

文章编号:1007-2861(2009)01-0093-06

# 上海人工冻土冻胀特性和水分迁移的试验研究

秦爱芳<sup>1,2</sup>, 林金钱<sup>1,2</sup>, 蒲毅彬<sup>2</sup>, 顾同欣<sup>2</sup>, 邢丽丽<sup>2</sup>

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200072;

2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 冻胀是冻土材料的一种最为显著的特性, 冻胀引起土体位移将对周围环境产生危害. 通过目前新研制的微机控制多功能冻土冻融试验机 POWER TESTV32-SHT, 配合 CT 扫描, 对上海具有代表性的粘土进行人工冻土的冻胀量和冻胀应力模拟试验研究, 得出不同深度土层人工冻结后的冻胀量和冻胀应力与固结应力的关系, 以及土样在冻结过程中的水分迁移情况. 所得结果将对上海人工冻土工程的设计、施工具有一定的参考价值.

**关键词:** 人工冻土; 冻胀应力; 冻胀率; 冻胀量; 水分迁移

**中图分类号:** TP 393      **文献标志码:** A

## Experimental Study on Freezing Expansion and Water Transference of Shanghai's Artificially Frozen Soil

QIN Ai-fang<sup>1,2</sup>, LIN Jin-qian<sup>1,2</sup>, PU Yi-bin<sup>2</sup>, GU Tong-xin<sup>2</sup>, XING Li-li<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Freezing expansion is the most prominent character of frozen soil, which can bring displacement of ground and therefore is harmful to the surrounding areas. By testing Shanghai's frozen clay with different frozen quantities and frozen stresses, the relations of consolidated stress are obtained with frozen quantity and frozen stress, and instance of water transference in the frozen process is the results of this study is useful in the design and construction of artificially frozen soil project of Shanghai.

**Key words:** artificially frozen soil; frozen stress; frozen rate; frozen quantity; water transference

人工冻土的冻胀是指在人工冻结土体过程中, 当土的温度为负时, 土中水分会在负温下结冰, 使土体体积增大, 从而对周围的环境产生一定的影响. 在地铁建设冻结法施工中, 冻胀会造成冻结管断裂、路面上拱、周围建筑物移位和破坏等. 人工土层冻结技

术现已广泛应用于德国、法国、美国、加拿大等许多国家的地铁、隧道、基坑等地下工程及环境保护中, 积累了成功的经验并取得了巨大的经济效益<sup>[1-2]</sup>. 我国沿海有较大范围的软土分布区且地下工程量大, 人工冻结施工在含水松软土层的地下工程中将有广

收稿日期: 2007-12-14

基金项目: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所国家重点实验室基金资助项目(SKLFSE2005-5)

通信作者: 秦爱芳(1966~), 女, 副教授, 研究方向为人工冻土工程性质、基坑开挖土的性质变化及对周围环境影响、非饱和土固结.

E-mail: qinaifang@21cn.com

阔的应用前景<sup>[3-5]</sup>。上海表层土为第四纪沉积层,以淤泥质松软粘土为主,地下水位高,土体强度低且具流变性。人工土层冻结方法因具有使被加固土体强度提高幅度大、防渗性能好、适应性强、环境影响小及造价低于常规方法等特点,尤其适合上海等软土地区的地下工程<sup>[3]</sup>。人工土层冻结施工尽管具有多方面的优势,但由于土层冻结机制和冻土力学性质的复杂性,设计、施工不当或设计中风险考虑不周将会导致工程失败乃至严重的后果。尽管上海地下工程中应用冻结法施工已有十几年的历史,但由于工程零星、规模小、受试验条件所限,人工冻结上海软土方面的研究及试验数据均较少。目前国内冻土方面的研究主要以砂土为主,专门针对上海粘土进行冻胀特性和水分迁移进行研究的试验很少,而冻土作为一种特殊材料,强烈地受环境及自身因素影响,条件及材料的微小波动都可能使试验结果相差很大<sup>[6-7]</sup>。随着城市经济建设的不断发展,上海的地下工程会越来越多,人工冻结施工也会成为地下工程的一种重要施工方式,所以很有必要对上海代表性冻结软土的冻胀特性及其机理进行宏观和细观的综合研究。

## 1 人工冻土冻胀试验

### 1.1 冻胀试验设备系统及试验流程

本试验采用中科院寒区旱区研究所新型研制的冻/融试验机 POWER TESTV32-SHT,它由酒精循环温控系统、液压系统、位移记录系统、计算机自动数据采集系统和试验箱体 5 个部分组成。

