

软土地层地铁车站浅埋冻结暗挖法施工方案分析

盛应平^{1,2}

(1. 上海轨道交通十八号线发展有限公司, 200135, 上海; 2. 上海申通地铁集团有限公司, 200135, 上海//高级工程师)

摘要 上海轨道交通18号线江浦路站是典型的软土地层车站,其周边环境复杂、地层条件差、施工难度大、风险高。提出了明挖顺作法、管幕+冻结暗挖、冻结暗挖等3种施工方案。通过技术、经济、环境等方面的比选,确定冻结暗挖法为最优方案。冻结暗挖法具有施工造价低、工期短、不占用道路等优点,但由于冻结体量大,地层冻胀量较大,会对地表环境产生较大影响。因此,参考类似的冻结工程设计,并结合数值分析,提出采用全方位高压喷射方法,可有效控制地层冻胀量。

关键词 地铁车站; 软土; 浅埋暗挖; 施工方案; 冻结法

中图分类号 TU94+1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.06.031

Analysis on Metro Station Construction with Shallow-buried Frozen Excavation Method in Soft Soil Stratum
SHENG Yingping

Abstract Jiangpu Road Station on Shanghai metro Line 18 is a typical station built on soft soil stratum with complex surrounding environment, poor stratum condition, difficult construction and high risks. Three construction schemes: open excavation, pipe curtain + frozen excavation and frozen excavation are put forward. Through comparison of the technological, economic and environmental factors, the frozen excavation method is recommended as the best one. This method features advantages of low construction cost, short construction period and no road occupation, but because of the large amount of frozen body, the frost heave of stratum is larger, which may influence the ground environment. Therefore, referring to the similar frozen engineering design and combined with numerical analysis, metro jet system (MJS) method is adopted to control the frost heave of stratum.

Key words metro station; soft soil; shallow-buried excavation; construction scheme; frozen method

Author's address Shanghai Rail Transit Line 18 Development Co., Ltd., 200135, Shanghai, China

当地铁隧道穿越软弱、破碎、富含水地层或断层破碎带,而盾构法等常规施工方法不可行时,常采用冻结法对不良土层进行加固,以增加其强度和稳定性。

隔绝了地下水与地下工程的联系后,再采用矿山法进行施工^[1-3]。但由于地铁隧道多处于市政交通枢纽区域,对周边环境的敏感性强,采用冻结法对大断面隧道施工时,需要考虑冻胀对地表环境的影响^[4-7]。

上海轨道交通18号线江浦路站埋深浅、开挖断面大。车站处于市政交通枢纽区域,周边环境敏感。为控制该站冻结工程对周边环境的影响,车站施工拟在管棚冻结法加固地层后采用矿山法进行开挖支护施工^[8-10]。由于大断面车站冻结工程在国内尚属首次,为此,特对冻结方案进行分析,并结合数值分析,研究冻结法施工时冻胀对地表的影响,提出相应的控制措施。

1 工程概况

18号线江浦路站沿江浦路南北走向,与已通车的8号线江浦路站进行“十”字换乘,换乘段靠近8号线。车站结构为上下两层岛式建筑,结构宽度23.0 m,高12.45 m。车站断面呈矩形,分为南北两段,其中南段长度15.21 m(地下连续墙至地下连续墙),北段长度10.31 m(地下连续墙至地下连续墙)。站台中心处顶板覆土约2.47 m,底板埋深约14.97 m。车站周边建(构)筑物及管线较多。

如图1所示,该站所处土层由上至下分别为:①填土层;③灰色淤泥质粉质黏土层;③J灰色淤泥质粉质黏土与砂质粉土互层;④灰色淤泥质黏土层;⑤1-1灰色黏土层。土体渗透系数最大的为灰色砂质粉土与淤泥质粉质黏土层(③J层),渗透系数为 5.36×10^{-5} cm/s,属于非渗透性土层。

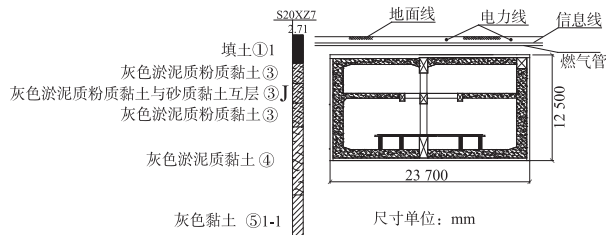


图1 江浦路站地质横断面图

2 车站加固方案

2.1 工程特点

综上所述,车站采用冻结预加固的浅埋暗挖法施工,具有以下难点:

(1) 周边环境复杂。车站上方覆土仅为 2.47 m,且覆土内市政管线较多,因此在施工过程中若产生较大变形,将会引起房屋倾斜开裂、道路破坏或地下管线破损,从而在社会上造成严重的负面影响。

(2) 地层条件差。车站结构主要位于③灰色淤泥质粉质黏土层、③J 灰色淤泥质粉质黏土与砂质粉土互层、④灰色淤泥质黏土层中,为典型的上海地区软土层。地层中的灰色淤泥质土具有高含水量、高压缩性、低强度等特点,易出现突发涌水流砂事故。

(3) 开挖断面大、跨度长。待建车站断面总宽度达 23.7 m,总高度达 12.5 m,若在施工中处理不当,易引发塌方、冒顶等事故。

2.2 施工方案比选

车站施工方案的选择需要综合考虑安全、经济、工期等指标。在确保施工安全的前提下,从工期、设备、材料等方面综合考虑经济合理性,尽量满足施工便利以及缩短工期。因此,从经济、施工风险、技术、交通影响、工期等方面对明挖顺作法、管幕+冻结暗挖法、冻结暗挖法这 3 种方案进行比选,详见表 1。除了要分析上述 3 种方案本身的造价和施工因素外,还要考虑对商业活动和地面交通的影响,以及由此而波及的对整个城市的经济活动、市政建设和财政收入等因素的影响。

表 1 江浦路站施工方案比选

比较内容	A 方案(明挖顺作法)	B 方案(管幕+冻结暗挖法)	C 方案(冻结暗挖法)	比较结论
造价/亿元	1.30	1.00	0.83	C 方案最优
技术可行性	工艺成熟	工艺较成熟	工艺成熟、方便	C 方案最优
对交通的影响	占用道路	不占用道路	不占用道路	B、C 方案都可
工期/月	23	17	14	C 方案最优
施工风险	最低	较低	较低	A 方案稍优
综合比选采用方案				C 方案

该车站原计划采用明挖顺作方案。明挖法具有施工作业面多、保护主体结构工程质量等特点,但对地面环境影响较大,在饱和的软土地层中,深基坑开挖引起的地面沉降较难控制。由表 1 综合比选可知,车站施工方案选取冻结暗挖法最优。冻结暗挖法可全天候施工,施工期为 14 个月,满足工期的要求;而且,冻结暗挖法不占用道路,对交通影响小。

3 工程参考实例

上海轨道交通采用冻结暗挖的类似工程案例有 4 号线上海体育场站零距离穿越 1 号线体育馆站。如图 2 所示,上海轨道交通 4 号线上海体育场站施工段与已运营的轨道交通 1 号线上海体育馆站由东向西斜交约 78°。穿越段结构由相邻的上行线隧道、下行线隧道和换乘通道 3 部分组成。穿越段结构横截面尺寸(高×宽)都为 5.74 m×21.5 m。穿越段顶面紧贴 1 号线车站站底板,穿越段结构顶部绝对标高为-10.08 m,底板底标高为-15.82 m,地面绝对标高为+4.19 m,穿越段总长度约 22.6 m。穿越段东端与 4 号线上海体育场站相连,西端为 4 号线区间盾构隧道。

