

动、静荷载作用下细粒土的冻胀特性实验研究

田亚护, 刘建坤, 彭丽云

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 随着列车速度的不断提高, 季节冻土区路基工程的冻胀问题也越来越突出。为研究细颗粒土在动荷载作用下的冻胀特性, 进行了无荷载、静荷载和动荷载条件下室内开敞系统的冻胀实验, 对比分析了无荷载、静荷载和动荷载条件下细粒土的冻胀变形、水分迁移速率及土中含水量的分布。实验结果表明: 静荷载、列车动荷载对土的冻胀都具有一定的抑制作用, 随着外荷载值的增大, 该细颗粒土的冻胀率逐渐减小; 且当静荷载值等于动荷载幅值的二分之一时, 动、静荷载对细颗粒土冻胀的影响基本相同; 土冻结过程中水分迁移速率随着冷却温度的降低而逐渐增大, 而随列车动荷载值的增大而相应降低; 土的冻胀特性基本不受列车动荷载频率变化的影响。

关键词: 动荷载; 冻胀; 水分迁移

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)12-1882-07

作者简介: 田亚护(1974-), 男, 陕西咸阳人, 讲师, 从事道路与铁道工程研究。E-mail: yhtian@bjtu.edu.cn。

Experimental study on frost action of fine-grained soils under dynamic and static loads

TIAN Ya-hu, LIU Jian-kun PENG Li-yun

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the increase of train speed, the frost hazard of subgrade engineering in seasonally frozen soil becomes more and more serious. In order to research frost heaving characteristics of fine-grained soil subjected to dynamic loading, the frost heaving tests are performed. Based on the results of laboratory experiments on open frost heave for fine-grained soils, the influences of no load, static load and dynamic load on frost heave susceptibility are discussed comparatively. The test results show that the frost of soils is restrained respectively by the static loading and the dynamic load of a train. The frost heaving ratio of fine-grained soil gradually tends to reduce with the increase of external load, and when the static load is equal to half of the dynamic load, the characteristics of frost heave of fine-grained soils under static load and dynamic load respectively are approximately equal. The moisture inflow velocity of freezing soil increases with the decrease of cooling temperature, and decreases with the increase of the dynamic load. The frost heave of soils is not affected by the change of cyclic loading frequency of the train.

Key words: dynamic load; frost heave; moisture migration

0 引 言

土的冻胀除由原位水分冻结引起外, 冻结过程中未冻区水分不断地向冻结锋面迁移、聚集并结晶形成冰透镜体, 是造成土体冻胀的主要原因。关于土冻结过程中水分迁移及冻胀机理, 国内外已进行了大量的研究, 认为水分向冻结区的迁移是在各种势梯度作用下完成的, 在理论上先后提出了冻胀预报的经验及半经验模型、流体动力学模型、刚冰模型和热力学模型等^[1-5], 但所有模型中都未考虑动荷载对冻胀的影响, 且有的模型虽然考虑了静荷载的影响, 也仅把静荷载

作为一个影响因子, 而未考虑土冻结过程中荷载、冻胀和蠕变引起土应力场变化的影响。因为外荷载一方面使土层压缩脱水固结, 改变了土体的密实度和导湿率, 从而影响冻结过程中水分迁移速率; 另一方面只有当冻胀力大于上覆荷载时冻胀才可发生。在实验方面, 陈肖柏等^[6-7]进行了不同类别土的冻胀敏感性研究和冻结速率与超载应力对冻胀的作用研究, 并提出了相应的冻胀模型, 但模型中对荷载的影响也以一定的

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678020)

