

非对称异性隧道联络通道冷冻法施工技术

Freezing Aonstruction Technology of Asymmetric Heterologous Tunnel Contact Passage

高民富

(郑州地铁集团有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 非对称异性隧道联络通道掘进时极易发生变形风险, 因此对非对称异性隧道联络通道采取冷冻法加固施工技术。利用 ANSYS 软件, 构建非对称异性隧道联络通道及其地层情况的三维模型, 模拟不同冷冻天数、冷冻壁厚度、冷冻壁工况以及冷冻温度下, 联络通道的变形规律与稳定情况, 并优化施工方案。结果表明: 经冷冻法处理后的土体表现出良好的冻结效果, 土体强度较高, 掘进时土体不易塌陷; 冷冻天数越长, 位移变化量越小; 土体冷冻壁较厚且全冷冻壁工况能够获得更加良好的加固效果; 冷冻温度越低, 联络通道越稳定。

关键词: 非对称; 异性隧道; 联络通道; 冷冻法施工; ANSYS 有限元; 应力变化

中图分类号: TU472.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0157-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.030

GAO Minfu

(Zhengzhou Metro Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The risk of deformation is very easy to occur in the tunnel tunnel, so the freezing method is adopted to strengthen the tunnel tunnel. ANSYS software is used to build a three-dimensional model of the asymmetric tunnel contact channel and its formation conditions, simulate the deformation rule and stability of the contact channel under different freezing days, freezing wall thickness, freezing wall condition and freezing temperature, and optimize the construction scheme. The results show that the soil treated by the freezing method has a good freezing effect, the soil strength is high, and the soil is not easy to collapse during excavation. The longer the freezing days, the smaller the displacement change; better reinforcement effect can be obtained under the condition of thicker frozen wall and full frozen wall; the lower the freezing temperature is, the more stable the communication channel is.

Keywords: asymmetry; opposite sex tunnel; contact channel; freezing method construction; ANSYS finite element; stress changes

0 引言

伴随着城市化速度加快, 交通压力越来越大, 城市规划过程中, 为了缓解交通压力, 大量城市将

交通网络转移到地下, 修建安全性更高、便捷性更强、准时率更高的绿色轨道交通线路^[1]。这类地下轨道交通修建工程最为关键也最为困难的部分便是隧道开挖^[2-4]。考虑到地面建筑及周边环境的影响, 隧道开挖通常采用暗挖法施工, 但是伴随施工开展, 隧道施工的风险也不断上升^[5]。不同地质环境工程开挖难度也不同, 暗挖施工时需要考虑地下土体的结构与组成成分, 开挖过程极易导致土体失稳、结构破坏的情况, 所以需要使用加固土体的技术, 避免开挖过程中出现破坏隧道衬砌结构的情况^[6-8]。联

作者简介: 高民富 (1972—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 城市轨道交通施工和运营安全等。

收稿日期: 2022-10-08

研究与应用

络通道是隧道结构中关键组成部分,如果加固土体结构没有达到理想状态,将会导致开挖联络通道面出现严重失稳的情况,破坏隧道衬砌结构;如果隧道处于较为复杂的土体结构之中,很容易出现突水、塌陷情况。

翟强等^[9]为评价地铁联络通道冻结法施工安全风险,首先采用层次分析法计算各风险事件的相对权重,运用风险经济损失值描述风险事件的影响后果;鄯新军等^[10]基于现场试验,对富水粉质黏土层条件中联络通道在冻结法施工中温度场变化及地表变形规律进行研究,其结果表明各类温孔温度的下降趋势大致相同。

考虑研究区域的地质情况,使用冷冻法加固非对称异性隧道联络通道,避免隧道开挖造成土体失稳、隧道结构出现沉降、透水等情况。因此,利用 ANSYS 软件,构建非对称异性隧道联络通道及其地层情况的三维模型,研究在不同工况下联络通道的变形规律与稳定情况。

