

冻土动荷载直剪仪的研制

崔颖辉, 刘建坤, 吕 鹏

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要: 冻土的动力学参数是工程设计的重要依据之一, 也是数值模拟时不可或缺的因素, 动力学参数的正确与否直接影响了工程设计和数值模拟的正确性。通过分析其他学者做过的冻土动荷载三轴试验, 以及参考普通直剪仪器的构造, 北京交通大学冻土室研制了一种新型的冻土动荷载直剪仪, 该仪器将传统直剪仪的水平静载部分改造为能够提供动荷载作动器, 可以提供一个 0.1~6 Hz、20kN 以内的动荷载, 用于测定冻土的动力学参数。介绍了动荷载直剪仪的结构组成、动力系统、测控系统等, 并详细分析了仪器框架、直剪盒、动荷载作动器等参数选取方法。最后使用该仪器进行了一组验证试验, 试验结果表明, 动荷载直剪仪能够完成其设计目的, 可以测量出冻土在动荷载下的应力-应变曲线, 从而求出动弹性模量、动阻尼比等, 为冻土的动力学参数测定开辟了一条新的道路。

关 键 词: 冻土; 动荷载; 直剪仪; 动力参数

中图分类号: TU 445 **文献标识码:** A

Development of dynamic load direct shear apparatus for frozen soils

CUI Ying-hui, LIU Jian-kun, LÜ Peng

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

Abstract: The dynamic parameters of frozen soils is one of the important bases of engineering design, also the indispensable factor for the numerical calculation. The dynamic parameters directly affect the correctness of engineering design and numerical simulation. By analyzing the dynamic load triaxial test, and with reference to the structure of ordinary direct shear apparatus, Beijing Jiaotong University developed a new dynamic load direct shear apparatus. The apparatus used dynamic load actuator instead of the traditional direct shear apparatus's static load part, which can provide a 0.1-6 Hz, 0-20 kN dynamic load. Power systems, measurement and control systems of the dynamic load direct shear apparatus are analyzed; and the parameter selection of instrument frame, direct shear box, dynamic load actuators and so on are analyzed. Finally, by using the apparatus, a set of validation experiments have been carried out. The results show that the dynamic load direct shear apparatus can complete its purpose; stress-strain curve of frozen soils under dynamic loading can be measured, so as to open up a new way for determining kinetic parameters of frozen soils.

Key words: frozen soils; dynamic load; direct shear apparatus; dynamic parameters

1 引 言

我国是世界上的冻土大国, 冻土面积约占我国国土总面积的 68.6%, 其中多年冻土占 22.3%, 并且青藏高原上的分布着世界上面积最大的高原冻土区^[1]。随着西部大开发等一系列国策, 我国在青藏高原上的工程建设日益活跃, 如青藏铁路、青藏公路、格尔木至拉萨输油管道、大坂山隧道等一系列工程, 其中, 青藏铁路更是以其海拔最高、高原铁路中线路最长的特点被誉为“天路”。青藏高原同时

又是地球表面构造活动最频繁的大陆高原, 自 2003 年来, 连续有 7~8 级的地震发生, 尤其是昆仑山口西、汶川、玉树等地的大地震对地面建筑和基础设施造成了不同程度的破坏^[2], 所以要更加重视对冻土地区抗震的研究。

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。相对冻土静力学而言, 冻土动力学特性的研究起步较晚, 从 20 世纪 80 年代末期, 我国学者才开始从不同试验条件下如温度、含水率、土质、围压、加载频率、动荷载幅值等方面研究冻

收稿日期: 2013-04-17

项目基金: 国家基础研究 973 计划 (No.2012CB026104); 国家自然科学基金 (No.41171064); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (No.2011JBZ009)

第一作者简介: 崔颖辉, 男, 1984 年生, 博士研究生, 主要从事季节冻土及多年冻土的动力学性能及冻土区边坡稳定性等研究。

E-mail: 10115290@bjtu.edu.cn

通讯作者简介: 刘建坤, 男, 1965 年生, 博士生导师, 主要从事冻土的力学性质及特殊路基工程方面的教学和科研工作。E-mail: jkliu@bjtu.edu.cn

