

人工冻土冻胀引发地面变形规律及影响范围探究

王磊^{1,2,3}

(1. 煤炭科学研究总院, 100013, 北京; 2. 北京中煤矿山工程有限公司, 100013, 北京;
3. 中国铁路工程集团有限公司, 100055, 北京//副研究员)

摘要 采用随机介质理论和模型试验方法, 基于现场测试数据和文献发表数据, 分析了人工冻土冻胀引发地面变形规律和冻胀影响范围。结果表明: ① 随机介质理论计算结果表明人工冻土冻胀引发地面变形曲线是一条高斯型二重积分曲线; ② 物理模型试验得出地面抬升曲线规律与高斯分布拟合度较高, 试验地面抬升曲线的高斯分布拟合系数为 0.977 47, 工程实测数据的高斯分布拟合系数为 0.949 32 ~ 0.995 53, 对文献数据拟合得出拟合系数位于 0.954 41 ~ 0.983 44; ③ 冻结引发地面变形范围为 8 ~ 10 倍冻胀丘宽度。冻结壁为对称结构或拟对称结构时, 冻胀引发地面变形曲线可以采用高斯分布进行拟合。该结论可以为人工冻土冻胀引发上部地面变形量计算及影响范围提供设计参考。

关键词 人工冻结法; 软土地层; 冻胀; 地面变形; 冻胀影响范围

中图分类号 TU472.9

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.03.017

Law of Ground Deformation Caused by Artificial Frozen Soil Frost Heave and the Influence Range

WANG Lei

Abstract By adopting the random medium theory and model test method, and based on measured data and literature published data, the law of ground deformation caused by frost heave and the influence range are analyzed. The results show that: (1) The curve of ground deformation caused by artificial frozen soil frost heave is a Gaussian double integral curve according to the calculation of the stochastic medium theory. (2) The physics model test shows that the law of ground heave curve has a high fitting degree with Gaussian distribution, and the experimental fitting coefficient of the ground heave curve and the Gaussian distribution is 0.977 47. The Gaussian distribution fitting coefficient of the engineering measured data is in 0.949 32 ~ 0.995 53, and the fitting coefficient from literature data is in 0.954 41 ~ 0.983 44; (3) The range of ground de-

formation caused by freezing is 8 ~ 10 times the width of the frost heave mound. The ground deformation curve caused by frost heave can be fitted and calculated by using Gaussian distribution when the frozen wall presents a symmetric or quasi-symmetric structure. The results can provide design reference for the calculation and influence range of the ground deformation caused by artificial frozen soil frost heave.

Key words artificial ground freezing method; soft soil stratum; ground deformation; influence range of frost heave

Author's address China Coal Research Institute, 100013, Beijing, China

0 引言

冻结法是利用人工制冷技术将土体中的水冻结成冰, 形成一个坚固、封闭的冻土帷幕, 在其保护下进行开挖构筑。冻土帷幕形成时, 冻结区域土体中的原位水分和迁移水分冻结相变, 冻土体积增大, 对周围地层产生扰动, 引起上覆结构和地面出现不均匀变形。富水软土地层冻结施工中, 人工冻土形成速度快、体量大, 冻胀对地层扰动较大^[1]。采用冻结法施工的城市地下工程多位于城市中心地带, 隧道上部存在道路、密集管线、大厦等结构, 冻胀对地面安全影响问题尤为突出。实际施工过程中, 如不了解地面冻胀变形规律, 将导致道路抬升、管线弯折和结构开裂等问题, 造成不良社会影响和较大的经济损失(见图1)。

人工冻结过程中需要有针对性地对地面变形量进行预测, 进而对道路、管线及建筑等结构进行保护, 达到安全冻结、降低施工风险的目的。目前, 一些学者对人工冻土冻胀引发上部地面变形规律进行了研究。文献[2]对苏州市轨道交通2号延伸线某联络通道开展了地面变形实测研究, 得出冻胀

