

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.033

冻结工法在富集海水地层下地铁联络通道 施工中的应用研究

苏文德

(厦门轨道交通集团有限公司, 福建 厦门 361001)

摘要: 海水成分复杂致使海域地层冻土力学特性及温度变化规律不同于淡水地层。基于海底隧道的修建逐渐增多且冻结法在海域环境中的应用少,开展了海域复杂环境下联络通道冻结施工温度场变化规律研究。依托国内首条海底地铁隧道——厦门轨道交通2号线,研究富集海水地层下地铁联络通道施工技术,通过对比分析了不同位置、不同深度测温孔温度分布特征,确定了“喇叭口”位置受隧道内部环境影响的范围,冻结帷幕内、外侧边缘冻结发展特点;对比深、浅测温孔数据表明泵站处冻结帷幕边缘温度沿冻结管轴向呈“W”形状分布,指出了可能存在包括两侧“喇叭口”和泵站位置中部在内的3处主要冻结薄弱区;对比分析了积极冻结期间3次不同时段、不同持续时间长度盐水温度回升对冻结加固效果的影响情况。研究成果揭示了海底隧道联络通道冻结温度场变化规律,对今后海底冻结施工具有重要的借鉴意义。

关键词: 海底隧道;冻结工艺;联络通道;温度场变化

中图分类号: U455.49

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0181-06

Application of Freezing Method in the Construction of Subway Connecting Aisle Under the Enriched Seawater Stratum

SU Wende

(Xiamen Rail Transit Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361001, China)

Abstract: The complex composition of seawater causes the mechanical properties and temperature changes of the frozen soil in the sea layer to be very different from the freshwater stratum. The construction of tunnels under sea has been gradually increasing, however only a few freezing methods were applied in the marine environment. In this paper, the variation law of temperature field in the freezing construction of the connecting aisle in the complex environment of the sea area was analyzed. Taking Xiamen rail transit line 2 as an example, which is the first subsea subway tunnel in China, the construction technology of subway connecting aisle under the enriched seawater stratum is studied, determine the range of the "horn mouth" position affected by the internal environment of the tunnel, and the characteristics of freezing development in the inner and outer edges of the frozen curtain were determined. Comparing the data of deep and shallow temperature measurement holes, the temperature of the frozen curtain edge at the pumping station is distributed in the shape of "W" along the axial direction of the freezing tube, indicating that there may be three main parts including the "horn mouth" on both sides and the middle of the pumping station. The effects of three times of salt water temperature rise on different periods of time and different lengths of time on the freezing and strengthening effect were compared and analyzed. The research results reveal the change law of freezing temperature field in the connecting aisle of the subsea tunnel, which has important reference significance for the future subsea freezing construction.

Keywords: subsea tunnel; freezing method; connecting aisle; temperature variation

冻结工法是利用人工制冷技术,通过在富水岩土层中布置冻结管以及循环冷媒,发生冷媒与富水岩土层发生热交换,从而使富水岩土变成冻土,增加其强度和稳定性,隔绝地下水与地下工程的水力联系。由于其安全可靠、效果好等特点,已在城市轨道交通建设中得到广泛应用^[1-4],如出入口暗挖施工、联络通道施工、地铁修复、穿越不良地层等。

根据对冻结工法在地铁联络通道中的应用分析,其施工技术相对成熟,包括在特殊地层下的联络通道施工工法及其控制措施^[5],陆域城市地铁联络通道冻结法施工技术^[6-8],越江隧道工程中联络通道冻结法施工与风险分析等。其中,施工难度比较大的地质环境为越江隧道联络通道冻结施工,杨太华^[9]曾依托上海复兴东路越江隧道,运用风险分析方法,分析了冻结施工中可能出现的各类风险,并提出了具体的防范措施;李开文等^[10]、王彦洋等^[11]和李大勇等^[12]采用数值模拟方法对冻土帷幕的应力与变形进行了分析和安全评价,详细研究了冻土帷幕中应力和位移的分布情况,指出了容易产生应力集中的位置。通过统计冻结工法的应用范围与对象,可以明显看出:冻结工法应用于陆域富水地层的各类地层稳定性处理方面的工程案例较多,并且已积累的设计与施工经验十分丰富。但在富集海水地层下地层稳定性处理方面,如海底地铁联络通道冻结施工的应用极少。

