

拱北隧道管幕冻结法关键技术研究

王启铜

(广东省南粤交通投资建设有限公司, 广东 广州 510623)

摘要: 拱北隧道是港珠澳大桥的关键控制性工程, 是业内首座双层暗挖施工隧道。隧道施工采用顶管管幕超前支护+水平冻结止水帷幕的组合围护结构, 由 255 m 超长曲线顶管管幕形成超前支护体系, 应用水平冻结法对管幕之间的土体进行冻结, 形成致密止水帷幕后, 在顶管管幕+冻结止水帷幕的超强支护下实施大断面暗挖施工。本文主要介绍了港珠澳大桥拱北隧道长距离水平控制性冻结的施工工法及关键技术。

关键词: 港珠澳大桥; 拱北隧道; 管幕法; 冻结法

中图分类号: TU744

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)01-0017-09

作者简介: 王启铜 (1963 -), 江西省永修县人。工学博士, 高级工程师, 长期从事软土地基施工和建设工程管理工作。E-mail: wangqt@vip.163.com。

Pipe roof-freezing method of Gongbei Tunnel

WANG Qi-tong

(Guangdong Nanyue Transportation Investment and Construction Co., Ltd. Guangzhou 510623, China)

Abstract: Gongbei Tunnel is the key controlling part of Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge (HZMB) project and it is the first double-deck underground excavation tunnel in the highway industry. A combined retaining structure with advance support by pipe-roofing curtain and horizontal freezing water-stop curtain was adopted for tunnel construction. The advance support system was formed by 255 m super-long curved pipe jacking curtain. The soil between the pipes was frozen by horizontal freezing method so as to form a dense water-stop curtain. Afterwards, large cross-section underground excavation was carried out under this super-strong water-tightness retaining structure. This paper introduces the construction methods and key technology of long-distance horizontal controlled freezing of Gongbei Tunnel of HZMB.

Key words: HongKong-Zhuhai-Macau Bridge (HZMB); Gongbei Tunnel; pipe-roof method; freezing method

0 引言

拱北隧道是港珠澳大桥的关键控制性工程。其建设环境复杂, 下穿珠海拱北口岸与澳门关闸

口岸之间的狭长区域以及军事管制区等敏感地带, 见图 1。跨度大、埋深浅, 水文地质条件复杂, 地面建筑多, 地下桩基密集, 管网错综复杂。

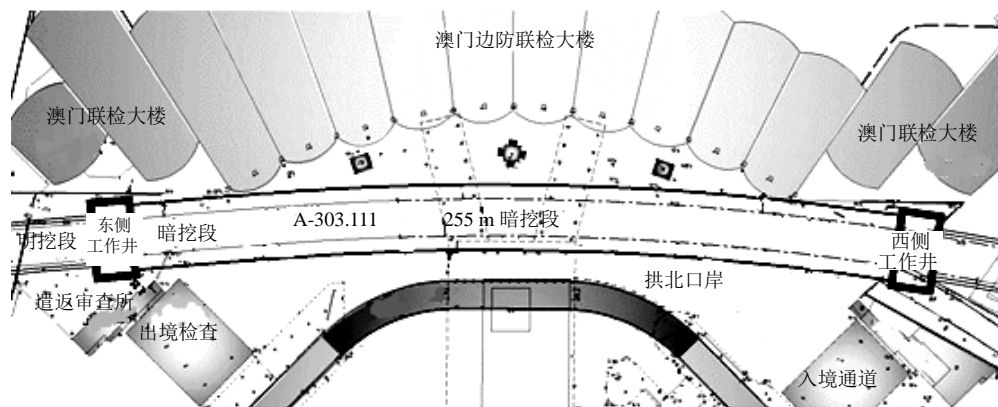


图 1 拱北隧道口岸暗挖段平面图

Figure 1 Plane map of underground excavation section at Gongbei tunnel port

因建设条件限制,隧道下穿拱北口岸的暗挖段设计为上下叠层的双层结构,隧道施工采用顶管管幕超前支护+水平冻结止水帷幕的组合围护结构,由255 m超长曲线顶管管幕形成超前支护体系,应用水平冻结法对管幕之间的土体进行冻结,形成致密止水帷幕后,在顶管管幕+冻结止水帷幕的超强支护下实施大断面暗挖施工。

1 管幕冻结法基本原理

1.1 拱北隧道暗挖段设计方案

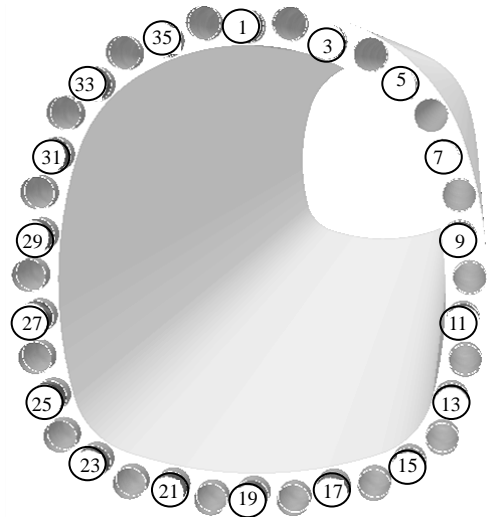
拱北隧道口岸暗挖段设计为上下叠层的双层卵形结构,采用曲线管幕+水平冻结法施工。施工方案确定如下:

(1) 由东、西侧工作井采用顶管施工形式分别顶进36根 $\Phi 1620$ mm管径的空心钢管,形成超大断面钢管管幕(图2(a))。255 m长曲线管幕一次性顶进,顶管施工东、西侧工作井互为始发、接收;