1 联络通道冷冻法施工技术分析

1.1 研究区域概况

研究区域位于我国中部某城市,隧道工程靠近我国著名的水景胜地,隧道挖掘过程中随时会出现透水风险。设计要求行车速度达到 50 km/h,总长度预计为 830 m。以当地的“轨道交通保护条例”为依据,隧道结构保护范围与轨道交通的车站都是外边线外侧 50 m 范围,隧道结构保护范围 10 m 范围之内是轨道交通隧道的通风亭和出入口。该隧道的风道竖井在隧道线位 CH14 段的西部位置,风道竖井地表结构出口在隧道上方。由此来看,隧道预留接口位置和风道竖井之间的距离没有达到安全规范中的标准距离,右洞与左洞之间存在差异,构成非对称异性隧道。

隧道靠近大型水体,是一个包含大跨度和一个普通跨度的非对称异性隧道,隧道左洞与右洞尺寸差异较大,左洞是普通跨度的隧道,往返 3 车道,测量后确定净距为 2.85 m;右侧为大跨度隧道,往返 4 车道,测量后确定净距为 17.77 m,断面示意图如图 1 所示。

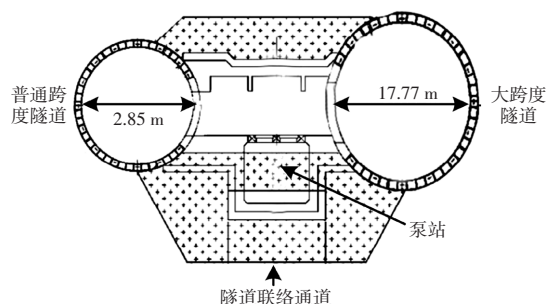


图 1 非对称异性隧道联络通道面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the connecting passage surface of an asymmetric anisotropic tunnel

1.2 冷冻法施工技术加固非对称异性隧道联络通道

结合已有非对称异性隧道联络通道的实际施工经验,在非对称异性隧道之中使用少量倾斜孔与水平孔,共同冷冻等待加固的隧道土体地层,构建一个高封闭性、高强度的联络通道外部土体结构。

(1) 设计防冻壁

从以往的研究结果来看^[11],隧道开挖断面与防冻壁的断面情况基本一致,根据联络通道的开挖需求设计冷冻壁的厚度,在常规以环形方式布置冷冻管的基础上,增加横向和纵向的钢管、塑料冷冻管,形成网格状布置,确保冷冻壁均匀冻结,防止局部过热或过冷导致的应力集中或冻结效果不均。冷冻壁之中冷冻管的基本布置情况如图 2 所示。

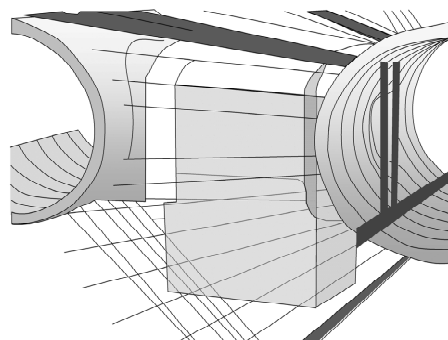


图 2 冷冻管布设示意图

Fig. 2 Schematic diagram of freezing tube layout

(2) 布设冷冻孔

布置冷冻管时,需要从上仰、下探、水平等多个方向延伸,确保联络通过各个位置均布置冷冻管,共在联络通道上布设 75 个冷冻孔,穿透孔 5 个。冷冻孔之间的平均距离设置为 11.22 m,穿透孔之间的平均距离设置为 207.5 m。

布设冷冻孔时,位置误差不能超过 10 cm,开孔

研究与应用

位置不能靠近管片主筋、螺栓与接缝,开孔间距最大误差不能超过 15 cm。冷冻孔的设计深度是冷冻孔有效深度的标准。为了实现地层沉降控制,注浆施工与冷冻孔施工同时进行,冷冻孔体积是土体流失的上限^[12];先对穿透孔施工,重复检查钻孔施工质量与两个隧道预留口的偏差;假如设计冷冻壁的厚度超出 10 cm,需要对冷冻口的位置加以调整。