土的动应力应变关系、动强度变化以及冻土动蠕变特性等问题。

目前, 国内学者测试冻土的动力特性绝大部分采用冻土三轴试验。徐学燕等^[3]利用低温振动三轴 MTS-810 在大量低温三轴试验的基础上给出了冻土的应力-应变关系、参数及动弹性模量, 在国内首次计算出了冻土的动泊松比的数值; 吴志坚^[4]基于地震动荷载作用下冻土的动三轴试验, 采用振动三轴材料试验机(MTS-810), 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 °C)下的变化规律, 建立了相应的温度影响模型; 赵淑萍等^[5]利用振动三轴材料试验机 MTS-100, 以恒应力幅值动荷载试验方式, 发现冻土的动弹性模量随频率的增加或温度的降低而增加, 冻土的动阻尼比随频率的增加或温度的降低而减少的特性; 张淑娟等^[6]利用 MTS-810 振动三轴材料试验机, 在围压为 0.3~16 MPa, 频率为 2 Hz, 温度为-4、-6°C条件下, 通过一系列恒应力幅循环动荷载试验, 发现冻土动强度的变化不仅跟破坏振次的大小有关, 而且与围压、循环荷载作用下土体吸收的有效能量(损失能)之间也存在一定关系。国内大部分试验都是通过振动三轴仪(MTS)的相关试验获取数据从而进行分析的。

由于直剪仪具有结构简单、消耗试件少、固结快、省时、仪器刚度大、传力明确、操作简单等诸多优点^[7], 目前在国内外仍普遍采用。继承了直剪仪的优点, 本文研制了一种动荷载直剪仪, 针对冻土在动荷载下的强度试验。低温振动三轴仪成本较高, 试验费用仅少数试验室能够承担, 本文研制的动荷载直剪其仪成本较低, 试验方法便捷, 易于在广大工程技术人员中推广, 结果更直接的满足工程需要。而且在某些情况下, 如某些滑坡的现场试验、弱面抗剪强度试验、一些材料的接触摩擦强度试验等, 由于条件的限制, 直剪试验可能是惟一可行的试验方案。新型的动荷载直剪仪, 能够测定冻土的动力学参数, 文本对动荷载直剪仪的结构组成、动力系统、测控系统等进行了详尽的分析。试验结果表明, 动荷载直剪仪能够完成其设计目的, 为冻土的动力学参数测定开辟了一条新的道路。

2 动荷载直剪仪试验系统组成

作为一整套的工作体系, 动荷载直剪仪主要由以下几部分组成: 动荷载加载系统、竖向荷载加载装置、温度控制及测定装置、位移测定装置以及数据采集系统, 以上各个装置组合完成整个试验, 可

对普通土样或土样与其他土工材料的交界面进行动力性能试验。

动荷载直剪仪的各个组成装置由北京交通大学岩土试验室自主设计, 直剪仪的主框架由南京土壤仪器厂制造, 主要设计包括: ①动力加载装置性能参数及设计; ②直剪工作台设计; ③温度、位移、力反馈的数据采集装置。动荷载直剪仪的系统工作原理图如图 1 所示。

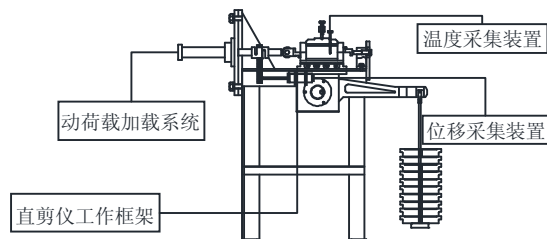


图 1 动荷载直剪仪的系统工作原理图
Fig.1 Diagram for the dynamic load direct shear apparatus

2.1 动荷载作动器性能参数设计

在满足试验目的的前提下, 充分考虑经费、试验室场地等限制条件, 根据动荷载试验通常需要的振动频率对动荷载加载系统的主要动力参数进行设计。通过对试验过程中能够将土样破坏需要的极限推进力经行预估, 由计算结果确定系统负载合理值^[8]。

由于本文研制的动荷载直剪仪承担着进行冻土试验的目的, 而冻土的强度较常温土体大, 所以进行预估时使用冻土为目标土体。预估计算所采用的粉质黏土物理性质见表 1。

表 1 粉质黏土物理性质
Table 1 Physical properties of silty clay

W	w_L	w_p	E_d	C_d	μ_d	c_d	φ_d
/%	/%	/%	/MPa			/kPa	/ (°)
18.10%	48.6%	21.5%	180	0.13	0.28	220	10