(2) 奇、偶数号顶管采用错开布置,奇数号顶管向隧道内偏移30 cm,管间净距约35 cm(图2(a));

(3) 暗挖段开挖方案为5台阶14部,台阶平均高度约3.8 m左右(图2(a));

(4) 冻结帷幕横断面划分为5个分区,冻土帷幕厚度2.0~2.5 m(图2(b))。



(b) 顶管间土体采用冻结法

图2 管幕设计方案

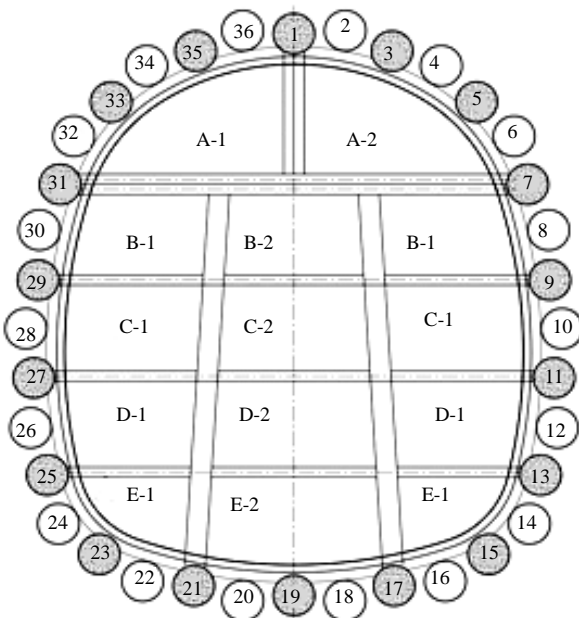
Figure 2 Design scheme of pipe curtain

2 管幕冻结法原理

拱北隧道下穿口岸控制区、边境管理区、军事禁区等特别敏感区域,隧道施工过程中,必须确保万无一失。该隧道施工的难点和要点主要有三点:首先,必须按规定的轨迹精确完成36根大直径钢管的长距离曲线顶管施工,形成超大断面钢管管幕支护结构;接着,采用水平冻结法对顶管间土体进行强制冷冻,形成致密的冻结止水帷幕;最后,在顶管管幕+冻结止水帷幕的超强组合支护下实施大断面暗挖施工。这三个分部工程一环紧扣一环,任何一部失败,将前功尽弃。

其中,隧道的冷冻施工尤为关键。由于地质复杂,隧道所处地层为强透水地层,地下水与海水连通。一旦止水帷幕失效、击穿,帷幕外地下水将携带泥沙大量涌入隧道内。在水流冲刷下,砂性地层冻土将快速融化,漏水通道将加速扩大,极端情况下将导致口岸地面垮塌,进而中断口岸通关正常运行。此外,由于隧道断面超大,抢险条件差,一旦出现涌水险情,难以及时采取有效的抢险措施。因此,必须将顶管间的土体全部冻结形成致密冻土帷幕,方可满足隧道开挖要求,且冻土帷幕需保证一定厚度以防止开挖过程中击穿。

另一方面,隧道穿越环境敏感地带,埋深较浅,覆盖层较薄,对控制冻土冻胀的影响要求较高,冻土帷幕的厚度又不宜过大。因此,冻土帷幕厚度既不能过小,也不宜过大,必须控制在合理的范围内。



(a) 顶管错开布置

根据上述施工要求,管幕冷冻设计方案如下。

2.1 冻结管路布置

为动态控制冻土帷幕的体积(厚度),管幕横断面上,采用圆形冻结管+异形冻结管+加热限位管的组合布管方式,实施分区分段控制冻结(图3)。奇数号顶管(填充混凝土的实心管)内两腰部分布两根 Φ133 圆形冻结管作为开挖前的主要冷源,在靠近顶管外边缘的位置布设加热管来约束冻土帷幕过快发展;偶数号顶管(空心管)内对应实心管内圆形冻结管的位置布设异形冻结管(用 125 角钢焊接在管壁上),在土体开挖后进行冻结,以抑制开挖过程中空气对流对冻土的削弱作用。

