排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2016 年 3 月 Mar. 2016 | 第 34 卷 第 3 期 Vol. 34 No. 3
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.15.0131

新疆头屯河流域饱和砂砾土动三轴试验研究


张凌凯

张凌凯
(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 通过室内动三轴试验,研究了饱和砂砾土在动荷载作用下的动力特性规律,主要分析了振动频率、固结压力和固结应力比对动本构关系和动弹性模量的影响规律. 试验结果表明:饱和砂砾土的动本构关系可采用双曲线表示,随着固结压力、固结应力比增大,动本构关系曲线逐步偏向应力轴方向,而振动频率对砂砾土的动本构关系曲线影响较小;动弹性模量 E_d 随着动应变 ε_d 增大而减小,最后趋于平缓,不同的振动频率对饱和砂砾土的 $E_d-\varepsilon_d$ 关系曲线影响较小,试验数值基本上都落在同一区域内,固结压力与固结应力比对 $E_d-\varepsilon_d$ 关系曲线的影响较大;不同的振动频率与固结压力作用下的 $E_d/E_{d\,max}-\varepsilon_d$ 关系曲线具有相对良好的归一性,而在不同的固结应力比作用下的试验点归一性较差.

关键词: 新疆头屯河流域;饱和砂砾土;动三轴试验;动本构关系;动弹性模量
中图分类号: TU411 **文献标志码**: A **文章编号**: 1674-8530(2016)03-0260-05

张凌凯. 新疆头屯河流域饱和砂砾土动三轴试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(3):260-264.

ZHANG Lingkai. Experimental study on dynamic tri-axial test of saturated gravel soil of Toutun river basin in Xinjiang[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2016,34(3):260-264. (in Chinese)

Experimental study on dynamic tri-axial test of saturated gravel soil of Toutun river basin in Xinjiang

ZHANG Lingkai
(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: The dynamic deformation properties of saturated gravel soil were studied under a dynamic loading by using tri-axial test in laboratory. The effort was mainly focused on the influence of vibration frequency, consolidation pressure and consolidation stress ratio on the dynamic constitutive relation and dynamic modulus of elasticity. It is indicated that the dynamic stress-strain curve is of hyperbolic type, and approaches gradually towards the stress axis direction with the increasing of consolidation pressure and consolidation stress ratio, but the vibration frequency has a less effect on the stress-strain curve of the gravel soil. The dynamic elastic modulus decreases with the increasing of dynamic strain, but remains nearly unchanged at last. The vibration frequency affects the curves less because the experimental data are generally in the same zone; the consolidation pressure and consolidation stress ratio, however, demonstrate a great influence on the curves. The $E_d/E_{d\,max}-\varepsilon_d$ curves under different vibration frequencies and consolidation pressures have a relatively good normalization property, while those under various consolidation stress ratios do not.

收稿日期: 2015-06-11; **网络出版时间**: 2016-03-17
网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20160317.1129.006.html
基金项目: 2014 年度新疆研究生科研创新项目(XJGRI2014071); 新疆农业大学实验室建设与管理改革项目(sysblx022)
作者简介: 张凌凯(1987—),男,山西长治人,博士研究生(935352456@qq.com),主要从事于环境岩土工程、土动力学及岩土工程结构抗震研究.

Key words: Toutun river basin in Xinjiang; saturated gravel soil; dynamic tri-axial test; dynamic stress – strain; dynamic elastic modulus

砂砾土在新疆地区分布较为广泛,由于其具有压实性能好、透水性强、抗剪强度高、不易液化等特有的优良工程特性,因此在工程建设中被得到广泛应用[1-3]. 砂砾土目前主要用于高土石坝、高铁路基、桥梁墩台、人工筑岛及软弱地基的砂石垫层等[4-7]. 过去认为砂土是容易发生液化的,而粗粒土是不易发生液化破坏的,但是,通过最近的几次地震发现粗粒土也有发生液化的现象,所以粗粒土的液化问题逐步成为工程界的热点问题[8-10]. 而新疆地区属于地震高发地区,且主要分布为粗粒土,所以分析新疆地区的粗粒土的动力特性显得尤为重要.

目前关于砂土及黏性土的研究成果较为丰富,在粗粒土的动力特性方面研究还不够[11-13]. 文中通过室内对饱和砂砾土进行动三轴试验,分析不同振动频率、固结压力、固结应力比等影响因素下的动本构关系曲线的变化规律,建立砂砾土的本构关系,分析砂砾土在动力荷载作用下的力学反应及其相关参数的变化规律,为本地区的相关工程提供科学依据[14-16].