注: W 为土的含水率, w_L 为土的液限指数, w_p 为土的塑限指数, E_d 为土的动弹性模量, c_d 为土的动内聚力, φ_d 为土的动内摩擦角。

动荷载直剪仪的上直剪盒尺寸为 150 mm×150 mm×40 mm(长×宽×高), 呈方形空心筒型; 下直剪盒尺寸为 150 mm×150 mm×30 mm(长×宽×高), 呈无盖方形盒型, 故试样面积为 22 500 mm²。法向压力通过杠杆系统实现, 法向力加荷装置为 1:24 的杠杆机构, 最大荷重为 9.6 kN, 可以提供 0~400 kPa 的法向压力。

$$\tau_{fd} = c_d + \sigma \tan \varphi_d \quad (1)$$

式中: τ_{fd} 为土的动抗剪强度; c_d 为土的动黏聚力; σ 为土样的法向压力; φ_d 为土样的动摩擦角。

在 400 kPa 的法向压力下, 将表 1 中土体的物理参数代入式 (1), 计算可知, 破坏土样一般情况下需要轴向拉压力大概在 10.7 kN; 按照国家土工试验的规定, 土样变形超过土样自身尺寸的 15% 即为破坏, 需要动荷载加载头能够伸缩范围为 ± 22.5 mm; 对一般振动试验而言, 其特征频率一般为 1、2 Hz, 根据以上计算数据设计, 并为其他试验保有余量, 最终确定动荷载加载系统的特征为见表 2。

表 2 动荷载加载系统主要性能
Tab 2 dynamic loading system performance

设计项目	荷载幅值范围/kN	活塞最大行程/mm	动荷载频率/Hz
性能参数	1~20 kN	-50~50	0~6

2.2 液压系统设计

液压系统由北京交通大学机械工程学院设计^[9], 根据动荷载直剪仪的性能参数, 设计与之相配合的液压系统参数性能。

变量泵的工作压力定位 7.0 MPa, 其系统过滤精度大于 25 μ , 流量最大为 72 L/min; 电机功率选择 15 kW 既能满足装置需求, 伺服器选择 SFL223 型的偏导射流阀, 作动器的活塞行程为 200 mm, 作动器的活塞直径为 70 mm, 连接活塞外伸的活塞杆直径为 32 mm; 油箱选用矩形开放式油箱, 需求容积为 450 L, 根据油箱型号整定为 500 L; 冷却系统采用水冷却方式, 具体选用 2LQFL 型的列管式油冷却器, 冷却面积 0.65 m², 工作压力 1 MPa, 工作水温 25~30 °C, 正常工作油温不大于 100 °C。

2.3 动荷载作动器与直剪仪工作台架的组装

试验中, 动荷载作动器为动荷载直剪试验提供动力、记录直剪仪的应力反馈值, 同时要保证工作台的稳定等需求, 所以必须按照作动器的尺寸设计直剪仪相应的拼接装置。

作动器部分, 如图 2 所示, 轴向长为 680 mm, 在轴身 340 mm 处有焊有一块正方形钢板, 钢板的尺寸为 400 mm×400 mm×20 mm, 钢板的四角打有 $\phi 28$ mm 的孔, 孔与孔之间的间距为 320 mm; 作动器前端轴直径为 35 mm, 作动器头部最多可以向前伸长 200 mm; 作动器后端装有油压的进出管子及控制电路。

根据动荷载作动器的工作参数, 直剪仪端进行相应设计, 以和作动器组成一个完整的工作系统。在直剪仪的安装作动器的一端, 安装一块钢板, 尺寸为 400 mm×400 mm×20 mm, 并在四角开有

$\phi 28$ mm 的孔, 用 4 颗 $\phi 28$ mm 的螺丝固定作动器与直剪仪, 螺丝与螺母之间均放置弹簧垫片和胶皮垫片, 以减少振动干扰。钢板中部开有 $\phi 100$ mm 的孔, 可以讲作动器的伸缩头伸到直剪仪工作台上, 伸缩头前端安装 $\phi 18$ mm 的铰接头, 即可与直剪仪下盒铰接在一起, 控制直剪仪下盒在轴向上前后运动。通过以上措施, 可以将作动器与直剪仪有机的固定在一起, 进而完成试验目标。动荷载动作器和直剪仪工作台组合完成图见图 2。