由于富集海水地层中含有大量可溶性盐类及各种金属离子成分,其冻土力学特性及温度变化不同于淡水地层。因此,冻结工艺在陆域地层的施工经验无法指导富集海水地层下地铁联络通道施工。通过查阅资料,仅有的海底联络通道冻结施工的介绍为许黎明等^[13]研究海底隧道联络通道冻结法施工健康监测技术,利用光纤光栅传感技术,提出海底隧道联络通道施工过程中冻土、联络通道结构与盾构隧道结构的实时监测方法。但是,上述研究并未获取实际监测数值,并对数值进行分析。

本文依托国内首条海底地铁隧道——厦门轨道交通 2 号线,基于许黎明等^[13]构建的海底隧道联络通道健康监测技术,研究富集海水地层下地铁联络通道施工技术,试图通过对比分析冻结温度场变化规律,为今后海底冻结施工提供技术支持。

1 淡水与海水成分差异性

海水是非常复杂的多组分水溶液,包含溶解于水中的多种化学元素(大量/常量元素)^[14-15]。根

据已有研究^[16],海水含盐量一般在 35 g/L 左右,密度约为 1.03 g/cm³。海水中主要离子成分如表 1 所示。

表 1 海水中主要离子成分

成分	含量/(mg·L ⁻¹)	成分	含量/(mg·L ⁻¹)
Cl ⁻	18980.0	Br ⁻	65.0
Na ⁺	10560.0	Sa ²⁺	13.0
SO ₄ ²⁻	2560.0	SiO ₂	6.0
Mg ²⁺	1272.0	NO ₃ ⁻	2.5
Ca ²⁺	400.0	B	4.6
K ⁺	380.0	F ⁻	1.4
HCO ₃ ⁻	142.0		

注:海水中总含盐量约 34 400 mg/L。

相比较而言,自来水中包含的离子成分及含量较少。通过对室内自来水水质的监测,离子成分见表 2。

表 2 自来水中主要离子成分

成分	含量/(mg·L ⁻¹)	成分	含量/(mg·L ⁻¹)
Cl ⁻	13.100	Ca ²⁺	27.900
SO ₄ ²⁻	19.600	Mg ²⁺	2.590
Mn	0.002	Fe	0.011

对比表 1 和表 2 验证了海水与自来水成分存在巨大差异,海水中的可溶性盐类及各种金属离子成分含量远高于自来水。

2 工程概况

厦门地铁 2 号线海沧大道站—东渡路站区间为跨海区段(见图 1),沿海沧大道向北敷设,然后下穿海沧湾公园后入海,途经大兔屿,穿越厦门西港,在国际码头 1 号泊位上岸,到达东渡站。该区段采用两台复合式泥水盾构(管片外径为 6.7 m)进行施工,其中左线盾构隧道区间长度 2 288 m,右线盾构区间长度 2 338 m。

跨海区段内共设置 4 座联络通道,1#、2#、3#联络通道位于海底,其中 3#联络通道兼做泵房。3 条联络通道均采用洞内水平冻结法进行地层加固,暗挖法施工。考虑到隧道内空间狭小,为不影响盾构施工,1#、2#联络通道盐水管单趟铺设距离约 750 m、450 m,冻结站设置在大兔屿上;3#联络通道及泵房的冷冻站设置在右线联络通道位置,铺设距离约 100 m。考虑到 3#联络通道结构复杂、受干管铺设长度影响较小且单独使用一个冻结站,本文以 3#联络通道作为研究对象。