(3) 布设测温孔

测温孔的作用是为了对冷冻壁不同位置的温度变化情况开展测量,由此监测冷冻法的施工安全性,冷冻站的位置与对侧位置分别布置 2 个和 4 个测温孔^[13]。要求通过焊接密封测温管前端,确保不会有水分渗入到测温管之中,测温管长度为 2.5~6.5 m。

(4) 布设卸压孔

构建防冻壁时,需要布置 4 个卸压孔,卸压管的长度为 3~4.5 m,卸压孔发挥传递防冻壁压力的作用,深入土体后留下一个梅花形状的钻孔,将一个压力表散装在卸压孔上,实时监测防冻壁中的压力变化,一旦防冻壁形成,可以将冻胀压力释放出来。

(5) 设计制冷条件

冷媒剂与冷媒介质分别为氟利昂与盐水,冷冻法施工时,将盐水的温度控制在 $-27\sim-31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,冷冻施工 7 d 以后,把盐水的温度降低到 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之下,15 d 以后盐水温度降低到 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之下。冷冻单孔之中,控制氟利昂的流量在 $5\sim7\text{ m}^3/\text{h}$ 。联络通道中,临近冷冻管终孔间距低于 1 m,下部泵房中临近冷冻管终孔间距低于 1.2 m,设定 3 cm/d 土体冷冻发展速度,20 d 实现防冻壁交圈,经过 25 d 达到预设厚度,冷冻施工 30 d 后开始掘进施工。计算冷冻工艺量需求 X :

$$X = 1.3\pi K H d \quad (1)$$

式中: K 与 H 分别为冷冻管散热系数与冷冻管长度总和,本文散热系数设定为 $255\text{ Kcal/j}\cdot\text{m}^2$; d 代表冷冻管的直径。根据式 (1) 计算得出冷冻工艺量需求为 $65\,959\text{ Kcal/h}$,满足研究隧道施工需求。

1.3 冷冻法施工技术有限元模拟

(1) 构建有限元模型

使用 ANSYS 有限元分析软件,分析研究区域经过冷冻法加固施工后,非对称异性隧道联络通道的变形规律与稳定情况。按照以往研究经验^[14],通常

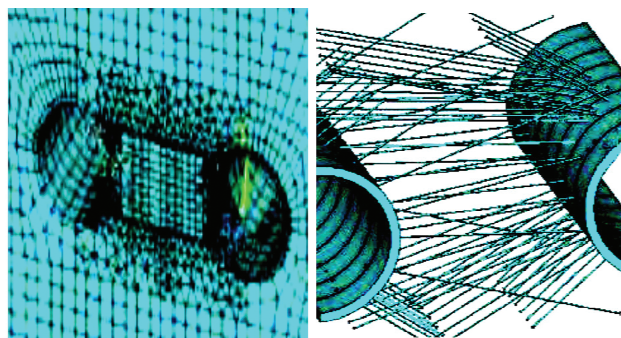
冷冻施工只会影响与冷冻区域中心点距离 5~8 倍半径范围的区域,所以构建有限元模型时,考虑该区域中已经建成的隧道地层情况,从三维角度开展数值计算,按照隧道掘进方向,确定划定模拟区域长度为 45 m,该距离相当于 30 环管片,每一环的长度约为 1.5 m,模拟区域的宽度是隧道横向尺寸,模型中设定该宽度为 33 m,隧道的数值方向是非对称异性隧道联络通道的埋深,根据该深度确定土层厚度,模型中设定该厚度为 30 m ^[15]。

(2) 单元选取

非对称异性隧道联络通道冷冻法加固效果分析,涉及联络通道中的多种材料:混凝土、型钢材料、冻土、管材等,所以有限元模型构建时需要设计多种材料参数与单元数量选择。本文所研究的隧道属于非对称的异性隧道,需要构建两个隧道的模型,设计温度方面的计算则使用热分析 SOLID90 单元,钢筋混凝土或者土体的分析计算则使用 SOLID95 单元,所需单元数量约为 136385 个。

(3) 网格划分

为了节省计算时间,并且保证试验计算结果足够精确,划分网格时,冷冻管区域的网格设定为较密网格,与冷冻壁较远的区域可以将网格设定得较为稀疏,网格划分结果如图 3 所示。