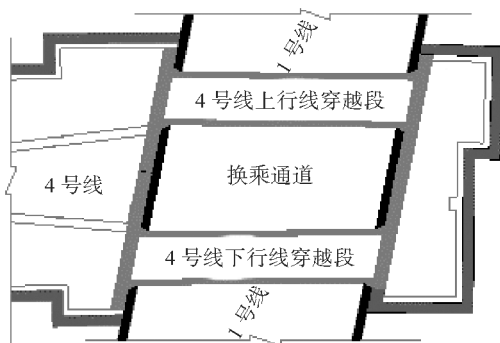


图 2 上海轨道交通 4 号线上海体育场站穿越段平剖面

3.1 冻结设计

冻结孔布置见图 3, 冻结壁和冻结孔设计参数见表 2。

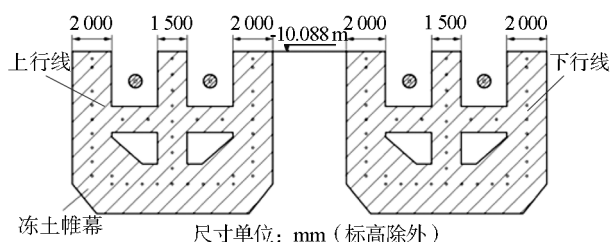


图 3 穿越段冻结孔布置图

3.2 工程效果

通过对穿越段施工全过程的监测,在钻孔、冻

表2 穿越段冻结壁设计参数

序号	参数名称	主侧墙	底板	中间竖隔墙	中间横隔墙	防坍冻土锚
1	冻结长度/m	22.6	22.6	21.8	21.8	21.8
2	冻土帷幕设计厚度/m	2.0	2.5	1.5	1.3	1.5
3	冻土帷幕平均温度/℃	-9 ~ -10	-12	-8	-7	
4	冻土与结构冻结界面宽度/m	1.0	1.0			
5	冻土与结构冻结界面温度/℃	-5	-5			
6	积极冻结时间/d	45	75	25	20	

结、开挖与融沉注浆的各个阶段,1号线轨道的竖向位移为 $-0.5 \sim 2.8$ mm,完全满足轨道交通运营线路的沉降控制要求。

4 江浦路站车站冻结方案

4.1 冻土帷幕设计

江浦路站为矩形对接结构,因此冻结壁整体呈矩形布置。内侧根据开挖分区划分,设置“井”字形冻结壁(见图4),左右两侧及底部冻结壁厚度为3.0 m,横向冻结壁厚度从上之下依次为1.0 m、1.0 m、1.6 m,将冻结区分为9个独立部分。

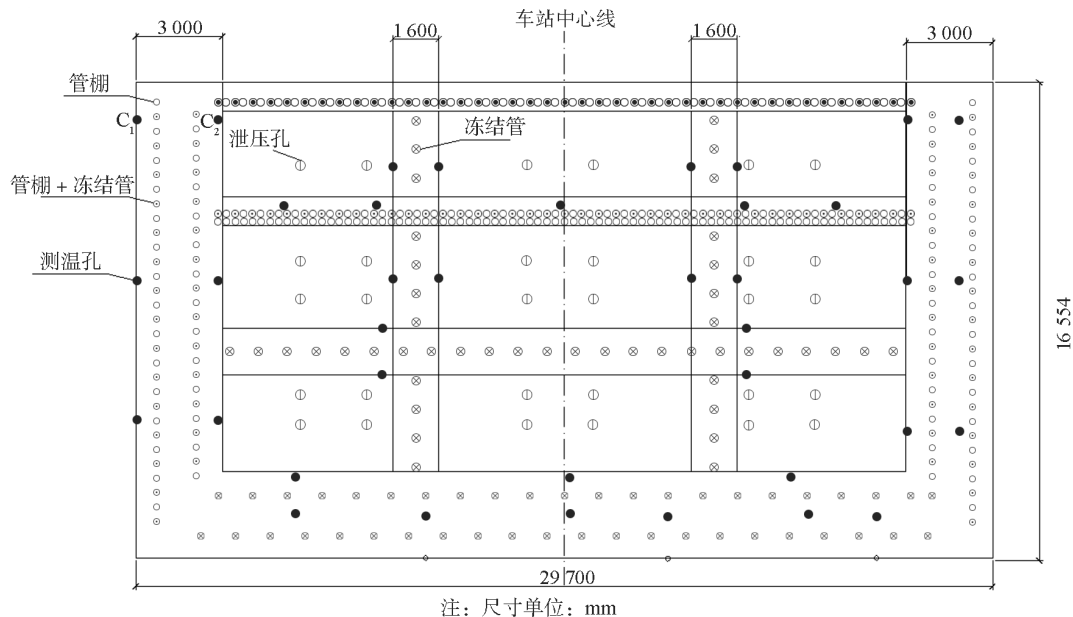


图4 江浦路站冻结孔位布置图

4.2 冻结参数设计

本工程管棚管规格采用 $\phi 273$ mm \times 10 mm 无缝钢管,横排和竖排管棚孔间距分别为300 mm、500 mm。冻结孔采用两种布孔方式:一种为独立冻结孔,冻结孔采用 $\phi 89$ mm \times 8 mm 冻结管;另一种为管棚内下放冻结管,并在管棚管和冻结管之间用水泥砂浆充填。根据位置不同,采用冻结管的规格分别为 $\phi 57$ mm \times 4 mm、 $\phi 89$ mm \times 5 mm。此外,为了监测冻结壁发展状况以及控制内部冻胀压力,分别布置了测温孔和泄压孔。具体参数如表3所示,孔位布置如图4所示。