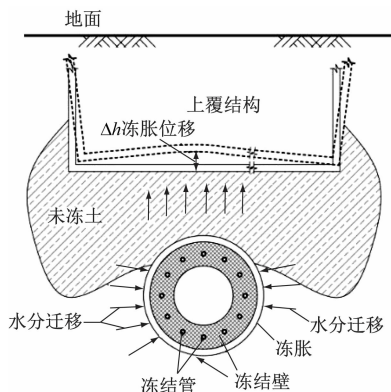


图1 人工冻土冻胀引起上覆结构和地面变形

Fig. 1 Covering structure and ground deformation caused by artificial frozen soil frost heave

引起的地面沉降槽曲线可以看作拟正态分布,其认为冻结影响范围为6倍冻胀沉降槽宽度。文献[3]对上海轨道交通2号线杨高路站(后更名为上海科技馆站)—中央公园站(后更名为世纪公园站)区间和江苏路站—中山公园站区间的2个联络通道冻胀抬升数据进行了研究,认为冻胀引发地面变形 Δh 与计算点距离联络通道中心线的水平距离 L 的关系可以用抛物线来表达。文献[4]研究得出有无建筑物影响时地面竖向位移近似呈高斯分布。文献[5]基于随机介质理论,得出地面抬升曲线符合高斯分布。文献[6]基于上海体育场站冻结工程,研究得出无底板约束时土体上表面自由冻胀量曲线符合正态分布。

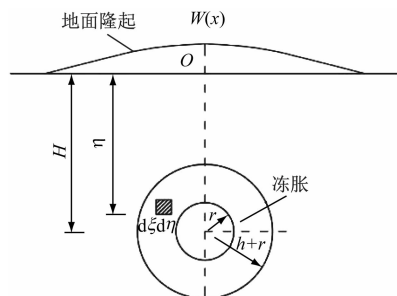
综上所述,诸多学者对冻胀引发上覆结构和地面变形规律存在多种观点,工程实测及试验研究不系统,冻胀引发上覆结构和地面变形是一种复杂的变形过程,形成冻结壁形状受土性、含水率、冻结温度等诸多因素影响,上覆结构和地面变形规律及影响范围仍需研究,为简化计算对计算模型提出以下基本假设:①仅考虑冻结管对周围土体的热传导效应;②人工冻结过程中,土体模型中水分以液态水形式迁移,气态水、强结合水、弱结合水及毛细水等迁移量忽略不计;③冻结过程中的温度场和水分场在时间和空间上的分布是连续的,冻结所处的土层性质相同,冻土形成是均匀的。

基于以上假设,采用随机介质理论和模型试验方法,分析现场实测数据和文献发表数据,对人工冻土冻胀引发地面变形规律及影响范围进行研究。

1 冻胀引发地面变形理论研究

采用随机介质理论求解地面变形曲线符合何

种数学分布,该理论基于统计学观点将土体颗粒视为一种“随机介质”,将开挖或冻结下部土体引起的上覆地层抬升与下沉视为一个随机过程。建立冻胀引起上覆地层抬升的计算模型,见图2。将模型简化为二维结构,取冻结壁中的一个微元体,其面积为 $d\xi d\eta$,微元体体积膨胀引发周围土体变形,变形范围定义为 $r(\eta)$ 。



注: h ——冻结壁厚度; r ——冻结壁内径; $W(x)$ ——地表抬升值; η ——埋深; H ——冻结壁某点的埋深。

图2 冻胀引发上覆地层抬升的计算模型

Fig. 2 Calculation model of ground uplifting caused by frost heave

由随机介质理论可知,冻结壁微元体 $d\xi d\eta$ 膨胀引起的地面某点上升值 $W_e(x)$ 为^[9]:

$$W_e(x) = -\frac{1}{r(\eta)} \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(\eta)} x^2\right] d\xi d\eta \quad (1)$$

式中:

x ——地面距离冻结中心的距离;

ξ ——冻结壁厚度;

β ——地层影响角;

