



# 长江隧道盾构始发端头冻结加固施工技术

张巍

(中交二航局第三工程有限公司, 江苏镇江 212021)

**摘要:** 盾构始发施工事关隧道施工成败, 软土地层盾构始发施工难度及风险大大高于其他地层。南京纬三路过江通道N线盾构始发施工采用端头冻结加固技术取得了良好的效果。详细阐述了盾构隧道始发端头冻结加固法设计、施工关键技术及施工效果, 可供类似工程借鉴。

**关键词:** 盾构; 冻结法; 垂直度; 盾构出洞

中图分类号: U 455.43

文献标志码: B

文章编号: 1002-4972(2015)08-0081-03

## Consolidation of initial end of tunnel boring by freezing crossing the Yangtze River

ZHANG Wei

(The 3rd Construction Company of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Zhenjiang 212021, China)

**Abstract:** Starting of the tunnel boring machine (TBM) is one of the key points which directly affect the effect of tunnel construction. The TBM started in the soft soil layers faces more difficulties and risks than those started other soil layers. Freezing on the starting end of TBM for consolidation is used during the construction of work-Nanjing Weisan road tunnel N crossing the Yangtze River and acquires a good effect. This text elaborates the design of freezing on the starting ends for consolidation, key construction points of such freezing technology and its construction effects.

**Keywords:** tunnel boring; consolidation by freezing; verticality; TBM launching

盾构在软土地层始发时, 由于土体自立性差, 在复杂的应力作用下极易发生大量土体涌入工作井的事故。为保持始发期间土体稳定性, 采取端头冻结法加固土体。盾构始发前, 将洞门环周边含水地层冻结成具有一定强度的封闭冻土帷幕, 以抵抗土层压力、阻止地层变形、隔断地下水同洞门圈土体的联系; 在盾构掘进、刀盘切削冻结加固范围土层时, 可强制解冻使其融化, 便于盾构施工。

## 1 工程概述

### 1.1 工程概况

南京市纬三路过江通道设计为双层双向8车

道, 采用N、S线分离两管盾构隧道形式, 采用直径为14.93 m 泥水加压平衡式盾构机施工。盾构始发井为N、S双线共用, 尺寸为47.32 m (宽) × 25 m (长), 工作井深26.35 m。

### 1.2 施工环境

工作井始发端头18.0 m 范围内采用水泥土搅拌桩进行加固。始发前50 d 在洞门范围内选择均匀分布的4个点钻设水平探孔, 均有大量水流出, 其中1探孔流水浑浊。据此判断在高水头软土和粉细砂地层中水泥土搅拌桩加固效果不佳, 且上部存在建筑物, 始发施工风险极大。因此, 面对上部敏感建筑物沉降控制要求高、保水软土地层自立性差的客观条件, 施工中进行冻结法端头加固。

收稿日期: 2015-05-28

作者简介: 张巍 (1977—), 工程师, 从事工程施工技术管理及质量管理工作。

### 1.3 水文地质条件

盾构始发主要穿越地层为：淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉细砂，是典型的软土地层。地下水主要为松散岩类孔隙潜水和松散岩类孔隙承压水，孔隙承压水在长江河道区直接与江水相通。含水介质主要为粉细砂，底部为卵砾石层，该层厚度大、渗透性好、赋水性好。土层渗透系数为  $6.8 \text{ m/d}$ 。

## 2 冷冻加固设计

始发井端头加固以提高端头地层承载力和对周围透水通道进行有效止水为目的，端头  $18 \text{ m}$  范围使用搅拌桩进行加固（冻结区域也进行加固），水泥土加固土体强度提供必要的承载力，冻结加固提高洞口土体强度，防止不均匀沉降阻塞地下渗水通道。施工设计指标为：冻结壁厚度  $1.6 \text{ m}$ 、宽度  $19.2 \text{ m}$ 、深  $25 \text{ m}$ ；冻结孔  $49$  个，冻结孔长度  $1225 \text{ m}$ ；冻土平均温度  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ，盐水温度  $-25 \sim -30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

