

地铁隧道联络通道冻结施工引起地表变形实测分析

陶东军¹ 桂 林¹ 李建望²

(1. 苏州市轨道交通集团有限公司, 215004, 苏州;

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//第一作者, 高级工程师)

摘 要 在地铁建设过程中, 联络通道的冻结法施工仍然存在许多安全问题。以苏州轨道交通 5 号线长江路站—塔园路站区间的 2# 联络通道兼泵房施工为例, 根据监测数据分析了软土地层中联络通道冻结法施工引发的地表沉降变形趋势, 主要结论为: 联络通道位置的地表竖向位移变化大致经历了钻孔微变、冷冻隆起(冻胀)、开挖起伏、解冻下沉(融沉)和注浆趋稳共 5 个阶段; 垂直于联络通道中轴线的各断面地表最大冻胀变形呈凸起的半椭圆型, 最大融沉变形呈 V 型; 距离联络通道中轴线约 25 m 范围内的地表变形受到冻结法施工的影响较大, 超出这个范围则影响较小。

关键词 地铁隧道; 联络通道; 冻结法施工; 冻胀量; 融沉量
中图分类号 U455.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.05.016

Measurement Analysis of Surface Deformation Caused by Freezing Construction of Connection Passages in Metro Tunnels

TAO Dongjun, GUI Lin, LI Jianwang

Abstract In the process of metro construction, there are still many safety problems in the freezing method construction of connection passage. Taking the construction of 2# connection passage and pump room of Changjiang Road Station—Tayuan Road Station interval of Suzhou Rail Transit Line 5 as an example, the trend of surface settlement and deformation caused by the freezing method construction of connection passage in soft soil layer is analyzed according to monitoring data. Main conclusions are: the surface vertical displacement variation at the position of connection passage generally experiences five stages including drilling micro-change, freezing uplift (frost heave), excavation undulation, thawing subsidence (thaw subsidence), and grouting stabilization; the surface maximum frost heave deformation of all sections perpendicular to central axis of connection passage is in the shape of a ‘convex semi-ellipse’, and the maximum thawing deformation is in V-shape; the surface deformation within a range of about 25 meters from the central axis of the connection passage is largely influenced by freezing method construction, and the impact be-

yond this range is relatively small.

Key words metro tunnel; connection passage; freezing method construction; frost heave; thaw subsidence

First-author's address Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., 215004, Suzhou, China

0 引言

城市地下管道及各种线网交互密集, 城市周边建(构)筑物环境复杂, 地铁隧道、联络通道施工引发的地层土体变形, 必然会影响地下管道及周边建(构)筑物的安全, 故在地铁联络通道的施工过程中须严格控制土层的变形。针对当前面临的工程问题, 文献[1-2]基于现场实测、文献[3-4]采用数值模拟等手段开展了研究。文献[5]在哈尔滨某地铁联络通道冻结法施工过程中对土体温度进行研究, 总结了土体温度场的变化规律, 发现在盐水冻结的初期, 土体温度下降的较快, 当温度降到零度左右时, 会出现一个平台期, 温度降至零度以下后, 土体的降温速率明显变慢。文献[6]通过现场试验, 得到了含水量丰富的粉质黏土地层联络通道冻结法施工过程中, 温度场及地表位移场的变形规律。研究发现: 土体冻结期间, 各测温孔温度变化趋势基本相同, 但冻结壁远离冻结管方向的冻结速率约是趋向冻结管方向速率的 1.35 倍; 开挖期间, 距离开挖面较远的测温孔温度比距离开挖面较近的测温孔温度下降的快; 同时, 将冻结施工期间的地表竖向位移分为 5 个阶段, 分别是小幅隆起、冻胀加快、冻融起伏、地表下沉和融沉注浆 5 个阶段; 开挖期间最大冻胀量、最大沉降量曲线分别呈倒 V 型和 W 型。文献[7]基于南昌地铁 1 号线联络通道冻结法施工现场实测数据, 运用数值模拟软件 ABAQUS 模拟了冻结温度、冻胀位移及管片应力。数值模拟结果与现场实测数据基本一致, 表明其所建模型合

