

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.09.022

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

石荣剑^{1,2}, 陈 斌³, 岳丰田^{1,2}, 张 勇^{1,2}, 陆 路^{1,2}

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 宁波工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘 要: 盾构地中对接冻结加固过程中形成不规则形状的冻结体, 产生的冻胀效应会引起上部地层产生不均匀冻胀变形。为了获得冻结过程中冻胀效应对上部地层变形的影响规律, 以上海地区软土地层中盾构地中对接冻结工程为原型, 按照相似理论, 设计进行了盾构对接位置地层冻结加固的模型试验, 获得了如下结论: 冻结过程中, 冻胀引起上部地层的变形量随着冻结壁厚度的增长而线性增大, 当冻结壁发展超过测点位置后, 相应位置的地层变形不再变化。冻结产生的冻胀力对上部地层有压缩作用, 随着地层内测点埋深的增加, 地层变形量和地层平均应变都逐渐增大。当冻胀力超过土层的黏聚力后, 上部土层的滑动使地层平均应变不再增加, 地层不再被压缩, 下部地层的变形会直接传递到上部地层。研究表明, 影响冻结加固固体上部地层变形量的主要因素是冻结壁的厚度, 次要因素是地层的埋深。

关 键 词: 人工冻结; 冻胀效应; 盾构对接; 地层压缩; 模型试验

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017) 09-2639-08

Model test on freezing reinforcement for shield junction in soft stratum (Part2): Frost heave effect of soft stratum during freezing process

SHI Rong-jian^{1,2}, CHEN Bin³, YUE Feng-tian^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, LU Lu^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

3. Ningbo University of Technology, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: In general, uneven frost heave deformation was generated in upper soil strata during the freezing reinforcement process of shield junction, which was caused by the frost heave effect of the irregular frozen wall. Hence, this study was to obtain the influence law of strata deformation caused by the frost heave effect. Based on the similarity theory, a model test was carried out according to the prototype of the freezing reinforcement project of shield junction in Shanghai, and then the deformation data were analyzed. The results show that the upper strata deformation caused by the frost heave increases linearly with increasing the frozen wall thickness in the freezing process. When the development of the freezing wall exceeded the measuring point, the stratum deformation at the corresponding position no longer changed. It is found that the frost heaving force caused by the frost heave extrudes the upper strata in the freezing process, which increases both the strata deformation and its average strain with increasing the depth of measuring points. When the frost heave force exceeds the cohesion of soil, the growth of the average strain terminates due to the slide occurrence in upper soil layers. Moreover, the strata are no longer subjected to compress, and the deformation of the bottom stratum transfers directly to the upper strata. The results indicate that the frozen wall thickness is the primary factor and the formation depth is a secondary factor, which both affect the upper strata deformation.

Keywords: artificial ground freezing; frost heave deformation; shield junction; formation compress; model test

1 引 言

在富含水的软弱地层中利用土木工程方法来进

行盾构地中对接施工时, 常使用人工冻结法加固对接施工区域的地层, 在盾构交接位置形成橄榄球形的冻结帷幕, 来稳定开挖面周围地层, 并隔绝地下

收稿日期: 2015-10-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)计划(No.2012AA06A401)。

This work was supported by the National High Technology Research and Development Program of China (2012AA06A401).

第一作者简介: 石荣剑, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事地下工程冻结法等方面的教学与研究工作。E-mail: rjshicunt@163.com

水^[1]。冻结过程中地层中的水结冰产生的体积膨胀,会对冻结壁周围的地层产生冻胀效应,使地层产生冻胀变形,影响地表建筑物和地层内管线的安全^[2]。由于盾构对接施工区域一般离地表较近,冻胀效应对地表变形的影响较大,这也成为限制人工冻结法在市政工程中应用的重要因素,一直是人们关注和研究的重点。

国内外学者针对市政工程冻结法施工的冻胀效应问题,开展了一系列研究。在地层冻胀变形的预测模型方面,蔡海兵^[3]、陶德敬^[4]、周太全^[5-6]等利用随机介质理论,考虑冻结壁形成过程的特点,提出了不同阶段冻结壁冻胀变形的预测模型,可以用来预测和分析形成冻结壁过程中地层冻胀变形规律。程桦^[7]、周希圣^[8]、周晓敏^[9]、岳丰田^[10]、姜耀东^[11]等通过数值模拟或者现场实测的方法,研究了水平冻结过程中地层冻胀变形规律,分析了地层冻胀变形的主要影响因素。模型试验也是研究冻胀变形的常用方法和手段,蔡海兵^[12-13]、周希圣^[14]、岳丰田^[15]等通过模型试验研究了地铁隧道及联络通道水平冻结过程中地层位移场变化规律;程桦^[16]、周晓敏^[17]、乔京生^[18]等还利用模型试验的方法研究了不同地层条件下地铁隧道水平冻结对地表变形的影响,获得了近水平冻结过程中地层冻胀变形规律。在已有的研究中,地层冻胀变形研究多是针对地表变形的预测和评价开展的,而且分析的冻结壁形式主要是近水平冻结形成的规则形状冻结壁。