收稿日期: 2009-07-14

折减系数来考虑。徐学祖和邓友生等^[3-4, 8]通过实验对土的冻胀机理、水分及盐分迁移和土水特征参数进行了研究；朱强^[9]对野外试验场地观测资料进行了统计分析, 并根据水分迁移量的不同划分土体冻胀的等级；李述训等^[2, 10]对土体冻融过程中气态水及液态水迁移进行了大量的试验, 研究了冻融作用对系统与环境间能量交换的影响；以上研究主要考虑了土的性质对冻胀的影响, 未考虑外加荷载的影响作用。李萍等^[4]、何平等^[5]总结了国内外土体冻结过程中的热质迁移和冻胀模型研究进展, 阐述了目前的热质迁移模型多半还处于室内试验验证阶段, 而且一些模型中的参数难以测得, 无法验证模型的实用性。

随着经济的发展, 高速公路、铁路和重载铁路已成为交通建设发展的主要方向, 冻土区路基冻害问题会比过去中低速运行时更为突出。目前已有的研究工作大多数针对中低水平的建筑物, 而且未考虑动荷载对土体中水分迁移和冻胀的影响。本文通过细颗粒土在开敞条件下的冻胀实验, 对比分析无荷载、静荷载和动荷载条件下土的冻胀变形特点, 初步探讨了细颗粒土的冻胀特性与动荷载的关系。

1 土样制备及实验设计

实验采用内蒙古某铁路路基填土, 深度范围为路肩下 1.2 m。该地段属于季节冻土区, 年平均气温在 6℃左右, 年极端最低气温可达 -30℃, 季节冻结深度约为 1.2 m, 且地下水位较高。土样物理性质见表 1。

表 1 土样基本物理性质

Table 1 Basic properties of soil

颗粒成分/%			比重	液限 /%	塑限 /%
>0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm			
40.6	45.7	13.7	2.74	26.6	13.4

根据冻胀试验规程^[11]中有关土样和试样制备的要求, 制取含水率为 17.8%、直径 150 mm、高 100 mm 的圆柱体试样, 其压实度为最大干密度的 90%。进行实验时, 参图 1 所示装置, 把试样盒和加载系统放在低温室中, 温度传感器通过试样盒边上的测温孔插入土体中；并且试样盒周围用泡沫塑料保温, 以确保其单向冻结；在底板采用马氏瓶进行补水。

实验开始前先使试样在 1℃条件下恒温稳定, 然后开启加载系统和补水系统, 同时顶板的温度保持固定的负温 (冷端冷却温度), 底板温度保持 1℃不变 (暖端温度), 使土自上而下冻结。实验过程中通过计算机监控试样的温度变化和冻胀变形量；冻结 72 h 后在低温室把试样切成薄片测定含水率。

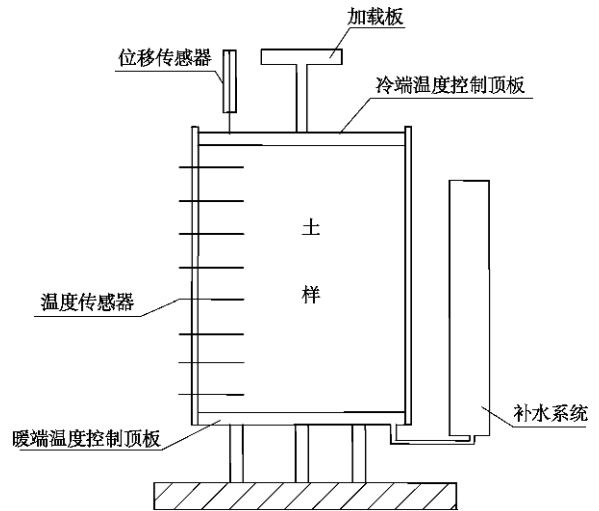


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Investigation device of frost heave

实验中动荷载的加载条件根据铁路部门现场实测的路基面动应力结果^[12], 当列车速度为 200 km/h 时路基面动应力最大值为 70~80 kPa, 频率为 3 Hz 左右。实验中共进行了 18 个样品, 如表 2 所示。