理。在此基础上,还模拟了冷冻液温度在-25℃、-30℃和-35℃时形成的不同冻结壁厚度所需时间。结果发现,冻结壁厚度受冷冻液温度影响,冷冻液温度越低,形成冻结壁厚度所需时间越小。文献[8]基于南京地铁2号线联络通道水平冻结法施工,运用FLAC3D数值模拟软件模拟联络通道施工时的温度场变化,以及冻胀、融沉引起的地表位移及管片应力,得到了许多有价值的结论,以期为后续联络通道冻结法施工提供参考。

本文以苏州轨道交通5号线长江路站—塔园路站区间2[#]联络通道兼泵房为例进行分析。该区间土层特性相差较大,上、下土层强度差异可能会引起工作面不稳定等问题。隧道底部纵向土层性质分布不同,也极有可能会导致隧道纵向及联络通道横向不均匀沉降。此外,土层含水量较丰富,且④2粉土夹粉砂层和⑤2粉土层为微承压含水层,具有微承压性,施工时地表沉降控制难度较大。本文通过对现场实测数据进行分析,以期能够得到苏州地区地铁联络通道冻结法施工的变形规律,为类似工程的施工提供参考。

1 工程简介及场地地质条件

1.1 工程简介

苏州轨道交通5号线V-TS-04标包含两站两区间,两站即长江路站、塔园路站,两区间即枫瑞路站—长江路站区间、长江路站—塔园路站区间。区间采用盾构法掘进施工,工程总体走向如图1所示。

长江路站—塔园路站区间右线隧道全长1 378.529 m;左线隧道全长1 405.704 m,长链26.511 m,区间左、右线总长2 784.233 m。本区间线路自长江路站出站后向北方向穿行,右线设置两段半径分别为400 m和350 m的平面曲线,左线设置两段半径分别为400 m和360 m的平面曲线,到

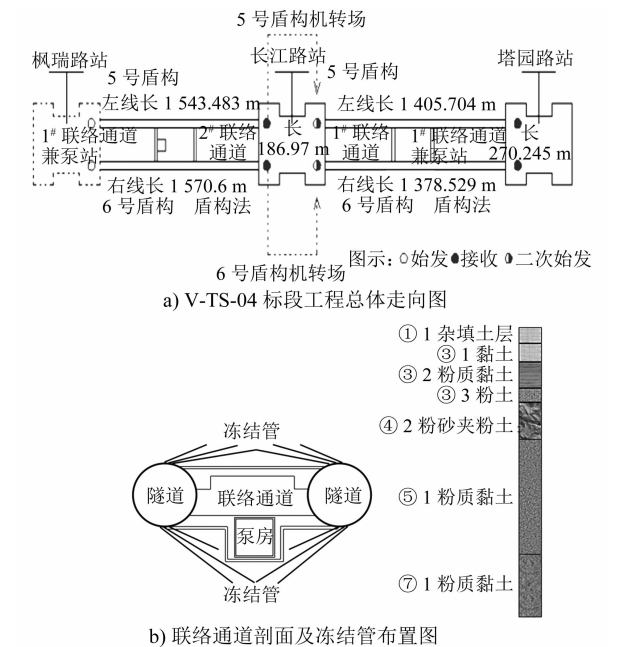


图1 苏州轨道交通5号线V-TS-04标工程示意图
Fig. 1 Diagram of Suzhou Rail Transit Line 5 V-TS-04 project

达竹园路后沿竹园路到达塔园路站,线间距为13~16 m。左、右线均采用盾构法施工,区间在里程右DK 13+710.000处设一处联络通道、在右DK 14+121.000处设置一处联络通道兼泵房。由于该区间地层土质特性相差较大且土层含水量较丰富,故联络通道施工中易出现土体加固失效、隧道塌方及结构受损、地面沉降较大和开挖面涌水等问题,严重危及工程安全。

1.2 场地工程地质及水文地质条件

根据地质资料,长江路站—塔园路站区间地层层序自上而下依次为:①1杂填土层、①3素填土层、③1黏土、③2粉质黏土、③3粉土、④2粉砂夹粉土、⑤1粉质黏土、⑤1a粉土夹粉质黏土、⑦1粉质黏土、⑦3粉质黏土夹粉土。各土层的主要物理力学指标如表1所示。