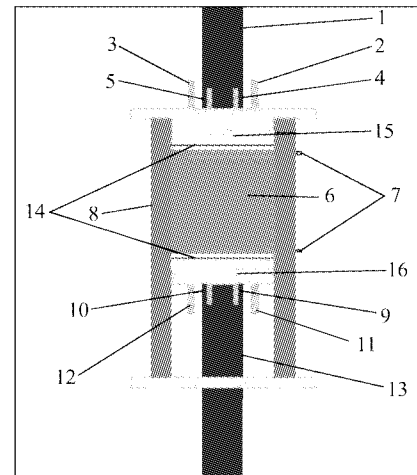
酒精循环温控系统:通过如图 1 所示的上下端酒精循环出入口对试样进行冻结融化,控制试样的温度。

液压系统:通过如图 1 所示的下端推杆,对试样施加应力并控制试样变形尺寸。

位移记录系统:通过下端推杆的移动情况来记录试样的变形尺寸。

计算机自动数据采集系统:试验过程中要采集的数据有下端推杆的位移、试样上下端的温度、下端推杆的应力以及记录这些数据的时间,这些都是由计算机自动采集,可以人为设定采集的密度和精度。

试验箱体是密闭的,试验中可以设定箱体的箱温,上端传力轴连接着测力仪,可以记录下端传来的力,精确到 0.001 N;下端推杆由液压系统控制,用来给试样施加荷载,并连接位移记录仪,可以记录推



1—上端传力轴;2—上端酒精进口;3—上端酒精出口;4—上端补水口;5—上端排水口;6—试验土样;7—热敏电阻测温探头;8—有机玻璃圆筒;9—下端补水口;10—下端排水口;11—下端酒精进口;12—下端酒精出口;13—下端压力推杆;14—橡胶密封圈;15—上端冷源板;16—下端冷源板

图 1 试验密封箱简易结构图

Fig. 1 Facility drawing of airproof box for test

杆的位移,精确到 0.001 mm。推杆施加荷载可以有两种形式,一种是力控制,另一种是位移控制。这两种加载形式都是通过控制软件在试验前编好的,也可以两种形式交替作用。有机玻璃圆筒内径为 100 mm,高度根据试样尺寸不同而不同,一般在 200 ~ 300 mm 之间,试样直径比有机玻璃圆筒略小 0.2 ~ 0.5 mm,高度在 90 ~ 150 mm 之间。可根据试验需要在有机玻璃圆筒上适当的位置钻直径 1 ~ 2 mm 的小洞,用来安插热敏电阻测温探头,以便记录试样不同部位的温度变化,可精确到  $\pm 0.05$  °C。上下端的酒精循环出入口用来给顶板和底板提供冷源,上下端进出水口用来给试样补水和排水。

### 1.2 土样的制备及装样

#### 1.2.1 试验用土来源

试验用土来自上海浦东某工地提供的上海具代表性的第四纪淤泥质粘土,埋置深度为 16 ~ 25 m。上海地下水位为 1 m 左右,因此这些淤泥质粘土均为饱和土。

#### 1.2.2 试样的制备

原状土捣碎,去杂质,加入适量的水,用搅拌机充分搅拌成均匀的泥浆;然后用固结仪初步固结成饱和样,直径为 99.5 mm,高度在 100 ~ 120 mm,用保鲜膜包住,放在保湿器中备用。

#### 1.2.3 装样

把土样上下端切平,测量其基本数据后装到涂有凡士林的有机玻璃筒中,在 CT 室扫描后装到试验机上.

### 1.3 冻胀试验设计

试验分为冻胀力试验和冻胀量试验.两种试验在试验设计上有所不同,冻胀力试验是保持试样上下端位移不变而冻结试样,产生冻胀力;冻胀量试验是保持试样上下端应力不变而冻结试样,试样因为冻结膨胀产生冻胀量.两种试验都是单向冻结,只给定上端冷源,下端不提供冷源,由热传递自由变温,从而形成上端温度在  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,下端温度在  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右的冻结试样.这跟实际冻土工程中的冻土壁受力温度接近<sup>[8]</sup>,可以很好地模拟工程实际.两种试验都是单向由下端自由补、排水,上端进、出水口封闭.

