

地震荷载作用下冻土的动力学参数试验研究

吴志坚^{1,2}, 王兰民², 马 巍¹, 程建君³, 冯文杰¹

(1. 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, 甘肃兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000;

3. 中原油气高新股份有限公司天原气产销厂科研所, 河南濮阳 457061)

摘要: 基于地震动荷载作用下冻土的动三轴试验, 定量研究了重塑冻结兰州黄土的动本构模型、动弹性模量在不同温度(-2℃、-5℃、-7℃、-10℃)下的变化规律, 建立了相应的温度影响模型, 为寒区建设工程提供了较为可靠的抗震设计依据。

关键词: 冻土; 动本构模型; 动弹性模量; 温度

中图分类号: P315.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2003)03-0210-05

0 前言

地球上多年冻土、季节冻土和瞬时(短暂)冻土区的面积约占陆地面积的 70%, 其中多年冻土面积占陆地面积的 20%^[1]. 我国的多年冻土面积占国土面积的 21.5%, 在全世界占第三位, 季节冻土区约占国土面积的 53.5%, 其中高海拔多年冻土面积居世界之最^[2]. 随着西部大开发的来临, 国家将投资在青藏高原冻土地区建设包括青藏铁路在内的多项基础设施建设项目; 而青藏高原地区是我国强震多发区之一, 仅 1980 年以来在该地区就有 14 次 6.0~6.9 级地震, 2 次 7.0~8.5 级地震发生. 特别是 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震在冻土区形成了规模宏大的地表形变, 并对震区铁路、公路、地下管线、通信等工程设施造成了一定破坏. 因此开展青藏高原冻土区的抗震设防研究成为当务之急.

冻土的动力学特性是寒区建设工程抗震设计的重要依据之一. 由于实验技术和寒区社会经济发展状况等原因, 国内外对冻土力学特性研究起步较晚. 国外在 20 世纪 70 年代中期, 国内在 90 年代初才开始对冻土在不同负温、不同土性、不同初始含水量下的静力学特性以及周期振动荷载下的强度和变形性质进行实验研究, 其中冻土工程国家重点实验室在冻土常规土力学性质方面开展了大量的研究工作. 但是涉及到冻土在地震荷载作用下的动力特性以及温度对其影响的研究报告甚少.

已有的研究业已表明冻土的动力特性和其它土类有明显的差异^[3~10]. 虽然总的来说在不受外界和人类活动扰动的前提下, 冻土是有利于抗震的, 但是由于近数十年来全球气候变暖, 青藏高原年平均气温普遍上升 0.2~0.4℃, 尤其是冬季气温升值幅度大, 气温年较差逐年减小, 导致高原多年冻土多呈区域性退化状态^[11]. 全球气候变暖和多年冻土退化所产生的环境变化使青藏公路沿线多年冻土区的自然地理、地质环境、工程地质环境和工程地质条件发生了很大变化^[12]. 此时, 一方面在地震荷载下冻土的变形要比通常大得多而且其受破坏要比通常容易得多; 另一方面冻土动力特性的变化对其场地的地面地震动参数也将产生显著影响. 本文的目的就是通过试验来调查温度对冻土动力参数的定量影响规律, 为评估冻土退化和融冻对其抗震性能带来的影响提供科学依据, 同时也为我国西部大开发的重点工程建设提供可靠的抗震设计依据.

收稿日期: 2003-01-06

基金项目: 地震科学联合基金会资助课题(100134); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04); “973”国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412704); 中国地震局昆仑山口西 8.1 级地震科学考察项目; 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2003034.

作者简介: 吴志坚(1974-), 男(汉族), 安徽太湖人, 在读博士生, 主要从事寒区工程、冻土动力学与地基抗震方向的研究.

1 试验方案

1.1 试验仪器

本试验是在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的振动三轴材料试验机(MTS-810)上进行.该仪器能进行冻、融土及软岩在动、静应力状态下的恒荷载或恒变形速率单、三轴拉、压试验.可以对动应力的幅值、环境温度、振动频率任意控制,所有试验结果由计算机控制的数据采集系统自动采集.其主要技术指标为:最大轴向负荷:100 kN;围压范围:0.5~20 MPa;最大轴向位移:±85 mm;频率范围:0~50 Hz;温度范围:常温~-30 °C

1.2 土样制备

试验土样采用兰州黄土.其塑限含水量为17.7%;液限含水量为24.6%;干容重为1.6 g/cm³;其颗粒级配与比重见表1.试样为重塑黄土.为了试验的可靠性,采用标准批量制样方法,即在制样前先将土配成含水量为10%的散状土,并在限制蒸发条件下保持约6小时使土体均匀;然后分层装模,按试验要求的干容重将土夯实压密.试样在抽真空后置于-30 °C的低温下使其快速冻结;48小时后脱模,加工成直径为62 mm,高度为150 mm的圆柱体标准试样后,在不同温度下恒温12小时使样品整体温度一致后进行动三轴试验.由于试样高径比为2.42,基本上克服了试样两端摩擦对实验成果的影响.