1　砂砾土动三轴试验

1.1　试验仪器

试验仪器采用新疆农业大学岩土实验室的 TAJ-20 振动三轴仪,设备主要由计算机控制系统、伺服控制系统、测量系统、压力及加载系统、三轴室及附属系统组成. 该仪器通过计算机系统进行数据的自动采集记录,主要采集的有轴应力、应变、位移及孔隙水压力等值. 该设备的压力室尺寸为 Φ220 mm × 420 mm,轴向最大位移为 10 mm. 设备主要参数:① 最大轴力为 20 kN;② 最大固结压力为 1 MPa;③ 试样的直径为 39.1,50.0,80.0,100.0 mm;④ 加载频率为 0.5 ~ 5.0 Hz.

1.2　试样材料

试验材料取自于新疆头屯河流域某建筑场地,取土埋深为 2 ~ 5 m,砂砾土中最大粒径范围为 40 ~ 60 mm,最小粒径小于 0.075 mm,粒径分布不均匀. 通过对初始土料进行颗粒筛分及密度试验的联合测定,并对试料进行了剔除法和等量代换法的缩尺处理,该原试验材料的级配良好,不均匀系数为 C_u = 63.73, C_c = 2.66. 模拟料的不均匀系数为 C_u = 12.4, C_c = 0.72,级配良好. 试样为圆柱体,尺寸(直径 × 高度)为 50 mm × 100 mm,试验采用试样成型后通入无气水的方法制备,因为砂砾土具有透水性良好且不易成样的特点,所以采用上机饱和方法进行饱和.

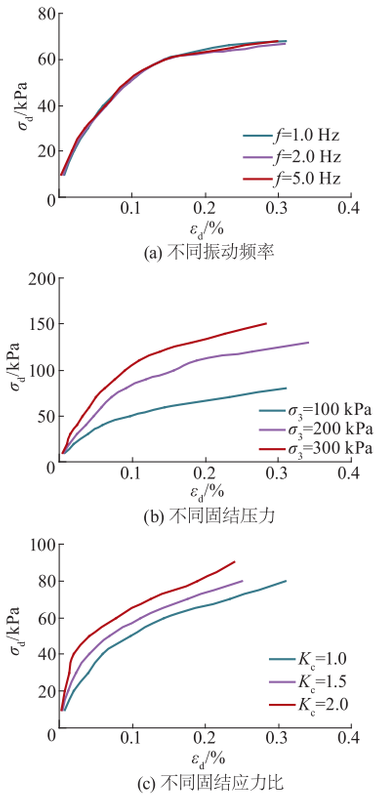
1.3　试验参数选择

在试验中,选取的加载频率为 1,2,5 Hz;试样的动荷载按等幅的正弦波形式加载. 根据建筑物中砂砾土垫层所处的一般埋置深度,同时也使试验的结果具有一定的代表性,故围压采用 σ_3 = 100,200,300 kPa. 试样在施加规定的围压后,按设定的固结比施加轴向荷载. 试验中所取的固结应力比为 1.0,1.5,2.0.

2　动本构关系曲线分析

2.1　不同试验条件下的动本构关系曲线

图 1 为不同试验条件对饱和砂砾土动本构的影响关系曲线,图中 σ_d, ε_d 分别为动应力、动应变;f, σ_3, K_c 分别为振动频率、固结压力、固结应力比. 由图 1a 可知,不同频率条件下的动本构关系曲线基本都密集分布在一起,具有良好的归一性. 在小应变的条件下,不同频率下的关系曲线基本是重合在一起的;随着动应变的逐步增大,各条曲线的发展趋势略有不同,但基本上偏差不大,原因在于振动频率的不同并未对试验的结构产生影响,动应力幅值没有发生变化,即从整体上分析,不同振动频率下的动本构关系曲线基本上具有良好的归一性. 由图 1b 可知,动应力随着动应变的增大而逐步增大,在小变形时,土体基本上处于弹性阶段,为线性关系;随着应变的逐步增大,关系曲线逐步趋于平缓. 当产生相同的动应变时,随着固结压力的增大,所需的动应力也随之增大. 从另一角度分析,在相同的动应力条件下,随着固结应力的增大,产生的动应变反而减小. 由图 1c 可知,随着固结应力比的增大,动本构关系曲线逐步偏向动应力轴的方向;当动应变为某一定值时,随着固结应力比的增大,所需的动应力值随之增大;当动应力为某一定值时,随着固结应力比的增大,产生的动应变值反而减小.



