in the tunneling process are optimized and the corresponding measures are put forward to provide reference for the construction of similar strata.

Keywords: Soil warehouse mode; Parameters; Optimization; Measures

1 工程概况

南通轨道交通1号线某标段区间采用土压平衡盾构施工，盾构隧道为环形断面，采用预制混凝土管片，管片强度C50，抗渗为P10；整环有六块管片拼接组成，内径5.5m，外径6.2m，厚350mm，环宽1.2m，错缝拼接；区间隧道断面主要穿越土层为③1粉砂夹粉土、③2粉砂、④1粉质粘土，线路埋深范围约9.51m~22.38m，区间断面均位于地下水位以下，盾构隧道局部断面要穿越的全断面沙层，沙层自稳性差，强透水性，且在水压差作用下较容易产生涌沙、流砂，刀具磨损、盾尾渗漏等现象，砂层在扰动后，收敛快，盾构施工易引起变形。

2 盾构施工在富水砂层中掘进难点

区间分布的③2粉砂和③3粉砂夹粉土层，具有自稳性差、强透水性特征，其特点会使强度降低，进一步加大建构物的沉降变形。在一定水压差作用下易发生渗透变形，形成流沙或涌沙，严重时易发生隧道上浮现象，其针对措施如下：

（1）加强盾尾密封的维保，经常检查盾尾密封刷的密封效果，定期往盾尾加注油脂，确保盾尾密封良好。

（2）加大盾尾上部注浆量，减小上浮空间，降低管片

上浮量；加强管片螺栓复紧工作，当千斤顶掘进至800mm，对盾尾后3环管片进行螺栓人工复紧；掘进至1100mm时，对盾尾内的管片螺栓进行二次人工复紧，当管片脱出盾尾刷瞬间，同时对管片螺栓进行快速的第三次人工复紧。

（3）掘进时选择合理的掘进参数

①调整土仓压力，严格控制螺旋机出土速率，避免超挖和欠挖，造成的地表沉降和地表隆起。

②穿越前调整掘进姿态保证平稳且向上趋势，需要纠偏时勤纠小纠，每次纠偏量不超过5mm。

③同步注浆量与注浆压力双控管理。

（4）盾构机主机完全进入后，盾构垂直姿态在-30mm（具体下调量根据管片监测进行确定），防止管片上浮超限（+100mm）。

（5）若发现螺旋机有涌水涌沙情况，应立即停止推进，快速关闭螺旋机闸门，严禁反转螺旋机，停止刀盘转动，观察土仓压力变化，若变化不大，可以启动推进系统适当往前推进，是土仓压力达到平衡状态，或往土仓内注入浓稠的膨润土浆液达到土压平衡，避免造成地面沉降，并缓慢转动刀盘，将刀盘切削下的泥土或注入的膨润土浆液与土仓内的泥沙充分搅拌，然后将螺旋机闸门缓慢打开，推进系统打开，

待螺旋机不出现涌水涌沙情况后，就恢复正常掘进状态，正常掘进过程中始终保持土压平衡状态。

(6) 向土仓中注入浓稠膨润土浆液或高分子材料，使膨润土浆液或高分子材料与土仓内泥沙充分搅匀，观察螺旋机排渣口泥土是否成流塑状，若达不到预想状态，则需在加大注入量，使之达到要求，从而连续从螺旋输送机排出，避免喷涌。

3 盾构施工在富水砂层中掘进控制要点

(1) 施工技术分析

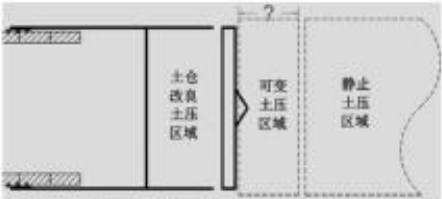
土压平衡盾构适用于土质软硬土岩和混合地层等含水量较高的地层中施工；土压平衡盾构的开挖面由鱼尾刀、滚刀、刮刀、齿刀及泡沫注入口组成。根据断面地层情况，选择合理的掘进参数。盾构掘进过程中首先需根据地层级覆土深度设定理论土仓压力，在掘进过程中通过推进速度及螺旋机转速来控制土压平衡，从而盾构姿态，并做好相关施工记录。

