

220 kV 华月线过海电缆隧道盾构修复 海上冰冻技术

吕文胜

(广东电网公司汕头供电局, 汕头 515041)

摘要: [目的] 220 kV 华月线过海电缆隧道工程在盾构推进至 +118 环时出现险情, 隧道被淹, 盾构修复必须对正面土体进行加固处理以解决盾构机头处涌砂、涌水的问题。[方法] 在综合考虑了各种条件后, 利用淡水冻结计算原理, 结合现场海水和土样试验数据, 尝试海水冻结。[结果] 实现了国内首例海上冰冻进行土体加固措施并获得成功。[结论] 冻结施工的有效实施, 可成功地解决隧道盾构切口处漏水的难题, 案例经验和数据极具参考价值。

关键词: 海底盾构隧道; 盾构修复; 海水冻结施工

中图分类号: TM611; U455

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0262-05

Seawater Freezing Technology for Repairing Submarine Tunnel in Construction of 220 kV Huayue Line Project

Lü Wensheng

(Shantou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid, Shantou 515041, China)

Abstract: [Introduction] Under construction in 220 kV Huayue line submarine tunnel project, some emergency danger occurred because of seawater inflow. [Method] The advantage of freshwater freezing technology had been tried to solve this problem. After several tests of the seawater and soil sample, some calculations were done according to the test data and freshwater freezing theory. [Result] The problem has been resolved successfully by seawater freezing. The seawater freezing technology has been used for the first time in the nation. Due to this method, the construction can be continuously done according to existing plan, otherwise this tunnel may have to scrap. [Conclusion] The seawater freezing technology is very efficient and economic to deal with seawater inflow of tunneling under seawater.

Key words: submarine tunnel; seawater freezing technology; tunnel restoration

淡水冻结法在煤矿开挖和陆上地下结构施工时发生透水情况经常使用^[1-3], 而海上在海水泥土中采用冻结法没有实际可借鉴案例。海底盾构隧道受淹后修复工程, 海水冻结法土体加固是冻结法的一种特殊应用。同其他淡水冻结法一样, 它是在海上地层中埋设冻结管, 同样利用盐水循环来降低土体温度, 将天然岩土变成冻土, 形成不透水强度高的临时冻结体。

海上冰冻不同于一般的淡水土体冻结, 由于海

水含盐量比较高, 冻结温度就会随之降低, 冻结时间就会相应延长。另外, 含盐量越高, 冻土的力学强度就越低^[4]。能否形成能够承受水土压力并起到阻水作用的冻土帷幕, 作为盾构隧道修复的隔离措施, 意义重大!

1 工程概况

220 kV 华能汕头电厂至月浦电缆线路, 是汕头电网第一根 220 kV 电压等级电缆线路^[5]。路径从华能汕头电厂升压站出发, 穿越汕头内海湾到北岸, 沿中山路转天山路至金凤路, 往西到潮汕路, 经金平工业区至 220 kV 月浦变电站, 全长约 17

km。线路大部分是陆地电缆通道，其中穿越汕头内海湾为钢筋混凝土盾构隧道，长 2.06 km；穿越梅西河为钢顶管隧道，长约 330 m。这两个隧道段是本项目工作难度较大的关键控制点。过海电缆隧道位于汕头市海湾大桥的西侧，采用直径 $\Phi 3.54$ m 的网格式水力机械盾构机进行掘进施工，平均埋深约 30 m。隧道盾构在推进至 +118 环时，发生了隧道涌水进泥事件。为了解决这一问题，综合考虑各方面因素，决定采用冻结法对盾构机前方正面土体进行冻结加固的方案。待冻结体达到阻水阻泥要求后，对隧道后侧工作井平衡压水卸压，再进行隧道内泥沙清理和盾构机修复。