表 2 土冻结作用的实验参数

Table 2 Parameters of freezing experiment on soils

外加荷载	荷载值/kPa	频率 /Hz	冷端温度/℃		
无荷载	—	—	-1.7	-3.0	-4.5
静荷载 1	30	—	-1.7	-3.0	-4.5
静荷载 2	60	—	-1.7	-3.0	-4.5
动荷载 1	31+29sin πt	0.1	—	-3.0	—
		0.5	—	-3.0	—
		1.0	—	-3.0	—
动荷载 2	46+44sin πt	3.0	-1.7	-3.0	-4.5
		3.0	-1.7	-3.0	-4.5

2 结果与讨论

2.1 冷端温度对冻胀的影响

图 2~4 为不同冷端温度下, 土体在无荷载、静荷载和动荷载 (频率 3.0 Hz) 作用下的变形过程, 其中动荷载为 31+29sin πt kPa, 静荷载为 30 kPa。在实验开始后短期内由于外荷载对土样产生一定的压缩变形, 而后随着土温逐渐降低冻胀发生, 其变形由最小值开始逐渐增大。由于荷载对土的压密作用使得土中孔隙体积减小和导热系数增大, 而且当冷端温度较高时, 土中产生过冷现象持续时间也较长, 因此土体冻结速率较慢, 所以图 2 中无荷载作用时土样在实验开始 23 h 后才开始出现变形增长。

从图 2~4 可以看出, 不同条件下土冻胀变形量大小不同, 但变形发展趋势比较相似。当冷端温度一定

时, 无荷载作用时土的冻胀变形量最大, 而静荷载、动荷载作用下土的冻胀变形较小, 这表明静荷载和动荷载对土的冻胀变形都有一定的抑制作用。

土冻结过程中冻胀变形是由土中的初始水分冻结和迁移水分的冻结引起的。实验中土的初始含水率为 17.8%, 其饱和度为 80%, 因为在冻结初期土体冻结速率和冻胀变形增长均较快, 而冻土的渗透系数较小, 所以此时冻胀变形主要由土中的初始水分冻结引起的。在土体进入冻结稳定阶段后, 土的冻结速率缓慢, 相应其冻结深度变化较小, 但其冻胀量不断增大, 此

