

文章编号:1671-6833(2013)01-0005-05

水泥土冻胀特性试验研究

鲍俊安, 杨平, 王许诺

(南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 为了从理论上揭示水泥土抑制冻胀的规律, 对掺入不同比例水泥的南京地区典型黏土和砂土进行了冻胀试验研究. 试验结果表明: 黏土质水泥土和砂土质水泥土的冻胀率均随水泥含量增大而减小, 随含水率增大呈线性增大, 随龄期增大呈指数减小, 随温度升高而呈线性增大, 随荷载增大呈指数规律减小; 且冻胀率与水泥掺入比变化规律均存在一个最佳掺入比, 最佳掺入比对应土体较小的冻胀率, 南京地区的典型黏土和砂土的最佳掺入比分别为 10%、5%. 综合分析可得: 冻结法施工时, 在土体中预先注一定量的水泥浆并将放置一段时间后再冻结, 可减小由于冻胀对工程和环境造成的影响.

关键词: 水泥土; 人工冻土; 水泥掺入比; 冻胀

中图分类号: TU445 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.01.002

0 引言

近年来, 随着冻结法施工技术的广泛应用, 其施工对周边环境的影响也日渐显现出来^[1-2]. 由于人工冻结法施工引起周围土层温度场变化, 使周围土层产生冻胀和融沉, 对此如不能及时控制, 很容易对地表建筑、地下结构和管线产生影响甚至破坏作用, 因此冻胀和融沉的防治问题是工程界亟待解决的难题^[3-5]. 目前用来控制冻胀的方法大多只能治标, 如开挖卸压槽, 减小水平冻胀力, 而控制融沉主要采用事后控制即用跟踪注浆的方法来解决, 但注浆量和注浆时间主要靠经验选择, 缺乏精确的计算, 经济效果和工程效果并不太理想^[6-7]. 在地基土中掺入水泥形成水泥土的方法来控制冻胀在国内外均有应用, 且效果显著. 日本学者小山道义等人通过在土层中加入一些添加剂来控制天然冻土的冻胀, 发现加入水泥后控制效果良好, 而谭利华^[8]也做过这方面的尝试. 胡向东^[9]针对上海灰黄色粉砂开展水泥改良土冻胀融沉性质的实验研究, 并指出水泥改良地层控制冻胀融沉的基本机理是水泥改良作用降低了土的渗透性, 阻止了水分迁移量, 减小了冰分凝作用, 从而减小了冻胀. 关于这方面的研究报道很少. 实践表明, 在地基掺入水泥后冻胀得到了明显的抑制, 是一种行之有效的控制冻胀措施, 但水泥

掺入比、含水率、龄期、冷端温度、荷载等因素和冻胀率具体变化规律尚不清楚. 为了从理论上揭示水泥土抑制冻胀的规律, 笔者研究了这些因素对水泥土冻胀特性影响.

1 试验材料、试样规划与方法

1.1 试验材料

试验所用黏土、砂土均为南京地区典型土质, 取自南京地铁十号线过江大盾构风井基坑, 其基本物理性质见表 1; 试验所用水泥为海螺牌 42.5 普通硅酸盐水泥.

表 1 土样基本物理性质
Tab. 1 Basic physical property of soil

土质	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	含水率/ %	密度/ (g · cm ⁻³)
黏土	32.8	15.8	17	30.0	1.93
砂土	—	—	—	16.5	1.96

1.2 试验规划

研究掺入比单因素时, 由掺入比与冻胀率关系可得两种水泥土最佳掺入比, λ_n 、 λ_s 分别为黏土质水泥土和砂土质水泥土的最佳掺入比, 研究其他单因素时, 水泥掺入比均采用最佳掺入比; 实际工程龄期为 28 d 时, 水泥强度已增长到总强度的 90%, 故取 28 d 为试验基准龄期; 冻土强度设计时一般采用 -10℃ 时强度, 故取 -10℃ 为试

收稿日期: 2012-10-19; 修订日期: 2012-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278251); 南京地铁集团有限公司科研项目(D3-XY-0001-1206)

作者简介: 鲍俊安(1985-), 男, 江苏宿迁人, 助理工程师, 硕士, 主要从事环境岩土与地下工程研究, E-mail: baojunan.an@163.com.