$r(\eta)$ ——土体影响范围,负号表示地面上的升。

其中, $r(\eta)$ 的大小取决于 η ,引入地层影响角的这一参数, β 为地下抬升引发上部地面变形范围角,见图3。

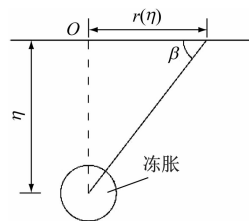


图3 地层影响角与地层影响范围

Fig. 3 Stratum influence angle and stratum influence range

由图3可得出:

$$r(\eta) = \frac{\eta}{\tan \beta} \quad (2)$$

冻结过程中,下部土体中的水分产生相变引发体积膨胀,对式(1)进行积分,积分范围为冻结壁面积 Ω 。

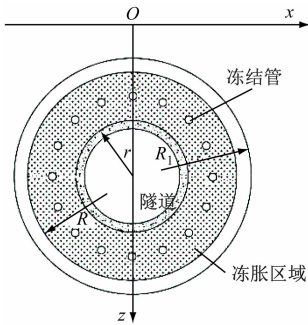
$$W_1(x) = - \iint_{\Omega} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[- \frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta \quad (3)$$

式中:

$W_1(x)$ ——距离冻结中心线 x 距离的冻结抬升值;

Ω ——冻结壁面积,由实际施工过程中的冻结管位置、冻结时间、盐水温度、地层条件等因素决定。

市政冻结工程中,施工多采用水平冻结方式,设计冻结壁为环形,冻结管布置见图 4。



注: R ——冻结壁实际外半径; R_1 ——原土体半径; x 轴——隧道水平方向; z 轴——深度方向。

图 4 冻结管布置及冻结壁膨胀示意

Fig. 4 Diagram of freezing pipe layout and frozen wall expansion

冻结时,各冻结管的外冻结锋面相互交圈,且外冻结锋面很快趋于平滑,在此过程中土体中的原位水分和迁移水分在温度梯度作用下相变,体积膨胀。为简化计算,基于计算假设认为在冻结过程中冻结壁半径从 R_1 区域膨胀至实际外半径 R 处。冻结壁中心距地面深度为 H ,则地面各点的上升值为:

$$\begin{aligned} W_1(x) &= - \int_a^b \int_c^d \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[- \frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta + \\ &\int_e^f \int_g^h \frac{\tan \beta}{\eta} \exp \left[- \frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \xi)^2 \right] d\xi d\eta = \\ &- \int_a^b \int_c^d w(x, \xi, \eta) d\xi d\eta + \int_e^f \int_g^h w(x, \xi, \eta) d\xi d\eta \quad (4) \end{aligned}$$

式中:

$w(x, \xi, \eta)$ ——土体中某点的抬升值。

其中: $a = H - R_1$; $b = H + R_1$; $c = -\sqrt{R_1^2 - (H - \eta)^2}$; $d = -c$; $e = H - R$; $f = H + R$; $g =$

$-\sqrt{R_1^2 - (H - \eta)^2}$ $h = -g$; $R_1 = r + \frac{R - r}{1 - \varepsilon_1}$, ε_1 为冻土环的实际体积与原位土体体积的比值。

由式(4)可知, $W_1(x)$ 的数值计算符合叠加法,地面变形形状是一条对称轴位于冻结中心轴的丘状曲线,是一条高斯型二重积分曲线,表明冻胀引发地面变形符合高斯分布。

2 地面变形物理模型试验

采用模型试验的方法对冻胀引发上部土体变形抬升规律进行研究,试验基于相似理论进行设计。以上海轨道交通 18 号线江浦路车站冻结暗挖工程为工程背景,工程覆土厚度约 2.076 m。冻结施工核心区域主要地层为⑤11 灰色黏土。试验土体含水率为 25%,参数与工程地层保持一致,装填过程中分层压实。设定几何缩比 $n = 1/500$,试验箱尺寸为 700 mm (长) \times 100 mm (宽) \times 900 mm (高),箱体一侧采用 20 mm 透明亚克力板用以观察土体变形,四周为铁板,内部粘贴透明胶带并涂抹润滑油以减小土体上方摩擦力。冻结管采用 $\phi 6$ mm 无缝钢管,材质与工程中使用的冻结管相同,水平插入试验土体,管内循环 -28°C 的低温酒精,冻结管埋深为 110 mm。土箱下部设补水孔,铺设滤纸防止土颗粒穿透,使用白色软管连接水箱以模拟地下水位高度。受试验条件限制无法完全按照密度等效,试验无法完全模拟实际工程,因此基于试验可行性,土层上覆 50 kg 钢珠,折合压力为 16 kPa,见图 5 所示。

