

青藏铁路冻结粉质粘土动静三轴试验对比 Comparison of dynamic and static triaxial test on frozen silty clay of Qinghai-Tibet Railway

王丽霞^{1,2,3}, 凌贤长^{1,2}, 徐学燕¹, 顾全宇⁴, 胡庆立¹

(1.哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2.中科院寒旱所, 甘肃 兰州 71000;

3.吉林建筑工程学院, 吉林 长春 130021; 4. 吉林粮食集团, 吉林 长春 130021)

摘要: 直接针对采自青藏铁路工程中的粉质粘土, 根据低温动、静三轴试验结果, 进行了冻土的动强度与静强度对比研究。研究表明, 冻土的静强度和动强度均随负温降低而增大、随含水率增加而减小, 相应的静粘聚力、静内摩擦角和动粘聚力、动内摩擦角随负温及含水率的变化规律也如此; 冻土的动强度随围压上升而增大; 冻土的静力变形明显存在弹性、塑性两个不同性质的变形发展区, 冻土的静强度在塑性变形区随围压上升有增大的趋势,但在弹性变形区这一变化规律不明显, 并且在塑性变形区冻土静强度增长缓慢且发生一定的塑性流动; 冻土的动内摩擦角随振次增大显著减小, 而动粘聚力随振次变化较小。

关键词: 动强度; 静强度; 冻结粉质粘土; 低温三轴试验; 青藏铁路

中图分类号:P 642.14 文献标识码:A 文章编号:1000 - 4548(2005)02 - 0202 - 04

作者简介:王丽霞(1972 -), 女, 讲师, 哈尔滨工业大学岩土工程专业博士研究生, 主要从事多年冻土地道路工程地震输入响应机理方面研究工作。

WANG Li-xia^{1,2,3}, LING Xian-zhang^{1,2}, XU Xue-yan¹, GU Quan-yu⁴, HU Qing-li¹,

(1.Harbin Institute of Technology, School of Civil Engineering, Harbin 150090,China;2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAS, Lanzhou 730000,China; 3.Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021,China;4.Jilin Grain Group, Department of Engineering, Changchun 130021, China)

Abstract: The dynamic and static strength of frozen silty clay are studied based on the results of the low-temperature dynamic and static triaxial test with samples taken from Qinghai-Tibet Railway. It is indicated that both of the dynamic and static strength increase with the decreasing temperature, and decrease with the increasing water content. The variation of static cohesion(c), dynamic cohesion (c_d), static friction angle (φ) and dynamic friction angle (φ_d) is same as that of strength. The dynamic strength increases with the increasing confining pressure. The static deformation is divided into elastic and plastic stages. The static strength increases with the increasing confining pressure in the plastic stage, but there no such evidence in elastic stage. The increasing rate of static strength is slow and the plastic flow occurs in plastic stage. Dynamic friction angle decrease with the increasing vibration times, however dynamic cohesion varies slightly.

Key words: dynamic strength; static strength, frozen silty clay; low-temperature triaxial test; Qinghai-Tibet railway engineering

0 引言

冻土的动强度是冻土动力学的主要研究内容之一,也是寒区土木工程抗震设计中热衷关心的一个重要课题。由于受限于相关学科的发展水平、试验技术等原因,对冻土动力学研究的起步比较晚,而对冻土动强度参数的试验测定更是在探索中求发展。基于前人^[1-12]工作且以青藏铁路工程的抗震问题为应用背景,并出于比较分析的目的,本文根据冻土的动、静三轴的试验结果,进行了冻土的动强度与静强度的对比研究,对于合理认识冻土动、静强度的影响因素及其参数的变化规律具有一定意义,也为进一步开展多年冻土地工程地震安全性评价积累部分基础资料。

1 试验简介

1.1 试验仪器

本次冻土的动、静三轴强度试验在冻土工程国家重点实验室完成。采用的试验设备为由美国 MTS 公司生产的 MTS - 810 型振动三轴材料试验机,配有计算机数控及自动数据采集系统,围压范围为 1~20 MPa,温度范围常温至-30℃,频率范围 0~50 Hz,最大轴向负荷 100 kN,最大轴向位移 50 mm。

1.2 试件制备

试验土样为采自青藏铁路工程中的粉质粘土,塑

基金项目:中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04); 国家特殊学科人才培养基金; 国家自然科学基金项目(40071021)

收稿日期:2004 - 01 - 15

表 1 青藏铁路粉质粘土颗分析结果

Table 1 Partical size distribution of silty clay of Qinghai-Tibet Railway

粒径 /mm	0.2~0.154	0.154~0.125	0.125~0.1	0.1~0.08	0.08~0.063	0.063~0.05	0.05~0.02	0.02~0.01	0.01~0.005	0.005~0.002	
含量/%	0.1	0.2	0.1	0.4	0.85	34.4	7.9	10.95	12.65	22.55	9.9