与已有的研究成果相比,盾构地中对接冻结加固形成冻结帷幕的形状不规则,冻结帷幕周围约束条件对冻胀力作用形式的影响与水平冻结时差别较大。而对于冻结过程中地层内部变形,受到模型尺寸及测点布置困难等因素影响,试验中获取的内部测点变形数据较少,很难获得一般性的地层内部变形规律。随着城市地铁隧道工程的增多,会越来越多地遇到盾构对接冻结加固的施工需求,当施工区域处于地层内管线复杂的繁华地区时,对地层内部变形的控制就显得尤为重要,而地层内部变形规律的掌握,也可以为冻胀控制措施的设计和选择提供依据。本文以上海地区某盾构对接冻结加固工程为原型,在冻结温度场研究的基础上^[19],考虑冻结壁形成过程特点,通过模型试验研究冻结过程中地层内部及地表的变形规律,利用地层平均应变参数来评价地层的压缩效果,分析不同深度地层的变形差别,其研究成果可以为盾构对接冻结加固过程中冻胀控制研究提供基础,提高冻结工程设计和施工的精细化水平,同时获取的基本参数也可以供后续相

关研究参考。

2 模型试验的设计

2.1 试验模型

试验以上海地区某盾构地中对接工程为原型,按照相似准则进行试验系统的设计^[20],罗列试验过程中应力场与位移场的影响参数,获得方程:

$$f(R, \sigma, E, \gamma, \varepsilon, \nu, \mu, H, P) = 0 \quad (1)$$

式中: R 为几何因素 (m); σ 为应力 (MPa); E 为弹性模量 (MPa); γ 为土体的密度 (kg/m^3); ε 为土体的应变; ν 为土层位移 (m); μ 为泊松比; H 为地层厚度 (m); P 为作用于冻结壁上的荷载 (MPa)。

利用因次分析法,可以确定主要的相似准则,其中力学准则为 $\pi_1 = \frac{\sigma}{E}$, $\pi_2 = \frac{P}{\gamma H}$, 常量准则为 $C_1 = \varepsilon$, $C_2 = \mu$ 。

冻结壁与土层的应力场取决于外载、冻结时产生的冻胀力以及冻结壁的冻土强度,而冻土强度的主要影响因素为温度,冻胀力的主要影响因素为温度、水分和土性,所以在外载、冻胀力和冻土强度相似条件下,保证试验初始条件和边界条件的相似,就可以实现冻结壁应力场和变形场的自模拟。由于重力相似材料较难实现热物理参数的完全相似,考虑到冻结过程中温度场分布对冻胀影响的重要性,在试验中严格保证热物理参数的相似性,通过反力架在土层表面施加面荷载,来保证地层密度的相似性满足相似准则要求。

按照几何缩比 $c_l = 6.35$ 进行试验设计,时间缩比 $c_t = c_l^2$, 温度缩比 $c_t = 1$ 。试验用两台带支撑的钢套筒来模拟盾构模型,选用实际冻结加固工程的上海⑤₃层粉质黏土作为试验土层^[19],其含水率为 35.3%,填土深度为 2.5 m。

2.2 监测传感器的布置

考虑到 2 台盾构模型的对称性,选择 2[#]盾构模型的冻结范围来进行地层变形测试,在盾构模型中心线的两侧分别布置地表和地层内部变形测点,以减少传感器之间的相互影响。按照冻结管布置和冻结壁形状的特点,在 2[#]盾构模型上部地层内部和地表分别布置 6 个测点,其中 V1~V6 为地层内部变形测点, W1~W6 为地表变形测点,如图 1 所示。土体内部位移利用测试装置导出至土体表面,使用单点位移计及数据采集设备实现试验过程位移的自动测试,位移计的测试精度为 0.01 mm,具体布置

如图 2 所示。

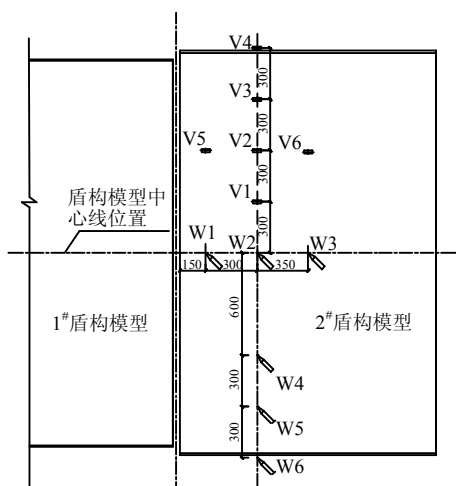


图1 地层变形测点平面布置图(单位: mm)
Fig.1 Arrangement of strata deformation measuring point (unit: mm)