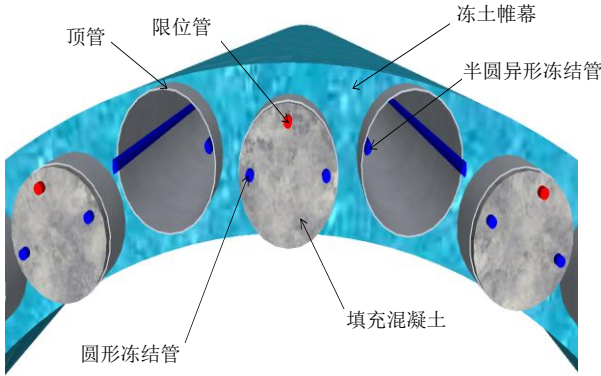


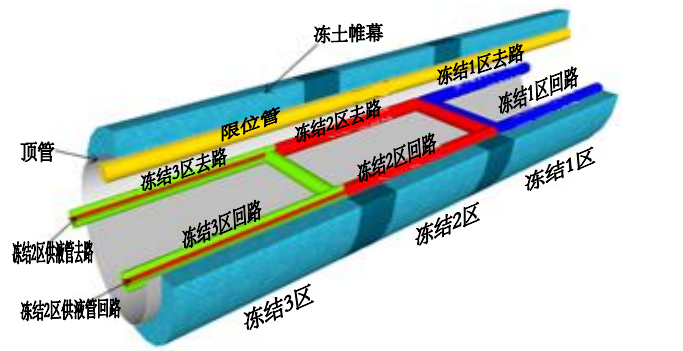
图 3 冻结管路横断面布置图

Figure 3 Cross section layout of freezing pipeline

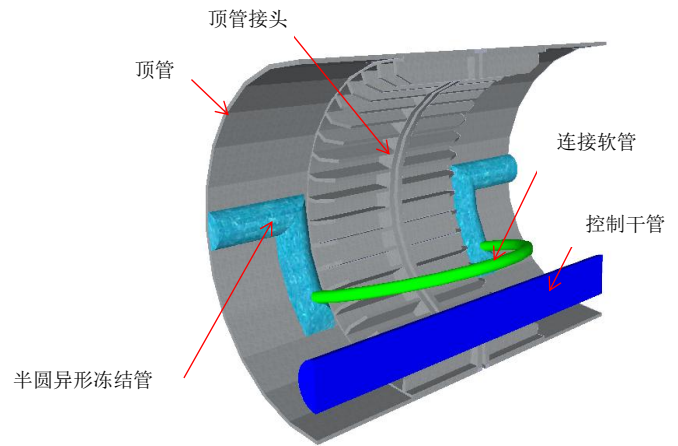
管幕纵向方向,奇数号顶管内,通过冻结管内设置供液管,两根冻结管形成 3 个独立的冻结回路,如图 4 (a) 所示。回路 1 长度约为 63 m,回路 2 长度为 128 m,回路 3 长度为 64 m;偶数号顶管内,由干管和 16 个独立的回路通过电控三通球阀分别控制 16 个冻结区域(每 4 节顶管内的异型冻结管通过高压橡胶管连成一组),如图 4 (b)。

2.2 冻结分区

结合洞内暗挖方案,在环向和纵向分别分段分区进行冻结施工。在横断面上将冻土帷幕分为 A 区(上导洞部分),B1, B2, B3 区(开挖 2~4 台阶),C 区(隧道底部仰拱部分) 5 个区域(图 5)。纵向上分为 1, 2, 3 三个区域其中冻结 1, 3 区长度约为 84 m,冻结 2 区长度约为 88 m。而根据管路设置回路 1 长度约为 63,回路 2 长度为 128,回路 3 长度为 64,这样实际操作时冻结 1, 3 区和冻结 2 区可以保证 20 m 的搭接长度。



(a) 奇数号顶管内冻结管路示意图



(b) 偶数号顶管内冻结管路示意图

图 4 冻结管路纵向布置示意图

Figure 4 Drawing of longitudinal layout of freezing pipeline

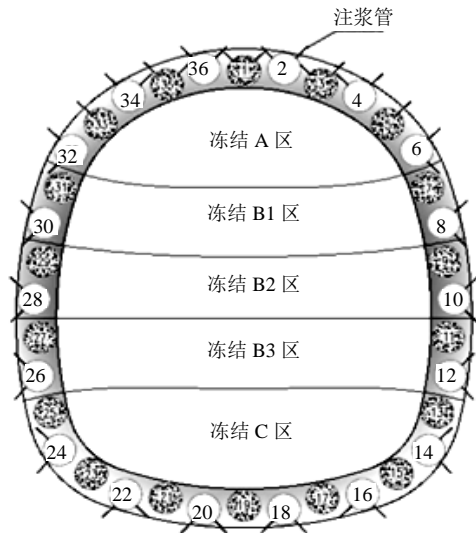


图 5 冻结横断面设计图

Figure 5 Frozen cross section design drawings

3 管幕冻结法关键技术研究

管幕冻结法在国内外尚无工程先例。考虑到本项目的极端重要性,在施工方案初步确定后,为确保万无一失,必须对冻结施工方案开展专题

研究。通过对管幕冻结的关键技术加以研究，进一步验证其冻结效果，确定施工方案的可靠性。

本项目管幕冻结关键技术研究主要解决以下四方面的问题：

(1)能否形成有效的冻土帷幕以保证封水的有效性，并预估冻土帷幕达到不同设计厚度所需的冻结工期；

(2)考虑开挖后，是否会由于热扰动较大而导致冻土帷幕的融化进而影响冻结帷幕的封水能力；

(3)考虑开挖前及开挖后冻土帷幕的发展情况，为研究施工中及施工后可能出现的冻胀、融沉现象及应对措施提供参考依据；

(4)研究以限制冻土体积为手段的冻胀、融沉控制方法，并确定相关参数，例如冻土限位管法、盐水温度/流量控制法、间歇冻结法等。

3.1 管幕冻结法冻结试验方案

(1) 冻结模式

管幕冻结法设计方案初步确定后，通过数值计算及室外模型试验，对管幕冻结法的设计理念及其封水的可靠性进行了大量研究。为进一步验证冻结效果，探索冻结控制方法，本项目利用现场的工程管（5号管）和试验专用管（0号管）进行了现场原位冷冻试验（图6）。该试验主要从冻结方案和冻结控制方法两个方面展开，通过尝试多种冻结模式，进一步优化冻结方案与工艺。

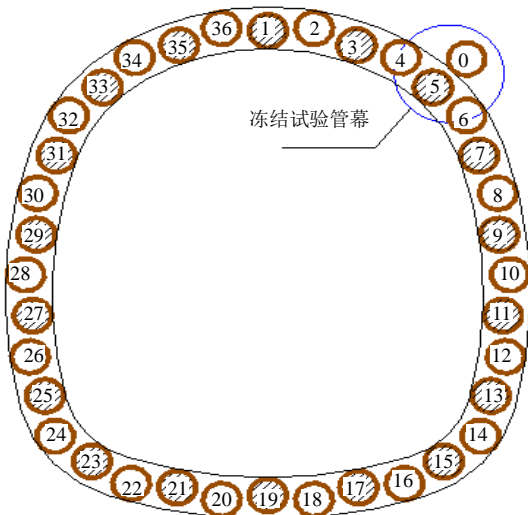


图6 管幕横截面布置图
Figure 6 Pipe curtain cross section layout

根据管幕冻结法冻结方案及现场实际情况，对5号实管以及0号空管进行如下布置：5号管内铺设圆形冻结管以及限位管，并采用微膨胀混凝土填充；0号管里面则布置异形加强冻结管（见