(a) 整体网格模型

(b) 管线网格模型

图 3 有限元网格划分结果

Fig. 3 Finite element mesh division results

(4) 边界条件设置

从计算边界来看,边界条件需要符合计算时的数学物理条件。初始条件和边界条件统称定解条件。在有限元模型中冷冻施工之前的土层原始温度设定为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,原始地温通过测量已有联络通道的冷冻施工后的资料确定。非对称异性隧道联络通道冷冻施

研究与应用

工后结构变形与稳定性变化,需要设定应力场边界条件。左侧隧道 $X = -9.5$ 处的截面是左侧边界,右侧隧道 $X = 22.5$ 处的截面是右侧边界,施加与该面方向垂直的约束位移, $Z = 0$ 处的截面是前边界, $Z = -21$ 处的截面是后边界,向这两个面施加法向位移约束,模型地面区域接受固端约束。

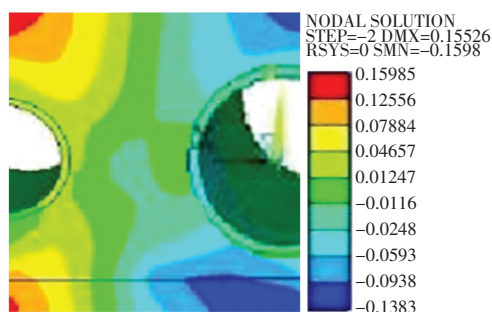
模型中应力场的荷载施加过程中需要率先确定边界条件与重力场,并对重力场之下的应力变化情况加以计算,以此为基础,考虑重力场影响下,应力变化对于联络通道整体冻胀变化的影响。

2 结果分析

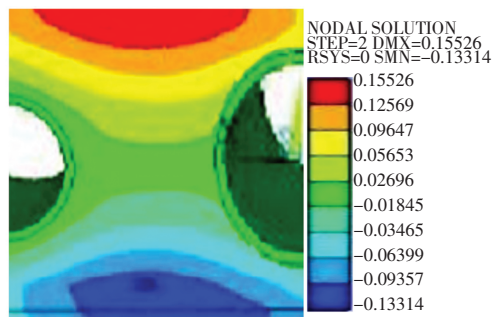
2.1 应力变化模拟分析

(1) 未开挖阶段应力分析

使用冷冻法在联络通道加固施工后,并没有立刻开展后续的挖掘施工工作,冷冻加固后,土体出现冻胀变化,该变化作用会导致冷冻壁与隧道管片均会出现受力变形,在有限元模型中 X 方向与 Y 方向位移分布云图如图 4 所示。



(a) X 方向



(b) Y 方向

图 4 X 与 Y 方向上位移云图

Fig. 4 Upward shift cloud map in X and Y directions

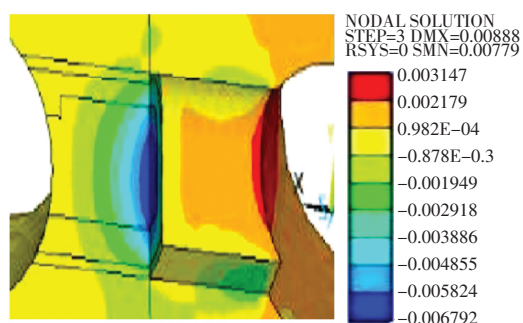
由图 4 (a) 可知,冷冻壁是 X 方向最大位移,冷冻壁右端 $-X$ 方向上最大位移为 -1.3 mm,冷冻

壁左端 $+X$ 方向上最大位移为 1.5 mm。由图 4 (b) 可知冷冻施工后,隧道开挖之前,土体出现冻胀变化,冷冻壁上端 $+Y$ 方向的土体出现显著位移,最大位移为 15.5 mm,冷冻壁下端 $-Y$ 方向的最大位移为 -13.3 mm。