#### 1.3.1 冻胀量试验

冻胀量试验设置程序为力控制模式,给试样模拟深度的竖向固结应力,试样在这个应力下完全固结,然后在此固结应力下冻结,记录冻胀率.分别以 100,300,500 kPa 固结应力做 3 组冻胀量试验来对比分析试验结果.在试验时,先分级加荷载至给定固结应力,至变形稳定(约 48 h),之后保持荷载不变,开始冻结,当试样上下端温度均稳定后结束(约 30 h).拆样到 CT 室扫描,并测量试验后试样的基本数据.

#### 1.3.2 冻胀应力试验

冻胀应力试验和冻胀量试验的程序设置有所不同,冻胀量试验只有一个力控制,而冻胀力试验在试样的固结阶段是力控制,而在冻结阶段则为位移控制.给试样模拟深度的竖向固结应力,试样在这个应力下完全固结,然后保持当前位移不变(即保持下端推杆的位置不变),开始冻结,记录冻胀应力.分别以 100,300,500 kPa 固结应力做 3 组冻胀应力试验来对比分析试验结果.在试验时,分级加荷载至给定固结应力,至变形稳定(约 48 h),之后保持当前位移不变,开始冻结,当试样上下端温度均稳定后结束(约 30 h).拆样到 CT 室扫描,并测量试验后试样的基本数据.

## 2 试验结果分析

### 2.1 冻胀量试验

图 2 和图 3 是冻胀量试验中得到的冻胀率与时间及温度变化情况.从图 2 中我们可以看出,冻结开始后,在最初的 200 min 内,试样是呈近直线收缩

的,固结应力越大,收缩率越大.相对应的图 3 中的温度,上端从  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降到  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,下端从  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降到  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .在这最初的 200 min 内,试样内只有小部分水结冰,其膨胀量小于整个试样由温度下降而冷缩的量.这个结果跟王建平等人的试验结果相吻合<sup>[9]</sup>.在 200 ~ 500 min 这段时间内,试样的膨胀率直线上升,固结应力越小,增长的速度越快,95% 以上的冻胀率在这个时间段里完成,相对应这个时间段,上端温度从  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降至  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,下端温度从  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降至  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .之后,虽然下端温度从  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降至  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但冻胀率趋稳定.在 100,300,500 kPa 下固结后最终冻胀率分别为 1.090%,0.713%,0.405%,说明随着固结应力的增加,即人工冻土深度的增加,最终冻胀率会线性逐渐减小<sup>[10]</sup>.

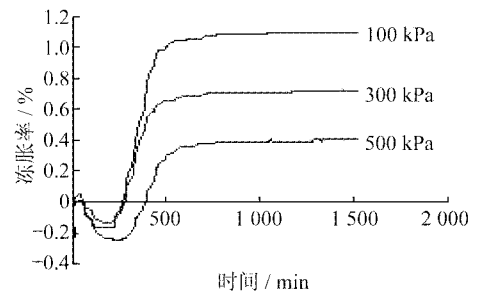


图 2 不同固结应力下的冻胀率

Fig. 2 Frozen rate at different consolidated stresses

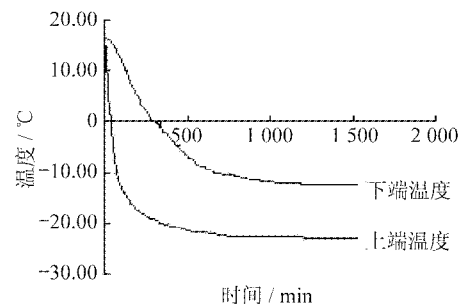


图 3 冻胀率试验的试样上下端温度情况

Fig. 3 Condition in temperature on the top and bottom in the frozen rate test

### 2.2 冻胀应力试验

图 4 是 100,300,500 kPa 下固结后冻结的冻胀应力对比.图 5 是相对应的上下端温度,基本跟冻胀量试验时的温度一样.从图 4 中可以看出,在冻结试验最初的 200 min 内,测得的应力是缩小的,这个跟冻胀量试验的原理是一样的;在 200 ~ 700 min 内,冻胀应力直线增加,直至稳定.随着固结应力的增加,即人工冻土深度的增加,冻胀应力会逐渐增加,

但是,增加的趋势减缓很快.在100 kPa的固结应力时,冻胀力可达到1 300 kPa,增加了12倍;在300 kPa时达到1 500 kPa左右,增加了4倍;而在500 kPa时达到2 000 kPa左右,只增加了3倍.