为测量上部土体变形,使用 100 目白色石英粉放置于亚克力板后土层,以形成可见的刻度线。在冻结管外侧 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm 位置布置 PT1000 测温传感器监测冻结壁扩展。冻结 3 d 后管路外侧形成约 30 mm 的冻结壁。在刻度板上根据石英砂的轨迹描画土体变形曲线,如图 6 所示。

采用高扫描仪扫描网格卡,将图像转化为数字,提取抬升数据绘制曲线。采用 Origin 自带的 Gauss Amp 函数对抬升数据进行回归。拟合表达式为^[5]:

$$s = y_0 + A \exp \left[- \frac{(y - y_c)^2}{2i^2} \right] = s_{\max} \exp \left[- \frac{(y - y_c)^2}{2i^2} \right] \quad (5)$$

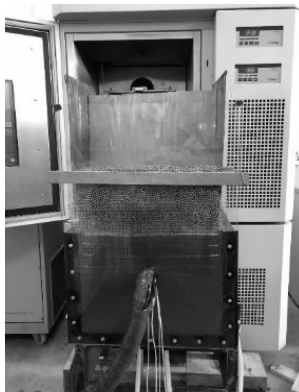
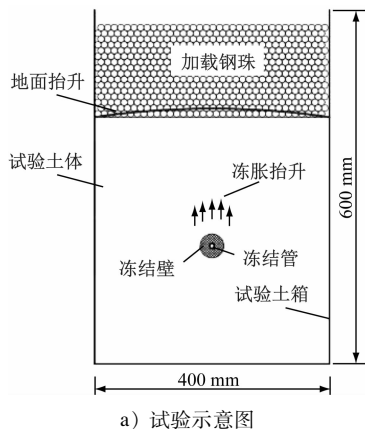


图5 试验土箱及土体分层布置

Fig. 5 Test soil box and soil layered arrangement

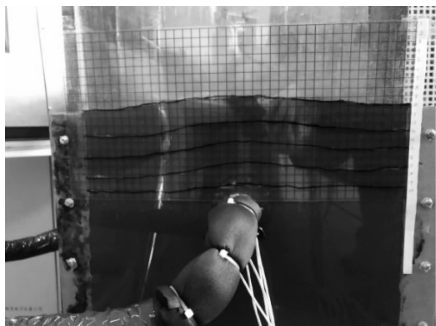


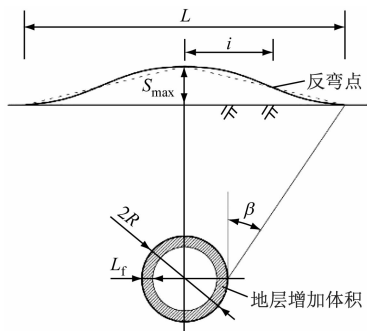
图6 冻结完成后土体变形

Fig. 6 Soil deformation after freezing completion

式中:

- s ——地面冻胀量;
 - y_0 ——计算点距隧道中心的偏移量;
 - S_{\max} ——地面最大冻胀量;
 - y ——计算点距隧道中心线的距离;
 - i ——冻胀丘宽度,即冻胀抬升曲线拐点到冻结壁轴线的长度;
 - y_c ——曲线中心偏移量。
- 冻胀过程中引起的地面位移见图7,地面抬升