盾构机配有自动导向测量系统，因此在盾构推进过程中，能够更好地控制掘进的方向，使之拟合设计轴线；同时盾构机推进时会对周边建筑物产生一定的影响，也会对周围土体造成扰动，因此，盾构机都配有同步注浆及二次补浆系统，同时对掌子面土体进行注入改良剂（泡沫及膨润土）等措施。

(2) 施工掘进参数控制

在掘进过程时可根据盾构所在位置的覆土埋深、地层情况及地表监测结果进行调整与控制土仓压力级盾构姿态。并随着推进从盾尾注入水泥浆液，把盾构对土体扰动从而产生地表沉降及周边环境（建筑物）的影响降到最低。

掘进参数控制：刀盘转速 1.1r/min，土仓顶部压力控制在 1.6~2.3bar，推力 11000~18000kN，扭矩 1600~2500kN·m，掘进速度控制在 40mm/min~60mm/min，出土量约 40m³。



图一 三区域划分的土压控制理论示意图

为保持土仓压力的稳定，掘进速度须与螺旋机的转速相匹配，严禁出现超挖或欠挖情况，同时须保证同步注浆速度及注浆量的饱和，穿越建筑物时掘进速度应控制在 20~30mm/min，正常段掘进速度控制在 35~60mm/min。

出渣量的控制：在盾构持续掘进过程中，根据刀盘的开挖量和螺旋机的排土量能维持一个稳定土压动态平衡，当掘进完成后，处于管片拼装期间，土仓土压会随着停止掘进的时间增加，土压力会较小，当土仓压力小于地层土压力时，刀盘前方的泥土就会涌入土仓，从而造成地层失稳；同样刀盘的开挖直接大于盾体直径，当停止掘进时间增加，盾体与刀盘开挖的间隙平衡压力就会随着时间的增长而破坏，同样

导致盾体上方的地层失稳。为解决盾构机停止掘进期间土仓压力减小和消散带来地层不稳的影响，严格控制出渣量（可通过千斤顶行程或渣土斗体积进行监控）。

排土量管理：

机型	刀盘开挖直径	理论排土量 (m³)	松散系数	添加剂量 (m³)	可控排土量 (m³)	千斤顶行程	排土预警值 (m³)
左线	6460 mm	39.3	粉砂 1.01	0.5 ~ 1	39.8~ 40.3	每斗 18m³ 64~47 4mm	41
左线	6440 mm	39.08	粉砂 1.01	0.5 ~ 1	39.5~ 40.1	每斗 18m³ 57~49 5mm	41

渣土改良控制：在盾构持续掘进过程中，根据刀盘的开挖量和螺旋机的排土量维持一个稳定土压动态平衡，当掘进完成后，管片拼装期间，土仓土压会随着停止掘进的时间增加，土压缓慢下降，当土压力小于地层压力时，刀盘前方的泥土就会涌向土仓，造成地层失稳；同样刀盘的开挖直接大于盾体直径，当停止掘进时间增加，盾体与刀盘开挖的间隙就会随着时间的增长而破坏，导致盾体上方的地层失稳。为解决盾构机停止掘进期间土仓压力减小和消散带来地层不稳的影响，主要采取以下措施控制：

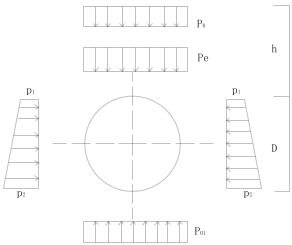
①进入富水沙层地层前，维保人员应全面检查各大系统，保证每一系统均都能正常使用。

②改良剂选择：选择聚合型泡沫，砂层中应将泡沫发生倍率调至适中，在泡沫观察口查看泡沫喷出后是否有挂壁效果，这样才能有效地改良砂土的和易性、降低渣温、减小刀盘扭矩、降低泥饼产生，或者注入发酵良好的浓稠的膨润土浆液，保证渣土出土顺畅。