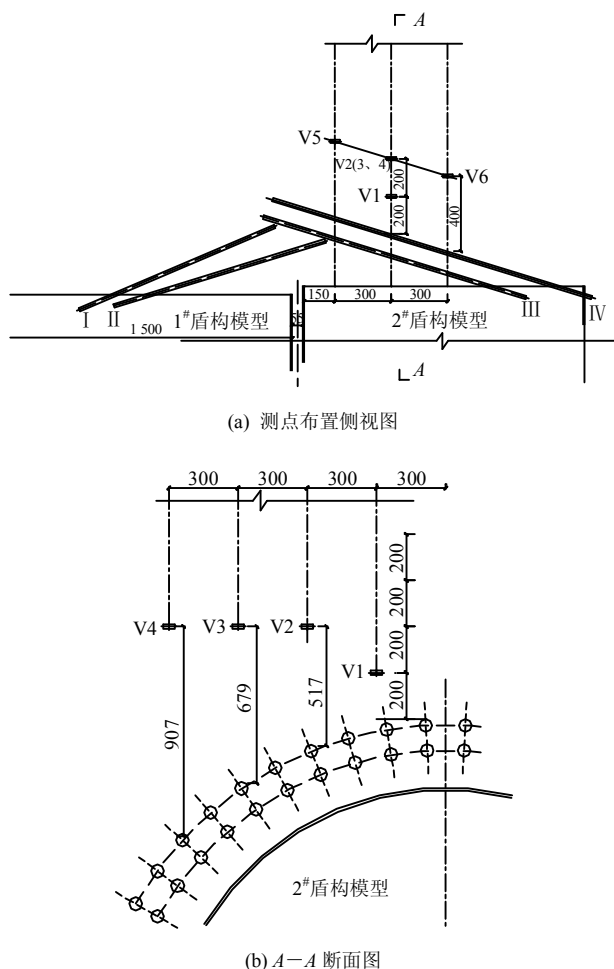


图2 地层内部位移测点布置图(单位: mm)
Fig.2 Arrangement of displacement measuring points in strata (unit: mm)

2.3 试验过程

加工完成的盾构模型及冻结管固定在土箱内

后,从施工现场取的⑤₃层粉质黏土,分层填入试验土箱,每层填筑时均压实,保证试验土层的含水率及重度与现场土层基本一致。填土完成后,打孔布置地层内部和地表变形传感器。试验前对土体进行加载固结,待土体变形稳定后,开始冻结试验,保证冻结过程中盐水的降温梯度与实际工程一致,冻结壁厚度满足要求后停止试验,试验共进行了 50 h,相当于实际工程的 84 d。

3 试验结果分析

3.1 地层内部位移的变化规律

冻结过程中, 地层内部测点的位移变化如图 3 所示。

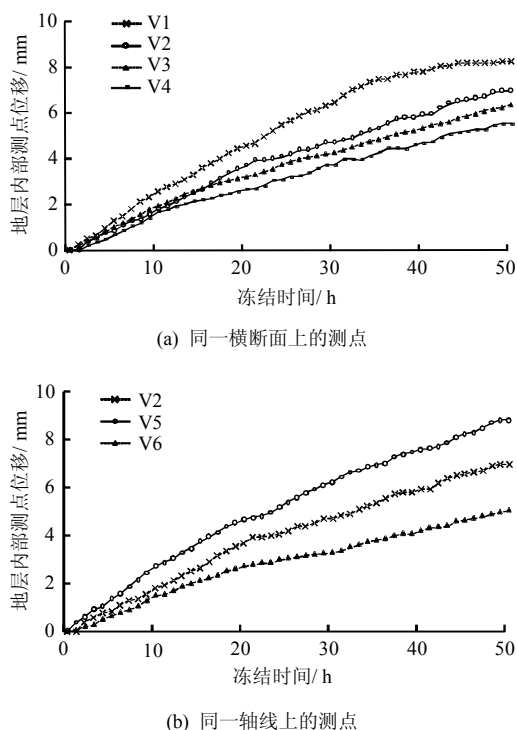


图 3 地层内部测点位移的变化曲线

Fig.3 Curves of deformation of measuring points in strata

从图可以看出,在整个冻结阶段,冻胀作用引起上部地层的变形量随时间成近线性增长,按照地层变形增长速度的差别可以将冻结过程分为 3 个阶段。①冻结开始时,距离冻结壁较近的测点(图 3 中测点 V1)受到土体热胀冷缩的作用,产生了少许沉降,且位移量较小,而其他测点基本保持稳定,未产生明显变形,这个阶段一般维持 2~3 h;②由于冻结管布置间距较小,冻结开始 3 h 后冻结壁即发展至交圈,此阶段冻结壁向内、外两侧扩展,厚度增长速度快,所以地层变形以较大梯度增加,产生的累计冻胀变形较大;③冻结 20 h 后,冻结管内