图7）。

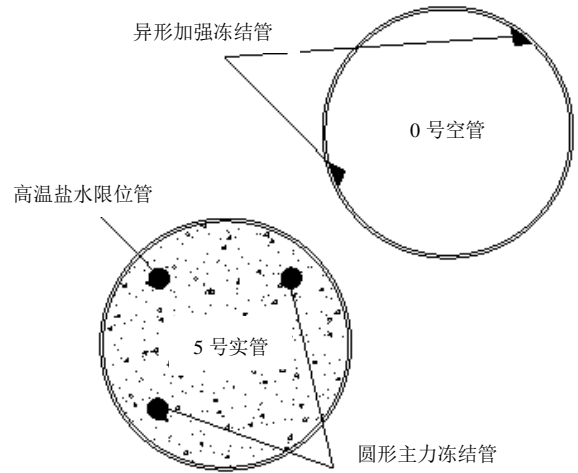


图7 试验管幕内冻结管布置图

Figure 7 Layout of freezing pipe in test tube curtain

本项目冷冻施工分为积极冻结、维护冻结期控制冻结、解冻等三个阶段。

a) 积极冻结阶段

开挖施工前的冻结阶段为积极冻结阶段，此时主要为冻土非限位冻结模式，即快速、有序地形成冻土帷幕。此期间主要利用圆形主力冻结管和异形加强冻结管来加速形成冻土帷幕。结合管幕中各类冻结管的布置情况，分别对实管单独冻结模式、实管与空管协同冻结模式、实管为主与空管为辅的冻结模式以及空管单独冻结模式进行研究。

实管单独冻结模式即仅开启实顶管内圆形主力冻结管进行冻结，用来验证圆形主力冻结管单独工作情况下的冻结效果；实管与空管协同冻结模式则是利用圆形主力冻结管以及异形加强管同时开启来达到冻结强度最大的冻结模式，从而保证冻土帷幕在最短时间内迅速形成；而实管为主、空管为辅的冻结模式则是在圆形主力冻结管单独冻结模式下，适时开启加强管来提高冻结强度，这种实管为主、空管为辅的冻结模式作为一种优化的冻结模式，其冻结效果以及时间控制也值得试验探索；空管单独冻结模式则用来考察仅仅开启空顶管内的异形加强管时的冻结效果。

b) 维护冻结期控制冻结

积极冻结施工完成后，进入边维持冻结边开挖的维护冻结期控制冻结阶段。此时，既要有效保持冻土帷幕厚度，确保安全开挖，又要防止冻土帷幕无序发展，导致冻胀效应过大，即要做到“抗弱化、控冻胀”。“控冻胀”的手段主要有热控限位和冷控限位两种控制方法。

冻土热控限位模式，即采用实顶管内“限位管”循环温度较冻土帷幕高的高温盐水，带走冻

土冷量的方式,以控制隧道外侧冻土帷幕的无序发展;冻土冷控限位模式则是通过升高冻结系统内冻结盐水温度或者对圆形主力冻结管进行开关控制,实现间歇冻结,来减小冷源提供的冷量,从而达到控制冻土帷幕厚度的效果。

c) 解冻施工阶段

隧道开挖施工完成后,进入解冻施工阶段。此时需要平稳、有序地升高循环盐水温度,逐步解冻帷幕,直至恢复至常温状态。

综上所述,本项目冷冻原位试验分为三大类模式:冻土非限位冻结模式、冻土热控限位模式以及冻土冷控限位模式。

在这三大类冻结模式的基础上,结合土体注浆改良以及空管内安装保温板与否的影响,冻结方式可分为表 1 所示的 14 种模式。

(2) 温度监测方案

温度是反映冻土帷幕情况以及冻结效果的主要参量。试验中主要对盐水温度(实管内圆形冻结管盐水去回路温度、限位管盐水去回路温度、加强管各独立回路的去回路温度)、管幕温度(实管、空管的内管壁温度、实管内混凝土和空管内空气温度分布)以及土体温度(管幕外侧土体温度)进行监测记录。

试验采用“一线总线”测温系统。盐水温度主要通过冷冻站盐水干管去回路、限位管盐水去回路、加强管各独立回路布置温度测点,采用盐水测温传感器监测盐水温度;管幕温度以及土体温度则需要在每节管段中部布设测温电缆,共计 15 个断面。每个断面的测温点布置如图 8 所示。以

“C1-N-3”说明图 8 中测点编号含义:“C1”表示电缆编号、“N”表示管节编号、“3”表示相应电缆的测温点编号。

3.2 冻土帷幕性状及控制方法

(1) 试验结果分析

对管幕冻结法的 14 种冻结模式以及 6 种解冻模式进行了现场原位试验。试验运行历时 5 个月,得到了大量数据。试验证实,可完美地达到“冻起来、抗弱化、控冻胀”的目的。

a) 冻起来

管幕间冻土是止水帷幕封水的关键部位,所以该区域测点温度变化直接反映了管幕之间“冻起来”的效果。图 9 为三种不同冻结模式下积极冻结阶段管间测点 C2-N-16 的温度变化曲线。