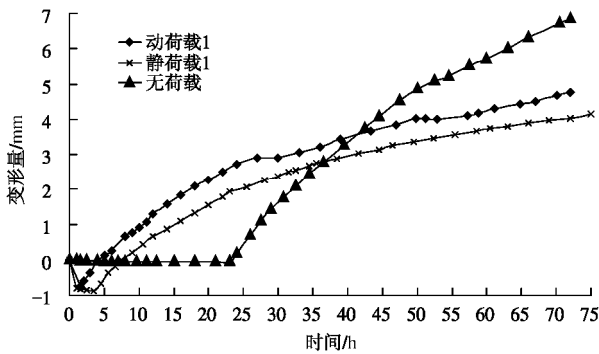


图2 冷端温度为-1.7°C时土样的变形过程
Fig. 2 Deformation of soils at -1.7°C

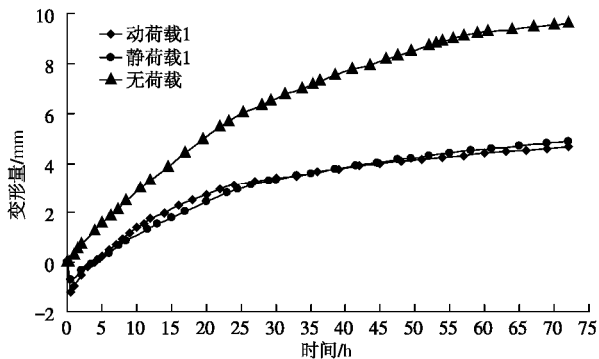


图3 冷端温度为-3.0°C时土样的变形过程
Fig. 3 Deformation of soils at -3.0°C

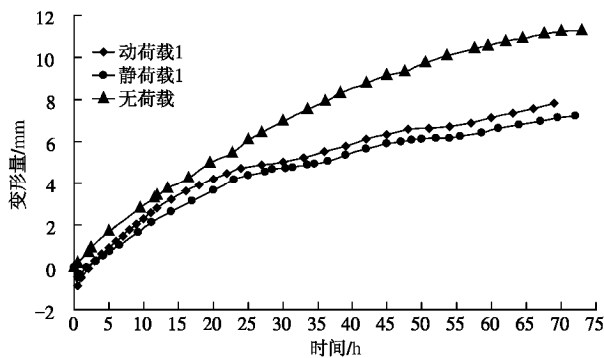


图4 冷端温度为-4.5°C时土样的变形过程
Fig. 4 Deformation of soils at -4.5°C

时冻胀基本上全部是由迁移的水分冻结产生的, 因此水分迁移速度的大小也就直接表现为冻胀变形增长梯度的变化。在冻结稳定阶段以后, 静荷载 1、动荷载 1 作用下的土体冻胀变形曲线基本呈平行发展趋势, 即其增长的梯度基本相同, 说明此时冻结过程中水分迁移速度也基本接近, 也表明了静荷载 1 和动荷载 1 在冻结速率较小的时候对这种细颗粒土的冻胀影响差异较小。

图 5~7 反应了土冻胀率随时间的变化, 即单位时间内冻胀量增量与冻结深度增量的比值随时间的发展趋势, 可表示为

$$h_t = \Delta h / \Delta H_t \quad (1)$$

式中 h_t 为冻胀率; Δh 为冻胀量增量, (mm); ΔH_t 为冻结深度增量, (mm)。

图 5~7 表明, 冻胀率随冻结时间延长呈不断增大趋势, 在冻结初期即快速冻结阶段其值较小; 在冻结稳定区以后冻胀率急剧增大, 而此时土体冻结深度变化较小, 因此迁移水分在冻结锋面处不断结冰聚集导致冰透镜体产生。在冻结进入稳定区以后, 土冻胀主要由迁移水分的结冰体积膨胀引起, 而从图 5~7 可以看出, 静荷载与动荷载作用下的冻胀率相互之间差异较小, 表明水分迁移速率较接近。

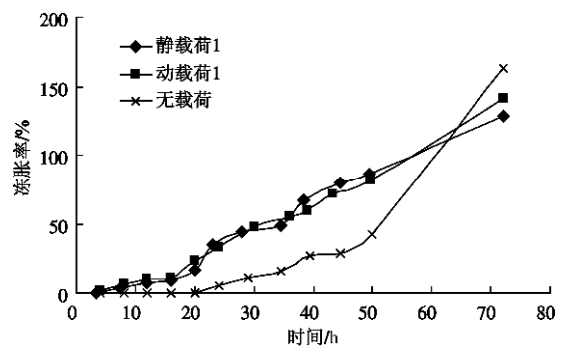


图5 冷端温度为-1.7°C时冻胀率随时间变化
Fig. 5 Variation of frost heaving ratio of soils at -1.7°C

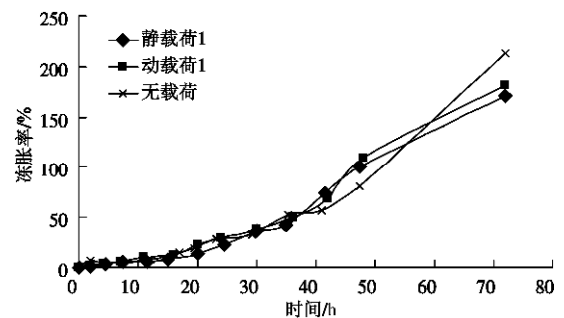


图6 冷端温度为-3.0°C时冻胀率随时间变化
Fig. 6 Variation of frost heaving ratio of soils at -3.0°C