2 地质条件

本工程地处汕头出海口内海湾，属冲积相地貌。地下水属潜水型和海水连通，直接受海水涨落潮的影响，海水水位标高为 $-1.0 \sim -12.0$ m。盾构切口正面需进行冻结的土层主要为淤泥质土和粉质粘土。淤泥质土为深灰色，饱和，流塑，轻微异味，含腐殖质，少量贝壳残骸，多含中粗粒以上砂，局部夹淤泥质砂层。粉质粘土为灰褐色、深灰色，湿，可塑，干强度中等，韧性好，局部含多量石英砂颗粒及少量淤泥质，海积，局部含多量中粗砂，标贯击数偏高。同时，由于位于港口局码头前沿，盾构机头正面碰到不少码头抛石和原来老海堤的花岗岩块石，大量的贝壳。

3 冻结法施工

3.1 冻结帷幕设计及冻结孔布置

根据盾构机切口的地质土层结构和水文地质资料，现场取土进行的相关实验后数据，提出在盾构切口处打设两排冻结孔共 15 个，包裹整个盾构机前端，通过冻结形成帷幕封闭设备前端泥水通道；考虑到盾构机长度约 7 m 的稳定问题，在前端向后 4.5 m 处盾构机两边各布置一个冻结孔，利用冻结土层来稳定盾构机身，以免发生盾构机不均匀沉降和姿态失稳现象。冻结管选用 $\Phi 127$ mm $\times 5$ mm 低碳钢无缝钢管。冻结孔数按机头正面尺寸共布置 17 个，冻结孔间距为 0.7 m，排间距 0.8 m，距盾构切口间距 0.3 m。根据隧道的埋深和作业平台标高 ($+4.0$ m)，冻结孔埋深为 33.51 m，采用双供液管，冻结深度为下部 7.55 m，上部 25.96 m 不冻结部位采用 10 mm

厚 PEF 板保温，套管选用 $\Phi 219$ mm $\times 4.5$ mm 钢管。盾构冻结帷幕剖面示意图和盾构冻结孔、测温孔平面布置图如图 1 和图 2 所示。

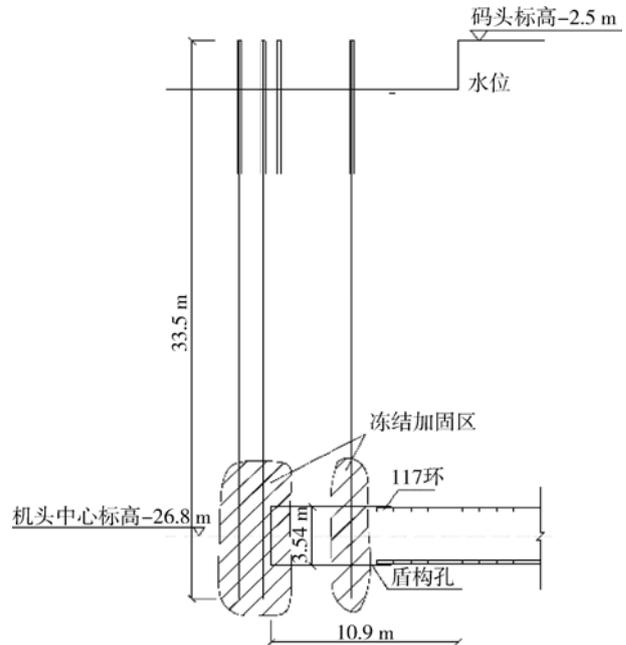
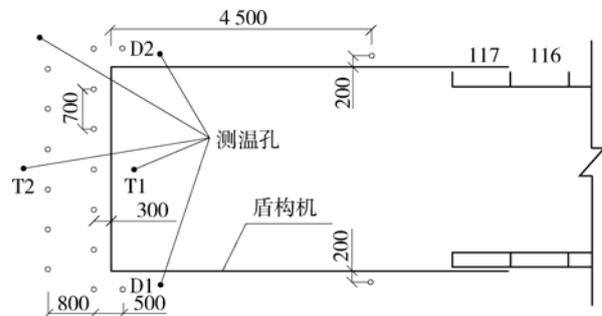