部土体全部冻实, 冻土仅向冻结壁外侧扩展, 冻结壁厚度增长速度减慢, 所以地层变形的增长速度变缓, 地层的冻胀变形一直持续到冻结结束。

比较位于盾构模型同一断面上 4 个测点, 如图 3(a)所示, 测点位移量随着埋深的增加而增大, 冻结结束时埋深最大处的测点 V1 最大位移量达到 9.02 mm, 相当于工程原型的 57.28 mm。冻结 35 h 以后, 冻土发展范围超过 V1 测点位置, 测点 V1 位于冻结壁内部, 其位移不再变化。不同埋深的测点之间位移差值随着冻结的进行逐渐增大, 即冻胀作用对测点之间的地层有持续压密作用, 使地层压缩变形量增加, 冻结结束时不同测点的位移最大相差 4.46 mm, 相当于工程原型的 28.32 mm。

V2、V5、V6 测点沿盾构模型的轴线间隔 300 mm 布置, 与冻结管的竖向距离均为 400 mm。由于沿冻结管向外的冻结壁扩展速度相同, 所以冻结过程中测点距离与冻结壁的距离始终保持一致, 而测点上部地层自重应力的差别, 与土体表面施加的面荷载相比, 其影响小得多, 因此, 影响 3 个测点位移变化的主要因素是沿冻结管向内扩展的冻结壁厚度。从图 3(b)可以看出, 冻结开始后, 3 个测点位移开始发生变化的起始时间基本相同, 不同测点位移的差值随着冻结进行逐渐增大。冻结结束时, V5 测点位移最大, 达到了 8.74 mm, 相当于工程原型的 55.49 mm, 而 V2 与 V5、V5 与 V6 测点之间的位移差值分别为 1.68、1.76 mm, 相当于工程原型的 10.67、11.18 mm, 其差值主要是由于测点下方的冻结壁厚度不同造成的。

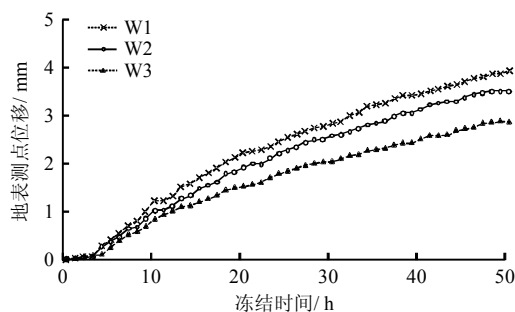
3.2 地表位移的变化规律

冻结过程中, 地表测点位移的变化规律如图 4 所示。

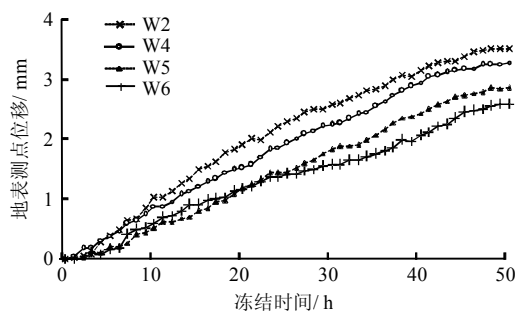
从图 4(a)可以看出, 冻结开始 4 h 以后, 地表位置才开始出现变形, 这较地层内部变形出现的时间晚, 其原因是冻结壁产生的冻胀变形将地层压缩后才会传递到地表, 地表的变形较土体深部变形表现出一定延迟性。随着冻结壁厚度的增长, 冻胀作用的增加使地表变形呈线性增长, 而不同位置的地表变形不同, 也是由于下部形成冻结壁厚度的差异造成的。冻结 30 h 后冻结管内部土体冻实, 冻结壁整体厚度增长速度减慢, 所以导致地表变形的增加速度变缓。冻结结束时, 盾构模型中心线上的测点 W1、W2、W3 的变形分别为 3.93、3.49、2.86 mm, 相当于工程原型 24.96、22.16、18.16 mm。

图 4(b)中的 4 个测点位于盾构模型的同一横断面上, 距离盾构模型中心线的距离分别为 0、600、

900、1 200 mm, 可以认为, 在相同冻结时刻, 4 个测点位置形成冻结壁的厚度基本相同。冻结开始后同一横断面上测点位移差别主要是由于冻结壁上部未冻土层厚度不同造成的, 冻胀作用使地层压缩吸收了一部分冻胀变形量, 所以冻结初始阶段, 远离盾构模型中心线的测点变形量较中间测点小, 随着冻结进行, 不同测点之间变形量的差值逐渐变大, 说明冻胀作用对不同深度地层的压缩量也是不同的。冻结结束时, 测点 W4、W5、W6 的变形量分别为 3.27、2.84、2.56 mm, 相当于工程原型的 20.76、18.03、16.26 mm。