(a) 不同振动频率

(b) 不同固结压力

(c) 不同固结应力比

图1 不同试验条件下的 $\sigma_d - \varepsilon_d$ 关系曲线

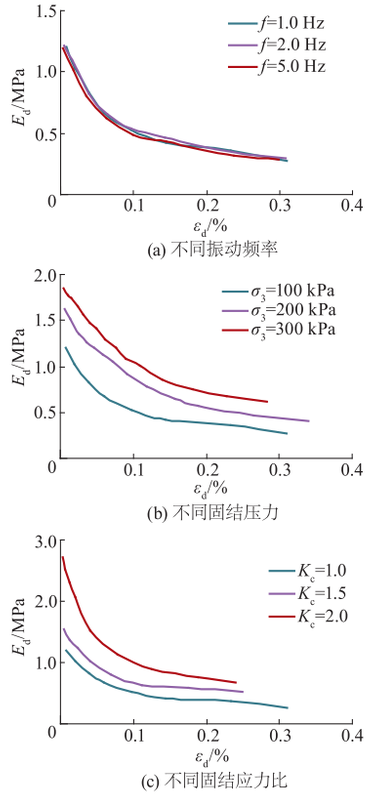
Fig. 1 $\sigma_d - \varepsilon_d$ curves under different test conditions

综上所述,固结压力与固结应力比对本构关系的影响规律基本相同,原因在于无论是增大固结应力还是固结应力比,实质上是使土体的密度增大,接触更加充分,颗粒之间摩擦力增大,产生同样大小的应变所需的动应力也随之增大.

2.2 不同试验条件下的 $E_d - \varepsilon_d$ 关系曲线

图2为动弹性模量 E_d 与动应变 ε_d 的关系曲线. 根据试验结果,$E_d - \varepsilon_d$ 曲线可以分为3个阶段:① 水平阶段,该阶段动应变很小,土体处于弹性阶段,动弹性模量为常数,即为最大动弹性模量;② 快速减小阶段,在这阶段中,随着动应变的增大,塑性变形逐步增大,动弹性模量迅速减小,土体由弹性阶段逐步转向塑性阶段;③ 平缓阶段,在该阶段中,随着动应变的增大,动弹性模量减小的趋势趋于平缓.

由图2a可知,不同的振动频率对饱和砂砾土的 $E_d - \varepsilon_d$ 关系曲线影响较小,试验数值基本上都落在一区域内,动弹性模量随动应变的变化规律具有良好的归一性,在不同的振动频率作用下,动弹性模量随着动应变的增大不断减小,表现出应变软化的趋势. 由图2b可知,在同一动应变条件下,动弹性模量随着固结压力的增大而增大,在小应变阶段,动弹性模量随固结压力的不同其值相差较大,随着动应变的逐步增大,曲线趋于平缓,不同固结压力对动弹性模量的影响逐步减小. 由图2c可知,在同一动应变时,固结应力比越大,土体动弹性模量越大;在应变较小时,相同的应变下动弹性模量差别较大;随着动应变的增大,固结比应力大的曲线下降较为明显,不同固结应力比对动弹性模量的影响也逐步减小.



(a) 不同振动频率

(b) 不同固结压力

(c) 不同固结应力比

图2 不同试验条件下的 $E_d - \varepsilon_d$ 关系曲线

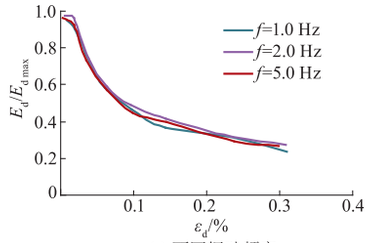
Fig. 2 $E_d - \varepsilon_d$ curves under various test conditions

2.3 不同试验条件下的 $E_d/E_{d\,max} - \varepsilon_d$ 关系曲线

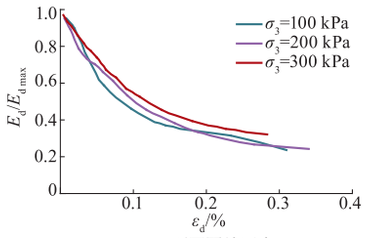
图3所示为对 E_d 进行归一化处理后的 $E_d/E_{d\,max} - \varepsilon_d$ 关系曲线. 饱和砂砾土的动弹性模量随着动应变增大而减小且符合双曲线关系,其关系式为 $E_d = (a + b\varepsilon_d)^{-1}$,对其进行改写为 $E_d^{-1} = a + b\varepsilon_d$;当 ε_d 趋近于0时土体处于弹性状态,此时的动弹性模量实际上就是最大弹性模量,即 $E_{d\,max} = 1/a$.