验基准冷端温度. 试验规划见表 2.

1.3 试验方法

冻胀试验参照《土工试验方法标准》^[10], 采用南京林业大学研制的冻胀融沉仪进行, 试验装置

如图 1 所示. 在有外部水分补充情况下选取掺入比、含水率、龄期、冷端温度、冻结条件、荷载等因素进行不同水平的单因素试验, 以获得其对两种水泥土冻胀率的影响规律.

表 2 水泥土单因素冻胀试验规划
Tab.2 Single-factor test planning of the cement soil frost heave

土质	掺入比/%	含水率/%	龄期/d	冷端温度/℃	荷载/kPa
黏土	0,1,3,5,7,9,11,15,20	30	28	-10	1
	λ_n	30	7,14,28,90	-10	1
	λ_n	24,26,28,30,32	28	-10	1
	λ_n	30	28	-2,-5,-10,-15	1
	λ_n	30	28	-10	1
	λ_n	30	28	-10	1,50,100,200,300
	λ_n	30	28	-10	1
砂土	0,1,3,4,5,7,9	16.5	28	-10	1
	λ_s	16.5	7,14,28,90	-10	1
	λ_s	13,16.5,19,22,24	28	-10	1
	λ_s	16.5	28	-2,-5,-10,-15	1
	λ_s	16.5	28	-10	1
	λ_s	16.5	28	-10	1,50,100,200,300
	λ_s	16.5	28	-10	1

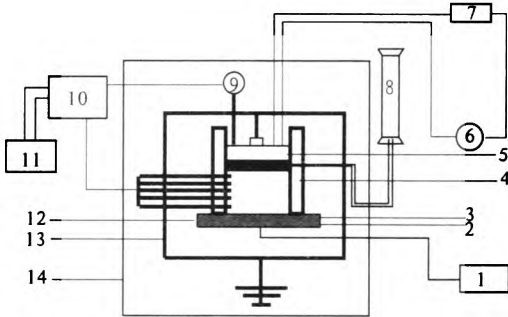


图 1 冻胀融沉仪示意图
Fig.1 Sketch map of frost heave and thaw subsidence instrument

1—温度控制器;2—循环冷水进口;3—循环冷水出口;4—试样筒;5—加压装置;6—循环水泵;7—恒温水槽;8—补水装置;9—位移传感器;10—数据采集仪;11—计算机;12—制冷块;13—加压设备;14—恒温箱.

本试验中采用的水泥掺入比为干水泥质量与重塑土质量之比, 即 $\lambda = (m_s/m) \times 100\%$, 其中 λ 为水泥掺入比, %; m_s 为掺入的水泥质量, kg; m 为重塑土质量, 包括干土和水的质量, kg.

水泥土试样制作: 在土样的干土中加入水泥充分搅拌, 按照原状土含水量、水泥水灰比 0.5 对土样进行配水, 一次压制成直径为 80 mm, 高度 50 mm 的圆柱体, 制作完成后放入养护室中按照标准条件养护 28 d.