(3) 推力、扭矩计算

①理论推力的计算

地层参数按中粉砂层选取，由于地层中含水量较大，按最大土压和水压计算。根据地质纵剖面图显示盾构顶端距离地面 22.38m（按 23m 计算），水位按照地下 0.5 米处计算。



盾构所受压力计算如下：

$$P_1 = P_e \times \lambda$$

$$P_2=(P+\gamma \cdot D) \lambda$$

式中：λ-为水平侧压力系数，λ=0.42；

H-为上覆土厚度，h=9.51~22.38m（本次计算取值最大
附土埋深23m）；

γ-为土容重，γ=19；

G-为盾构机重，G=450t；

D-为盾构机外径，D=6410mm；

L-为盾构机长度，L=9.198m；

P₀-为地面上置荷载，P₀=20kPa；

P₀₁-为底部的土压力；

P₁-为拱顶处的侧向水土压力；

P₂-为底部的侧向水土压力；

P_e=1.9×23=437kPa

P₀₁=437+4500/（6.41×9.198）=513kPa

P₁=437×0.42=183kPa

P₂=(437+20×6.87)×0.42=241kPa

盾构的推力主要由以下五部分组成：

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$$

式中：

F₁-为盾体外壳与土体之间的摩擦力；

F₂-为刀盘上的水平推力引起的推力；

F₃-为切土所需要的推力；

F₄-为盾尾刷与管片之间的摩擦阻力；

F₅-为后方台车的阻力。

$$F_1 = \frac{1}{4} (P_e + P_{01} + P_1 + P_2) DL \mu \cdot \pi = 20457.3 \text{ kN}$$

式中：μ：土与钢之间的摩擦系数，计算时取μ=0.3，

$$F_2 = \pi/4(D^2 P_d)$$

式中：P_d为水平土压，

$$P_d = \lambda \gamma \left(h + \frac{D}{2} \right)$$

$$h + \frac{D}{2} = 23 + \frac{6.87}{2} = 26.44 \text{ m}, P_d = 0.42 \times 19 \times 26.44$$

$$= 211 \text{ kPa}, F_2 = 7821 \text{ kN}$$

$$F_3 = \pi/4(D^2 C)$$

式中：C为土的粘结力，C=0t/m²，

$$F_3 = \frac{\pi}{4} \times (6.87^2 \times 0) = 0 \text{ kN}$$

$$F_4 = W_c \mu_c$$

式中：W_c、μ_c为两环管片的重量按428kN考虑，μ_c=0.3，

$$F_4 = 42.8 \times 0.3 = 12.9 \text{ kN}$$

$$F_5 = G_h \cdot \sin \theta + \mu_g G_h \cos \theta$$

式中：G_h为后备套的重量，G_h≈1400kN；

θ为坡度，tgθ=0.025；

μ_g为滚动摩擦阻，μ_g=0.05。

$$F_5 \approx 1400 \times 0.025 + 0.05 \times 1400 \times 1 = 105 \text{ kN}$$

盾构总推力：F=20457+7821+12.9+1400+
105=29912kN

F=29912kN≤44574kN（所选盾构机最大推力）。

②扭矩的计算

盾构机刀盘的扭矩主要由以下九部分组成。在进行刀盘
扭矩计算时：

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_7$$

式中：M₁为刀具扭矩；M₂为刀盘自重力矩；

M₃为刀盘的推力荷载产生的扭矩；M₄为密封装置摩擦力
矩；

M₅为刀盘与土体的摩擦力矩；M₆为刀盘开口槽力矩；

M₇为刀盘土仓室内的搅动力矩。

a. 刀具的切削扭矩 M₁

$$M_1 = \int_0^{R_0} C_r h_{\max} R_0^2 dr \quad M_1 = \frac{1}{2} (C_r h_{\max} R_0^2)$$