图 2 作动器和直剪仪组装图

Fig.2 Assembly diagram of the actuator and the direct shear apparatus

2.4 动荷载试验测量系统

整个仪器的测量系统主要由力反馈/应力测量系统、位移/应变测量系统, 及温度测量系统组成。这 3 个测量系统可以在试验过程中, 自动采集应力、应变、温度, 3 个主要测定数据, 最终得到应力-时间、应变-时间及温度-时间 3 个数据文件, 后期通过数据分析得到土的动物理参数。

力反馈/应力测量系统固定在作动器上, 由测力环及应力传感器组成, 能实时反馈由作动器端传递的力值, 精度为 0.02 N, 由计算机进行数据采集, 采样频率可以自行设置, 一般力反馈/应力的采集频率同位移/应变采集频率相同, 都设置为 50 Hz。

位移/应变测量系统主要由位移计和数据采集仪组成, 位移计安装在直剪仪的一侧, 位移计的顶针顶在一块钢板上, 钢板与直剪盒的下盒固定在一起, 故位移计可以精准的测定直剪仪下盒的位移。位移计连接东华数据采集仪 DH5956 型, 由计算机端得到位移—时间数据。

动直剪盒为中空铁盒, 并在铁盒外部贴有保温材料; 在上下盒的一端分别接有冷浴接头, 连接 1 台 2 匹的冷浴机使用, 土样可事先在冷冻箱中冻至目标温度, 再放入直剪盒中, 将冷浴温度调至试验目标温度, 稳定 1 h, 待土样与直剪盒的温度均稳定

在目标温度;也可直接将制备好的土样放入直剪盒中,冷浴循环 24 h,且插入土样的温度计显示达到目标温度后,即可开始试验。

温度数据采集系统通过 pt100 热敏传感器和数据采集仪组成,pt100 温度传感器为插入式接头,精度为 0.1℃,在直剪盒的盖板上开孔,pt100 热敏传感器的接头刻有刻度,插入直剪盒的尺寸可以通过刻度读出,试验中传感器插头一般插到直剪盒的中部,可以测量直剪盒内部的温度,在做冻土试验时,可以实时监测土样内部温度。Pt100 热敏传感器连接东华数据采集仪,由计算机端输出温度-时间数据。

3 测试试验

通过土样的测试试验,对冻土动荷载直剪仪的性能进行测试,试验用土为哈大客运专线哈沈段的路基素填土,土样的各项物理性质指标见表 1,土样的颗粒级配见表 3。为了试验的可靠性,试验采用标准批量制样方法,即在制样前先将土配成含水率为 10% 的散状土,并在限制蒸发条件下保持约 6 h 使土体均匀,然后分层装模,按试验要求的干重度将土夯实压密,土样放入 -3℃ 的控温箱中冷却 48 h,经传感器测定,试样的各个位置温度一致,满足试验要求。试验过程持续 10 min,在土样中插入温度热敏传感器,试验过程中温度保持在 -3 ± 0.2 ℃。

试验采用动力系统典型的工况频率 1 Hz,振动波形采用正弦波,起始振幅为 2.5 kN,增加间隔为 0.1 kN,每级荷载持续 30 s,由计算机端数据采集系统采集由作动器头的力传感器反馈值,经滤波后的动力反馈值时程曲线如图 3 所示,同一时间的水平位移曲线如图 4 所示,取动荷载反馈值和水平位移值换算成土样的应力和应变,第 28 个周期的应力-应变关系曲线如图 5 所示,同文献[3]较为一致,验证本文研制的仪器较为成功。