表1 长江路站—塔园路站区间土层主要物理力学指标

Tab. 1 Main physical and mechanical indicators of soil layers of Changjiang Road Station—Tayuan Road Station interval

层序及土名	重度/(kN/m ³)	直剪固快强度		直剪快剪强度		三轴UU		渗透系数/(cm/s)
		c_{cq}/kPa	$\phi_{cq}/(^{\circ})$	c_q/kPa	$\phi_q/(^{\circ})$	c_u/kPa	$f_u/(^{\circ})$	
③2 粉质黏土	19.1	31	15.0	35	8.5	69	0.4	3×10^{-6}
③3 粉土	18.8	8	20.0	9	22.0			4×10^{-4}
④2a 粉砂夹粉土	18.9	9	20.5	10	21.0			5×10^{-4}
⑤1 粉质黏土	18.7	17	19.0	27	10.5	47	00	7×10^{-6}
⑤1a 粉土夹粉质黏土	18.8	17	12.5	30	11.0	59	1.0	9×10^{-6}
⑦2 粉砂夹粉质黏土	19.0	2	28.5	2	31.5			4×10^{-3}

注: c_{cq} , c_q , c_u 分别为直剪固结快剪、直剪快剪、不固结不排水(UU)三轴剪切条件下的粘聚力; ϕ_{cq} , ϕ_q , ϕ_u 分别为直剪固结快剪、直剪快剪、不固结不排水三轴剪切条件下的摩擦角。

本场区地下水分为孔隙潜水、微承压水、承压水三类。其中孔隙潜水水位埋深 1.2~2.0 m, 高程 1.72~2.04 m; 微承压水赋存于第一隔水层下的粉(砂)土层中, 埋深 5~6 m, 厚度 5~7 m, 赋水性中等。据区域资料, 苏州市历年最高微承压水头标高为 1.74 m, 近 3~5 年的最高微承压水水位为 1.60 m 左右, 年变幅为 1 m 左右; 承压水主要赋存于深部的粉(砂)土层中, 埋深约 35 m, 赋水性中等。根据《苏州市水文地质、工程地质、环境地质综合勘察报告》(江苏省地质矿产局第一水文地质工程地质大队, 1987 年 7 月)等区域资料, 承压水头埋深 3~5 m, 年变幅为 1 m 左右。

2 施工监测方案

为确保盾构区间联络通道施工安全, 依据《苏州市轨道交通工程安全质量标准化系列手册(上册管理类)》有关规定, 对联络通道施工的影响区进行沉降变形监测。施工时, 联络通道上方地表点横断面间距为 5 m, 共布设 5 个断面, 每个断面布置 11 个监测点, 布置范围为联络通道底板埋深 2 倍范围内。地表沉降监测点布置如图 2 所示。

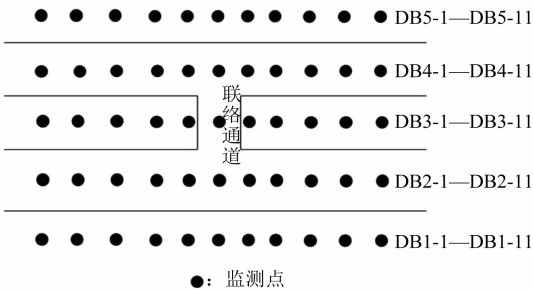


图 2 2#联络通道地表沉降监测点布置图
Fig. 2 Monitoring point layout of 2# connection passage surface settlement

联络通道冻结法施工时监测频率为: 钻孔期, 1 次/d; 冻结加固期, 1 次/3 d; 融沉控制期, 1 次/d; 施工结束, 1 次/5d。联络通道施工时的监测频率不应少于 1 次/d, 监测数据趋于稳定后, 监测频率为每 15~30 d 监测 1 次。联络通道沉降监测控制标准如表 2 所示。

3 联络通道冻结法施工引起地表位移分析

3.1 与联络通道中轴线垂直断面地表点竖向位移分析

2#联络通道 DB3-3—DB3-9 监测点地表竖向位

表 2 联络通道沉降监测控制标准
Tab. 2 Monitoring and control standards for connection passage settlement