限 16.4%，液限 27.9%，干密度 1.8 g/cm³，颗粒级配见表 1^[13](赖远明, 2003)。采用重塑粉质粘土制备试件。为了确保试验结果的可比性与可靠性，采用标准批量制备试件方法，先配成含水率为 18%，23% 的土样，并在限制蒸发条件下保持 6 h 以使土的含水率及结构均匀，然后分层装模，按设计要求的干密度将土夯实压密。制成的试件置于 -30 °C 负温下快速冻结，48h 后脱模。试件直径为 62 mm、高度为 125 mm。在不同试验温度下将试件恒温 24 h，进行试验。

1.3 试验步骤

在 2 种负温(-12, -2 °C)和 2 种含水率(23%, 18%)条件下，对 27 个重塑冻结粉质粘土试样进行低温动三轴试验。对每一种负温条件，均做 3 种围压(1, 1.5, 2 MPa)条件下土的动强度试验。在一种温度、一种含水率及一种围压条件下，需要对 3 个相同的试件分别施加大小不同的轴向动荷载(σ_{de})，每个试件在轴向动荷载作用下一直进行到累计 20% 的应变为止。

为了对比研究冻结粉质粘土的动强度与静强度，在与动强度测试相应的试验条件下，又进行了 9 个试件低温静三轴试验，以 1.25 mm/min 的应变速率施加轴向静荷载，直至试件产生 25% 应变为止。

1.4 动荷载施加方案

本次冻土低温动三轴试验的动力条件要求模拟地震作用的动力波形、方向、频率、幅值、持时。按照 Seed 等的方法，将随机变化的地震波形简化为一种等效的谐波作用，谐波的幅值剪应力取为 $\tau_c = 0.65\tau_{max}$ 。根据地震烈度确定谐波的等效循环次数，模拟 7, 8, 9 度的地震烈度时分别取为 12, 20 和 30 次^[4]。一般地震的卓越频率为 1~2 Hz；地震动方向按照水平剪切波的作用考虑。鉴于上述，本次试验的轴向动荷载为等效的等幅正弦波荷载，其最大幅值和最小幅值据试验温度、围压之不同而调整；每一级荷载的等效循环次数分别取为 12, 20, 30 次；振动频率始终取为 1 Hz。

1.5 试件破坏标准

在地震荷载作用下，土的动力破坏可以解释为低周疲劳破坏；此外，路基工程中多数以路基的弯沉值进行控制。因而，在本次低温动三轴试验中，对试件的破坏确认采用应变破坏标准，即在应力 - 应变试验曲线中选取某一应变值所对应的应力作为试件的破坏标准，具体取动、静应变之和为 10% 时所对应的动剪应力作为土的动强度破坏标准；通过低温静三轴试验

的应力 - 应变曲线可以看出，应变值达到 10% 以后，土的强度虽有所增长，但增长的幅度明显减小，所以低温静三轴试验也取 10% 应变值所对应的静剪应力作为土的峰值抗剪强度。

2 静强度试验结果

冻土的静三轴试验存在弹性变形、塑性变形两个不同性质的变形发展区，冻土的静强度在塑性变形区随围压上升略有增大(但在 $w = 18\%$, $T = -2$ °C 条件下，当围压由 1.5 MPa 上升到 2 MPa 时，冻土的静强度很大幅度增大，其原因值得进一步研究)，在弹性变形区这一变化规律不明显，并且在塑性变形区冻土静强度增长缓慢且发生一定的塑性流动，见图 1。此外，冻土的静强度随负温降低显著增大，见图 1 (a)，(c)，随含水率增加明显下降，见图 1 (a)，(b)。由表 2 可以看出，冻土的静粘聚力和静内摩擦角随含水率增加有减小趋势，随负温降低有增大趋势。

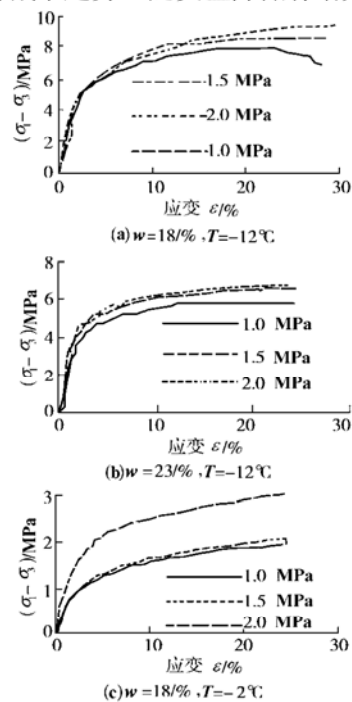


图 1 冻土静三轴试验应力 - 应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of frozen soil in static triaxial test