表1 试验土样的颗粒级配与比重

		颗粒级配				比重
粒级/mm	> 0.1	0.1~0.05	0.05~0.005	< 0.005	2.7	
百分比/%	1.7	5.4	58.6	34.3		

1.3 试验步骤

1.3.1 施加静荷

本试验在等压固结下进行,在侧压 σ_{3c} 施加时,需要在轴向施加一个和侧压相等的压力 σ_{1c} .本试验中 $\sigma_{3c} = \sigma_{1c} = 1$ MPa.

1.3.2 振动测试

振动测试的动力条件主要是模拟地震力作用的波型、方向、频幅和持续的时间.如果按照Seed等^[13]的方法,则可以将随机变化的地震波型简化为一种等效的谐波作用,谐波的幅值剪应力为 $\tau_e = 0.65 \tau_{max}$;谐波的等效循环次数 N_e 根据地震的烈度确定(VII、VIII、IX度时分别为10、20、30次);频率为1~2 Hz;地震方向按水平剪切波考虑.本试验中施加的动荷载为等效的、逐级增加幅值的、加卸荷为周期变化的正弦波循环荷载.每级动荷载由最大动应力 σ_{1max} 、最小动应力 σ_{1min} 及频率来确定.最大动应力 σ_{1max} 、最小动应力 σ_{1min} 是指在一个周期循环振动中应力所达到的最大和最小值,即正弦波的波峰与波谷.试验的进行按力控制方式进行,在每一级动应力作用下振动10次,然后对同一试样逐级增加动应力,共施加11级动荷载,直至产生明显的残余应变.振动频率为1 Hz.试验数据采集由MTS自动进行,采样间距为0.05秒.每级动荷载大小见表2.

表2 每级施加的动应力(单位: kN)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
σ_{1max}/kN	3.6	4.1	4.7	5.4	6.2	7.1	8.1	9.2	10.4	11.7	13.1
σ_{1min}/kN	3.3	3.7	4.2	4.8	5.5	6.3	7.2	8.2	9.3	10.5	11.8

共需在4种温度下(-2 °C, -5 °C, -7 °C, -10 °C)分别对两组(每组4个试样)试样进行对比试验.

2 试验结果

2.1 动本构模型

通过对上述4种不同温度,每种温度下的两个对比试样的动三轴试验,其结果如图1所示.对试验数

据的回归统计分析说明, $\sigma_d - \epsilon_d$ 骨架曲线的形态基本上为双曲线型, 故可以用 Hardin-Dmievich 的双曲线模型来描述. 如图 1 中曲线所示.

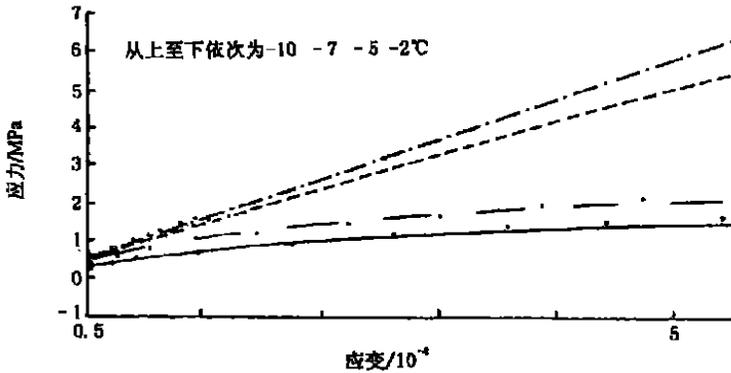


图 1 不同温度下动应力—动应变关系曲线

Fig. 1 Dynamic stress changing with dynamic strain in different temperatures.

双曲线模型的表达式为

$$\sigma_d = \epsilon_d / (a + b \times \epsilon_d) \quad (1)$$

式中: σ_d 为动应力幅值; ϵ_d 为动应变幅值; a, b 为试验参数.

2.2 动弹性模量表达式

根据材料力学定义, 冻土的动弹性模量 $E_d = \sigma_d / \epsilon_d$, 将式(1)代入该定义式即得出冻土的动弹性模量表达式

$$E_d = 1 / (a + b \times \epsilon_d) \quad (2)$$

式中, 当 $\epsilon_d \rightarrow 0$ 时, $1/a$ 表示曲线在原点的切线斜率, 物理意义为冻土的初始动弹性模量 E_{dmax} ; $1/b$ 为曲线的渐进线, 表示轴

向动应力的最大值 σ_{max} . 函数图象如图 2 所示.