### 2.1 冻结壁设计

为封堵土体和结构间隙的涌水，冻结壁必须有一定的厚度及较低的平均温度，取盾构刀盘下部最低点进行荷载计算，计算模型见图 1。

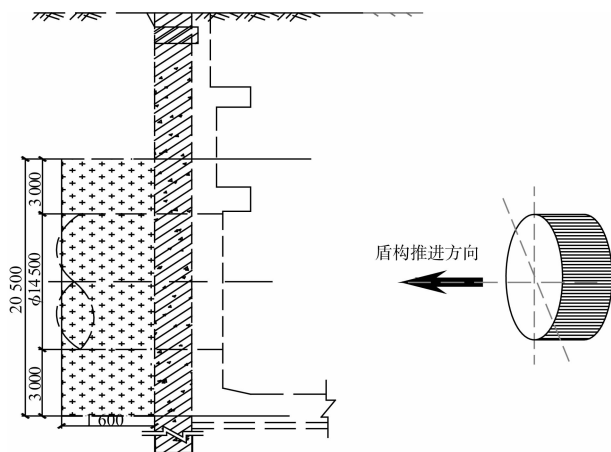


图 1 冻土加固体、荷载、计算模型（单位：mm）

应用重液理论计算水土压力，其出洞口的水土压力为：

$$P = 0.013H \quad (1)$$

式中： $P$  为计算点的水土压力（MPa）； $H$  为计算点深度（m）。

盾构隧道洞门处底高程为  $-16.439 \text{ m}$ ，工作井地面高程为  $5.8 \text{ m}$ ，洞门的底缘深度为  $22.239 \text{ m}$ 。则计算得到水土压力为  $P \approx 0.289 \text{ MPa}$ 。

### 2.2 冻结壁厚度计算

#### 2.2.1 按冻结壁周边抗剪计算

盾构始发穿越主要地层为淤泥质粉质黏土、粉质黏土，参考南京市长江江边冻土试验报告数据，取粉质黏土对应冻土单轴抗压强度为  $1.8 \text{ MPa}$ ，冻土弹性模量为  $150 \text{ MPa}$ ，泊松比为  $0.3$ 。当盾构推进过程中，冻结壁由于受水、土压力的作用，沿洞口周边产生剪切作用，据此设计冻结壁厚度为  $1.6 \text{ m}$  时，盾构推进受水土压力为

$$t = PD/(4h) \quad (2)$$

计算得  $t = 0.655 \text{ MPa} < 1.8 \text{ MPa}$ ，安全系数  $K = 2.7$ 。

#### 2.2.2 按弹性固定板计算

板中最大弯拉、压应力：

$$\sigma = 3P(1/2D)^2(1 + \mu)/(8h^2) \quad (3)$$

式中： $P$  为计算水、土压力， $0.289 \text{ MPa}$ ； $D$  为洞口凿除净直径， $14.5 \text{ m}$ ； $\mu$  为冻结壁泊松比， $0.3$ ； $h$  为冻结壁厚度， $1.6 \text{ m}$ 。计算得  $\sigma = 2.89 \text{ MPa} < 3.8 \text{ MPa}$ 。安全系数： $K = 3.8/2.89 = 1.31$ 。

板中最大变形：

$$U = 3P(1/2D)^4(1 + \mu^2)/(16Eh) \quad (4)$$

式中： $E$  为冻结壁弹性模量， $150 \text{ MPa}$ 。计算得  $U = 15 \text{ mm}$ ，满足沉降控制和盾构始发安全要求。

根据上述计算，设计采用两排冻结孔，孔、排间距均为  $0.80 \text{ m}$  插花布孔，冻结壁平均温度可按  $-10.0 \text{ }^\circ\text{C}$  计，冻结壁厚度  $1.6 \text{ m}$ ，按洞口周边抗剪计算、弹性固定板计算，能满足强度、刚度要求。

### 2.3 制冷机组选型及配置

冻结需冷量计算：

$$Q = \pi dHK \quad (5)$$

式中： $H$  为冻结总长度， $1225 \text{ m}$ ； $d$  为冻结管直径， $127 \text{ mm}$ ； $K$  为冻结管散热系数  $260 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ；冻结加固时需冷量为  $12.7 \times 10^4 \text{ kcal/h}$ 。考虑  $20\%$  的冷量损失，冻结站制冷能力不低于  $15.24 \text{ kcal/h}$ ，选用 W-YSLGF600 II 型螺杆冷冻机 2 台。每台机组制