图 1 盾构冻结帷幕剖面示意图

Fig. 1 Freezing curtain profile



注：单位为 mm。

图 2 盾构冻结孔、测温孔平面布置图

Fig. 2 Freezing and temperature measuring holes arrangements

据有关试验数据设计土体的冻土墙平均温度如表 1 所示。

表 1 冻土墙温度及强度指标

Tab. 1 Temperature and strength of frozen soil wall

冻土墙平均温度/ $^{\circ}\text{C}$	抗压强度 $\sigma_{\text{压}}/\text{MPa}$	抗拉强度 $\sigma_{\text{拉}}/\text{MPa}$	抗剪强度 $\tau_{\text{剪}}/\text{MPa}$
-15	2.2	1.3	1.0
-21	3.5	2.0	1.6

根据盾构机切口结构确定冻结帷幕有效厚度为

1.5 m, 即: 冻土进入盾构切口网格 20 cm, 已满足隧道内卸压抽水清理要求即可。

1) 计算水土压力: 盾构切口的中心埋深为 26.8 m, 盾构的直径为 $\Phi 3.54$ m, 切口处的底缘深度为 28.57 m。则按重液公式计算得到水土压力为: $P = (0.013 H) \text{ MPa} = 0.371 \text{ MPa}$

2) 假定加固体为整体板块而承受水土压力, 运用日本计算理论计算加固体的厚度, 计算得冻土墙厚度为 1.46 m。验算结果如表 2 所示:

$$h = \left[\frac{K\beta PD^2}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

表 2 加固体厚度计算结果

Tab. 2 Thickness of frozen soil wall calculation

平均温度/ ℃	弯拉强度 σ/MPa	水土压力 P/MPa	厚度 h^*/m	盾构直径 D/m	系数 β	安全系数 k
-15	1.3	0.371	1.46	3.55	1.2	2.0

注: h^* 为计算加固体厚度。

3) 运用国内建筑结构静力计算理论公式进行验算。圆板中心所受最大弯曲应力计算公式为:

$$\sigma_{\max} = \frac{P(D/2)^2}{16} (3 + \mu) \frac{6}{h^2} \quad (2)$$

验算结果如表 3 所示:

表 3 圆板中心最大弯曲应力计算

Tab. 3 Maximum bending stress calculation (circular plate centre)

水土压力 P/MPa	盾构直径 D/m	泊松比 μ	厚度 h^*/m	σ_{\max} /MPa	$\sigma_{-10\text{℃}}$ /MPa	安全系数 k
0.371	3.55	0.35	1.46	0.68	1.30	1.9

注: h^* 为计算加固体厚度; σ_{\max} 为计算加固体最大弯拉应力; $\sigma_{-10\text{℃}}$ 为冻土弯拉强度; $\sigma_{\max} \ll \sigma_{-10\text{℃}}$ 。

4) 剪切验算加固体厚度: 盾构切口周边验算加固体剪切应力 $\tau_{\max} = 0.25PD/h$ 。验算结果如表 4 所示:

表 4 剪切应力验算数据及结果

Tab. 4 Maximum shearing stress calculation

水土压力 P/MPa	盾构直径 D^*/m	厚度 h^*/m	τ_{\max} /MPa	$\tau_{-10\text{℃}}$ /MPa	安全系数 k
0.371	3.54	1.46	0.23	1.00	4.3

注: D^* 为加固体盾构直径; h^* 为加固体厚度; τ_{\max} 为最大剪切应力; $\tau_{-10\text{℃}}$ 为冻土抗剪强度; $\tau_{\max} \ll \tau_{-10\text{℃}}$ 。

上述的计算以及弯曲应力、剪切验算, 都是沿

用在淡水冻结法的计算方法, 再考虑在海水中含盐量较高的因素, 适当考虑放大安全系数。最终确定冻土墙厚度为 1.5 m。

3.2 制冷设计

1) 冻结参数确定如表 5 所示:

表 5 冻结参数

Tab. 5 Freezing parameters

盐水温度 /℃	冻结孔单孔流量 /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	冻结孔终孔间距 L_{\max}/m
-25 ~ -30	≥ 5	≤ 1.04
冻土发展速度/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)	冻结帷幕交圈时间/ d	达到设计厚度时间/ d
25	21	35

经过计算积极冻结时间为 35 d, 维护冻结时间为 20 d。为了观测实际冻结状态, 布置在盾构切口的外侧周围 4 个测温孔, 正面两个、侧面两个, 孔深较深延续至 33 m 左右。另一个测温孔深度较浅, 到盾构机上部外壳, 具体位置视现场情况而定。

2) 需冷量和冷冻机选型

依据上述参数代入, 冻结需冷量由下式计算: $Q = 1.5 \cdot \pi \cdot d \cdot H \cdot K = 23.033 \text{ Mcal/h}^{\text{①}}$ 。选用 YSLGF300 II 型螺杆机组一台套, 设计单台机组工况制冷量为 87.5 Mcal/h, 单台电机功率 110 kW, 满足使用。

3) 冻结系统辅助设备

盐水循环泵选用 IS125-100~200 型 2 台, 单台流量 200 m^3/h , 单台电机功率 45 kW; 冷却水循环选用 IS125-100~200 型 2 台, 单台流量 120 m^3/h , 单台电机功率 18 kW; 冷却塔选用 NBL-50 型 2 台, 补充新鲜水 10 m^3/h 。

为了能够持续保证制冷设备运转, 专门设置了双电源保供电。

3.3 作业平台及冻结孔的施工

从盾构工作井出发至 +118 环, 刚好穿越汕头港口局公务码头桩群进入海中, 此次海上冰冻施工需要在码头前沿外侧海面上搭设一个海上施工作业平台。为了保证平台的稳定和安全, 根据设备和作业人员的静荷载和工作动荷载, 充分考虑到出海口

① 1 cal \approx 4.2 J。

海面风荷载较大等情况,专门设计作业平台,按照冻结施工要求必须满足承受 10 t 以上的集中荷载要求。平台下部支撑体系需要打设 5 根直桩和 8 根斜桩,均为 $\Phi 580$ mm 钢管桩。纵梁和底梁采用 300 mm \times 600 mm 的“H”型钢,底梁共设 2 道,最南面一道贴近码头边缘,其北侧一道底梁利用码头下部的 T 梁进行上下对拉,所有节点均进行可靠焊接。考虑到平台使用期,正值台风季节,为了保证安全,从稳定要求把悬挑至海面的纵梁下部加斜撑撑至码头可靠不易变形的结构上。海上平台搭建和拆除时大直径桩基的打设及拔除是控制的难点,也是冻结法施工的关键点。

由于地层水量丰富,且与海水联通,在冻结孔钻进时,采取隔水措施。施工工序为:钻进套管孔——下套管——钻进冻结孔——下冻结管。选用 XY-2 型钻机进行成孔钻进,该钻机最大钻进深度为 100 m,最大钻进直径为 200 mm,先进行套管钻进到海滩面下 4.5 m 后,下入套管,套管长度 8 m,并加以固定,再进行冻结孔钻进到设计深度。考虑到施工区域内的塌陷已超过 4 m,无法推算地层下部土体的沉降量,可能地层中产生大范围的土体扰动,采用膨润土的泥浆钻进成孔,禁止使用清水造孔。冻结管埋设完成后进行耐压试验,用水压泵打压到封闭好孔内,加压力到 0.8 MPa 时停止,关好闸门观测 15 min 后压力下降小于 0.05 MPa 即为合格。