在实管与空管协同冻结的冻结模式下,管间土体可在短时间内迅速降温,10 天左右管幕间便有冻土出现,20 天左右便能实现交圈,形成封闭的止水帷幕;在积极冻结 60 天完成时,冻土帷幕发展成管间凸起的鼓包状,如图 10 (a)。这主要是由于圆形主力冻结管与异形加强冻结管共同工作下,两管间区域冻结强度较大所致。这种迅速形成的冻土帷幕提高了顶管之间止水的安全性。

相比于实管与空管协同工作的冻结模式,冻结强度较低的实管单独冻结模式下的冻土形成就相对较慢。30 天左右管间测点才达到冰点(图 9),而两管间冻土则需要积极冻结 45~50 天才能实现交圈,形成封水路径。

表 1 冻结试验各类冻结模式

Table 1 Various freezing modes in freezing test

冻结模式	编号	冻结模式名称	
模式 A 冻土热控限位	A1	实顶管与空顶管协同冻结-限位管限位模式	
	A2	实顶管为主空顶管为辅冻结-限位管限位模式	
	A3	实顶管单独冻结-限位管限定模式	
	B1	实顶管单独冻结模式	
	B2	实顶管与空顶管协同冻结模式	
	模式 B 冻土非限位	B3	实顶管与空顶管协同冻结(加强管保温)模式
B4		实顶管与空顶管协同冻结(注浆改良)模式	
B5		实顶管为主空顶管为辅冻结(加强管保温)模式	
B6		实顶管为主空顶管为辅冻结(注浆改良)模式	
模式 C 冻土冷控限位		C1	实顶管与空顶管协同冻结-冻结管冷控限位(注浆改良、空顶管全保温)模式
		C2	实顶管与空顶管协同冻结-冻结管冷控限位模式
	C3	实顶管与空顶管协同冻结-冻结管冷控限位(空顶管全保温)模式	
	C4	实顶管与空顶管协同冻结-冻结管与加强管冷控限位模式	
	C5	空顶管单独冻结模式	

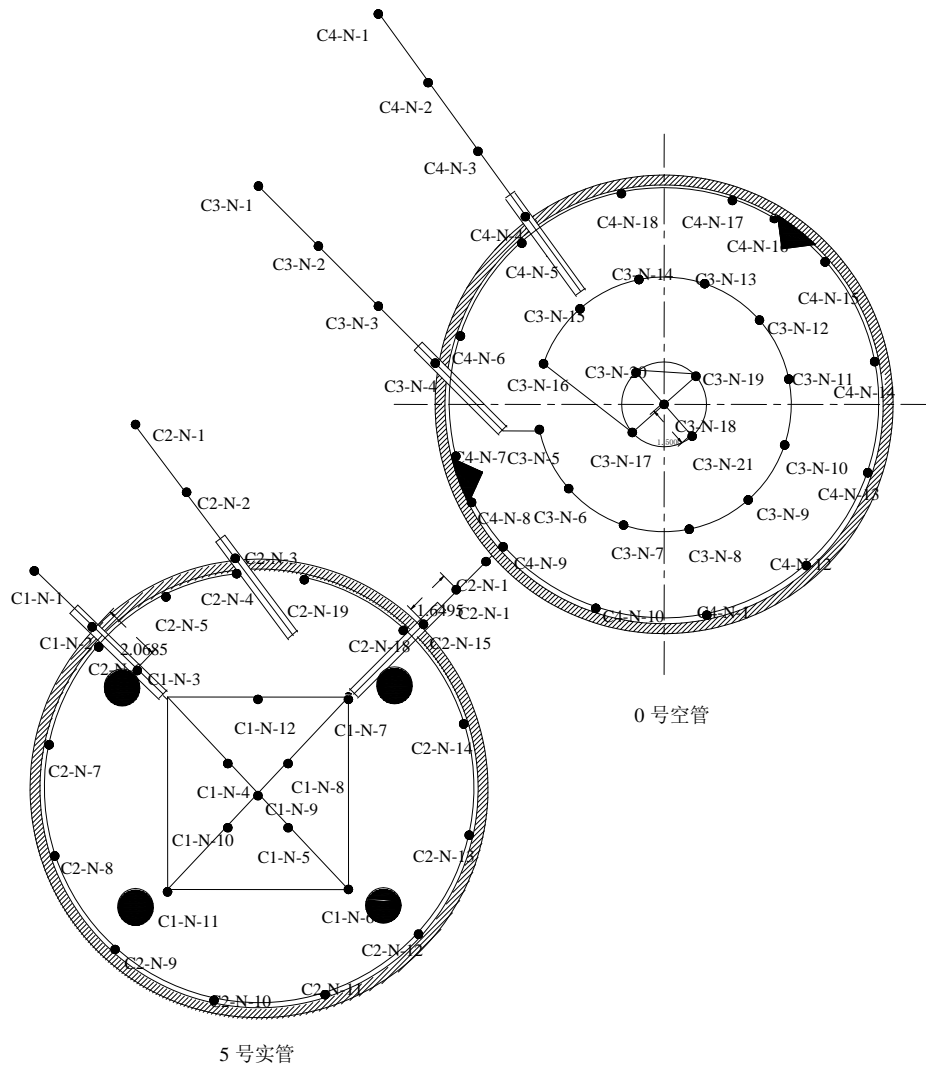


图8 测点断面布置示意图

Figure 8 Diagram of section layout of measuring points

同时，由图 10 (b) 的温度云图可见，积极冻结 60 天后，空管内空气以及空管上部土体降温效果仍然较差，且仅有靠近管间冻土附近区域温度降至冰点以下，而在空顶管上部区域并未形成冻土。通过对比可知，空管内异形加强管对冻结帷幕形成具有极端重要性。异形加强管不但加强了管幕之间的冻结强度，同时也保证了空管上方冻土帷幕形成。