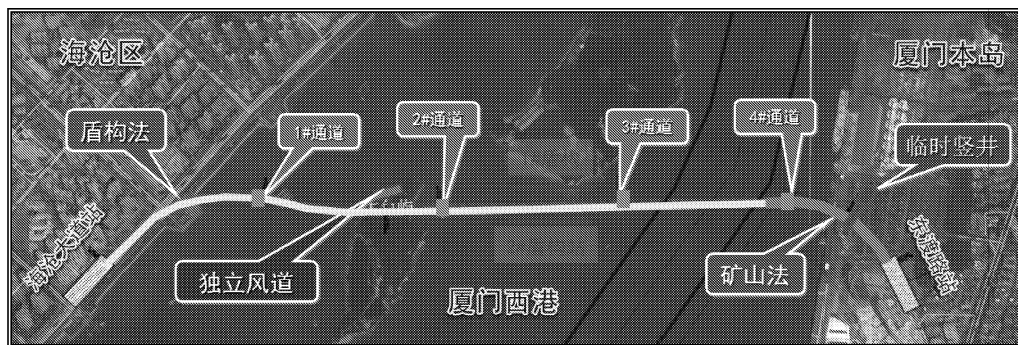


图 1 海沧大道站—东渡站区间平面示意图

3# 联络通道位于大兔屿与东渡站之间,覆土厚度为 37 m,地层自上而下主要有:4-1 淤泥、14-1-1 全风化变质砂岩、14-1-2 强风化变质砂岩、

14-1-3 碎裂状强风化变质砂岩。3# 联络通道处在碎裂状强风化变质砂岩中,地下水平均冰点温度为 -1.6℃。各地层工程地质情况见表 3。

表 3 地层情况

地层编号	地层名称	地层厚度 /m	地层描述
4-1	淤泥	11.5	该地层具天然含水量高、孔隙比大、强度低的特性,属高压缩性软弱土,工程性能不良
14-1-1	全风化变质砂岩	5.0	该层压缩性较低,天然状态下力学强度较高,具有泡水易软化、崩解使强度降低的不良特性;地下水类型为风化残积孔隙裂隙水,富水性差,渗透性弱
14-1-2	强风化变质砂岩	8.0	该层压缩性低,力学强度较高,受构造影响,风化厚度差异很大,呈波状起伏。岩石风化剧烈,为散体结构,岩芯呈坚硬土、碎屑土状,层理结构清晰,局部夹风化碎块,岩体极破碎,属极软岩。
14-1-3	碎裂状强风化变质砂岩	—	该地层受构造作用影响,岩体节理、裂隙发育,岩体极破碎,压缩性很低,力学强度较高,岩石点荷载抗压强度 10 MPa~17 MPa,属软岩,地层自稳能力较差,岩体基本质量等级 V 级;地下水类型为基岩裂隙水,中等富水,渗透等级中等

3 联络通道冻结加固设计

3.1 冻结加固技术参数

3# 联络通道里程为右线 DK20 + 314(左 DK20 + 294.639),左、右线隧道中心间距 14.05 m。冻结加固施工设计参数如下:

(1) 冻结帷幕设计厚度为 2.5 m,冻结帷幕交圈时间为 18 d~22 d,冻结壁平均温度为 -10℃,积极冻结时间 45 d~50 d。

(2) 盐水温度要求积极冻结 7 d 后降至 -18℃ 以下,积极冻结 15 d 后降到 -24℃ 以下;联络通道开挖时盐水温度降至 -28℃ 以下,且去、回路盐水温差 不大于 2℃。单孔盐水流量为 5 m³/h~7 m³/h。

(3) 冻结孔数目为 95 个,冻结孔成孔控制间距为 1.3 m,泵站处取 1.4 m,冻结孔多排布置时最大孔间距不大于 1.5 m,冻结管选用低碳钢无缝钢管。此外,设置 10 个测温孔和 4 个泄压孔用来监测冻结加固动态信息。

3.2 冻结孔及测温孔布置

3# 联络通道 95 个冻结孔(透孔 6 个)分别布置

在左、右洞两侧,其中左洞一侧布设冻结孔数目为 56 个,左洞一侧布设冻结孔数目为 37 个。冻结孔按上仰、水平、下俯三种角度布置在联络通道和泵站周边。3# 联络通道冻结孔布置立面透视图如图 2 所示,其中虚线表示测温孔,C1—C10 为布置的 10 个测温孔。冻结过程中,低温盐水经透孔进入左侧冻结循环管路,再经透孔返回冻结站。