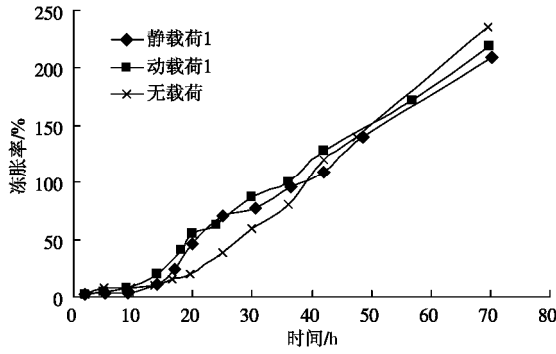


图 7 冷端温度为-4.5°C时冻胀率随时间变化

Fig. 7 Variation of frost heaving ratio of soils at -4.5°C

2.2 荷载大小对冻胀的影响

图 8~10 为不同荷载作用下土样的变形过程, 其中动荷载 2 为 $46+44\sin t$ kPa, 动荷载 1 为 $31+29\sin t$ kPa, 频率都为 3.0 Hz; 静荷载 2 为 60 kPa, 静荷载 1 为 30 kPa。

由图 8~10 可以看出, 随着荷载的增大, 在实验初始时土体压缩变形量也增大, 导致更多的水分从土中排出, 从而土中水分含量相对减小。在冻结初期, 土体冻胀变形量主要由原始水分冻结引起, 再加上荷载对冻胀变形的抑制作用, 所以在冻结初期土体的冻胀曲线的增长梯度随荷载的增大而减小; 在进入冻结稳定区以后, 冻胀变形曲线梯度逐渐减小, 此时迁移来的水分在冻结锋面处聚集成冰引起土体积膨胀。