4.3 冻胀控制方案

综上所述,本冻结工程现场施工条件较差、风险较高。要实现车站冻结工程的顺利施工,需要采取冻

表3 江浦路站盐水冻结主要参数表

序号	名称	参数
1	冻结壁设计厚度/m	1 ~ 3
2	冻结壁平均温度/℃	-10
3	积极冻结时间/d	45
4	冻结孔个数/个	238
5	管棚孔个数/个	295
6	最低盐水温度/℃	-28 ~ -30
7	单孔盐水流量/(m^3/h)	5 ~ 7
8	管棚管规格	$\phi 273$ mm \times 10 mm
9	冻结管规格	$\phi 89$ mm \times 8, $\phi 89$ mm \times 5, $\phi 57$ mm \times 4 mm
10	测温孔/(个/m)	43

注:积极冻结时间为分区冻结的单段积极冻结时间;冻结管为低碳钢无缝钢管

胀控制措施以减小土体冻胀对周边环境的影响。具体措施如下:①路面裂缝处理(包括路面原有裂缝、

冻结期间冻胀裂缝)。采用热沥青灌缝和宽 40 cm 的抗裂贴,在地表路面摊铺,增加防水面,阻止水分下渗。② 管棚抗冻胀。管棚嵌入 8 号线墙体 10 cm,形成超静定梁结构,以抵抗下部冻结带来的冻胀影响。③ 泄压孔泄压。在图 4 中 9 个封闭冻结区域内设置泄压孔,进行物理取土泄压。

5 冻结施工方案数值分析

5.1 几何模型与边界条件

依据初步冻结设计方案,温度场数值分析采用有限元软件 ANSYS 进行三维建模。车站横断面方向为 x 、 y 方向,车站纵向为 z 方向;车站计算模型沿 x 、 y 、 z 方向上尺寸取 50.000 m \times 30.000 m \times 10.308

m。温度场分析采用具有 10 节点的 Solid 90 单元,结构分析采用与之对应的 Solid 185 单元。为提高计算精度,对车站周围的土体进行网格加密。

模型边界条件:由于土体初始温度为 18 ~ 22 $^{\circ}\text{C}$,因此假定初始地温为 20 $^{\circ}\text{C}$;由冻结温度场控制方程中冻结管边界条件可知,冻结管壁温度为盐水温度;在冻胀位移计算过程中,模型两侧边界限定水平位移,底部边界限定水平及竖直位移,前后侧边界限定纵向位移。

5.2 计算参数

为简化计算,视车站主要位于灰色淤泥质黏土中,委托相关单位对开挖地层原状土进行了物理力学特性试验,取得了土层热学物理参数如表 4 所示。

表 4 地层温度场计算参数

状态	温度/ $^{\circ}\text{C}$	导热系数/(W/(m \cdot K))	焓/(kJ/kg)	比热容/(kJ/(kg \cdot K))	密度/(kg/m 3)	弹性模量/MPa	泊松比	膨胀系数/(m/K)
冻土	-20	1.06	0	0.78	1800	130	0.25	-0.033
	-1	1.06	1150	0.78	1800	105	0.28	-0.021
未冻土	0	0.94	3490	0.91	1800	20	0.32	-0.002
	20	0.94	4690	0.91	1800	4	0.34	0

5.3 计算结果分析

5.3.1 温度场结果分析

车站设计积极冻结期为 45 d。图 5 为冻结 45 d 时车站冻结温度场扩展分布情况,可看出,侧墙冻结壁厚度为 3.2 m,冻结壁整体平均温度达 -14.5 $^{\circ}\text{C}$ 。冻结壁满足设计值要求。