2 试验结果分析

2.1 掺入比对水泥土冻胀特性影响

两种土质掺入不同含量水泥后冻胀率与水泥

掺入比的关系曲线如图 2 所示. 由图可见: 两种水泥土冻胀率均随掺入比增大呈指数规律减小, 黏土中水泥掺量为 0% 时其冻胀率为 11.56%, 随着水泥掺入量增加, 曲线斜率也一直增大, 即冻胀率一直在减小, 而当水泥掺量达到 10% 时曲线斜率增大趋势有所减缓, 图中此时冻胀率为 1.56%, 仅为水泥掺入量 0% 时的 13.5%; 水泥掺量对砂土质水泥土冻胀率影响具有同一变化规律, 只是量值不同, 砂土中无水泥掺量时冻胀率为 2.73%, 随着水泥掺入量增加, 曲线斜率也一直增大, 在水泥掺入量为 5% 左右, 冻胀率减小缓慢, 此时冻胀率仅为 0.41%, 仅为无水泥含量时的 15.02%. 这种现象可解释为: 在土中掺入水泥, 水泥熟料中的矿物与水发生水化反应, 水化产物填充了空隙和土颗粒连接在一起, 由于水泥水化产物与土颗粒之间的结合力大于土颗粒本身之间的结合力, 所以水泥的掺入, 土体中颗粒之间的结合力增加使得抵抗破坏颗粒骨架能力加强, 且随水泥掺入比增大, 抵抗破坏颗粒骨架能力增大, 冻胀试验产生的冻胀力不足以破坏试样, 最终使得冻胀率下降.

综上所述, 得知: (1) 两种土质掺入水泥后的曲线整体均呈现指数规律减小趋势, 且黏土质水泥土冻胀率下降的幅度大于砂土质水泥土冻胀率, 表明在黏土中掺入水泥对控制冻胀的效果更加显著; (2) 黏土、砂土中掺入水泥对冻胀率影响均存在一个掺入比最佳点, 当掺入比小于最佳点时, 水泥掺入量的变化对冻胀率变化影响较大, 反

之,掺入比变化对冻胀率变化影响较小,最佳掺入比可能随土质的不同而不同,但变化量不会太大,本试验黏土和砂土的最佳掺入比分别为 10%、5%。最佳点对应的掺入比可称最佳掺入比,表明在水泥掺入比为此值时的冻胀率相对较小。所以,冻结法施工时,可采取预先掺入一定水泥的办法来减小冻胀,以减小由于冻胀融沉对工程和环境造成的影响,且水泥掺入比为最佳掺入比时可达经济最佳。

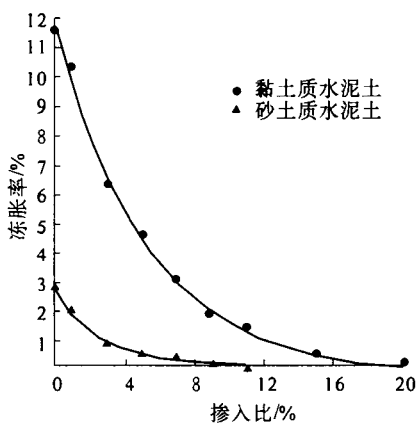


图 2 水泥土冻胀率与水泥掺入比的关系曲线
Fig. 2 Curves between frost heave coefficient of cement-improved soil & mixing ratio of cement

2.2 含水率对水泥土冻胀特性影响

图 3 为黏土质水泥土和砂土质水泥土冻胀率与原始含水率的关系曲线。

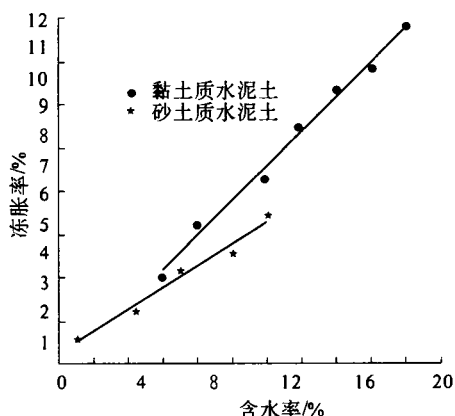


图 3 水泥土冻胀率与原始含水率关系曲线
Fig. 3 Curves between frost heave coefficient of cement-improved soil & moisture content

由图可见:两种土质水泥土冻胀率均随含水率增大呈线性递增,这是因为随着含水率增大,土中所含水量也随着增大,当温度降低时,水变成冰,自然体积就会膨胀,故冻胀率增大;另外还可见黏土质水泥土的曲线全部在砂土质水泥土的上