3.4 冻结监测与分析

海上冰冻工程自 2008 年 9 月 20 日开始积极冻结,至 2009 年 1 月 9 日停机,期间冷冻机运转正常,总天数 110 d。盐水干管去路的温度维持在 -30 $^{\circ}\text{C}$ 左右,各组冻结管去回路温差平均值为 0.8 $^{\circ}\text{C}$ 。

1) 积极冻结 65 d 后,冻土帷幕的平均总厚度为 2.43 m,有效厚度为 1.71 m,比设计的有效厚度 1.5 m 大了 0.21 m,冻土平均温度为 -15.32 $^{\circ}\text{C}$,也达到了设计冻土的平均温度 -15 $^{\circ}\text{C}$ 的要求,冻土罩子包裹盾构机头部的长度为 0.72 m,超过了设计考虑的 0.2 ~ 0.5 m 的指标。由此可下结论,积极冻结 65 d 后,如表 6 所示,冻结罩子的各项指标都达到了设计的要求,可以开始进行隧道抽水卸压,清理工作井和隧道中淤泥,把受淹的盾构机械、电气设备进行修理更换。

2) 冻土帷幕厚度在不同的深度上的值也不一样,距离隧道越近,冻土帷幕厚度越大,呈上下薄

表 6 积极冻结 65 d 后的 T1-T2 截面冻土帷幕计算

Tab. 6 Freezing soil curtain calculation after 65 days

深度/ m	T2 侧厚 度/m	T1 侧厚 度/m	总厚 度/m	有效厚 度/m	包裹厚 度/m	平均温 度/ $^{\circ}\text{C}$
26.0	0.555	0.727	2.082	1.655	0.427	-14.9
26.5	0.590	0.866	2.256	1.690	0.566	-15.2
27.0	0.597	1.155	2.552	1.697	0.855	-15.4
27.5	0.637	1.195	2.632	1.737	0.895	-15.6
28.1	0.660	1.168	2.628	1.760	0.868	-15.5
平均	0.608	1.022	2.430	1.708	0.722	-15.32

中间厚的罩子形状。T1 侧和 T2 侧的厚度差异很大, T1 侧的厚度明显大于 T2 侧,是由于布置了 D1 和 D2 两个加强冻结孔,起到了加强冻结、增大冻土包裹盾构范围的作用,说明加强孔辅助形成冻土罩子的理念得到了理想的实现。

4 问题及难点

4.1 海上钢平台搭设

此次海上冰冻施工需要在汕头港口局码头前沿外侧搭设一个海上施工作业平台,作业地点处于出海口海面风载较大,又是台风季节。为了保证平台的稳定和安全,下部支撑体系需要打设 5 根直桩和 8 根斜桩,为 $\Phi 580$ mm 钢管桩。

克服的难点:海上平台搭建和拆除时大直径桩基的打设及拔除。

4.2 冻结管打设

此次海上冰冻施工,共需打设 17 个冻结孔和 5 个测温孔,由于地处码头前沿,码头施工时,大量的抛石游离在软弱的土层中,克服冻结管打设时遇到的大量块石障碍;另一方面,长度为 33.5 m 的冻结管打设的精度和密闭性保证要求,需要精准的空间立体测量,以保障埋设管子位置的准确。

4.3 积极冻结周期

为保证盾构切口正面冻结帷幕厚度达到 1.5 m,理论设计积极冻结时间为 35 d。但是由于海上冰冻在国内还没有先例,缺乏相关的经验数据,且盾构机头处于砂土块石层,地下水与海水连通,受海水中盐分含量偏高及涨落潮水体流动的影响,为了慎重起见,积极冻结实际花费了 65 d,接近设计值的两倍。

克服的困难:海上冰冻国内第一,无借鉴资料。

4.4 局部冻结工艺

采用双供液管局部冻结工艺,既可以有效减少

冻胀和融沉现象对工程的不利影响；又减少制冷量和有效地保护环境。

克服的困难：增加了冻结管理设难度。

5 结论

1)本次汕头电缆隧道盾构机头正面冻结施工不同于以往在淡水中冻结，由于地下水与海水连通，在实际施工过程中，由于冻结区域主要为砂土地质，受海水中盐分含量偏高及涨落潮水体流动的影响，积极冻结所花费的时间远大于预先设想的 35 d (实际为 65 d)。