试验中还对比异形加强管滞后开启的实管为主、空管为辅的冻结模式进行了现场试验。图 9 中为异形加强管滞后 39 天开启试验的管间土体温度变化曲线。开启异形加强管后，管间土体降温速率有了明显提升，且在积极冻结结束时，该区域温度与实管与空管协同工作的冻结模式下的温度相当；积极冻结 60 天后温度云图的对比也说明该加强管滞后开启的模式同样能达到与实管和空管协同工作的冻结模式相当的冻结效果(图 10(c))。由此可知，采用实管为主、空管为辅的冻结模式

不但能够保证冻土帷幕的安全性，同时也能实现分段冻结，降低施工成本。

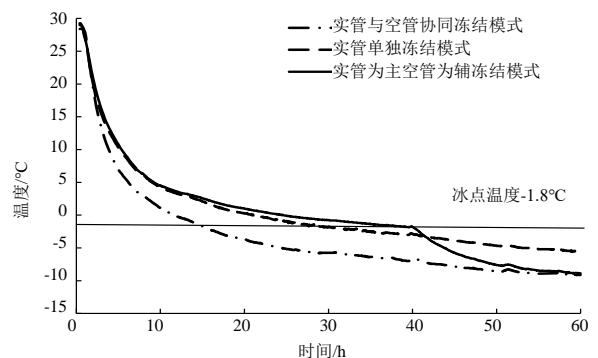
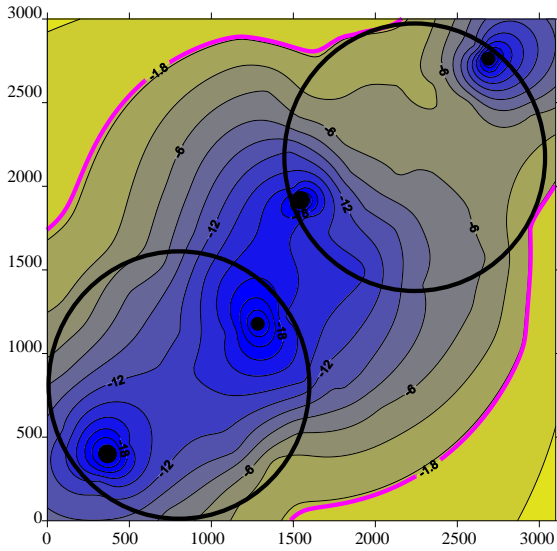
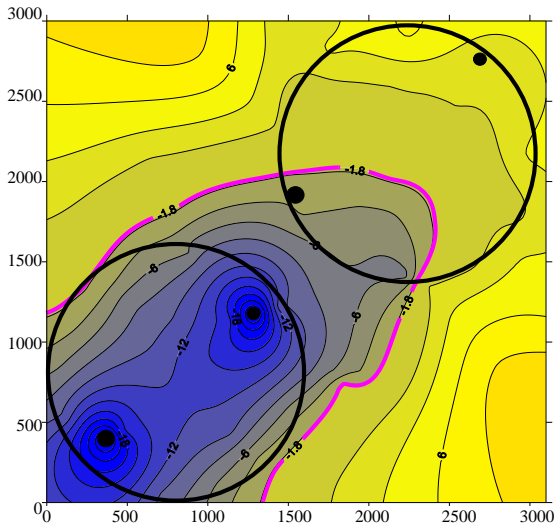


图9 管间土体温度变化 (C2-N-16)

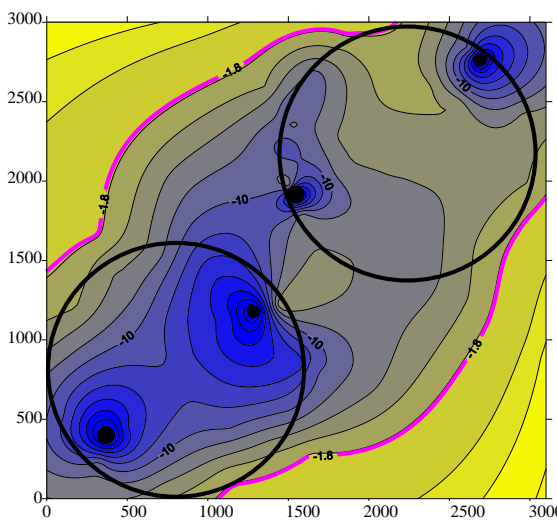
Figure 9 Temperature change of intertubular soil (C2-N-16)



(a) 实管与空管协同冻结模式



(b) 实管单独冻结模式



(c) 实管为主与空管为辅冻结模式

图 10 积极冻结 60 天后温度场云图

Figure 10 Cloud map of temperature field after 60 days of active freezing

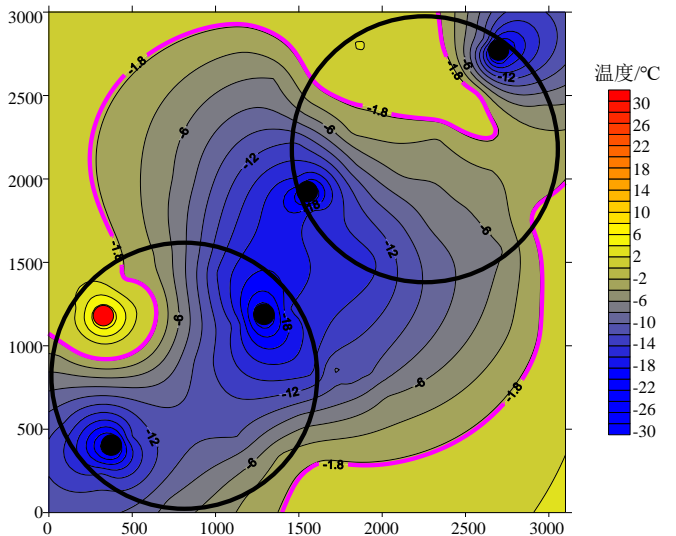
b) 控冻涨

实管与空管协同工作的冻结模式下冻土厚度将不断扩张, 需要采取控制冻结、限制冻土无序发展的方式来实现“控冻涨”的效果。试验针对热控限位和冷控限位两种控制方案进行了对比研究。热控限位是通过在限位管内循环“高温”(-2°C~8°C) 盐水向冻结区提供热源来吸收冷量以实现限位控制。该方案热源区域性集中的特点也使得该方案的控制效果在限位管局部更为明显。