量及拟合曲线见图8所示。



注: L_f ——冻结壁增加厚度。

图7 冻胀过程中引起的地面位移

Fig. 7 Diagram of ground displacement caused by frost heaving process

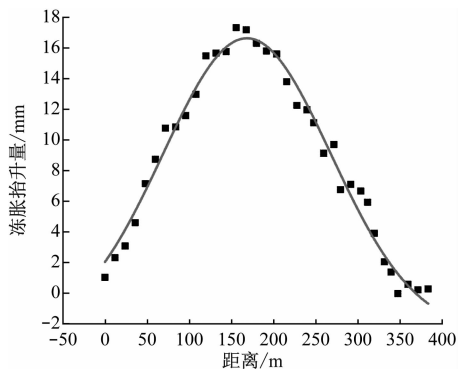


图8 地面抬升数据与拟合曲线

Fig. 8 Ground uplifting data and fitting curve

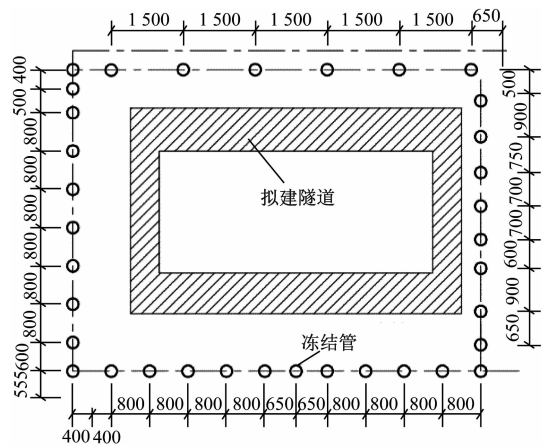
由图8可知,地面变形曲线与高斯分布拟合系数为0.977 47,冻胀丘宽度 $i=99.68$ mm,冻胀扩展系数 $n_i=4.4$ 。表明地面抬升曲线与高斯分布拟合度较高,地面变形符合高斯分布。

3 地面变形数据拟合

3.1 实际施工工程数据

上海轨道交通13号线6标一期工程大渡河站3号出入口通道结构冻结工程位于上海市区主干道金沙江路下方,为地铁车站出入口冻结暗挖工程,其暗挖长度为11.975 m,净宽为5.700 m,净高为2.550 m。结构开挖宽度为7.500 m,开挖高度为5.150 m,出入口结构底板距离地面9.805 m。冻结区域所处地层为②3-1灰色砂质粉土层位,该层位含水量高、强度低,且存在高冻胀性。该出入口通道结构及冻结管布置见图9。

该工程设计冻结壁厚度为1.8 m,冻结管位置见图9所示,冻结壁形状及拟建结构尺寸为矩形,实

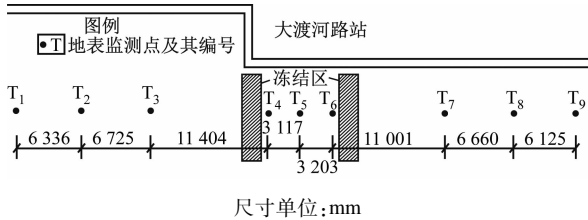


尺寸单位:mm

图9 3号出入口通道结构及冻结管布置示意

Fig. 9 Diagram of No. 3 entrance and exit passageway structure and freezing pipe layout

测冻结壁的厚度约为2.4 m。为精确测量地面变形,在隧道上方地面安装了德国进口GHD型静力水准系统泵和基准点传感器,依据上海地区测量规程^[7-8]布设测点,位置见图10。



尺寸单位:mm

图10 3号出入口冻结暗挖施工监测点位

Fig. 10 Monitoring points of freezing underground excavation at No. 3 entrance and exit

提取自动化监测数据进行高斯拟合,归纳总结冻胀影响范围。取积极冻结不同时间地面中部监测点T1—T9数据进行分析,见图11所示。

由图11可知,2020年的11月26日、11月29日、12月2日、12月5日及12月8日的抬升拟合系数分别为0.995 53、0.982 86、0.969 72、0.949 32、0.964 12,拟合度极高。地面最大抬升量为10.5 mm,拟合得出单侧冻结影响地面宽度为57.67 m,冻胀丘宽度*i*=13.73 m,冻胀扩展范围系数*n_i*=4.2 *i*,即单侧冻结影响范围为冻胀丘宽度的4.2倍。