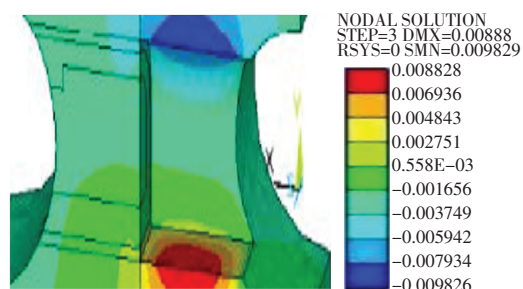
(2) 开挖到联络通道中段时的应力分析

开挖联络通道时,每掘进 4 m 时使用一根工字型钢支撑冷冻壁的土体,保证该阶段掘进施工中主要受力对象冷冻壁的管片不会发生过大变形。该阶段联络通道中的位移变化情况如图 5 所示。

由图 5 可知联络通道掘进施工一半时,未开挖土体在 $-X$ 方向上最大位移为 -6.79 mm,顶部 $-Y$ 方向的最大位移为 -9.82 mm,说明该区域中的土体发生沉降; $+Y$ 方向最大位移为 8.82 mm,表示该区域出现土体隆起。这种原因出现主要是由于冷冻加固后,掘进土体时,应力被释放出来,由于应力释放,被掘进的土体四周均出现较为显著的变形,开挖面上的土体显著偏移。施工过程中,受到冷冻后的土体表现出良好的冻结效果,土体强度较高,掘进时土体能够自立,保证开挖面足够稳定,不会出现涌沙、涌水现象。



(a) X 方向



(b) Y 方向

图 5 通道掘进一半时 X 与 Y 方向上位移分布云图

Fig. 5 Cloud map of displacement distribution in the X and Y directions during half excavation

研究与应用

2.2 沉降变形分析

在有限元模型中选取 3 个点, 点 A 在联络通道的最左端, 点 B 在联络通道的最右端, 点 C 在联络通道的中间, 模拟不同冷冻天数后, 这些点在不同冷冻时间下的位移变化情况如图 6 所示。

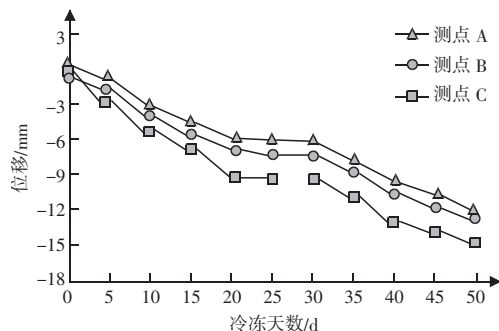


图 6 不同冷冻天数下各个测点的位移变化
Fig. 6 Displacement changes of each measuring point under different freezing days

由图 6 能够看出, 3 个测点都会随着冷冻天数的增加而逐渐下降, 从冷冻初期到冷冻 20 d 时, 各个测点均出现缓慢下降, 冷冻 20 d 以后, 完成冷冻交圈, 此后冷冻壁逐渐到达预设厚度, 这个阶段, 各个测点的位移变化逐渐趋于平稳; 冷冻 30 d 以后, 联络通道挖掘工程开始, 随着掘进工作的开展, 各个测点位移再次出现明显下降, 这种情况主要是由掘进时土体的压力得到释放, 这种压力转向管片上, 联络通道周围土体承受较大压力, 出现明显沉降。测点 A 与测点 B 与联络通道存在一定距离, 因此位移下降较少, 测点 C 处于联络通道的中心位置, 受到掘进影响, 沉降更加严重。

2.3 沉降变化与冷冻壁厚度、比例关系

(1) 冷冻壁厚度与沉降关系

在有限元软件中设定冷冻壁的厚度分别为 1、1.2、1.4、1.6 m, 选择与联络通道距离不同的测试点, 统计并绘制不同冷冻壁厚度之下沉降变化曲线, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 当测试点与联络通道距离较近时, 冷冻壁能发挥的加固作用较小, 此时沉降变化量较大。冷冻壁越厚, 沉降变化量越小, 1.6 m 冷冻壁厚度下, 沉降变化量达到 16.5 mm; 冷冻壁厚度为 1 m 厚度时, 沉降变化量约为 21 mm, 说明冷冻壁较厚可有效加固联络通道。随着测试点越来越远离联络通道中心区域, 靠近冷冻壁的区域加固效果更好, 与