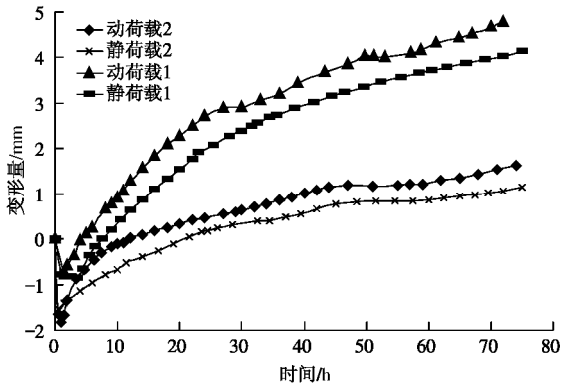


图 8 冷端温度为-1.7°C时土样的变形过程

Fig. 8 Deformation of soils at -1.7°C

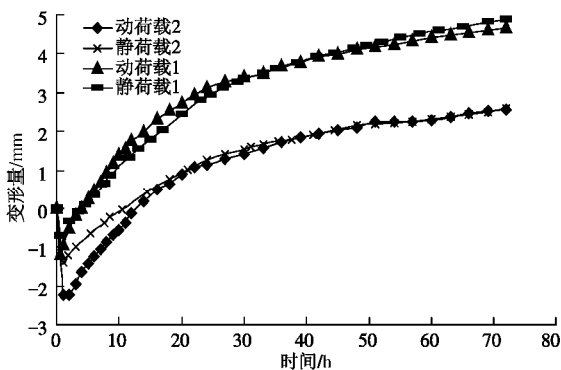


图 9 冷端温度为-3.0°C时土样的变形过程

Fig. 9 Deformation of soils at -3.0°C

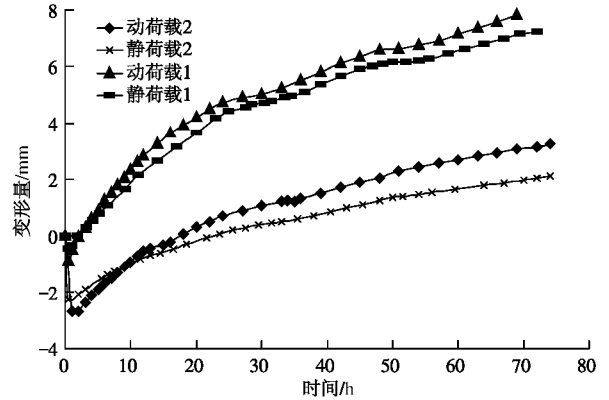


图 10 冷端温度为-4.5°C时土样的变形过程

Fig. 10 Deformation of soils at -4.5°C

图 11~13 为实验 72 h 后土中含水率的分布曲线, 图中高度为 0, 10 cm 处分别为土样的暖端、冷端位置。可以看出: 在最大冻深处土中含水率随着外加荷载的增大而减小; 随着冷端温度的降低, 土体冻结锋面处含水率逐渐增大, 而且含水率也随着荷载增大相互之间差异也越来越大。因为最大冻深处冰晶主要是由迁移水分冻结聚集而成, 所以含水率越高表明水分迁移速度越大, 也说明水分迁移速度随着外加荷载的增大而减小, 即采用颗粒土填筑的路基在冻结过程中的水分迁移速率随着列车产生的动应力增大而降低。

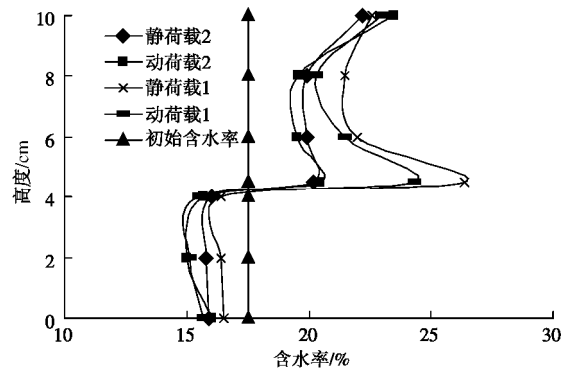


图 11 冷端温度为-1.7°C时 72 h 后土样中含水率变化

Fig. 11 Distribution of water content in soils at -1.7°C after 72 hours

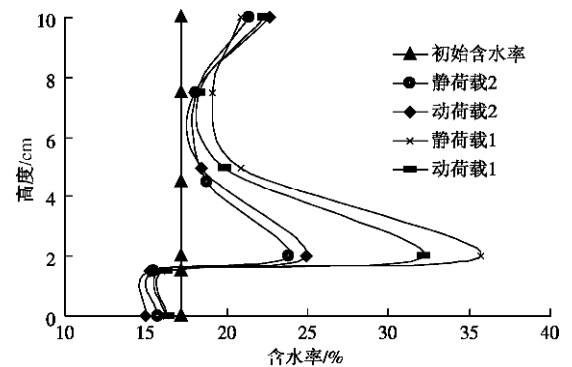


图 12 冷端温度为-3°C时 72 h 后土样中含水率变化

Fig. 12 Distribution of water content in soils at -3°C after 72 hours

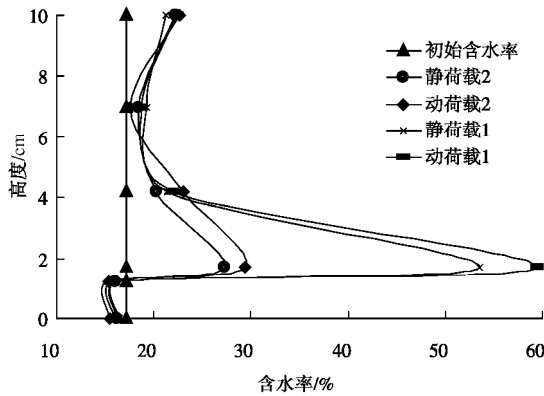


图 13 冷端温度为-4.5°C时 72 h 后土样中含水率变化

Fig. 13 Distribution of water content in soils at -4.5°C after 72 hours

表 3 为实验 72 h 后土样的冻胀量、冻结深度及冻胀率结果。可以看出，当冷端温度一定时，无荷载作用时土的冻胀量、冻胀率均比有荷载作用下的要大；随着外加荷载值的增大，土体冻胀量、冻胀率相应减小。动荷载 1 与静荷载 1 作用下土冻胀量和冻胀率较接近，说明开敞条件下这种细颗粒土在冻结过程中，当静荷载值等于动荷载幅值的二分之一时，动荷载、静荷载的作用对土冻胀的影响基本相同。