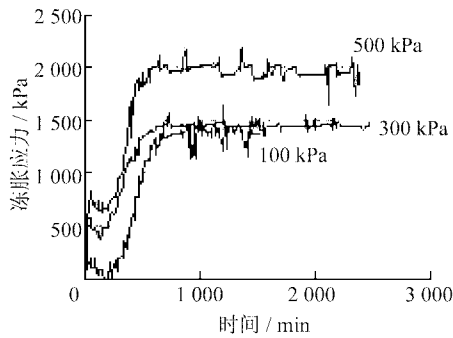


图4 不同固结应力下的冻胀应力

Fig.4 Frozen stress at different consolidated stresses

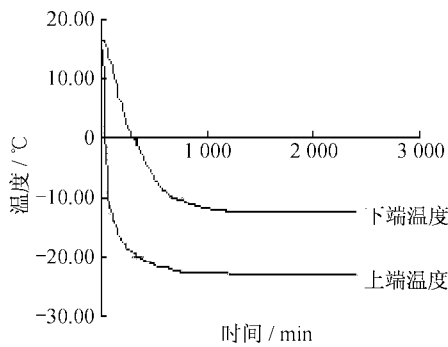


图5 冻胀应力试验的试样上下端温度情况

Fig.5 Condition in temperature on the top and bottom in the frozen rate test

2.3 CT扫描及水分迁移分析

试验前样品含水量较大,干密度较小,样品之间离散性较小;试验后有一定的排水,总重量减小,含水量减小,干密度增大.冻结过程发生物质迁移,层间有规律性变化,冷源端含水量大于自由端,土密度小于自由端.

各试样初始土密度有差异,试验后密度调整,受力大的土密度大,冻胀力试验稍大于冻胀量试验.初始含水量与密度互补,在试验后形成与荷载相反的梯阶(见图6).

逐层解析不同试验中各层土含水量和密度如图7和图8所示.在冻胀力试验中,试验后的上端密度比下端小,这是正常的.因为位移被约束,无法膨胀,而上端水分先冻结,冰吸下端水分并且把上端土颗粒往下端推移.在冻胀量试验中,试验后上端密度也比下端小.这是因为在有荷载作用下冻结,当上端水分冻

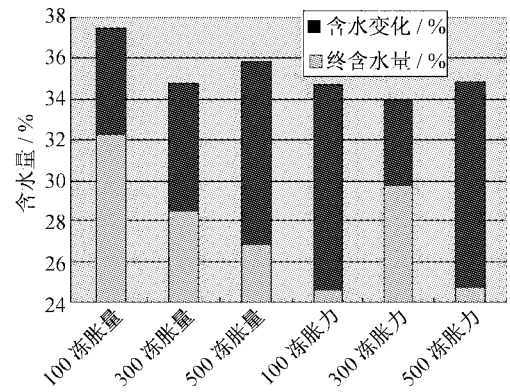


图6 不同冻结方法平均含水量

Fig.6 Water contents before and after tests at different freezing ways

结膨胀,并冰吸较下部分的水分,上端一些土颗粒就要往下推移,这样越往下干密度越大,冰吸效果越小.总体上是荷载阻止或者减少了结冰过程中的冰吸作用,使土样外部的水分无法或者很少到达土样内部,这个可以从冻胀力试验密度变化比冻胀量大和大荷载密度变化比小荷载大得到证实.