(a) 盾构中心线上的测点



(b) 同一横断面上的测点

图 4 地表测点位移的变化曲线

Fig.4 Deformation curves on the strata surface

4 讨论

4.1 地表与地层内部变形的比较

根据盾构模型及形成冻结壁的对称性特点, 选取盾构模型两侧对应位置的地表及地层内部测点, 来比较冻结过程中地层位移的差别。冻结过程中不同测点的位移变化如图 5 所示。

如图 1 所示, 地表测点 W4、W6 与地层内部测点 V2、V4 分别关于盾构中心线对称, 距离盾构中心线的水平距离分别为 600、1 200 mm, 对应位置的测点位移值相当于同一竖向位置的地表和地层内部位移。从图 5 可以看出, 冻结开始后, 地层内部测点先发生位移, 4 h 后地表测点才有位移变化。随着冻结的进行, 地层内部测点和地表的位移呈线性

增长, 对应位置的地层内部位移大于地表位移, 且两者之间的差值随着冻结的进行而逐渐增大。这说明地层内部位移传递到地表的过程中, 会对土层产生压缩作用, 随着冻结的进行, 冻胀力的增大使土层的压缩量增大, 造成了地层内部和地表变形的差值变大。冻结 30 h 后, 地层内部和地表变形之间的差值基本维持不变, 说明土层不再被继续压缩。

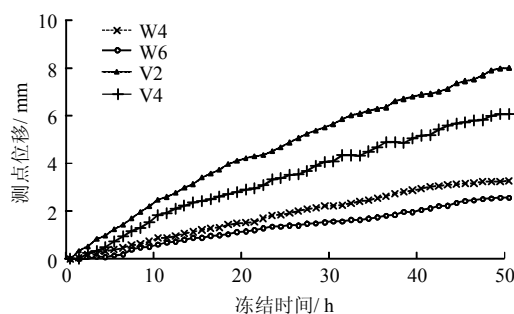


图5 地表与地层内部变形的比较曲线

Fig.5 Comparisons of deformation between strata surface and internal strata

在整个冻结过程中, 受到地层压缩作用对变形传递的影响, 对应位置的地表位移值一直小于地层内部的位移值, 同时距离盾构中心线较远测点的位移值也一直小于靠近盾构中心线的测点。

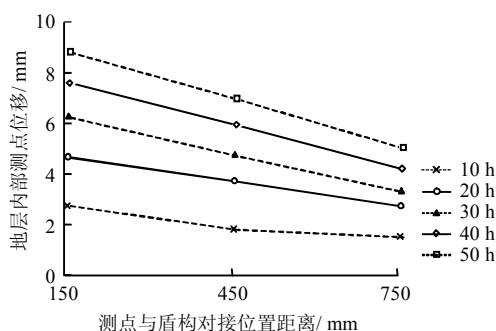
4.2 冻结壁厚度对地层位移的影响

冻结管沿盾构轴线斜向布置, 在盾构外形成橄榄球形状冻结壁, 所以在盾构不同横断面上冻结壁厚度是不同的^[19]。选取沿盾构轴线布置的地层位移测点, 来分析不同冻结时刻、冻结壁厚度差别对地层位移的影响。冻结过程中, 不同冻结时刻地表和地层内部位移分布曲线见图 6。

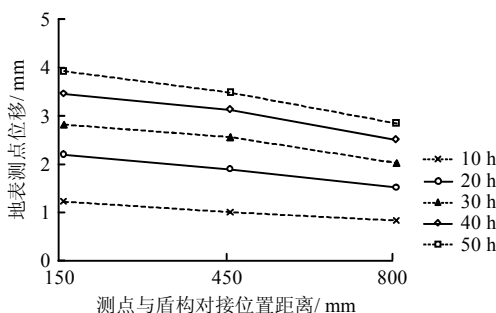
图 6(a)中, 地层内部测点 V5、V2 和 V6 与盾构对接位置的水平距离分别为 150、450、750 mm, 而 3 个测点与下部冻结管的距离均为 400 mm, 冻结 10 h 时 3 个截面上形成冻结壁厚度差别不大, 所以 3 个测点位移基本相同, 仅距离盾构对接位置较近的 V5 测点位移稍大, 其原因是上部较小覆土厚度使测点变形受到的阻力较小。随着冻结的进行, 测点 V5 位置冻结壁厚度增长快, 测点位移增加明显, 而测点 V6 位置冻结壁厚度相对增加较慢, 相应的位移变化量也较小。冻结 30 h 以后, 由于冻结管内部土体全部冻实, 3 个测点下方冻结壁厚度增加量基本相同, 3 个测点的位移变化基本相同, 表现为图 6(a)中直线斜率基本保持不变。