式中：C_r：土的抗剪应力，

C_r=C+P_d×tgφ=0+185×tg22°=75kPa

h_{max}：刀盘每转的最大切削深度，h_{max}=3cm/转；

R₀：最外圈刀具的半径，R₀=3.23m。

$$M_1 = \frac{1}{2} (7.4 \times 3 \times 10^{-2} \times 3.43^2) = 13 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

b. 刀盘自重产生的旋转力矩 M₂

$$M_2 = GR \mu_g$$

式中：G：刀盘自重，计算时取刀盘的自重为G=380kN；

R：轴承的接触半径，计算时取为R=3.2m；

μ_g：滚动摩擦系数，计算时取为μ_g=0.004；

M₂=380×3.2×0.004=4.86kN.m

（4）洞内注浆

管片背后注浆采用单液浆（同步注浆）和双液浆（二次
补浆）两种方式，单液浆通过同步注浆系统同步注浆泵注入，
双液浆通过台车尾部二次补浆机在盾尾后7~10环注浆，且
二次补浆时通过打穿管片吊装孔注入浆液，注完后需将对吊
装孔进行封孔处理。

单液浆采用水泥砂浆浆液或化学浆液、双液浆采用水泥

与水玻璃混合液浆。

①同步注浆材料配比

水泥砂浆浆液

材料名称	水 (kg)	砂 (kg)	粉煤灰 (kg)	水泥 (kg)	膨润土 (kg)
重量	400	800	400	100	80

a. 初凝时间：一般为 4~6h，根据断面地层情况和掘进速度，通过现场试验加入速凝剂及调整配合比来调整初凝时间。对于地下水丰富地层和需要浆液早期强度高的地段，可通过现场试验进一步调整配合比或加入早强剂，进一步缩短初凝时间。

b. 终凝强度：7 天不小于 0.15MPa，28 天不小于 1.0MPa。

c. 浆液结石率：> 94%，即固结收缩率 < 6%。

d. 浆液稠度：9~15cm。

水泥砂浆浆液初凝时间较快，能更好地固结周围土体压力，减少地层塌陷。一般适用在盾构始发、接收阶段及地层自稳性较差、地表沉降难以控制且要求较高的地段。

化学浆液

材料名称	水 (kg)	砂 (kg)	粉煤灰 (kg)	消石灰 (kg)	膨润土 (kg)
重量	363	800	400	100	80

化学浆浆液与水泥砂浆浆液相比：前期初凝快，易形成固结块，对土体填充效果好，适用于正常段的掘进施工。

a.初凝时间：一般为 6~10h。

b.终凝强度：7 天强度≥0.15MPa；28 天强度≥1.0MPa。

c.浆液稠度：12-15cm。

d.浆液结石率：> 94%，即固结收缩率 < 6%。

浆液的使用情况视现场实际情况而定。

②二次注浆材料配比

二次注浆	水灰比=1:1；水玻璃原液按 1:3 加水稀释；水泥浆：水玻璃稀释液=1:1	双液浆
------	--	-----

(5) 施工监控、测量、监测

施工监测是指导现场施工的依据，通过测量监测收集到各项监测数据，通过绘制软件绘制各种关系图，从而反映现场现状情况，对成型隧道结构的受力状况和其他施工作业安全系数做出综合评定，通过评定结果与现场沟通，促使现场施工作业调整方向，使施工过程时刻控制在安全范围内。主要体现以下控制：

1) 地面和隧道实行信息互通，进行施工参数和视频监控，掌握施工动态，同时开通隧道内局域网络，可对隧道内动态进行施工联系和监控、指导；

2) 对导向系统成果进行人工测量复核，确保盾构掘进姿态可控；

3) 加密隧道沉降、隧道收敛监测；

4) 加密地面沉降、地下管线沉降、沿线建（构）筑物、桥梁及箱涵沉降、裂缝监测。

参考文献：

[1] 曾华波.砂层地段土压平衡盾构施工技术探讨[J].人民珠江,2006(04).

[2] 陈长庆.土压平衡盾构机过富水砂层施工技术[J].中国盾构网,1998.

[3] GB50446-2008，盾构法隧道施工与验收规范[s].北京：中国建筑工业出版社,2008.

[4] 万庆良,常海昌,李艳芳,等.浅析隧道土压平衡盾构施工技术[J].中古建筑工业出版社,2010.