如果把动应力—动应变曲线的坐标系转换横坐标为 ϵ_d , 纵坐标为 $1/E_d$ 时, 函数图象如图 3 所示的一组直线, 其表达式为

$$1/E_d = a + b \times \epsilon_d \quad (3)$$

2.3 参数的选取

由图 3 可以得出冻土在不同温度, 动荷载作用下动弹性模量计算式中 a, b 的参考值, 如表 3 所示.

2.4 温度对冻土动弹性模量的影响

由表 3 可以看出: 地震动荷载作用下重塑冻结兰州黄土的动本构模型的双曲线表达式中 a, b 参数值受冻土温度的影响较大; 随着温度的降低 a, b 参数值均有减小; 当冻土温度由 -7°C 下降到 -10°C 时 a, b

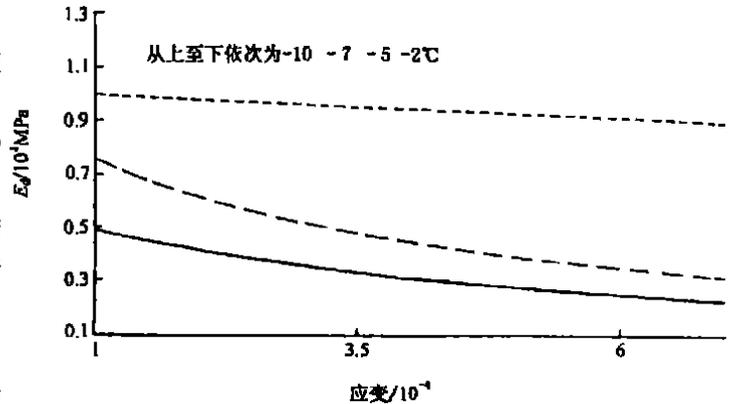


图 2 不同温度下 $E_d - \epsilon_d$ 关系曲线

Fig. 2 Dynamic elastic modulus changing with dynamic strain in different temperatures.

参数值减少并不明显, a 值最多减少 0.095, b 值最多减少 0.0194; 而在由 -2°C 下降到 -5°C 的过程中 a, b 参数值减少非常明显, a 值最多减少 0.832, b 值最多减少 0.077. 在同一温度下, 两个试样所得出的 a, b 值及由此计算出的动弹性模量相差不多, 说明试验结果重复性较好.

结合图 2、3 可以看出: 随着温度的降低冻土的动弹性模量增大, 并且在水—冰的剧烈相变区 (温度约为 $0 \sim -5^\circ\text{C}$) 其值随温度变化更为明显; 随着动应变的增大, 冻土的动弹性模量减小. 动弹性模量随温度降低而增大是由于冻土中冰的胶

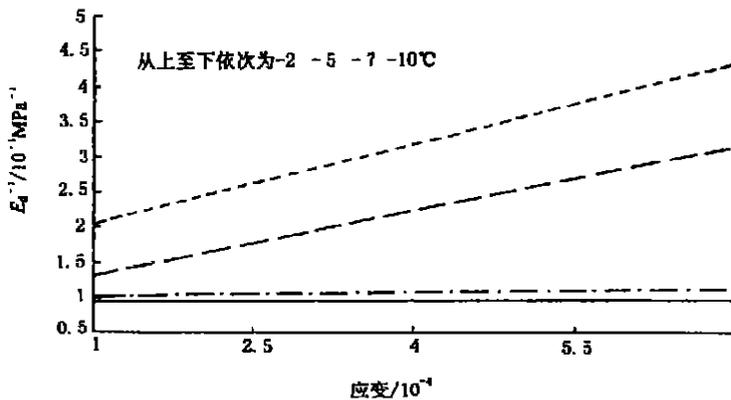


图 3 $1/E_d - \epsilon_d$ 关系曲线

Fig. 3 $1/E_d$ changing with ϵ_d in different temperatures.

结连接作用对温度的变化极为敏感所致:当冰的温度从 -1.5°C 下降到 -3.5°C 时其粘结能力从 2.2 MPa 增加到 4.5 MPa ,约增加一倍^[9]。原因是冰晶格中氢原子活性在外界作用下不断改变,当温度下降时,氢原子活性减小,冰变为较好的有序结构(更致密,更坚硬)。而当温度 $T < -78^{\circ}\text{C}$ 时,冰的晶格变成稳定状态;当温度 $T < -70^{\circ}\text{C}$ 时,冰的六方晶格变成立方晶形。而当温度升高,分子活化能随之增加,加速了分子的重新组合作用并削弱了分子间的连接作用,从而使冰的强度性能明显下降。其次,冻土中未冻水含量对动弹性模量也有影响。冻土中未冻水含量、成分和性质随着外界条件的变化而变化,并与外界条件处于动态平衡中。H.A.崔托维奇提出,在冻土的水—冰剧烈相变区温度每减少 1°C 未冻水含量减少在 1% 以上^[7]。因此,在水—冰剧烈相变区决定冻土强度的因素是冰和未冻水的含量及其与负温变化的关系。