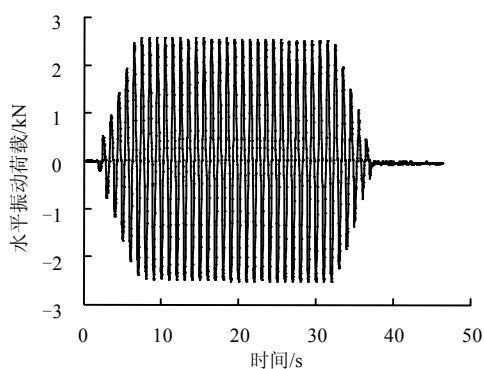


图 3 动荷载反馈值时程曲线

Fig.3 Dynamic load-time feedback curve

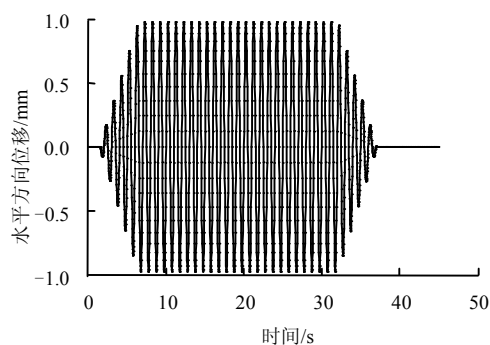


图 4 位移时程曲线

Fig.4 Displacement-time curves

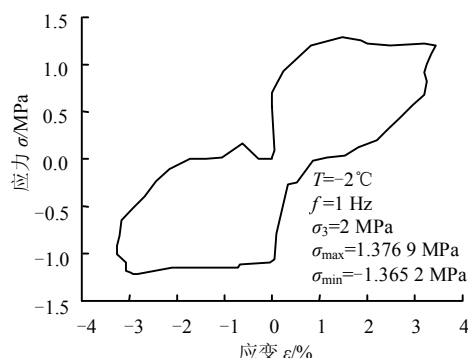


图 5 应力-应变弹性滞回圈

Fig.5 Stress-strain hysteresis loop

4 荷载直剪仪的特点

同普通直剪仪相比,动荷载直剪仪有以下特点:

(1) 动荷载直剪仪由直剪仪平台和动荷载作动器等部分组成,可以完成普通直剪仪无法实现的土的动荷载试验,且较动三轴仪价格便宜,操作简便,试验过程物理原理易于解释。

(2) 动荷载直剪仪增加了直剪盒的保温措施和温度测量系统,可以对冻土土样进行试验,并且在试验过程中,可以实时监控土样温度,解决了一般直剪仪无法进行冻土试验的难题。

(3) 动荷载直剪仪应力应变测量系统全部采用自动采集仪,使用的量测设备精度较高,较传统直剪仪人工读数精度更高。

5 结 语

冻土的动力性能是一个亟须研究的课题^[10],为了适应科研工作的需要,研制了动荷载直剪仪,与常规直剪仪相比,该仪器可以进行动荷载下的冻土试验。本文对该仪器的结构组成、工作原理及一些主要原理进行了分析论述,并通过一组试验来验证该仪器的性能,试验结果表明,本文所设计的试验

系统能够教好的分析冻土的动力特性,为今后该领域及其他一些冻土问题的试验试验开辟了一个新的途径,对该仪器的进一步检测,将在另一篇文献中论述。

参 考 文 献

- [1] 周幼吾. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 程国栋, 何平. 多年冻土地区线性工程建设[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 213—217.
CHENG Guo-dong, HE Ping. Linearity engineering in permafrost areas[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2001, 23(3): 213—217.
- [3] 徐学燕, 仲丛利. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 77—82.
XU Xue-yan, ZHONG Cong-li. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(5): 77—82.
- [4] 吴志坚, 王兰民, 马巍, 等. 地震荷载作用下冻土的动力学参数试验研究[J]. 西北地震学报, 2004, 25(3): 220—224.
WU Zhi-jian, WANG Lan-min, MA Wei, et al. Laboratory study on dynamics parameters of frozen soil under seismic dynamics loading[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2004, 25(3): 220—224.
- [5] 赵淑萍, 朱元林, 何平, 等. 冻土动力学参数测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2677—2681.
ZHAO Shu-ping, ZHU Yuan-lin, HE Ping, et al. Testing study of dynamic mechanics parameters of frozen soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp.): 2677—2681.
- [6] 张淑娟, 赖远明, 李双洋, 等. 冻土动强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 595—599.
ZHANG Shu-juan, LAI Yuan-ming, LI Shuang-yang, et al. Dynamic strength of frozen soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(4): 595—599.
- [7] 闵弘, 刘小丽, 魏进兵, 等. 现场室内两用大型直剪仪研制(I): 结构设计[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 168—172.
MIN Hong, LIU Xiao-li, WEI Jin-bing, et al. A new large direct shear apparatus for field and laboratory test (I): Configuration[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(1): 168—172.
- [8] LINGS M L, DIETZ M S. An improved direct shear apparatus for sand[J]. **Geotechnique**, 2004, 54(4): 245—256.
- [9] 李永波, 张鸿儒, 全克江. 冻土-桩动力相互作用模型试验系统研制[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 774—780.
LI Yong-bo, ZHANG Hong-ru, QUAN Ke-jiang. Development of model test system for dynamic frozen soil-pile interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(4): 774—780.
- [10] MA W, WU Z W, ZHANG L X. Analyses of process on the strength decrease in frozen soils under high confining pressures[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 1999, 29(1): 1—7.