监测项目	速率控制值/(mm/d)	报警值/mm	绝对控制值/mm
地表沉降	±2	+8/-24	+10/-30
结构沉降	±2	±16	±20

移如图 3 所示。由图 3 可知, 联络通道中轴线断面地表竖向位移变化可大致分为以下 5 个阶段:

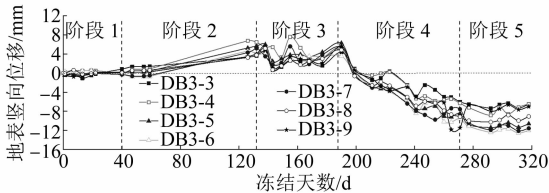


图 3 2#联络通道 DB3-3—DB3-9 监测点地表竖向位移
Fig. 3 Surface vertical displacement at 2# connection passage DB3-3—DB3-9 measuring points

1) 钻孔微变阶段(阶段 1): 此阶段地表基本稳定, 整体呈现微幅的下沉趋势。其中在钻孔施工第 13 天时地表出现较大位移, 沉降最大的是 DB3-3 监测点, 为 1.07 mm。主要原因为, 钻孔施工时, 土体发生水土流失, 进而导致地表呈下沉趋势。

2) 冷冻隆起(冻胀)阶段(阶段 2): 此阶段地表逐渐隆起, 隆起最大值可达 6.76 mm。该阶段土体温度降到 0℃ 以下, 各冻结孔交圈、冻结帷幕迅速扩展。由于原位冻胀(水冻结成冰后体积膨胀)以及分凝冻胀(水分迁移), 故而引起地表隆起。

3) 开挖起伏阶段(阶段 3): 此阶段隆起最大值达 7.58 mm, 最小值为 0.63 mm。该阶段联络通道开始施工, 导致土层应力得到迅速释放, 各监测点的竖向位移变化较大。由于此时冻结仍在进行, 冻结帷幕继续向外扩展, 冻结膨胀引起的地表隆起与联络通道土体开挖卸荷引起的地表沉降相互叠加, 导致地表竖向位移起伏震荡。随着联络通道开始砌筑, 地表竖向位移又开始上升。

4) 解冻下沉(融沉)阶段(阶段 4): 随着联络通道施工完成, 冷冻孔开始封孔并停止冷冻, 联络通道周围开始回温, 土体发生热融沉降和固结沉降, 从而导致地表快速下降, 最大沉降点为 DB3-7, 沉降值为 11.85 mm。

5) 注浆趋稳阶段(阶段 5): 此阶段地表沉降又出现起伏现象, 但总体呈下降趋势。这是因为冻结停止后, 热融沉降一段时间后也接着停止。然而, 土的固结沉降不会随之停止, 而是继续随时间产生

累积。此时又进行注浆加固,故在第 290 天左右各点均出现回升,随着注浆在不断地进行,地表沉降出现起伏现象。

3.2 各垂直断面的地表最大竖向位移分析

在联络通道施工过程中,导致地表沉降的原因有很多。图 4~5 反映了垂直于联络通道中轴线 5 个断面地表竖向位移在联络通道施工过程中的最大冻胀量和最大融沉量的变化趋势。

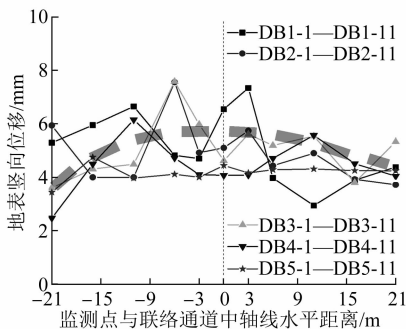


图 4 2#联络通道冻结施工期间最大冻胀分布

Fig. 4 Distribution of maximum frost heave during freezing construction of 2# connection passage

由图 4 可知,最大冻胀量变化趋势大致呈凸起的半椭圆型。最大冻胀量是 DB3-4 监测点,冻胀量为 7.58 mm。冻胀量较大的监测点大致位于联络通道及冻结壁上方的地表。这是因为联络通道上方及左右两侧有冻结管布置,且冻结时土体应力不易释放,进而导致中间位置出现相对明显的冻胀抬升。随着距离联络通道中轴线水平距离越远,最大冻胀量逐渐变小。