3.2 已发表文献数据

为了更准确的描述冻胀引发地面抬升曲线的形状,对本文参考文献中的数据进行拟合回归:文献^[2]以苏州某联络通道工程进行了实测研究;文

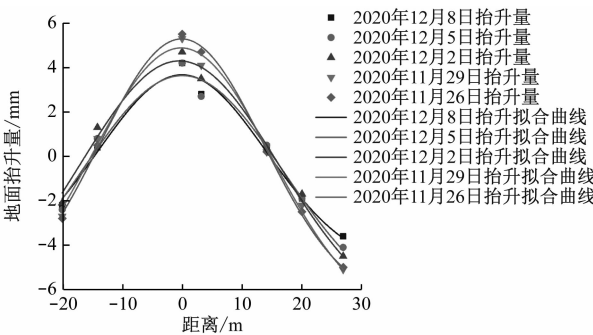


图11 不同时间地面抬升量与拟合曲线

Fig. 11 Ground uplifting and fitting curve on different dates

献^[3]对上海轨道交通2号线杨高路站(后更名为上海科技馆站)—中央公园站(后更名为世纪公园站)区间和江苏路站—中山公园站区间联络通道冻结工程的抬升数据进行了监测;文献^[9]对广州地铁3号线某折返线隧道、文献^[10]对常州地铁某平面斜交联络通道工程地面冻胀抬升规律进行了研究。

以上工程中地层参数、冻结方案、冻结管布置形式、冻结时间等均不相同,但共同点为形成的冻结壁为对称结构或拟对称结构,对以上工程数据进行分析 and 拟合,见表1。

表1 本文参考文献工程实测拟合汇总

Tab. 1 Summary of engineering field measurement fitting with references

序号	参考文献序号	拟合系数	地面最大抬升量/mm	冻胀丘宽度/m	冻胀扩展系数
1	6	0.967 56	7.345	10.82	4.2
2	6	0.975 44	7.345	10.82	4.2
3	7	0.983 44	25.550	4.88	4.3
4	7	0.975 12	25.860	4.81	4.4
5	7	0.979 87	11.080	4.23	4.3
6	7	0.983 16	15.950	4.95	4.2
7	7	0.957 79	6.980	4.33	4.2
8	13	0.954 41	9.750	4.49	4.2
9	14	0.979 41	380.710	11.19	4.9

9组数据得出的高斯拟合系数处于0.954 41~0.983 44,拟合度较高,可以认为冻胀引发地面变形符合高斯分布。冻胀引起的单侧地面变形扩展范围在4.1 *i*~4.9 *i*,即引发上部地层变形范围为8 *i*~10 *i*。

4 结语

采用随机介质理论、模型试验、工程实测和文献数据归纳的方法对人工冻胀引发地面变形规律进行了探索性研究。主要得出以下结论:

1) 基于随机介质理论,对冻胀引发地面变形规

律进行了研究,得出地面变形曲线为一条高斯型二重积分曲线,表明冻胀引发地面变形符合高斯分布。

2) 模型试验得出地面抬升曲线与高斯分布拟合系数为 0.977 47,可以认为地面变形曲线符合高斯分布。

3) 对上海轨道交通 13 号线 6 标一期工程大渡河站 3 号出入口结构冻结工程的地面变形数据进行自动化监测,对地面抬升数据进行高斯拟合得出拟合系数为 0.949 32 ~ 0.995 53,表明冻结引发上覆地面变形符合高斯分布。

4) 分析 9 组文献中冻结壁为对称结构或拟对称结构的冻结工程冻胀引发地面变形数据,得出拟合系数处于 0.954 41 ~ 0.983 44,进一步验证冻胀引发地面变形符合高斯分布。