方,表明在相同含水率条件下,黏土质水泥土的冻胀率始终比砂土质水泥土的冻胀率大,黏土质水泥土当含水率变化 1% 时,其冻胀率变化 0.08%;砂土质水泥土含水率变化 1% 时,其冻胀率仅仅随着变化 0.05%,含水率对土体冻胀率的影响特征可解释为:在土体中掺入水泥后经 28 d 的养护,试样已经具备一定强度,尤其砂土,它和水泥拌合一起制成试样经过养护后非常坚硬,这种情况下,进行冻胀试验产生的冻胀力不足以破坏试样,同时由于砂土中黏性颗粒含量较少,故相同含水率情况下,黏土质水泥土的冻胀率比砂土质水泥土的冻胀率大。

2.3 龄期对水泥土冻胀特性影响

根据试验数据,龄期对水泥土冻胀特性的影响规律曲线如图 4。由图可见,无论是黏土质水泥土还是砂土质水泥土随着龄期延长,其冻胀率均呈指数迅速减小,并逐渐稳定,尤其起初阶段较为明显,说明水泥掺入后早期对冻胀率影响比较显著。黏土质水泥土龄期 7 d 时冻胀率为 4.56%,当龄期增加到 28 d 时冻胀率减小至 1.56%,仅为 7 d 龄期时的 34.21%;然而当龄期增加到 90 d 时,冻胀率为 1.24%,此时变化不大,说明 28 d 是控制黏土质水泥土冻胀的关键时间;同样,对砂土质水泥土也有类似情况,其龄期 7 d 时的冻胀率为 1.80%,龄期增加到 14 d 时的冻胀率减小速度较快,冻胀率减小至 0.58%,仅为 7 d 龄期时的 32.22%,减小了 67.78%,但是当龄期增加到 90 d 时,冻胀率为 0.37%,减小量很少,说明 14 d 是控制砂土质水泥土冻胀的关键时间。综上分析,黏土质水泥土和砂土质水泥土龄期对其冻胀率的影响均存在一个转折点 D,试样龄期小于 D 时,龄期变化对冻胀率变化影响较大,当试样龄期大于 D 时,龄期变化对冻胀率变化影响较小。转折点 D 表明,当水泥土试样达到一定养护时间后冻胀率将较小,甚至为零,图中表明黏土质水泥土和砂土质水泥土的转折点 D 分别为 28 d、14 d。因此,在周边环境控制变形要求高的条件下,使用冻结法施工时,在经济技术条件允许下,可在土体中预先注一定量的水泥浆并将放置一段时间后再冻结,以减小由于冻胀对工程和环境造成的危害。

2.4 冷端温度对水泥土冻胀特性影响

冷端温度对水泥土冻胀特性影响单因素试验采用 4 种不同冷端温度在开放系统中单向冻结试验。图 5 为黏土质水泥土和砂土质水泥土两者冻胀率与冷端温度的对比曲线图。

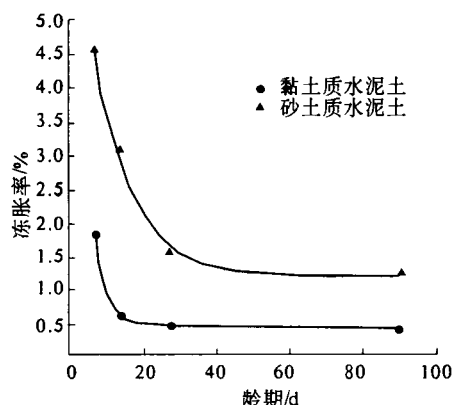


图4 水泥土冻胀率与龄期关系曲线
Fig.4 Curves between frost heave coefficient of cement-improved soil & instar

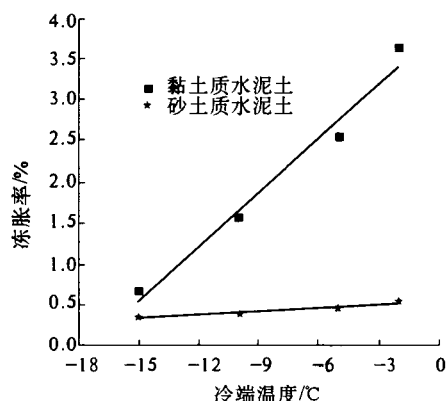


图5 水泥土冻胀率与冷端温度关系曲线
Fig.5 Curves between frost heave coefficient of cement-improved & the cold junction temperature