对不同试验条件下的结果进行归一化后作出分析:由图3a可知,不同的振动频率作用下的关系曲线具有良好的归一性,试验点基本都处于同一曲线上;由图3b可知,不同的固结压力作用下的曲线在小应变时有良好的归一性,随着动应变的增大,

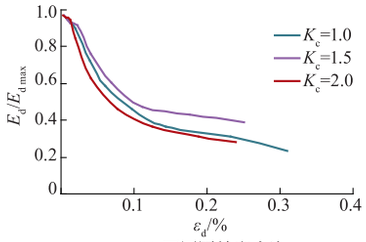
试验点虽有微小的分散，但整体而言，不同固结压力作用下的 $E_d/E_{d\,max}-\varepsilon_d$ 曲线具有良好的归一性；由图 3c 可知，不同的固结应力比作用下的试验点归一化较差，在小应变时的归一性相对较好，随着动应变的增大，归一化曲线相差较大，总体上，不同固结应力比作用下的归一性相对较差.



(a) 不同振动频率



(b) 不同固结压力



(c) 不同固结应力比

图 3　不同试验条件下的 $E_d/E_{d\,max}-\varepsilon_d$ 关系曲线

Fig. 3　$E_d/E_{d\,max}-\varepsilon_d$ curves under various test conditions

3　结　论

通过对饱和砂砾土进行室内动三轴试验，分析了不同影响因素对饱和砂砾土的动力参数的影响规律，可得以下结论：

1）饱和砂砾土的动本构关系可采用双曲线表示，固结压力、固结应力比对本构关系曲线的影响较大，而振动频率对砂砾土的动本构关系曲线影响较小.

2）根据试验结果，$E_d-\varepsilon_d$ 曲线可以分为 3 个阶段：水平阶段，快速减小阶段，平缓阶段. 振动频率对饱和砂砾土的 $E_d-\varepsilon_d$ 关系曲线影响较小，动弹性模量随动应变的变化规律具有良好的归一性. 动弹性模量随着固结压力与固结应力比的增大而增大；在小应变阶段，动弹性模量随固结压力增大的不同，其值相差较大；随着动应变的逐步发展，曲线趋于平缓.

3）在不同的振动频率和固结压力作用下的 $E_d/E_{d\,max}-\varepsilon_d$ 曲线有良好的归一性；而不同的固结应力比作用下试验点归一性较差，在小应变时的归一性相对较好，随着动应变的增大，归一化曲线相差逐步较大，总体而言归一性相对较差.

参考文献(References)

[1] 谢定义. 土动力学[M]. 北京：高等教育出版社，2011：141－179.

[2] 吴世明，徐攸在. 土动力学现状与发展[J]. 岩土工程学报，1998，20(3)：125－131.
WU Shiming, XU Youzai. State-of-art and development of soil dynamics[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1998, 20(3): 125－131. (in Chinese)

[3] 吴世明. 土动力学[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000：75－106.

[4] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州：黄河水利出版社，1999：270－284.

[5] 张训忠，王汝恒，贾彬，等. 饱和砂卵石土液化特性的试验研究[J]. 建筑科学，2009，25(3)：35－38.
ZHANG Xunzhong, WANG Ruheng, JIA Bin, et al. Experimental study on liquefaction behaviors of saturated sandy pebble soil[J]. Building science, 2009, 25(3): 35－38. (in Chinese)

[6] 张誉，王文一，孙方，等. 砂卵石土动本构关系的试验研究[J]. 四川建筑科学研究，2008，34(5)：155－157.
ZHANG Yu, WANG Wenyi, SUN Fang, et al. Testing study on the stress－strain relation of sand pebble soil[J]. Sichuan building science, 2008, 34(5): 155－157. (in Chinese)

[7] 张茹. 土石坝心墙料及坝基细砂砾料动力特性试验研究[D]. 成都：四川大学，2002：30－36.

[8] 贾革续. 粗粒土工程特性的试验研究[D]. 大连：大连理工大学，2003：49－52.