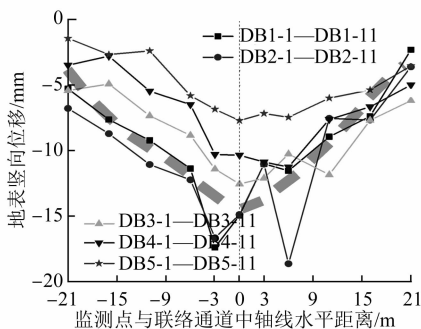


图 5 2#联络通道冻结施工后的最大融沉分布

Fig. 5 Distribution of maximum thaw subsidence after freezing construction of 2# connection passage

由图 5 可知,最大融沉量变化趋势大致呈 V 型。最大融沉量是 DB2-8 监测点,融沉量为 18.64 mm。最大融沉量较小的监测点大致位于远离联络通道

的地表。这是由于联络通道上方及左右两侧有冻结管布置,形成的冻结壁融化后土体随之沉降。随着距离联络通道中轴线水平方向距离越远,最大融沉量也相对减小。

综合上述分析可知,联络通道冻结法施工期间,在垂直联络通道中轴线水平方向距离约 25 m 的范围内,土体受冻结法施工影响较大,超出这个范围,土体所受的影响较小。

3.3 联络通道中轴线断面地表点竖向位移分析

2#联络通道 DB1-6—DB5-6 监测点地表竖向位移如图 6 所示。由图 6 可知,联络通道中轴线断面地表竖向位移变化同样可大致分为钻孔微变、冷冻隆起(冻胀)、开挖起伏、解冻下沉(融沉)和注浆趋稳阶段 5 个阶段。其中:在钻孔微变阶段,由于钻孔施工时存在施工工序先后,故同一断面各点变化趋势略有不同,最大沉降点是 DB5-6 测点,沉降量为 0.67 mm;在冷冻隆起(冻胀)和开挖起伏阶段,各测点变化趋势基本一致;在解冻下沉(融沉)和注浆趋稳阶段,冷冻孔开始封孔并停止冷冻,土体进行热融沉降和固结沉降,此时又进行注浆加固,故地表位移表现出起伏现象并最终趋于平稳。

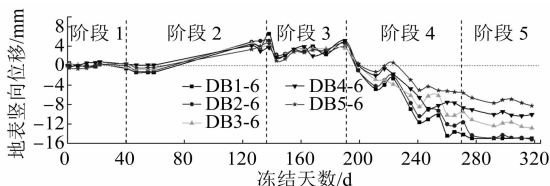


图 6 2#联络通道 DB1-6—DB5-6 监测点地表竖向位移

Fig. 6 Surface vertical displacement at 2# connection passage DB1-6—DB5-6 measuring points

3.4 中轴线断面地表点最大竖向位移分析

2#联络通道施工过程中的最大冻胀量和最大融沉量分布如图 7~8 所示。

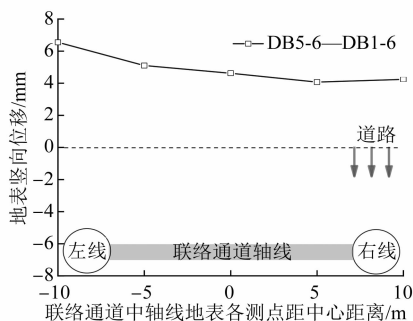


图 7 2#联络通道施工期间最大冻胀分布

Fig. 7 Distribution of maximum frost heave during the construction of 2# connection passage

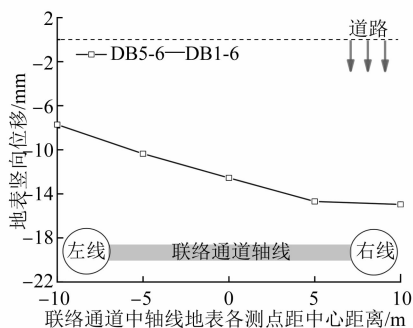


图8 2[#]联络通道冻结施工后的最大融沉分布

Fig. 8 Distribution of maximum thaw subsidence after freezing construction of 2[#] connection passage