表 2 静强度参数试验结果

Table 2 Test results of static strength parameters for frozen soil

试验控制控制条件			
含水率/%	负温/°C	c/MPa	$\phi / (^\circ)$
18	-12	2.87	12.88
23	-12	2.22	10.12
18	-2	0.49	10.24

3 动强度试验结果

在相同含水率条件下，冻土的动强度随负温降低较大幅度增大，见图 2 (a)，(b)。在相同负温条件下，冻土的动强度随含水率增加有降低的趋势，见图 2 (a)，(c)。在相同负温和含水率条件下，冻土的动强度随围压上升而增大，见图 2 (a)，(b)，(c)。在 $w=18\%$ 、 $T=-2\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下这种变化规律表现最突出；在 $w=23\%$ 、 $T=-12\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下，这一规律不明显，这也许是由于低温冻土在高含水量条件下整体刚度增大，从而导致其随围压改变较小的现象。在负温、含水率、围压均相同条件下，随振次增加，即因地震烈度的提高，迫使冻土动力破坏所需的动应力明显减小，见图 2 (a)，(b)，(c)。由图 3 可以看出，冻土的动内摩擦角和动粘聚力随负温度降低有增大趋势，随含水率增加有减小趋势；在相同负温和含水率条件下，冻土的动内摩擦角随振次增大减小，而动粘聚力随振次变化较小。

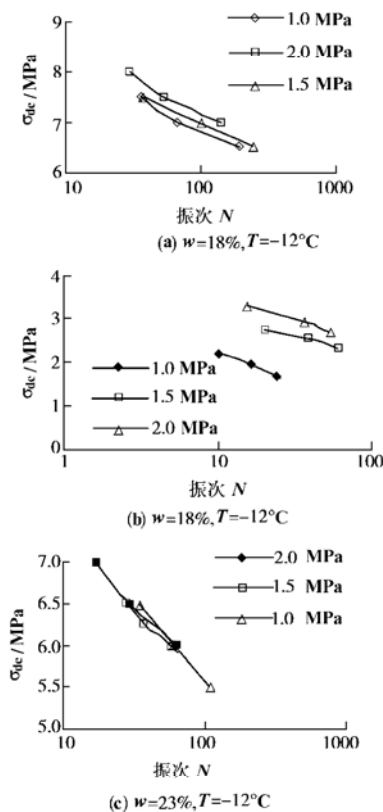


图 2 冻土动三轴试验动强度与振次关系曲线

Fig.2 Variation of dynamic stress with vibration times in dynamic triaxial test

4 几点认识

(1) 与非冻土相比，冻土的特殊性在于其属于由土颗粒、冰晶体、未冻水、气体组成的多相介质体，这四相物质在一定围压、动荷载、负温等外界条件作用

下而发生的相互运动、迁移、扩散、相变将直接影响冻土的强度与变形性质。

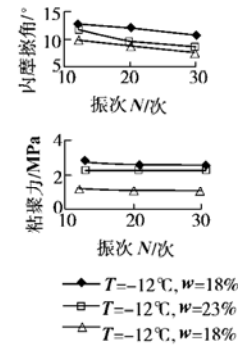


图 3 动强度参数试验结果

Fig.3 Test results of dynamic strength

(2) 初步分析表明，随负温降低，冻土强度增大的主要原因在于冻土中未冻水含量明显减小，含冰率随之增加，土颗粒间胶结力也相应增强。但是，在相同负温条件下，因含水率增加而导致土中未冻水含量增大，未冻水含量试验结果见图 4，所以冻土强度降低。在负温、含水率均相同条件下，随低周循环次数增加，冻土中未冻水含量增大。因水起了润滑剂作用而使土粒间内摩擦力减小，加之冻土由于吸收部分能量而处于局部融化状态，但土粒间粘聚力变化不明显，二者宏观直接表现为冻土强度的降低。冻土的动力破坏属于粘 - 塑性破坏性质（应力随应变持续增大），而静力破坏则为脆性剪切破坏性质（应力随应变增大缓慢、甚至降低）。