图 11(a)为限位管开启后 20 天时温度云图, 与未开限位管的图 10 (a) 相比, 仅有限位管区域温度场受到明显控制, 而其他距限位管较远区域的冻土则未发生明显变化。这说明了热控效果不但具有局部性的特点, 同时该限位方案对其他部位温度场的影响较小。所以, 热控限位对于控制实管外侧局部冻土发展较快的情况效果较好。

冷控限位则是通过调整冻结盐水温度实现。通过将冻结盐水温度依次升高至 -25°C、-22°C 后的管幕冻结温度场变化, 以及冻结盐水温度恢复至 -30~-28°C 后管幕冻结温度场的恢复情况, 来考察冷控限位的效果。由于调整了整个冻结循环的冷量供给, 这种控制方案可以对整个冻结区域的冻结效果进行控制。通过图 11(b)与图 10(a) 对比可以证实这一结论。

图 11 (b) 中温度场的温度梯度较控制前期也发生了较大变化。由此可知, 冷控限位不但能够实现冻土帷幕厚度的控制, 同时也能达到调整整个温度场温度梯度的效果。因而, 当管幕冻结施工过程中冻土帷幕较厚或冻土帷幕边界发展较快时, 建议采用冷控限位的方法进行整体限位控制。



(a) 热控限位模式 (热控 20 天)

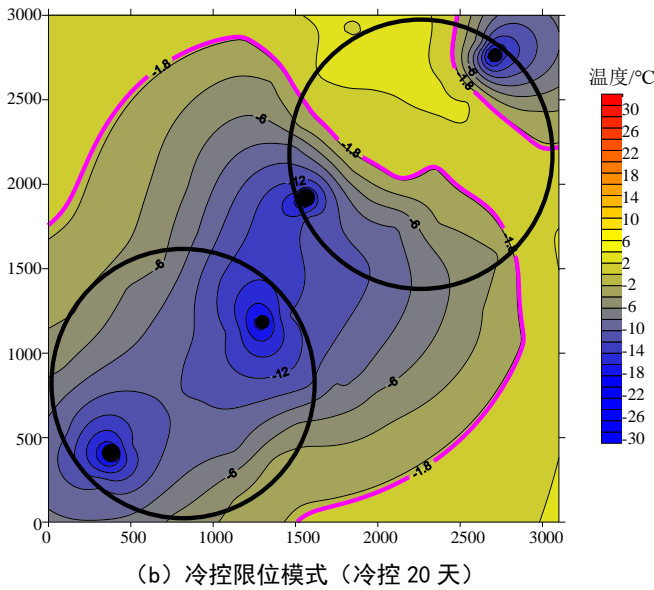


图 11 限位控制效果

Figure 11 Limit control effect

(2) 冻土帷幕动态控制的规律

根据上述测点温度-时间曲线、冻土帷幕厚度变化情况、管幕及周围土体温度云图等进行分析,可以得到以下冻土帷幕动态控制的规律:

a) 在实顶管与空顶管协同冻结模式下,可快速形成冻土帷幕,提高了管幕之间的止水可靠性,实现了“冻起来”的目的;

b) 实顶管单独冻结模式下,由于没有异形加强管的冷量补充,冻结效果差,难以形成有效的冻土帷幕;

c) 实管为主、空管为辅的冻结模式不但能够保证冻土帷幕的安全性,同时也能实现分段冻结,降低施工成本。建议施工中采用该冻结模式进行积极冻结阶段的分段冻结施工;

d) 热控限位影响范围较小,仅局限于实顶管附近,适用于控制实顶管外侧局部发展较厚的冻土。当管幕冻结施工过程中实顶管外侧冻土发展较快时,可采用该限位方法进行局部位控制。

e) 冻土冷控限位属于整体限位控制,其对整个管幕及周围土体温度场均有不同程度影响。离圆形主力冻结管和异形加强冻结管越近,即离冷源越近,冻结盐水温度的变化对其影响越大。因此,当管幕冻结施工过程中冻土帷幕较厚,冻土

帷幕边界发展较快时,可采用冻土冷控限位方法进行整体限位控制,采用这种方法时冻结效果越好的区域温升越明显,但是对封水性没有影响。冷控限位模式可以较好地起到对整个帷幕“控冻涨”的效果。

(3) 冻土帷幕解冻规律

在衬砌完成后的解冻阶段,若不及时采取注浆等措施,地表将相应地发生融沉现象。试验中对自然解冻与强制解冻相结合、仅自然解冻两种解冻模式进行了对比研究,以考察其解冻效果,从而为选择融沉控制方法提供依据。