由图7~8可见, 2[#]联络通道施工过程中中轴线断面地表最大冻胀量为4~7 mm范围, 最大融沉量为7~15 mm范围。这表明, 在联络通道冻结法施工过程中, 融沉量要显著大于冻胀量, 需要引起高度重视。此外, 联络通道中轴线的沉降线在理论上应该呈“对称”分布, 但实际上图中呈现出了左线至右线(DB5-6—DB1-6)渐变的沉降趋势。分析其原因是, 在该区间联络通道施工期间, 右线上方的市政道路仍保持通车状态, 这限制了冻胀期间的地表抬升, 同时也加剧了冻融期间的地表沉降。

4 结语

1) 冻结法施工期间, 联络通道中轴线断面地表竖向位移变化可大致分为钻孔微变、冷冻隆起(冻胀)、开挖起伏、解冻下沉(融沉)和注浆趋稳阶段5个阶段。其中, 钻孔造成的水土流失对地表土体竖向位移影响不大。

2) 土体温度降到0℃以下后, 各冻结孔交圈形成冻结帷幕, 地表迅速隆起。随着联络通道开始施工, 土层应力得到迅速释放。冻结膨胀引起的地表隆起与联络通道土体开挖卸荷引起的地表沉降相互叠加, 使得地表竖向位移起伏震荡。

3) 冻结法施工期间, 垂直于联络通道中轴线方向的各断面地表监测点最大冻胀量变化趋势大致呈凸起的半椭圆型, 最大融沉量变化趋势大致呈V型。

4) 在垂直联络通道中轴线水平方向距离约25 m的范围内, 土体受冻结法施工影响较大, 超出这个范围, 土体所受的影响较小, 故在此范围内的地下管线等设施需注意采取相应的保护措施, 尤其是穿越联络通道左右及上方土体的设施。

参考文献

- [1] 谢雄耀, 王强, 齐勇, 等. 圆砾泥岩复合地层泥水盾构下穿房屋沉降控制技术研究[J]. 岩土工程学报, 2017(9): 1591.
XIE Xiongyao, WANG Qiang, QI Yong, et al. Settlement control of slurry shield tunnelling crossing adjacent buildings in mixed ground of round gravel and mudstone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017(9): 1591.
- [2] 谢雄耀, 李军, 王强. 盾构施工地表沉降自动化监测及数据移动发布系统[J]. 岩土力学, 2016(增刊2): 788.
XIE Xiongyao, LI Jun, WANG Qiang. Automatic monitoring and mobile data publishing system of ground settlement induced by shield tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016(S2): 788.
- [3] 王志良, 瞿嘉安, 申林方, 等. 泥炭质土层盾构施工扰动引起隧道长期沉降的研究[J]. 岩土工程学报, 2017(8): 1416.
WANG Zhiliang, QU Jia'an, SHEN Linfang, et al. Long-term settlement of tunnel caused by shield tunneling in peaty soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017(8): 1416.
- [4] 胡长明, 冯超, 梅源, 等. 西安富水砂层盾构施工Peck沉降预测公式改进[J]. 地下空间与工程学报, 2018(1): 176.
HU Changming, FENG Chao, MEI Yuan, et al. Modifying of Peck's settlement calculation formula related to metro tunnel construction in Xi'an water-rich sand[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018(1): 176.
- [5] 刘加奇, 钱剑峰, 徐莹. 严寒地区地铁联络通道冻结法施工监测分析[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2021(3): 339.
LIU Jiaqi, QIAN Jianfeng, XU Ying. Study on construction monitoring and analysis of freeze method of subway liaison channel in cold area[J]. Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition), 2021(3): 339.
- [6] 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(6): 1267.
GAO Xinjun, LI Mingyuan, ZHANG Jingwei, et al. Field research on artificial freezing of subway cross passages in water-rich silty clay layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021(6): 1267.
- [7] 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(增刊1): 286.
HU Xiaorong, RAO Zhiqiang, WANG Ritang. Numerical simulations for freezing method in connecting channel excavation of Nanchang subway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019(S1): 286.
- [8] 王晖, 李大勇, 李健, 等. 地铁联络通道冻结法施工三维数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011(增刊2): 1589.
WANG Hui, LI Dayong, LI Jian, et al. Analysis of 3D numerical simulation in ground freezing method for a cross passage of the subway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011(S2): 1589.

(收稿日期: 2021-12-10)