5) 由工程自动监测数据、文献工程实测数据、试验数据得出冻结引发地面变形范围为 $8i \sim 10i$ 。

人工冻结形成冻结壁为对称结构或拟对称结构时,冻胀引发地面变形曲线可以采用高斯分布进行拟合。

实际工程中,冻胀规律显现和冻胀计算问题长期困扰着冻结设计人员及施工人员,现有方法多采用经验方法预估冻胀显现规律,准确掌握冻胀规律具有较强的迫切性。

研究得出的冻胀引发上部地表变形符合高斯分布这一结论,为冻胀引发上覆地表变形计算借鉴 Peck 公式思路提供了使用前提,但需注意的是:Peck 公式是一个经验公式,土体的冻胀与沉降存在机理上的不同,不能直接套用 Peck 公式。

除了冻胀效应外,融沉也是影响冻结施工安全的重要因素。本文未考虑人工冻结过程中出现的融沉效应,因为在冻结施工中多采用跟踪注浆的方法减小融沉造成的上覆地表及结构沉降,融沉对周围环境造成的影响具有较强的可控性,因此本文暂未考虑融沉对上覆地层的影响。

参考文献

[1] 胡双平,叶万军,张晓峰,等.大尺寸富水卵砾石样冻结状态下的力学特性[J].地下空间与工程学报,2020,16(2):406.
HU Shuangping, YE Wanjun, ZHANG Xiaofeng, et al. Mechanical properties of large-size water-rich gravel samples in frozen state[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(2): 406.

[2] 杨平,陈瑾,张尚贵,等.软弱地层联络通道冻结法施工温度及位移场全程实测研究[J].岩土工程学报,2017,39

(12): 2226.

YANG Ping, CHEN Jin, ZHANG Shanggui, et al. Whole range monitoring for temperature and displacement fields of cross passage in soft soils by AGF[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(12): 2226.

[3] 陈湘生.地层冻结工法理论与实践[M].北京:煤炭工业出版社,2007.

CHEN Xiangsheng. Theoretical research and practice of stratum freezing method[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2007.

[4] 范方方,李健.隧道冻结过程与邻近建筑物相互影响分析[J].现代隧道技术,2018,55(增刊2):1157.

FAN Fangfang, LI Jian. Analysis of the effects of the tunnel frozen construction process on adjacent buildings[J]. Modern Tunneling Technology, 2018, 55(S2): 1157.

[5] 阳军生,刘宝琛.城市隧道施工引起的地面移动及变形[M].北京:中国铁道出版社,2002.

YANG Junsheng, LIU Baochen. Ground movement and deformation caused by urban tunnel construction[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.

[6] 李方政.冻土帷幕的冻胀和蠕变效应与结构相互作用理论及应用研究[D].南京:东南大学,2005.

LI Fangzheng. Study on the theory and application of interaction between frost heave and creep effects of frozen soil curtain and structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.

[7] 上海市市政工程施工管理局.上海地铁基坑工程施工规程:SZ-08—2000[S].上海:上海市市政工程施工管理局,2000.

Shanghai Municipal Engineering Management Bureau. Specification for excavation in Shanghai Metro construction: SZ-08—2000[S]. Shanghai: Shanghai Municipal Engineering Management Bureau, 2000.

[8] 上海市住房和城乡建设管理委员会.旁通道冻结法技术规范:DG/TJ 08-902—2006[S].上海:上海市住房和城乡建设管理委员会,2006.

Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development. Technical code for crosspassage freezing method: DG/TJ 08-902—2006[S]. Shanghai: Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development, 2006.

[9] 马俊,胡导云,杨平.平面斜交联络通道水平冻结及实测分析[J].隧道建设(中英文),2019,39(12):1965.

MA Jun, HU Daoyun, YANG Ping. Horizontal freezing and measurement analysis of plane oblique connection gallery[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(12): 1965.

[10] 董建华,吴晓磊,师利君,等.水平冻结施工浅埋隧道对邻近正交路基的作用分析[J].岩石力学与工程学报,2020,39(11):2365.

DONG Jianhua, WU Xiaolei, SHI Lijun, et al. Effect of shallow tunnel construction by horizontal freezing on adjacent orthogonal subgrades[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11): 2365.

(收稿日期:2022-06-20)