表 3 不同冷端温度下实验结果

Table 3 Experimental results at different cooling temperatures

冷端温度	荷载类型	冻胀量 /mm	冻结深度 /mm	冻胀率 /%
-1.7°C	无荷载	6.8	52	13.2
	静荷载 1	5.0	53	9.4
	动荷载 1	5.1	56	9.1
	静荷载 2	2.7	57	4.7
	动荷载 2	3.4	53	6.4
-3°C	无荷载	11.9	78	15.0
	静荷载 1	5.6	74	7.6
	动荷载 1	5.9	76	7.7
	静荷载 2	4.0	78	5.1
	动荷载 2	4.8	76	6.3
-4.5°C	无荷载	9.2	90	10.2
	静荷载 1	7.9	90	8.8
	动荷载 1	8.3	91	9.1
	静荷载 2	4.7	90	5.2
	动荷载 2	6.0	89	6.8

2.3 动荷载频率对冻胀的影响

图 14, 15 中动荷载大小都为 $31+29\sin t$ kPa, 频率分别为 0.1, 0.5, 1.0, 3.0 Hz。从图 14 可看出，在 4 种不同频率的荷载作用下土冻结过程中，其变形曲线基本上呈平行发展趋势，且在相同时刻土冻胀量较接近。在冻结 72 h 后，频率为 0.1 Hz 的动荷载作用下土样冻胀量为 5.8 mm，其冻胀率为 7.7%；频率 0.5 Hz 的动荷载作用下冻胀量为 6.0 mm，其冻胀率为 8.0%；频率 1.0 Hz 的动荷载作用下冻胀量为 6.1 mm，其冻胀率为 8.0%；频率 3.0 Hz 的动荷载作用下冻胀量为

5.9 mm，其冻胀率为 7.7%，不同频率的动荷载作用下土样冻胀率基本相近。图 15 显示，在冻结过程中不

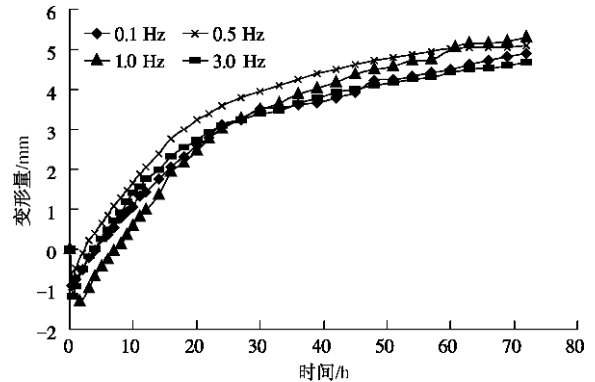


图 14 冷端温度为-3°C时不同频率的动载作用下的变形

Fig. 14 Deformation of soils under dynamic loads with different frequencies at -3.0°C

同频率动荷载作用下土冻胀率变化趋势相互之间较接近，表明冻结过程中结冰速率基本相等，也说明在冻结似稳定区以后水分迁移速度也基本相同。因此，在动荷载作用下此类型的细颗粒土冻胀特性基本不受荷载频率变化的影响。