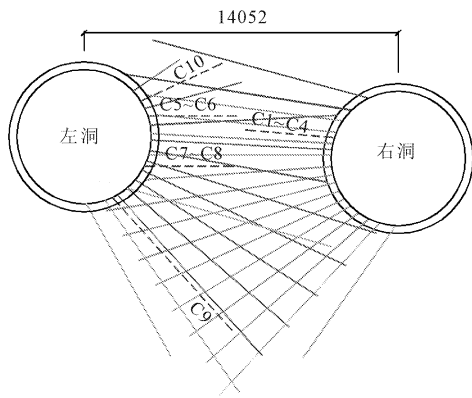


图 2 联络通道冻结孔布置立面透视图

4 冻结施工地温变化规律

4.1 循环管路盐水温度变化特征

联络通道冻结加固过程实质是利用低温盐水在冻结管道中的循环从而不断带出地层中热量。因此,循环管路中盐水温度和流量是冻结加固设计中的关键参数。根据 3 # 联络通道的地质环境特点,设计要求联络通道积极冻结 7 d 时盐水温度降至 -18°C 以下,积极冻结 15 d 时盐水温度降到 -24°C 以下,联络通道开挖时盐水温度降至 -28°C 以下,且去、回路盐水温差不大于 2°C 。

实际工程中,3 # 联络通道积极冻结历时 50 d。期间去、回路盐水因设备问题出现 3 次较大的调整过程,分别起于积极冻结第 10 天、第 19 天和第 39 天。图 3 给出了积极冻结期间去、回路盐水温度变化特征,图 4 为去、回路盐水温度差变化曲线。

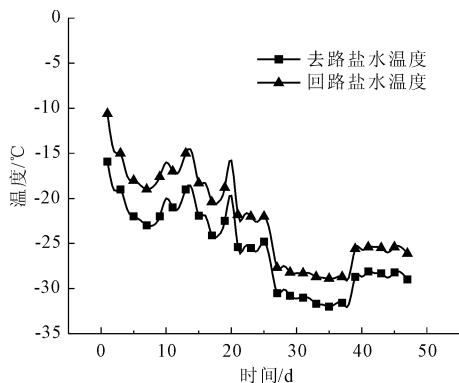
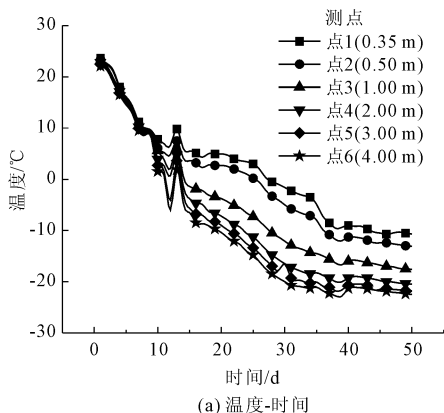


图 3 去、回路盐水温度变化曲线

由图 3 可知,积极冻结 7 d 内去盐水温度达到了 -18°C 以下。由于积极冻结第 10 d~20 d 内受设备故障影响,未满足积极冻结 15 d 时去路盐水温度降到 -24°C 以下。待设备运转正常后,自积极冻结第 20 天起,去路盐水温度保持在 -25°C 以下;自积