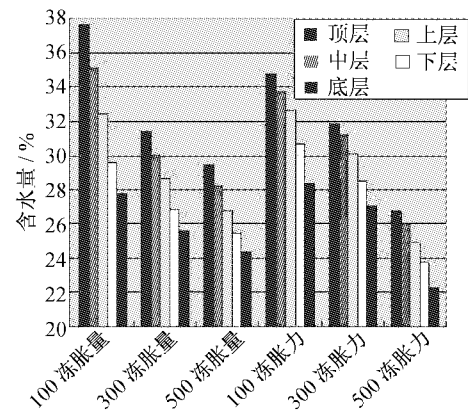


图7 不同冻结方法各层含水量

Fig.7 Water contents at different heights after tests

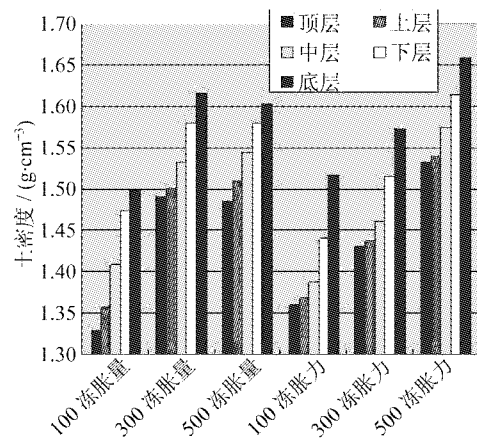


图8 不同冻结方法各层密度

Fig.8 Dry densities at different heights after tests

由表 1 和图 9 可得:各试样初始 CT 损伤(对经过硬化改正的 CT 数据,具有规范的 CT 数和标准差,分别代表了感兴趣区的密度和离散程度.在初始状态和试验过程中,这些数据会发生变化,预示着样品性质的改变)差异较大,试验后大多有所减小;试

验后 CT 损伤与荷载成正比<sup>[11]</sup>,冻胀量大于冻胀力;试验前各层 CT 标准差都很小,样品比较均匀;试验后由于物质迁移层间差异急剧扩大,CT 标准差有很大增加;由于变形约束,冻胀力试验的层间 CT 标准差大于冻胀量试验.

表 1 各试样不同冻结试验前后的结构分析  
Table 1 Various indexes before and after tests for all specimens

试验类型	初始土密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	冻结增量/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	终含水量/ %	含水变化/ %	冻前损伤	冻后损伤	初始层间 CT 标准差	标准差 变化	固结位移/ mm	冻胀率/ %	冻胀力/ kN
100 kPa 冻胀量	1.372 1	0.041 5	32.31	5.18	0.022 51	0.016 51	5.827	49.338	5.260	1.090	0.785
300 kPa 冻胀量	1.399 3	0.144 5	28.49	6.30	0.009 15	0.013 04	7.924	30.473	9.518	0.713	2.355
500 kPa 冻胀量	1.376 2	0.168 6	26.81	9.05	0.036 86	0.014 23	3.741	34.324	14.000	0.405	3.925
100 kPa 冻胀力	1.423 4	-0.007 1	32.24	1.43	0.013 41	0.007 85	2.586	57.167	3.187	0.000	10.810
300 kPa 冻胀力	1.423 9	0.059 5	29.69	4.24	0.009 21	0.009 87	2.617	55.708	7.152	0.000	11.730
500 kPa 冻胀力	1.406 5	0.177 1	24.73	10.10	0.016 70	0.011 09	5.179	40.285	13.000	0.000	15.600

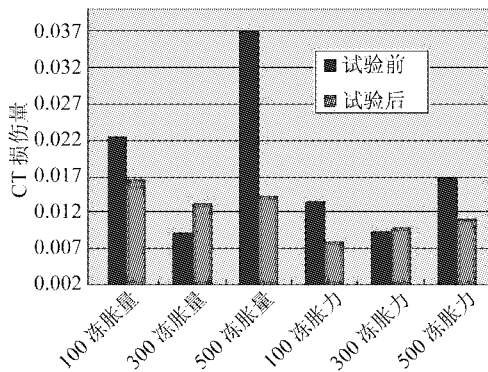


图 9 不同冻结方法平均 CT 损伤变化  
Fig. 9 CT mar before and after tests at different frozen ways

从以上冻胀量、冻胀力试验以及 CT 扫描分析可以看出,新型冻融试验机 POWER TESTV32-SHT 可以对人工冻土冻结过程进行很好模拟,配合 CT 扫描后,可以以全新的试验方式来综合研究人工冻土的宏观和细观特性.

### 3 结 论

(1) 本试验冻结土体温度在  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  至  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间,这正是人工冻土的作用温度范围,说明本试验方法能很好地模拟实际人工冻土.

(2) 固结位移随固结荷载增加而显著增加;小荷载冻胀量稍大于大荷载;在冻胀力试验中,随固结荷载增加,最终冻胀力有显著增加.

(3) 不同试验各层土密度一致性表达出冷端密

度小于自由端,小荷载试验差异大于大荷载试验,冻胀力试验大于冻胀量试验;各样含水量都表现出冷端大于自由端,小荷载试验差异大于大荷载试验,冻胀量试验大于冻胀力试验(与密度变化不一致);冻结过程内应力增大,物质迁移,冰体膨胀,等效饱和度增加,孔隙率降低.