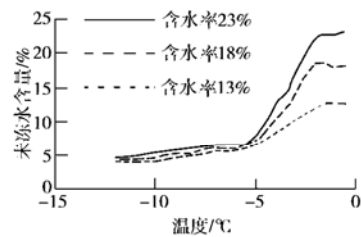


图 4 未冻水含量与温度关系曲线

Fig.4 unfrozen water content vs. temperature

(3) 通过对冻土的动、静强度试验参数对比发现，当振次较少时（12 次），在相同的负温、含水率条件下，冻土的动内摩擦角较静内摩擦角大，而随振次增大，冻土的动内摩擦角较静内摩擦角小，在相同含水率和负温条件下，冻土的动粘聚力大于静粘聚力。说明随振次加大，疲劳效应加强，冻土的动强度降低，这与文献[10]的结论是一致的。当振次较少时，冻土的动强度大于静强度的主要原因是由于动载作用时间很短、而静载作用时间较长所致。

5 结 语

直接针对采自青藏铁路工程中的粉质粘土,根据低温动、静三轴试验结果,进行了冻土的动、静强度对比研究,获得上述几点初步的认识,希望能够为冻土(动)力学发展及多年冻土场地工程地震安全性评价积累部分基础资料。特别值得说明的是,由于高温(如 -2°C)冻土的性质不稳定,可能给低温动三轴试验带来一定困难,因而为了确保试验成功,往往需要有试验控制条件随时调整的备选方案。

参考文献:

- [1] Haynes F D, Karalius J. A. Karafut J. Strain rate effect on the strength of frozen Silt[R]. USA Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 350. 1975: 27.
- [2] Chaichanavong T. Dynamic properties of ice and frozen clay under cyclic triaxial loading conditions[D]. Dept of Civil and Sanitary Engineering, Michigan State Univ, East Lansing, 1976.460.
- [3] 蔡中民,朱元林,张长庆.冻土的粘弹塑性本构方程以及材料参数的确定[J].冰川冻土,1990,12(1):31 - 40.
- [4] Zhu Yuanlin, Zhang Jiayi, et al. Constitutive Relations of Frozen Soil in Uniaxial Compression[A]. In Proceedings of 6th International Symposium on Ground Freezing[C]. Beijing: Balkema, Rotterdam, 1991:211 - 216.
- [5] 马巍,吴紫汪,等.冻土的强度与屈服准则[J].冰川冻土,1993,15(1):129 - 133.
- [6] 马巍,吴紫汪,盛煜.围压对冻土强度特性的影响[J].岩土工程学报,1995,17(5):7 - 11.
- [7] 张健明,朱元林,张家懿.动荷载下桩与冻土间动强度试验研究[R].兰州:中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室年报,1996.
- [8] 朱元林,何平,张家懿,等.冻土在振动荷载作用下的三轴蠕变模型[R].中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室年报.
- [9] 沈忠言,张家懿.冻结粉土的动强度特性及其破坏准则[J].冰川冻土,1997,19(2):141 - 148.
- [10] 沈忠言,张家懿.冻结粉土动强度的荷载效应及长期极限动强度[J].冰川冻土,1998,20(1):42 - 45.
- [11] 吴志坚,马巍,王兰民,等.地震荷载作用下温度和围压对冻土强度影响的试验研究[R].兰州:中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室年报(第十二卷),2002.
- [12] 凌贤长,徐学燕,徐春华,等.冻结哈尔滨粉质粘土超声波速测定试验研究[J].岩土工程学报,2002,24(4):456 - 459.
- [13] 张克绪,谢君斐.土动力学[M].北京:北京地震出版社,1989.

国家自然科学基金委员会水利水电与岩土工程战略研讨会在河海大学召开

2005年1月18~19日,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部水利水电工程与岩土工程战略研讨会在河海大学召开。国家自然科学基金委水利学科主任李万红教授、副主任左强教授,中国工程院陈厚群院士、葛修润院士、南京水科院张瑞凯教授、河海大学殷宗泽教授及来自清华大学、同济大学、大连理工大学、天津大学、武汉大学、中国水科院、南京水科院等单位80多人参加了会议。会议由水利学科主任李万红教授主持,河海大学副校长严以新教授到会作了讲话,清华大学

金峰教授、河海大学刘汉龙教授、中科院武汉岩土所冯夏庭教授、四川大学许唯宁教授分别做了“水工结构工程”、“土力学与工程”、“岩石力学与工程”和“水利学与工程”大会主题报告。与会代表围绕主题报告,对“十一五”期间水利水电工程与岩土工程学科的学科体系、研究范围和任务、国外研究进展和发展趋势、国内研究现状与差距、今后发展目标、重点研究领域、交叉领域和学科增长点等战略发展进行了深入的讨论,经讨论汇总后形成的总报告将上报国家自然科学基金委。

(河海大学 刘汉龙 供稿)