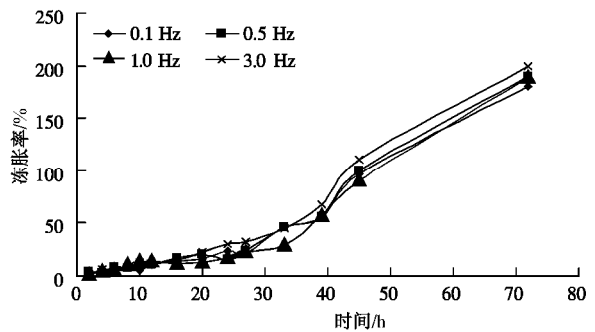


图 15 冷端温度为-3°C时不同频率的动荷载作用下冻胀率变化

Fig. 15 Frost heave ratio of soils under dynamic loads with different frequencies at -3.0°C

3 结 论

(1) 列车产生的动荷载对细颗粒土的冻胀具有一定的抑制作用，且当静荷载值等于动荷载幅值的二分之一时，动、静荷载对细颗粒土冻胀的影响基本相同。

(2) 细颗粒土的冻胀特性基本不受列车动荷载频率变化的影响。

(3) 细颗粒土冻结过程中水分迁移速率随着列车动荷载值的增大而相应降低。

参考文献:

[1] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (CHEN Xiao-bai, LIU Jian-kun, LIU Hong-xu, et al. Frost action of soil and foundation

- engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 李述训, 程国栋. 冻融土中的水热输送问题[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1995. (LI Shu-xun, CHEN Guo-dong. Transportation of water and heat during freezing and thawing[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1995. (in Chinese))
- [3] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 土体冻胀和盐胀机理[M]. 北京: 科学出版社, 1995. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Mechanism of frost heaving and salt heaving in soil[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese))
- [4] 李 萍, 徐学祖, 陈峰峰. 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. (LI Ping, XU Xue-zu, CHEN Feng-feng. State and progress of research on the frozen fringe and frost heave prediction models[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, **22**(1): 90 - 95. (in Chinese))
- [5] 何 平, 程国栋, 朱元林. 土体冻结过程中的热质迁移研究进展[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(1): 92 - 96. (HE Ping, CHEN Guo-dong, ZHU Yuan-lin. The progress of study on heat and mass transfer in freezing soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(1): 92 - 96. (in Chinese))
- [6] 陈肖柏, 王雅卿. 冻结速率与超载应力对冻胀的影响[C]// 第二届全国冻土学术会议论文集. 兰州: 甘肃人民出版社, 1983: 223 - 228. (CHEN Xiao-bai, WANG Ya-qing. The influences of freezing rate and overload stress on frost heaving in soil[C]// Proceedings Of The Second National Symposium on Frost. Lanzhou: Gansu Peoples Publishing House, 1983: 223 - 228. (in Chinese))
- [7] 陈肖柏, 王雅卿. 黏性土冻胀预报新模型[J]. 中国科学 B 辑, 1990(3): 226 - 235. (CHEN Xiao-bai, WANG Ya-qing. New model of frost heave prediction of clay soil[J]. China Science, 1990, **B**(3): 226 - 235. (in Chinese))
- [8] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991. (XU Xue-zu, DENG You-sheng. Experimental study of moisture migration in freezing soil[M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese))
- [9] 朱 强. 论季节冻土冻胀沿冻深的分布[J]. 冰川冻土, 1988, **10**(1): 1 - 7. (ZHU Qiang. Research on frost heaving distribution along frozen depth in seasonal frost region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, **10**(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [10] 李述训, 南卓铜, 赵 林. 冻融作用对系统与环境间能量交换作用[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(2): 109 - 115. (LI Shu-xun, NAN Zhuo-tong, ZHAO Lin. Impact of freezing and thawing on energy exchange between the system and environment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(2): 109 - 115. (in Chinese))
- [11] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T50123—1999 Standard of geotechnical test method[S]. 1999. (in Chinese))
- [12] 中国铁道科学研究院. 铁路路基基床结构设计方法及参数研究[R]. 2008. (China Academy of Railway Sciences. Research on parameters and design method of structure of railway subgrade bed[R]. 2008. (in Chinese))