(4) 就冻胀量而言,土层越深(即固结应力越大),其冻胀量成线性减小.这就要求在比较浅的地层运用冻结法施工时,要注意其冻胀量对上覆土层的影响;就冻胀力而言,冻胀力和固结应力的大小并不成线性增大关系,而是有明显的减缓增长的趋势,这就要求在比较浅的地层施工时,其周围的挡土墙是否能够承受增大数十倍的冻胀应力,而在较深地层施工时,也要注意大冻胀力对土层的影响.以上两点说明,施工对周围环境在浅土层进行冻结法的影响比在深土层时要大得多.

(5) 冻胀特性是与特定的冻结条件紧密相连的,在施工中确定了冻结方案后,应该取原状土层进行室内冻土试验,以此更能反映出该地层内土体冻胀特性及水分迁移情况.

(6) 在实现变温—加荷—补/排水试验过程中,将会遇到许多理论和试验技巧方面的问题.本工作提出了一种试验方法的初步应用,但还存在更多的理论和试验技术问题:试验装置要改进;要能准确测量补/排水量;应该考虑土性、孔隙、导热性等更多方面的原理性因素;应该建立能连续观测应力、温度、

排水的 CT 扫描装置,从而计算过程量等.

#### 参考文献:

- [1] ZHENG X Q, FLERCHINGER C N. Infiltration into freezing and thawing soils under differing field treatments [J]. J Irrig and Drain Engrg, 2001, 127(3):176-182.
- [2] ARENSON L U, SEGO D C. Modeling the freezing in coarse grained sands on a microstructural level [C] // Cold Regions Engineering 2006 Current Practices in Cold Regions Engineering 13th International Conference on Cold Regions Engineering, Orono, Maine, USA. 2006: 23-26.
- [3] 程国栋. 冻土力学与工程的国际研究新进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(3): 293-299.
- [4] 陈瑞杰, 程国栋, 李述训, 等. 人工地层冻结应用研究进展和展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 40-44.
- [5] 陈湘生. 人工地层冻结工法 [C] // 岩土工程青年专家学术论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 347-355.
- [6] 陈湘生. 冻结法在上海地铁中的几种形式——地层冻结工程技术及应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995: 469-471.
- [7] 杨更社, 谢定义, 张长庆, 等. 岩石损伤扩展力学特性的 CT 分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 250-253.
- [8] 金中林. 地铁隧道联络通道施工中的冷冻法加固土体技术和施工管理 [J]. 建筑施工, 2006, 7(7): 513-515.
- [9] 王建平, 王文顺, 史天生. 人工冻结土体冻胀融沉的模型试验 [J]. 中国矿业大学学报, 1999, 7(4): 303-306.
- [10] 刘珣, 梁鹏. 城市地下工程中人工冻结法的防冻胀优化设计研究 [J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2004, 12(4): 387-390.
- [11] 刘增利, 李洪升, 朱元林, 等. 冻土初始与附加细观损伤的 CT 识别模型 [J]. 冰川冻土, 2002, 10(5): 676-680.

(编辑: 陈海清)

#### · 简讯 ·

### 我校张田忠等 5 位学者入选 2008 年度“曙光计划”

2008 年度“曙光计划”评审结果日前公布, 本市高校推荐的 133 位青年教师通过项目答辩, 其中 56 位学者脱颖而出, 我校力学所张田忠博士、通信学院刘云启博士、材料学院程晋荣博士、文学院董丽敏博士、影视学院聂伟博士等 5 位榜上有名.

由上海市教育基金会资助、市教委共同实施的曙光计划, 自 1995 年启动以来, 对本市高校优秀青年骨干教师的培养起到了很大的推动作用, 完成了一批高质量的科研项目, 在基础研究、社会科学研究、高新技术领域以及经济建设和社会发展中作出了积极的贡献, 已经形成了一支高水平的曙光学者队伍, 有的曙光学者已经成为高校的栋梁之才, 曙光效应日益凸现.

我校这次获准资助的曙光项目分别是张田忠的“碳纳米管力学行为小尺寸效应及其相关器件原理研究”、刘云启的“基于包层模的光纤无源器件及其传感应用研究”、程晋荣的“铁电薄膜/贱金属智能材料及器件的研制”、董丽敏的“妇女解放与 1949 ~ 1966 年的社会文学/文化”、聂伟的“泛亚语境与中国电影产业发展研究”. 学校将根据“曙光计划”的项目管理要求, 保障入选者的工作条件, 确保项目取得良好成绩.

(科技处)