在图 6(b)中, 地表位移测点 W1、W2 和 W3 与盾构对接点的水平距离分别为 150、450、800 mm。

与地层内部测点位移的变化规律相似, 冻结开始时地表位移变化较小, 不同测点之间位移量差别不大。随着冻结的进行, 冻结壁厚度增长速度快的位置(图中测点 W1 位置), 其地表变形增加较快。冻结 30 h 以后, 不同位置测点的地表变形增长速度基本一致, 所以在沿盾构模型轴线上, 随着与盾构对接位置距离的增加, 地表的变形量线性减小。



(a) 地层内部测点



(b) 地表测点

图6 不同位置的地层位移变化曲线

Fig.6 Curves of strata deformation at different locations

由以上分析可知, 冻结壁厚度变化对上部地层位移影响明显, 为了研究地层位移与冻结壁厚度之间的关系, 对不同位置地层位移与下部冻结壁厚度比值的变化情况进行分析, 具体如图 7 所示。

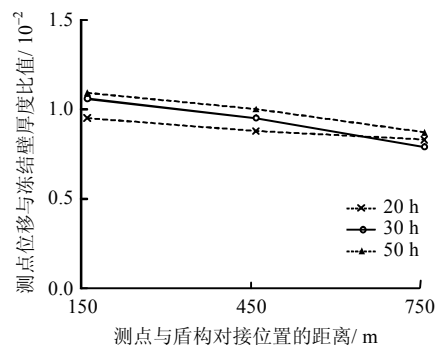


图7 地层位移与冻结壁厚度关系曲线

Fig.7 Relationships between strata displacement and thickness of the frozen wall

根据温度场分布特征的研究结果^[19], 距离盾构对接位置不同距离的断面上, 形成冻结壁厚度是不同的, 所以不同断面上地层变形量也是不同的, 但从图 7 可以看出, 不同断面上地层位移与冻结壁厚度的比值相差不大, 均在 1% 左右, 这较地层的冻胀率小, 其原因是试验室内测试的冻胀率为地层受限条件下的单向冻胀变形, 而模型试验中的冻胀会引起地层在 3 个方向上发生变形, 从而减小了地层的竖向变形量。随着冻结的进行, 不同断面上冻结壁厚度的增加并没有引起其比值的变化, 仍然维持在 1% 左右, 所以冻结壁厚度是影响地层位移的主要因素, 地层位移变化量与冻结壁的厚度成近线性关系。

4.3 埋深对地层位移的影响

由盾构模型外冻结管的布置形式可知, 盾构模型外同一横截面上冻结壁发展规律基本相同, 即不同位置冻结壁的厚度相差不大。地层内部测点 V1、V2、V3 和 V4 位于盾构模型的同一横断面上, 与冻结管的竖直距离分别为 200、517、679、907 mm (具体见图 2(b)), 可以认为在冻结过程中, 4 个测点对应位置冻结壁变化规律基本相同, 所以相应位置地层变形量的差别主要是由测点埋深不同造成的。不同冻结时刻, 4 个测点的位移分布如图 8 所示。

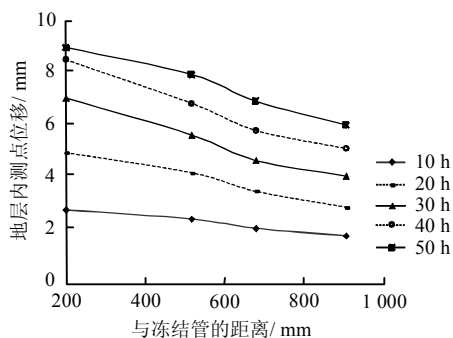


图 8 不同深度的地层位移变化曲线

Fig.8 Curves of strata deformation at different depths

从图可以看出, 冻结 10 h 时, 地层内部 V1 测点的变形最大, 但由于各点的位移量都较小, 不同测点之间的位移量相差较小。随着冻结的进行, 靠近冻结管处地层变形量增长快, 而距离冻结管较远处地层变形量增长较慢, 从而造成了不同深度测点之间的变形量差别增大, 这主要是由于冻结过程中产生的冻胀力对上部土层有持续的压密作用, 土层受到较大冻胀力产生了压缩, 从而吸收了一部分冻胀变形量, 造成深部土层的冻胀量较浅部大。

在同一冻结时刻, 不同位置的地层变形量与其到冻结管的距离近似呈线性关系, 可以用图 8 中直线斜率的改变量来评价地层内变形量的变化速度。冻结 30 h 后, 不同位置地层变形增加量基本相同, 表现为图中直线斜率变化不大。为了分析冻结过程中上部地层的变形规律, 采用两个测点之间的地层平均应变, 即地层内相邻测点变形量的差值与测点间距的比值, 来评价冻胀对地层的压缩作用。冻结过程中, 地层平均应变的变化曲线如图 9 所示。其中 V1 和 V2 测点之间的平均应变记为 V1 测点处的应变, V2 和 V3 测点处的应变分别为测点 V2、V3 和 V3、V4 之间的地层平均应变。