(a) 温度-时间

极冻结第 27 天起,去路盐水温度保持在 -28°C 以下。

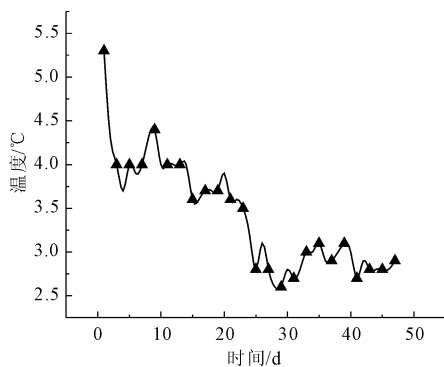


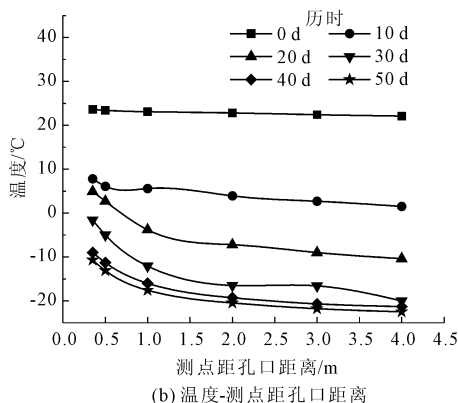
图 4 去、回路盐水温度差变化曲线

由图 4 可知,去、回路盐水温差最终稳定在 2.8°C 左右,并不满足联络通道开挖前去、回路盐水温差不大于 2°C 的要求。分析可知,较高的去、回路盐水温差产生原因主要是隧道内部温度较高,且 3 # 联络通道盐水干管单趟铺设距离较长所致。

4.2 冻结壁内、外边缘冻结发展规律

测温孔内设计不同距离测点,各测点布置规律如下:点 1 距测温孔孔口 0.35 m;点 2 距测温孔孔口 0.50 m;点 3 距测温孔孔口 1.00 m;点 4 距测温孔孔口 2.00 m;点 5 距测温孔孔口 3.00 m;点 6 距测温孔孔口 4.00 m;点 7 距测温孔孔口 5.00 m;点 8 距测温孔孔口 6.00 m;点 9 距测温孔孔口 7.00 m;点 10 距测温孔孔口 8.00 m。

选取代表性测温孔 C5、C6 内各测点温度进行冻结壁内、外边缘冻结发展规律研究。温度变化曲线见图 5、图 6。其中,(a)图表示积极冻结期间各测点温度随时间的变化曲线;(b)图描述测温孔不同测点在积极冻结第 0 天、第 10 天、第 20 天、第 30 天、第 40 天、第 50 天时的温度分布曲线。



(b) 温度-测点距孔口距离

图 5 测温孔 5 测点温度变化曲线

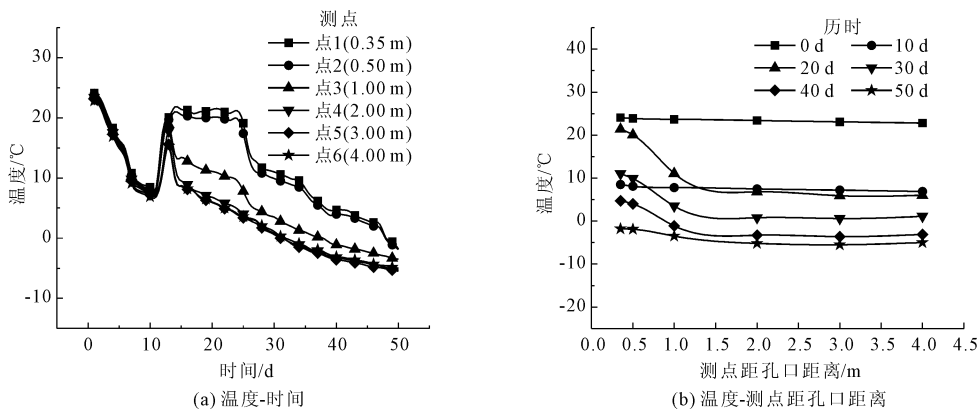


图 6 测温孔 6 各测点温度变化曲线

对比测温孔 C5 与 C6 实测数据可知:积极冻结初期各测点温度降低速率较快,且各测点温度下降速率较为接近,随着积极冻结施工,各测点温度出现较大的分化现象,具体表现为:

(1) 对于同一测温孔,靠近“喇叭口”的测点 1—测点 3 受管片处冷热交换作用影响大,点 1 温度受影响最为显著,随着测点与管片距离增大依次递减。测点 4—测点 6 的温度受管片处冷热交换作用影响小,三点处温度较为接近。据此可以判断 3 # 联络

通道“喇叭口”1 m 范围内隧道内部环境处冷热交换作用影响大。

(2) 从测温孔所处位置来看。在积极冻结过程中,外侧测温孔的温度下降速率明显低于内侧测温孔测量温度。分析认为:外侧具有持续热量补给,冷热对流交换作用对外侧冻结帷幕发展速度影响大。