联络通道中心距离超过 30 m 后冷冻法加固效果较好, 沉降情况基本平稳, 不会再发生明显变化。

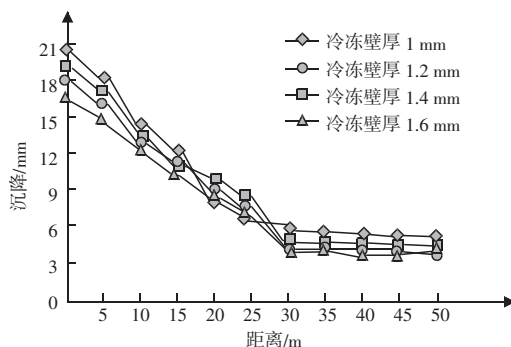


图 7 冷冻壁厚度与沉降关系
Fig. 7 Relationship between frozen wall thickness and settlement

(2) 冷冻壁比例与沉降关系

冷冻壁的形状差异也会影响联络通道的加固效果, 分别设置冷冻壁比例: 无冷冻壁、1/2 冷冻壁、全冷冻壁, 分析沉降变化量情况, 结果见图 8。

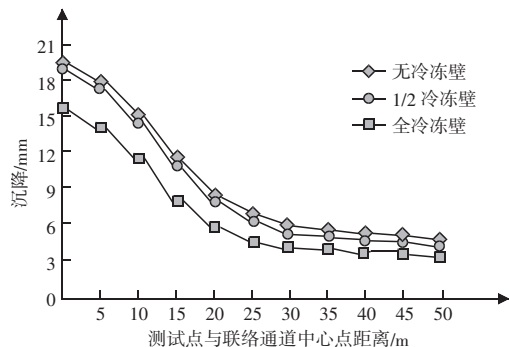


图 8 冷冻壁比例与沉降关系
Fig. 8 Relationship between frozen wall scale and settlement

从图 8 中能够看出, 完全不使用冷冻壁与 1/2 冷冻壁比例, 沉降变化率的差异并不大, 而两种冷冻壁比例与全冷冻壁比例下的沉降变化量差异较大, 这也说明, 使用局部冷冻的加固方式, 不能在联络通道之中完全发挥加固土体结构的效果。全使用冷冻壁的加固方式沉降量更低。与联络通道中心区域的距离越远, 越靠近冷冻壁区域, 加固效果越好, 沉降变化量也越小, 说明全冷冻壁的加固方式能够有效控制联络通道的沉降变化。

2.4 冷冻温度对联络通道加固的影响

在有限元软件中调整冷冻温度, 分别为 -15、-20、-25、-30、-35 ℃, 分析不同冷冻温度下, 联络通道的隆起与沉降变化, 如图 9 所示。

研究与应用

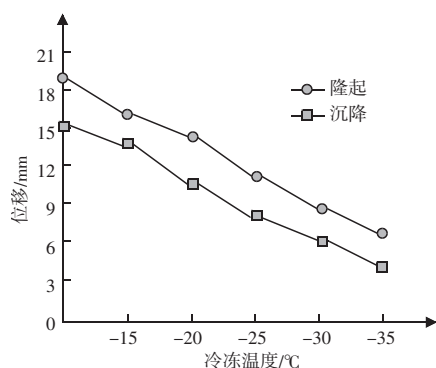


图9 不同冷冻温度下联络通道沉降与隆起变化

Fig. 9 Changes in settlement and uplift of connecting channels under different freezing temperatures

由图9可知,冷冻温度不断降低,联络通道的沉降与隆起位移保持一个平稳的下降趋势,说明使用冷冻法加固联络通道时,施工温度越低,土层的加固效果越好,联络通道的变形情况也更小。