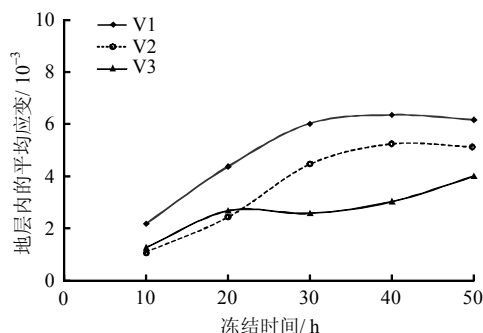


图 9 地层平均应变的变化曲线

Fig.9 Curves of average strain coefficient of soil

从图可以看出, 冻结开始 10 h 后, 冻结壁产生的冻胀变形较小, 所以地层的平均应变值均较小, 相比较而言, 埋深较大测点的地层压缩量稍大。随着冻结的进行, 下部冻结壁厚度增加产生的冻胀力逐渐增大, 持续压缩上部地层, 使地层平均应变逐渐增大, 特别是靠近冻结管的位置 (测点 V1 处), 受到下部冻结壁的冻胀作用明显, 而上部地层压力限制了地层变形, 所以测点 V1 处的地层平均应变增速明显, 最大地层平均应变达到 6.23%。随着埋深的减小, 下部冻胀作用及上部地层限制作用的减弱, 使地层平均应变的增速变缓, 特别是埋深较浅的地层, 其平均应变的数值及变化幅度都较小。

冻结过程中产生的冻胀力受到上部地层的限制作用, 当冻胀力超过地层的黏聚力时, 会引起上部地层的滑动, 从而减小了地层对冻结加固体的限制作用, 使地层承受的冻胀力不再增加, 相应地层平均应变也保持基本不变, 如图 8 中测点 V1 处地层平均应变在冻结 30 h 以后变化不大, 所以上部地层不再被压缩, 冻胀变形量可以及时传递到地层上部, 甚至会直接影响到地表。

5 结 论

(1) 冻结壁冻胀作用引起上部地层的变形量随着冻结壁厚度增长呈近线性增加, 按照地层变形量增加速度的差别可以将冻结过程分为3个阶段: 冻结开始时, 距离冻结壁较近地层产生少许沉降; 冻结开始3 h后冻结壁开始交圈, 地层位移增长速度变大; 而在冻结20 h后冻结管内部地层冻实, 地层位移的增长速度变缓。冻结壁对上部地层的冻胀效应一直持续整个冻结过程, 试验结束时地层最大变形量达到9.02 mm。所以施工中控制冻胀的关键时间是冻结壁交圈和内部地层冻实之间的施工阶段。

(2) 冻结壁厚度和地层深度是影响地层变形的主要因素, 对于同一深度的地层而言, 测点变形量与下方对应位置冻结壁的厚度呈线性比例关系, 而在同一竖向断面上, 地层变形量随着埋深的减少而减小。施工中控制冻结壁厚度是减少地层冻胀变形的关键因素, 而减小深部地层的冻胀量可以有效地控制地层的总变形量。

(3) 冻结产生的冻胀力对上部地层有持续的压缩作用, 可以用地层平均应变来评价上部地层的压缩效果。随着冻胀力的增加, 地层的平均应变逐渐增大, 使深部地层的变形量和平均应变均大于浅部地层。当冻胀力超过土层的黏聚力后, 土层的滑动使地层平均应变不再变化, 上部地层不再被压缩。所以在冻结施工中, 在上部地层未产生滑动前, 冻胀变形的控制措施需要针对冻结壁附近位置的深部地层进行。