图5表明,黏土质水泥土在有水分补给系统下进行单向冻结时,其冻胀率随温度升高而呈线性增大,冷端温度升高1℃,对应冻胀率增大0.22%。从冻土的冻结机理可知,当冷端温度较低,冷却强度较大,冻结峰面快速向上推进,就会促使土中的自由水和弱结合水快速冻结,这样迁移外部水分来不及迁移就冻结完毕,因此,冻胀率较小。反之,当冻结温度较高,冷却强度较小,负温持续时间则相对较长,则外部水分迁移量就会较大,因此,冻胀率较大。

由于砂土矿物颗粒较大,并且砂粒间缺少黏聚力,其中结合水含量非常少,加上在砂土中掺入5%水泥量,水泥水化物填充了部分空隙,使得单向冻结温度场中水分迁移机制减弱,故冷端温度升高1℃,对应冻胀率仅增大0.012%,说明冷端温度的变化对砂土冻胀特性影响不大,实际工程中在砂土层注入少许水泥浆再使用冻结法施工对周围环境几乎不会产生影响。

2.5 荷载对水泥土冻胀特性影响

研究荷载对水泥土冻胀特性影响时,为使仪

器各组成部分紧密接触,在试样上方施加1 kPa压力(施加这一小量对冻胀率值影响不大)。图6为两种不同土质水泥土冻胀率与上部荷载关系曲线,从图中可见,无论是黏土质水泥土还是砂土质水泥土,在单向冻结温度场冻胀变形均随上部荷载增大而减小,说明荷载对土体冻胀变形有抑制作用,并随荷载越大这种抑制作用越明显,究其原因可解释为试样在单向冻结试验中,冷端温度是自下而上,而荷载是从试样的顶端向下传递,由压力引起的固结排水与温度引起的水分迁移部分相抵消,即荷载对水分迁移有抑制作用,从而导致有荷载作用时,冻胀率减小。

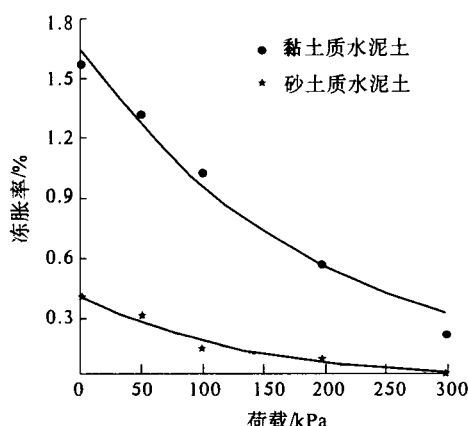


图6 水泥土冻胀率与上部荷载关系曲线
Fig.6 Curves between frost heave coefficient of cement-improved & load

表3中拟合关系式表明,冻胀率均呈指数规律减小,说明荷载对土体冻胀变形有抑制作用,并随荷载增大这种抑制作用越明显,究其原因可解释为试样在单向冻结试验中,冷端温度是自下而上,而荷载是从试样的顶端向下传递,由压力引起的固结排水与温度引起的水分迁移部分相抵消,同时荷载对水分迁移有抑制作用,从而导致有荷载作用时,冻胀率减小,但结合图6可知:荷载对两种土体的冻胀率影响程度并非一样,荷载对黏土质水泥土冻胀特性影响比砂土质水泥土大。

表3 不同土质冻胀率与上部荷载关系式
Tab.3 Relationship for different soil frost heave rate and the load

土质	试验系统	关系式	相关系数
黏土质水泥土	开放	$\eta = 1.635\exp(-0.005p)$	0.974 2
砂土质水泥土	开放	$\eta = 0.426\exp(-0.009p)$	0.967 4

3 结论

(1)无论在黏土还是在砂土中,掺入水泥后的水泥土在开放系统单向冻结温度场中产生冻胀变形,其冻胀率均随掺入比增大呈指数规律减小,且在黏土中掺入水泥冻胀率减小幅度更大.另外,在黏土和砂土中掺入水泥,均存在一个最佳掺入比,当掺入比小于最佳掺入比时,水泥掺入量的变化对冻胀率变化影响较大,当掺入比大于最佳掺入比时,掺入比变化对冻胀率变化影响较小,南京地区典型黏土和砂土的最佳掺入比分别为10%、5%.