2.5 冷冻管布设对联络通道加固的影响

冷冻管布设时从各个方向出发,单层布设冷冻管与多层布设冷冻管,会获得不同加固效果,在有限元软件中模拟布设1层、2层、3层冷冻管,结果如图10所示。

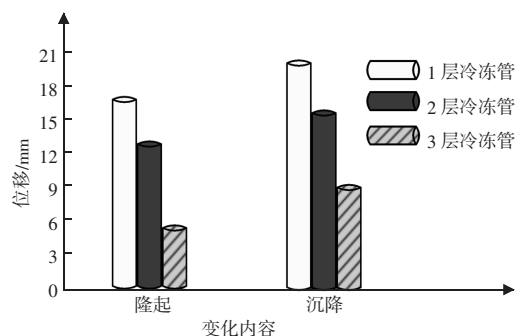


图10 冷冻管布设对联络通道加固的影响

Fig. 10 The influence of the freezing pipe layout on the reinforcement of the contact channel

从图10中能够看出,冷冻管的层数越多,联络通道的沉降与隆起越低,二者呈现出反比例关系,由此可以看出,适当增加冷冻管的层数,能够显著提升加固效果,保证联络通道后续开挖过程的稳定性,降低联络通道出现变形的概率。

3 结论

以某非对称异性隧道联络通道工程作为研究对

象,利用有限元软件开展模拟试验。在该有限元模型中导入非对称异性隧道联络通道的各项参数以及冷冻法施工方式,验证冷冻法加固后的非对称异性隧道联络通道稳定性能与变形形态。模拟试验结果证明冷冻法施工技术应用后,隧道掘进施工稳定性较好,具有较高安全性。

参考文献

- [1] 唐震东. 线路重叠交叉段下部隧道联络通道冻结法施工对上部隧道的影响 [J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23 (5): 92-96.
- [2] 刘启清, 黄君, 翁国亮, 等. 城际铁路盾构联络通道冻结法施工技术 [J]. 铁道建筑, 2019, 59 (6): 55-58, 73.
- [3] 韦猛, 林宇. 层状软岩隧道非对称大变形控制解耦方法 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (3): 358-369.
- [4] 陈志明. 城市复杂环境下浅埋非对称小净距隧道施工方法研究 [J]. 施工技术, 2020, 49 (13): 41-46, 50.
- [5] 胡小荣, 饶志强, 汪日堂. 南昌地铁联络通道冻结法模拟 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15 (增刊1): 286-292, 399.
- [6] 江杰, 邱居涛, 陈先枝, 等. 人工冻结法在圆砾地层地铁联络通道施工中的应用 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57 (2): 192-197.
- [7] 胡双平, 张晓峰, 胡智民, 等. 富水卵砾石地层地铁联络通道冻结壁厚度设计研究 [J]. 公路, 2019, 64 (5): 272-281.
- [8] 黄金龙, 黄建, 贾德华. 北京地铁区间联络通道冻结法施工技术 [J]. 铁道建筑, 2020, 60 (7): 55-58.
- [9] 翟强, 顾伟红, 荆肇秦. 地铁联络通道冻结法施工安全风险评价 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58 (4): 57-66.
- [10] 邵新军, 李铭远, 张景伟, 等. 富水粉质黏土中地铁联络通道冻结法试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40 (6): 1267-1276.
- [11] 赵干, 丁顺良. 冻结法施工地铁联络通道后期渗漏水分析及处置研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23 (5): 128-130.
- [12] 张中勇, 路林海, 赵松壮, 等. 富水砂卵石地层冻结法联络通道施工 [J]. 建筑技术, 2022, 53 (2): 234-236.
- [13] 李鹏飞, 贾航, 马佳, 等. 冻结法在富水砂层地铁联络通道施工中的应用 [J]. 施工技术, 2020, 49 (增刊1): 649-652.
- [14] 吉艳雷, 陈敬军, 王斌, 等. 红砂岩地层联络通道冻结温度场与应力场研究 [J]. 铁道标准设计, 2022, 66 (6): 110-117.
- [15] 王泽成, 李栋伟, 张潮潮, 等. 地铁联络通道冻结帷幕力学性能研究 [J]. 水力发电, 2021, 47 (5): 51-55.