4.3 冻结温度随深度变化规律

测温孔 C9 内各测点温度变化如图 7 所示。

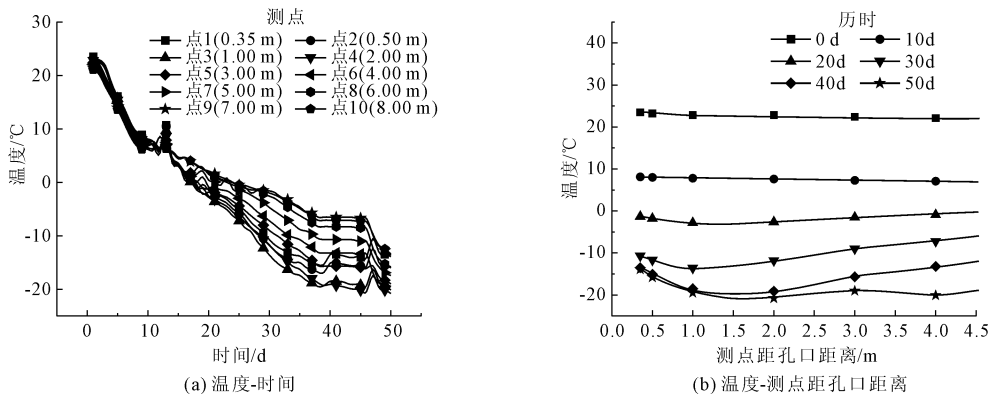


图 7 测温孔 9 各测点温度变化曲线

对比测温孔 C5 和 C9 实测数据可知:测温孔 C9 测点 1—测点 6 各点温度变化曲线表现出和测温孔 C5 测点 1—测点 6 相同的特征,而测点 7—测点 10 各点温度则有逐渐升高的趋势。根据对称性,假设联络通道另一侧设置与测温孔 C9 相对称的测温孔,则沿着两条对称测温孔各测点温度呈“W”趋势分布。考虑到测温孔 C9 位于联络通道下侧泵站位置,同时考虑冻结帷幕外侧冻结发展特点,“W”趋势的温度分布表明冻结帷幕薄弱点除分布两侧的“喇叭口”之外,在冻结帷幕泵站位置处存在冻结帷幕的薄弱点。

出如下两点控制原则:

- (1) 严格控制冻结孔钻孔偏差,安装冻结管应确保到达冻结孔底部。
- (2) 增加内、外侧测温孔孔深,特别是泵站位置处,确保可以获取冻结帷幕内外边缘温度场分布。

4.4 盐水温度回升对冻结温度场的影响分析

由于冻结过程中冻结设备出现故障,积极冻结过程中出现 3 次较大盐水温度回升的过程:

- (1) 第 1 次盐水温度回升过程。时间起于积极冻结第 10 天,持续时间共 5 d,回升前盐水日平均温度为 -22℃,回升期间盐水日平均温度为: -20℃、-21℃、-21℃、-19℃、-19℃,盐水日平均温度于

基于上述分析,为形成安全可靠的冻结帷幕,提

第 15 回下降至 -21.9°C , 此后盐水温度继续下降。

(2) 第 2 次盐水温度回升过程。时间起于积极冻结第 19 天, 持续时间共 2 d, 回升前盐水日平均温度为 -24.1°C , 回升期间盐水日平均温度为: -22.5°C 、 -19.7°C , 盐水日平均温度于第 21 回下降至 -25.4°C , 此后盐水温度继续下降。

(3) 第 3 次盐水温度回升过程。时间起于积极冻结第 39 天, 回升前盐水日平均温度为 -32°C , 回升后盐水日平均温度在 -28.5°C 附近上下波动。

分析测温孔 C5、C6、C9 受盐水温度回升影响, 可知:

(1) 冻结加固区温度场受影响程度与回升后盐水温度高低、持续时间长短以及冻结帷幕是否交圈有关系。图 6—图 8 显示, 第 1 次盐水温度回升温度较高且持续时间长, 冻结孔内各测点温度曲线具有明显表现; 第 2 次盐水温度回升后温度较低且持续时间短, 冻结孔内各测点温度曲线受其影响较小; 第 3 次盐水温度回升后温度仍在 -28°C 以下且此时冻结帷幕已交圈, 冻结孔内各测点温度曲线受其影响较小。