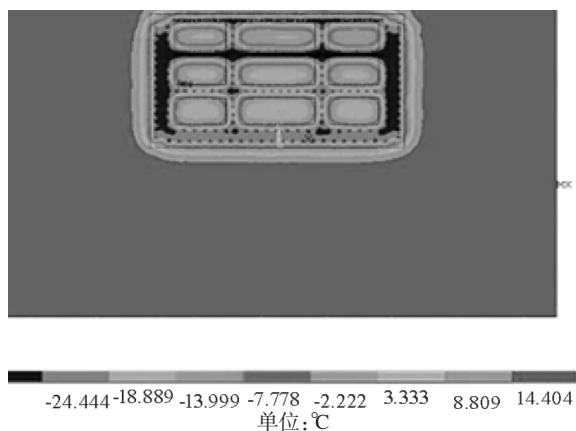


图 5 冻结 45 d 时车站的温度场云图

选取 C_1 、 C_2 两处测温点(位置见图 4)进行分析。图 6 为 C_1 、 C_2 的温降曲线。从图 6 可以看出:冻结初期,地层温降速率较快,冻结的前 20 d,2 号测温孔的温降速度约为 1 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$;第 20 ~ 30 d 时,温降速度约为 0.85 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$;第 35 ~ 45 d 时,温降速度约为 0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。这是由于:冻结管初期,土体与冻结管之间

热交换迅速,温降速率快;随着冻结时间的增加,土体与冻结管热交换逐渐趋于平衡,故温降曲线的斜率逐渐变缓直至消失;测温点 C_1 的温降规律与测温点 C_2 基本一致,但由于 C_2 测温点靠近车站内侧冻结管,受“群孔效应”影响, C_2 的温降速率明显快于 C_1 。

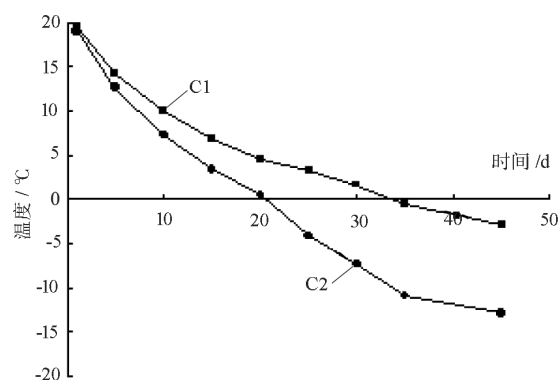


图 6 车站两个测温点的降温曲线

5.3.2 冻胀位移场结果分析

在该车站积极冻结期内,地表竖向位移分布规律如图 7 所示。车站积极冻结过程中,车站上方土层产生了较大的垂直隆起位移,且因冻结壁随冻结时间逐步扩展,车站上方土层隆起位移也逐渐增大。车站中心轴线处地表隆起位移在任意冻结时刻都较大,冻结 45 d 时的最大隆起位移值为 9 mm;车站上方土层隆起位移与距车站中心线水平距离呈负相

关,距离车站中心线水平越远,车站上方的土层隆起位移越小。

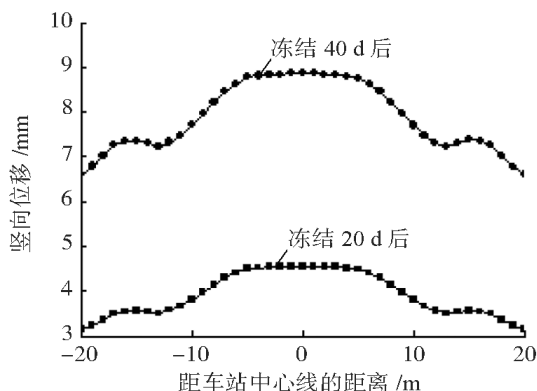


图7 车站地表竖向位移分布规律

在无冻胀控制措施的情况下,地表冻胀位移较大。因此,考虑采用大体积时空错峰冻结和全方位,高压喷射法(MJS),对冻结开挖区域土层进行加固,改良土体性能以控制地层冻胀。

(1) 错峰冻结控制冻胀:如图8所示,错峰冻结前期(20 d时),地表冻胀位移明显减小,竖向最大位移仅为 2.5 mm。随着冻结时间增长,地表位移逐渐增大,45 d时的竖向最大位移达 8.3 mm,与初始方案相比地表位移减少 0.7 mm。