参 考 文 献

- [1] 胡向东, 王金泰, 曹明亮. 琼州海峡隧道盾构对接冻土帷幕受力状态力学分析[J]. 隧道建设, 2013, 33(1): 1—8.
- [2] HU Xiang-dong, WANG Jin-tai, CAO Ming-liang. Analysis on mechanical behavior of frozen soil umbrella for shield junction in Qiongzhou strait tunnel[J]. **Tunnel Construction**, 2013, 33(1): 1—8.
- [3] YANG Ping, KE Jie-ming. Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation[J]. **Computer and Geotechnics**, 2006, 33(6-7): 330—340.
- [4] 陶德敬, 王明年, 刘大刚. 冻结法隧道施工引起的地表移动及变形预测[J]. 现代隧道技术, 2006, 43(6): 45—50.
- [5] TAO De-jing, WANG Ming-nian, LIU Da-gang. Prediction of surface movement and deformation caused by the freezing method construction of tunnels[J]. **Modern Tunneling Technology**, 2006, 43(6): 45—50.
- [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—123.
- [7] ZHOU Tai-quan, HUA Yuan, LÜ Bao-hua. Stochastic prediction for frost heave effect of a subway tunnel[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2009, 31(1): 119—123.
- [8] ZHOU Tai-quan. Stochastic prediction for frost heave effect of a subway tunnel[J]. **Advances in Civil and Industrial Engineering**, 2013, 353—356: 1451—1455.
- [9] 程桦, 臧华. 人工地层水平冻结冻胀效应准耦合数值分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 87—90.
- [10] CHENG Hua, ZANG Hua. Quasi-coupling numeric analysis of frost heave effect of horizontal freezing in artificial ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(1): 87—90.
- [11] 周希圣, 林枫, 任向东, 等. 下穿运营地铁隧道冻结施工的应力位移场及其控制技术[J]. 力学季刊, 2005, 26(3): 438—443.
- [12] ZHOU Xi-sheng, LIN Feng, REN Xiang-dong, et al. The freezing stress and displacement field and its control technique during the tunnel construction under the metro line[J]. **Chinese Quarterly of Mechanics**, 2005, 26(3): 438—443.
- [13] 周晓敏, 苏立凡, 贺长俊, 等. 北京地铁隧道水平冻结法施工[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 319—322.
- [14] ZHOU Xiao-min, SU Li-fan, HE Chang-jun, et al. Horizontal ground freezing method applied to tunneling of Beijing Metro[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(3): 319—322.
- [15] 岳丰田, 仇培云, 杨国祥, 等. 复杂条件下隧道联络通道冻结施工设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 660—663.
- [16] CAI Hai-bing, PENG Li-min, ZHENG Teng-long. A duration prediction model of surface frost heave induced by tunneling with horizontal freezing method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(6): 1761—1768.

- YUE Feng-tian, QIU Pei-yun, YANG Guo-xiang, et al. Design of freezing method applied to connection aisle in tunnel under complex conditions[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(5): 660—663.
- [11] 姜耀东, 赵毅鑫, 周罡, 等. 广州地铁超长水平冻结多参量监测分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 158—164, 173.
- JIANG Yao-dong, ZHAO Yi-xin, ZHOU Gang, et al. Multi-parameter monitoring of frozen soil structure with super-long freezing hole drilling in Guangzhou Metro[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(1): 158—164, 173.
- [12] 蔡海兵, 程桦, 彭立敏, 等. 地铁双线隧道水平冻结位移场的模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2088—2095.
- CAI Hai-bing, CHENG Hua, PENG Li-min, et al. Model test on displacement field of double-route metro constructed with horizontal freezing method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(10): 2088—2095.
- [13] 蔡海兵, 程桦, 彭立敏, 等. 浅埋隧道全断面超长水平冻结位移场的试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(12): 80—83.
- CAI Hai-bing, CHENG Hua, PENG Li-min, et al. Experimental research on whole-section extra-long horizontal freezing displacement in shallow-buried tunnel[J]. **Industrial Construction**, 2009, 39(12): 80—83.
- [14] 周希圣, 郑宜枫. 高含水黏土层隧道冻结位移场模型试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2000, 28(4): 472—476.
- ZHOU Xi-sheng, ZHENG Yi-feng. Research on displacement field of tunnel freezing in high water clay based on simulation model test[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2000, 28(4): 472—476.
- [15] 岳丰田, 张勇, 杨国祥, 等. 隧道联络通道冻结位移场模型试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(2): 209—212.
- YUE Feng-tian, ZHANG Yong, YANG Guo-xiang, et al. Research on frost heave deformation of connection passages in adjacent tunnel by modeling test[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2005, 34(2): 209—212.
- [16] 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, 40(10): 80—85.
- CHENG Hua, YAO Zhi-shu, ZHANG Jing-shuang, et al. A model test study on the effect of freeze heaving and thaw subsidence for tunnel construction with artificial horizontal ground freezing[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2007, 40(10): 80—85.
- [17] 周晓敏, 王梦恕, 陶龙光, 等. 北京地铁隧道水平冻结和暗挖施工模型试验与实测研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 676—679.
- ZHOU Xiao-min, WANG Meng-shu, TANG Long-guang, et al. Model test and prototype observation on artificial ground freezing and tunneling of Beijing Metro[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(6): 676—679.
- [18] 乔京生, 陶龙光, 弭尚银. 地铁隧道水平冻结施工地表变形特性的模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2643—2646.
- QIAO Jing-sheng, TAO Long-guang, MI Shang-yin. Simulation study on deformation characteristics of ground surface in horizontal freezing construction of metro tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(15): 2643—2646.
- [19] 石荣剑, 岳丰田, 张勇, 等. 盾构地中对接冻结加固模型试验(I)——冻结过程中地层冻结温度场的分布特征[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 368—376.
- SHI Rong-jian, YUE Feng-tian, ZHANG Yong, et al. Model test on freezing reinforcement for shield junction in soft stratum (Part 1): Distribution characteristics of temperature field during freezing process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 368—376.
- [20] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- YANG Jun-jie. Similarity theory and construction model experiment[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005.