冷量  $17 \times 10^4$  kcal/h, 电机功率 220 kW。

### 3 冻结施工

#### 3.1 施工参数

冻结法施工参数见表 1。

参数名称	单位	数量	说明
冻结孔深度	m	25	
冻土墙设计厚度	m	1.6	
冻土墙平均温度	℃	-10	
积极冻结时间	d	30	从开冻至盾构始发
冻结孔(总)数	个	49	
冻结孔(总)长度	m	1 225	
冻结(总)长度	m	1 225	
冻结孔开孔间距	m	0.8	
冻结孔与槽壁间距	m	0.4	
冻结孔偏斜率	%	≤1	
设计最低盐水温度	℃	-28	冻结 7 d 盐水温度到 -20℃ 以下
单孔盐水流量	m <sup>3</sup> /h	3~5	
冻结管规格	mm	φ127×4.5	20 <sup>#</sup> 低碳钢无缝钢管
测温孔总数	个	3	1.5" 焊管
冻结总需冷量	kcal/h	19.3 万	工况条件
JYSLGF465 型板翅式换热器	台	2	1 台备用
钻机 XY-2 型	台	2	
最大用电量	kW	400	
用水量	m <sup>3</sup> /h	30	新鲜水补充

#### 3.2 冻结施工过程<sup>[1-3]</sup>

##### 3.2.1 钻孔与下管工作

按冻结孔设计位置固定钻机, 用取芯钻开孔, 正常钻进时用三翼钻头钻进。

下好冻结管后, 采用经纬仪灯光测斜法测斜, 将手电放入钻孔冻结管中作为观测标志, 用经纬仪的对点器分段观测管内灯光的位置, 根据相似三角形原理, 解析出钻孔在某深度处的偏斜率, 判定垂直度是否合格。

##### 3.2.2 供液管的施工

冻结管施工完毕后在冻结管内下入一长一短两根盐水供液管。施工时将短管底部切除一部分以增大回液面积, 并将冻结管管口焊接密封。

##### 3.2.3 管路连接

所有供液管下放完毕后采用串并联方式连接

去、回两路管路, 两个孔串联成一组, 并根据组数在去回路上布置相应数目的进出液孔, 各组并联与去、回路连接。

##### 3.2.4 管路保温

采用厚度不小于 30 mm 的保温板或棉絮对管路、冷冻机组的蒸发器及低温管路进行保温, 盐水箱和盐水管用 50 mm 厚的保温板或棉絮保温。通过预先设置的测温孔放置深度为 2.5、1.5 m 的 2 条测温线进行观测, 测温孔温度下降趋势稳定, 冻结发展速度平均在 28 mm/d, 经验算如果可以确定已经交圈, 在洞门中部开设 4 个 0.8 m 深水平探孔, 孔内土体结冰并无水流出, 各探孔实测温度低于 -5℃ 时方可全部凿除。

##### 3.2.5 拔管及二次冻结

在盾构始发之前, 所有位于盾构推出轮廓内的冻结管需拔离盾构上部外壳 0.3 m, 冻结管在 24 h 内拔出并割除多余部分进行二次冻结。

拔管利用热盐水进行循环, 同时采用 2 个 10 t 千斤顶进行试拔, 拔起 0.5 m 左右时, 便可停止循环热盐水, 用 20 t 吊车快速拔出冻结管。

拔管并割除上部多余部分后立即进行管路再次连接, 进行二次冻结直至盾构顺利始发后再进行最终拔除。

##### 3.2.6 冻胀卸压

土体冻结过程中, 地层孔隙水结冰膨胀, 产生一定冻胀压力, 为减少冻胀对上部泥浆池和周边管线的影响, 在冻土边缘设置卸压孔 2 个, 释放冻胀力。

##### 3.2.7 融沉控制

冻结法加固盾构通过后, 对剩余冻结管路进行热盐水循环拔出管路, 在冻土融化时土体排水固结引起融沉, 其效用滞后于冻土融化, 保水黏性土尤为明显, 土体沉降会威胁盾构始发井口安全。为减少融沉影响, 解冻后在隧道内进行跟踪注浆, 减少冻结对周边土体的影响, 同时在拔除的冻结管内灌注水泥浆, 水泥浆内掺防冻早强剂以抵抗周围土体低温的影响。

(下转第 89 页)