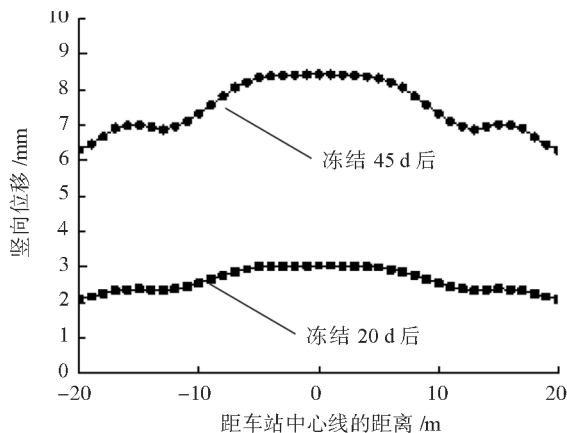


图8 错峰冻结时车站地表竖向位移分布

(2) 土性改良控制冻胀:如图9所示,采用 MJS 加固土体后,改善了土体性质,降低了土体的冻胀率,冻结 20 d 时竖向最大位移为 3 mm,45 d 时竖向最大位移达 6.5 mm,与初始方案相比地表位移减少了 2.5 mm。可见,冻结法施工前采用 MJS 加固土层,对控制地层冻胀具有显著效果。

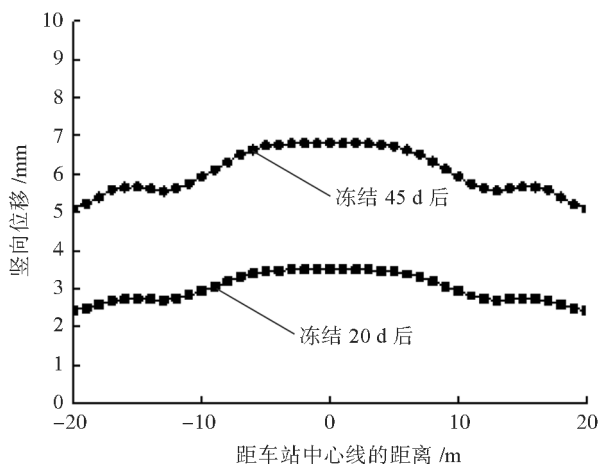


图9 MJS 加固时车站地表竖向位移分布

据地质条件、周边环境等因素提出了 3 种施工方案,经方案比选,最终选择“冻结+暗挖”法施工方案。但大体量冻结工程会对地表环境产生巨大的施工风险。因此,结合类似的工程实践经验,提出了相应冻结设计,并根据有限元分析得出车站冻结温度场扩展规律,确认方案可行;在此基础上,根据有限元分析可知,采用 MJS 加固土层,以改良土体性能,可有效地控制地层冻胀对周围环境的影响。

参考文献

- [1] 李方政,夏明萍.基于指数积分函数的人工冻土温度场解析研究[J].东南大学学报(自然科学版),2004(4):469.
- [2] 崔灏,李栋伟.水平冻结法施工温度场数值模拟与分析[J].低温建筑技术,2009,31(2):98.
- [3] 李方政.市政冻结技术的应用与展望[J].建井技术,2017,38(4):55.
- [4] 王顺廷.地铁车站出入口侧墙冻胀变形数值分析[D].北京:北京交通大学,2017.
- [5] 程桦,姚直书,张经双,等.人工水平冻结法施工隧道冻胀与融沉效应模型试验研究[J].土木工程学报,2007(10):80.
- [6] 周太全,华渊,吕宝华.某地铁区间隧道冻结施工冻胀效应随机预测分析[J].冰川冻土,2009,31(1):119.
- [7] 石荣剑,陈斌,岳丰田,等.盾构地中对接冻结加固模型试验(II)——冻结过程中地层的冻胀效应研究[J].岩土力学,2017,38(9):2639.
- [8] 崔灏,汪仁和.人工冻结黏性土的冻胀特性研究[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2004(增刊1):44.
- [9] 崔灏.土体冻胀环境下PVC冻结管可行性数值模拟分析[J].河南建材,2013(3):45.
- [10] 商厚胜.浅覆土人工冻结的冻胀融沉规律研究[D].北京:中国矿业大学,2015.

(收稿日期:2019-02-20)

6 结语

基于上海轨道交通 18 号线江浦路车站工程,根