通过试验发现:

a) 当空顶管的保温措施及防通风措施解除后,空顶管内部温度会迅速升高,两种解冻方式都一样。

b) 自然解冻温度升高主要集中在前 4 天,空顶管上方和实顶管上方的温度均在冰点附近 ($-1.8\sim 0^{\circ}\text{C}$),表明前期自然解冻效果显著。当冻土温度升高接近冰点 ($-1.8\sim 0^{\circ}\text{C}$) 后,自然解冻温升速率明显减缓,主要是相变潜热较大。

c) 强制解冻时,实顶管上方和空顶管上方冻土融化是由内而外发展。自然解冻时,空顶管上方冻土融化也是由内而外发展。

d) 对于实顶管外围的冻土,强制解冻的速率明显优于自然解冻的速率。但是对于空顶管外围的冻土,当空顶管内防通风措施解除后,空顶管内部温度会迅速升高,两者的在解冻速率上没有明显区别。

图 12 所示为拱北隧道口岸暗挖段施工期地表沉降监测情况。从图中可见,从冷冻施工开始,由于冻胀的影响,口岸地表有明显的隆起现象,但通过控冻胀等措施后,隆起发展较为平稳。冷冻施工结束后,随着隧道冻土帷幕逐渐解冻,辅以同步注浆施工,地表也相应地稳定下来。项目 2017 年年底完成交工验收后,口岸地表沉降不再发展。

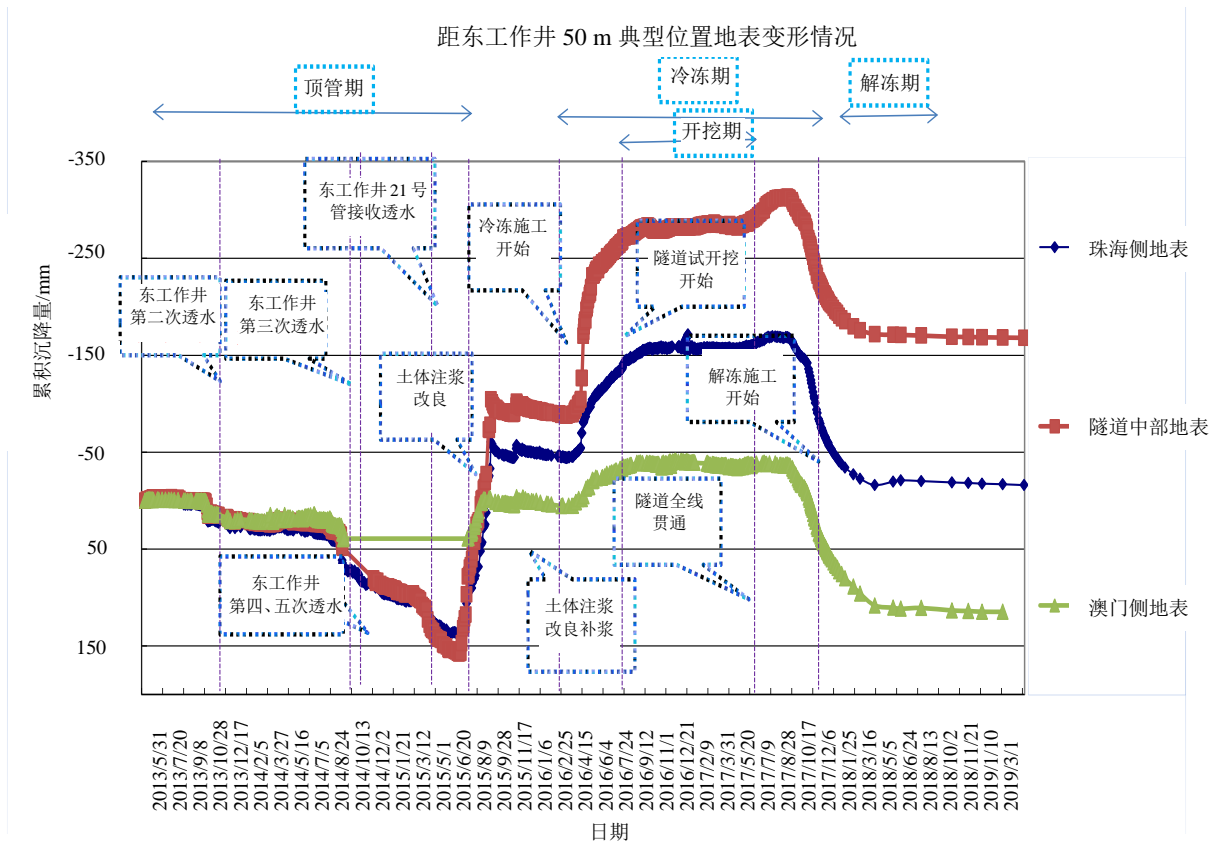


图 12 拱北隧道口岸暗挖段地表沉降监测情况

Figure 12 Monitoring of Surface Settlement in Underground Excavation Section of Gongbei Tunnel Port

4 结 语

历时 5 年多，历经超长距离曲线顶管管幕施工、超大断面水平控制性冻结施工和超大断面软土隧道开挖施工等阶段，拱北隧道顺利完成了全部施工任务。

顶管管幕+冻结法施工无需大范围开挖，不影响城市道路正常运行，无需进行管线改移（地表或地下各种管线），亦无需加固房屋地基或桩基。施工过程中无噪声、无振动、无泥浆污染，对周围地质环境和社会环境影响较小，可全天候连续

作业。可靠性高，方便监测，极大地降低了施工风险，为复杂建设条件下隧道暗挖施工开创了一种全新的方法，具有较大的社会效益和环境效益。

参考文献

- [1] 中国科学院武汉岩土研究所. 拱北隧道冻土物理力学性能试验研究报告[R]. 2014.
- [2] 同济大学. 拱北隧道管幕冻结法施工冻胀变形初步研究报告[R]. 2014.
- [3] 陈湘生. 地层冻结法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.