2)由于缺乏在海水中进行冻结的经验数据，原方案中的一些计算数据也大多是参照淡水冻结，在进行盾构机头开仓处理时，发现实际冻土墙范围已远超过计算值，因此，相应的解冻时间用了近 60 d，远大于预先设想的 20 d。从另一个角度而言，海水冻结没有原来预想的可能偏差那么大。

3)此次冻结施工的有效实施，成功地解决了隧道盾构切口处漏水的难题。从而维持原来设计方案继续盾构隧道推进，避免了受淹盾构机和已形成的 118 m 隧道报废，重新修改隧道标高的结果，其经验和数据都非常有参考价值。但由于仅为个案，还需要更多的实例去予以推敲佐证。

参考文献：

- [1] 汪仁和, 曹荣斌. 双排管冻结下冻结壁温度场形成特征的数量分析 [J]. 冰川冻土, 2002(2): 181-185.
WANG R H, CAO R B. Numerical analysis of the temperature

field features in the frozenwall with double rows of freezing pipes [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002 (2): 181-185.

- [2] 汤志斌, 陈文豹, 李功洲. 冻结壁温度场的实测研究及在工程中的应用 [C]//中国煤炭学会. 中国煤炭学会地层冻结工程技术和应用学术研讨会, 福州, 1995-06-01. 北京: 煤炭工业出版社, 1995: 216-222.
- [3] 胡向东. 上海长江隧道冻土试验报告 [R]. 上海: 同济大学, 2007.
- [4] 杨平. 原状土与冻融土物理力学性能差异性研究 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2001(2): 68-70.
YANG P. Study on the difference of physical and mechanical properties between original and thawing soil [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2001 (2): 68-70.
- [5] 于俊岭, 孙强. 南方电网首条海底电缆专用隧道之难点与创新 [J]. 广东电力, 2014, 27(11): 114-116.
YU J L, SUN Q. Difficulty and innovation of the first exclusive subsea cable tunnel in Southern Power Grid [J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(11): 114-116.

作者简介：



LÜ W S

吕文胜 (通信作者)

1964-, 男, 广东汕头人, 广东电网公司汕头供电局副总工程师, 高级工程师, 长期从事电网规划建设管理和技术管理工作 (e-mail) lws125325@21cn.com.

(责任编辑 郑文棠)

能源知识

电缆隧道盾构选型施工与地层变形研究

中国能建广东院企业博士后课题“电缆隧道盾构选型施工与地层变形研究”针对 220 kV 华能汕头电厂至月浦站电缆线路工程过海段的盾构选型和地层变形规律进行研究, 以理论分析、数值模拟、智能方法、现场实测为手段, 系统研究了电缆隧道施工选型及其对地层变形的影响规律, 围岩力学参数的反演方法和掘进参数的优化方法。课题提出了 RandWPSO-PP 盾构选型方法, 建立了 RandWPSO-PP 盾构选型模型, 分析了模型各参数物理意义、沉降速率和沉降量与时间的关系。以实测数据分析了华月线电缆隧道工程地层变形规律, 分析表明盾构掘进至 2016 环及其之后, 盾构机后方地层同时向隧道掌子面方向滑移, 说明对于类似的抛石结构加固围岩, 盾构施工后地表的变形不能用传统沉降机理进行分析, 同时有限元难以模拟滑移产生的沉降, 因此参数反演时应采用盾构掘进至 2016 之前的各测点沉降分析, 通过将实测数据拟合与经验公式对比, 给出了地面沉降经验公式的修正方法, 理论上证明了隧道中心线上地层纵向沉降采用双曲历时模型较为合理。

(聂卫平)