(2) 受盐水温度回升、隧道内部高温环境以及冻结加固区域外围热量持续补给等综合作用下, 冻结帷幕外侧“喇叭口”1.00 m 范围内受其影响最大, 冻结帷幕外侧“喇叭口”1.00 m 范围外、冻结帷幕内侧“喇叭口”1.00 m 范围内、冻结帷幕内侧“喇叭口”1.00 m 范围外受其影响依次降低。

由上述分析可知, 冻结过程中, 尤其是冻结初期, 盐水温度回升将严重影响冻结效果, 在冻结施工中应予以避免并做好预防措施。在冻结施工之前应确保冻结设备能够正常运转, 并配备备用的应急设备。在冻结施工过程中应及时发现设备异常, 及时发现问题并做到尽快恢复盐水温度的措施。

5 结 论

(1) 富集海水地层的冻结过程中, 管道中盐水温度回升会造成冻土温度的强烈反弹, 影响冻结效果。

(2) 海底联络通道冻结施工的薄弱点主要分布在与两条隧道管片相接的“喇叭口”附近; 其次是位于底部的泵站中部。

(3) 在冻结孔施工过程中, 应增加冻结孔深度, 并严格控制冻结孔位置偏差。在冻结加固过程中,

应做好隧道内管片表面的保温措施, 增大保温范围。

(4) 冻结管所形成的环外侧温度降低速度慢、受冻结中断影响大, 冻结效果差。环内侧温度降低速度快, 受冻结中断影响小, 冻结效果好。因此, 可以考虑冻结孔整体向外偏移, 以保证更多设计冻结帷幕处在该环内, 从而确保冻结帷幕质量。

参考文献:

- [1] 付 财, 韩圣铭, 韩玉福. 浅覆土条件下地铁出入口冻结法暗挖施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(7): 91-93.
- [2] 肖朝昀, 胡向东, 张庆贺. 地铁修复工程中冻结法设计[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1716-1719.
- [3] 苗立新, 齐修东, 邹 超. 冻结法在盾构接收端头土体加固中的应用[J]. 铁道工程学报, 2011(9): 105-109.
- [4] 雷 军, 白明洲, 许兆义, 等. 地铁隧道施工期冻结法穿越断层破碎带施工效果现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1492-1498.
- [5] 王 晖, 竺维彬, 李大勇. 富水砂层中联络通道施工工法及其控制措施[J]. 铁道工程学报, 2010(9): 82-87.
- [6] 黄奇兵, 张 坚, 曹宁全, 等. 西安地铁联络通道冻结法施工工艺及数值分析[J]. 南昌工程学院学报, 2018, 37(3): 19-23.
- [7] 孙成伟, 仇佩云. 广州地铁隧道联络通道冻结法施工技术研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3): 6-8.
- [8] 邵国鑫. 宁波软土地铁盾构隧道联络通道的冻结法设计与施工[J]. 工业建筑, 2013, 43(11): 147-152.
- [9] 杨太华. 越江隧道工程联络通道冻结法施工风险分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1201-1206.
- [10] 李开文, 毛 勇, 孙 闯, 等. 越江隧道联络通道冻结法施工力学模拟分析[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(7): 57-61.
- [11] 王彦洋, 唐华瑞, 李顺群, 等. 考虑温度梯度变化的地铁联络通道冻结施工三维数值模拟[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(6): 135-140.
- [12] 李大勇, 陈福全, 张庆贺. 地铁联络通道冻结施工的三维数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(S1): 472-474.
- [13] 徐黎明, 陈晓坚, 彭正勇, 等. 海底隧道联络通道冻结法施工健康监测技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(2): 295-299.
- [14] 谷佳瑞, 王仲刚. 海水集料混凝土的研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(4): 58-61, 106.
- [15] 刘旭辉, 陈小明, 黄海杨, 等. 海洋环境中活塞杆两种喷涂防腐技术测试报告分析和工程应用初探[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 108-112, 118.
- [16] 胡建平, 董教社, 冯蓓蕾. 聚合物海水水泥浆的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(12): 29-31.