[9] 洪小星，陈国兴，孙田，等. 砂砾土动力特性的室内试验研究进展[J]. 世界地震工程，2011，27(1)：47－53.
HONG Xiaoxing, CHEN Guoxing, SUN Tian, et al. Research progress of labrotory tests on the dynamic characteristics of gravel soil[J]. World earthquake engineering, 2011, 27(1): 47－53. (in Chinese)

[10] 王汝恒，贾彬，邓安福，等. 砂卵石土动力特性的动三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2006，25(S2)：4059－4064.

WANG Ruheng, JIA Bin, DENG Anfu, et al. Dynamic triaxial testing study on dynamic characteristics of sandy pebble soil[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2006,25(S2):4059 - 4064. (in Chinese)

[11] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙,等. 粗粒料大三轴试验研究进展[J]. 岩土力学,2002,23(2):217 - 221.
LIU Mengcheng, GAO Yufeng, LIU Hanlong, et al. Development of study on a large scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and soil mechanics, 2002,23(2):217 - 221. (in Chinese)

[12] 齐剑峰,栾茂田,杨庆,等. 饱和黏土动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土工程学报,2008,30(4):518 - 523.
QI Jianfeng, LUAN Maotian, YANG Qing, et al. Dynamic shear modulus and damping ratio of saturated clay [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2008,30(4):518 - 523. (in Chinese)

[13] 徐刚,杨宗茂,郝鸳. 粗粒土动力特性试验成果整理方法探讨[J]. 人民黄河,1994(3):34 - 36.
XU Gang, YANG Zongmao, HAO Yuan. Discussions on methods of sorting out test results of dynamic characteristics of coarse soil[J]. Yellow River, 1994(3):34 - 36. (in Chinese)

[14] 王皆伟. 四川地区砂卵石土动力特性试验研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2006.

[15] 凌华,傅华,蔡正银,等. 坝料动力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(12):1920 - 1924.
LING Hua, FU Hua, CAI Zhengyin, et al. Experimental study dynamic deformation behaviors of dam materials [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2009,31(12):1920 - 1924. (in Chinese)

[16] 董威信,孙书伟,于玉贞,等. 堆石料动力特性大型三轴试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(S2):296 - 301.
DONG Weixin, SUN Shuwei, YU Yuzhen, et al. Large scale triaxial shear test on dynamic properties of rockfill materials[J]. Rock and soil mechanics, 2011,32(S2): 296 - 301. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)

(上接第259页)

[55] 杨鑫光,牛得草,傅华. 植物根 - 土界面水分再分配研究方法与影响因素[J]. 生态学杂志, 2008,27(10):1779 - 1784.
YANG Xinguang, NIU Decao, FU Hua. Research methods and affecting factors of hydraulic redistribution between the inter face of root and soil: a review[J]. Chinese journal of ecology, 2008,27(10):1779 - 1784. (in Chinese)

[56] DAWSON T E. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant - plant interactions [J]. Oecologia, 1993, 95 (4): 565 - 574.

[57] 樊小林,曹新华,郭立彬,等. 根系提水作用的土壤水分变异及养分有效性:Ⅱ. 黄土性土壤水肥交互和根系提水作用与作物生长效应[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996,2(4):71 - 76.
FAN Xiaolin, CAO Xinhua, GUO Libin, et al. Hydraulic lift (HL) and its effect on soil water potential and nutrient availability: II. effect of the interaction of soil water and nutrient and hydraulic lift on the plant growth [J]. Journal of soil erosion and soil and water conservation, 1996,2(4):71 - 76. (in Chinese)

[58] ISHIKAWA C M, BLEDSOE C S. Seasonal and diurnal patterns of soil water potential in the rhizosphere of blue oaks: evidence for hydraulic lift[J]. Oecologia, 2000, 125(4):459 - 465.

[59] BURGESS S S O, PATE J S, ADAMS M A, et al. Seasonal water acquisition and redistribution in the Australian woody phreatophyte, Banksia prionotes[J]. Annual of botany, 2000,85(2):215 - 224.

[60] DAWSON T E, PATE J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: a stable isotope investigation[J]. Oecologia, 1996,107(1):13 - 20.

[61] DAWSON T E. Determining water use by trees and forests from isotopic, energy balance and transpiration analyses: the roles of tree size and hydraulic lift[J]. Tree physiology, 1996,16(1/2):263 - 272.

[62] WAN Changgui, XU Wenwei, SOSEBEE R E, et al. Hydraulic lift in drought-tolerant and-susceptible maize hybrids[J]. Plant and soil, 2000, 219 (1/2): 117 - 126.

(责任编辑 张文涛)