(2)掺入最佳水泥量的黏土质和砂土质水泥土在开放系统中,冻胀率均随含水率增大呈线性增大.

(3)黏土质水泥土和砂土质水泥土,冻胀率均随龄期增大呈指数减小,且龄期对黏土质水泥土和砂土质水泥土冻胀率的影响均存在一个转折点D,试样的龄期小于D时,龄期的变化对冻胀率变化影响较大,当大于D时,龄期变化对冻胀率变化影响较小,黏土质水泥土和砂土质水泥土的转折点D分别为28 d,14 d.

(4)其他因素相同时,两种水泥土冻胀率均随冷端温度升高而呈线性增大,且冷端温度的变化对黏土质水泥土冻胀特性影响比砂土质水泥土大.

(5)其他因素相同的情况下,冻胀率均随荷载增大呈指数规律减小,且荷载对黏土质水泥土

冻胀特性影响比砂土质水泥土大.

参考文献:

- [1] 杨平,余才高,董朝文,等.人工冻结法在南京地铁张府园车站的应用[J].岩土力学,24(S2):388-391.
- [2] 王效宾.人工冻土融沉特性及其对周围环境影响研究[D].南京:南京林业大学土木工程学院,2009.
- [3] 柯洁铭,杨平.冻土冻胀融沉的研究进展[J].南京林业大学学报:自然科学版,2004,28(4):105-108.
- [4] 李萍,徐学祖.冻结缘和冻胀模型的研究现状与进展[J].冰川冻土,2000,22(1):90-95.
- [5] 夏江涛,杨平.盾构出洞水平冻结加固杯形冻土壁温度场监测分析[J].郑州大学学报:工学版,2010,31(2):27-30.
- [6] 李文勇,石荣剑,张水宾,等.冻结加固融沉注浆作用机理与应用技术[J].徐州工程学院学报,2007,22(6):47-51.
- [7] 肖朝昀,胡向东.人工地层冻结冻土自然解冻与强制解冻实测分析[J].长江大学学报:自然科学版,2009,6(3):92-95.
- [8] 谭利华.水泥改良土冻胀融沉特性研究[D].上海:同济大学土木学院,2008.
- [9] 胡向东.上海灰黄色粉砂水泥改良土冻胀融沉性质实验[J].煤炭学报,2009,34(3):334-339.
- [10] 中华人民共和国建设部. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S].北京:中国标准出版社,1999.

Experimental Study on Frost Heave Properties of Cement-improved Soil

BAO Jun-an, YANG Ping, WANG Xu-nuo

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: In order to reveal the law that the cement-improved soil controls frost heave, experimental research on frost heave properties were conducted with two typical soils in Nanjing region, clay and sand, mixed with the cement. The experiments show that: frost heave coefficient of clay or sand cement-improved soil declines exponentially with mixing ratio of cement increasing, enhances linearly with moisture content increasing, declines exponentially with instar increasing, enhances linearly with the cold junction temperature increasing, declines exponentially with load increasing besides there is an optimal mixing ratio, while it is the optimal mixing ratio, frost heave coefficient of cement-improved soil are lower, the optimal mixing ratio of clay and sand in Nanjing region is 10% and 5%. By comprehensive analysis, when using the freezing method, before freezing, a certain amount of cement can be mixed into the clay or sand, and it is necessary to place it for a period of time, which can reduce frost heave and thaw subsidence, thus reducing the harm to engineering and the environment.

Key words: cement-improved soil; artificial frozen soil; mixing ratio of cement; frost heave