表3 试验所得 a, b 值

温度/ $^{\circ}$	第一组				第二组				平均			
	-2	-5	-7	-10	-2	-5	-7	-10	-2	-5	-7	-10
a 值	1.633	0.801	1.053	0.958	1.72	1.245	0.924	0.919	1.677	1.023	0.988	0.938
b 值	0.366	0.292	0.015	0.0013	0.392	0.315	0.021	0.0016	0.379	0.304	0.018	0.0015

2.5 动剪切模量的计算

与动弹性模量相应的动剪切模量可按式计算:

$$G_d = E_d / 2(1 + \mu) \quad (4)$$

式中 μ 为泊松比。按何平等^[14]的研究,粉土及粘土的泊松比随变形发展缓慢可近似取定值:粉土可取 0.35 ,粘土为 0.3 ,并且可不考虑温度的影响。

3 结论

(1) 在本试验中,在随机变化的地震波型简化为等效的等幅正弦循环荷载的作用下,不同温度下的重塑冻结兰州黄土的动应力—动应变关系曲线均可近似地用Hardin—Dmievich双曲线模型来描述。

(2) 给出了等幅正弦循环荷载作用下,重塑冻结兰州黄土的动弹性模量表达式及其参数的参考值。随着温度的降低, a, b 参数值均有减小,在水—冰剧烈相变区(温度约为 $0 \sim -5^{\circ}\text{C}$),其值随温度的降低而减少更为显剧。

(3) 重塑冻结兰州黄土的动弹性模量随着温度的降低而增大;在水—冰剧烈相变区,其值随温度变化较为明显;随着动应变的增大,冻土的动弹性模量减小。

致谢:试验得到了何平研究员的指导和常小晓工程师的现场帮助,在此深表谢意。

[参考文献]

- [1] 郭东信. 中国的冻土[M]. 兰州: 甘肃教育出版社, 1992. 1—10.
- [2] 周幼吾, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 1—8.
- [3] 何平, 朱元林, 等. 饱和冻结粉土的动弹模及动强度[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 170—174.
- [4] 徐学燕, 仲丛利, 朱元林, 等. 循环荷载作用下冻土的动弹模及临界动应力[A]. 见: 第五届全国冰川冻土大会论文集(上)[C]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 707—711.
- [5] 朱元林, 等. 围压对冻结粉土在振动荷载作用下蠕变性能的影响[J]. 冰川冻土, 1996, 17(增刊): 20—5.
- [6] H A 崔托维奇. 冻土力学[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [7] 前苏联科学院西伯利亚分院冻土研究所. 普通冻土学[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 180—206.
- [8] 中科院兰州冰川冻土研究所. 冻土的温度水分应力及其相互作用[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1989. 178—203.
- [9] 马巍, 吴紫汪. 高围压下冻结砂土的强度特性[J]. 冰川冻土, 1996, 18(3): 268—272.
- [10] 马巍, 吴紫汪. 围压对冻土强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 7—11.
- [11] 王昭令. 冻土退化与青藏高原冻土环境问题探讨[A]. 第五届全国冰川冻土大会论文集(上)[C]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 11—17.

- [12] 王国尚, 金会军, 林清. 青藏公路沿线冻土区自然环境及工程环境的变化[A]. 见: 第五届全国冰川冻土大会论文集(上)[C]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 43—50.
- [13] Seed H B, Idriss I M. Simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential[J]. J. Soil. Mech. Found Div., ASCE, 1971, 97(SM9): 1249—1273.
- [14] 何平, 朱元林, 常小晓. 冻土的变形性能与泊松比[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 115—118.

LABORATORY STUDY ON DYNAMICS PARAMETERS OF FROZEN SOIL UNDER SEISMIC DYNAMIC LOADING

WU Zhi-jian¹, WANG Lan-min², MA Wei¹, CHENG Jian-jun³, FEN Wen-jie¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China;

3. Institute of Zhongyuan Oil and Natural Gas High-technique Ltd., Puyang 457061, China)

Abstract: A systematic dynamic characteristics of frozen soil under seismic loading is studied by means of dynamic triaxial tests. It involves dynamic constitutive model, dynamic elastic modulus in different temperatures of -2°C , -5°C , -7°C , -10°C . The model of dynamic parameters for the effect of low-temperature is established.

Key words: Frozen soil; Dynamic constitutive model; Dynamic elastic modulus; Temperature