

相对密度和固结应力比对饱和含细砾砂土动强度的影响

刘凯, 张远芳

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 采用 TAJ-20 振动三轴仪对饱和含细砾砂土进行了不同相对密度、不同固结应力比下的循环振动三轴试验, 研究这两个因素对饱和含细砾砂土的动强度影响。试验结果表明: 相对密度对饱和含细砾砂土的动强度影响较为显著。随着相对密度的增大, 饱和含细砾砂土的动强度也在不断增大, 但增大的幅度有限。固结应力比对饱和含细砾砂土动强度的影响很显著。随着固结应力比的增大, 饱和含细砾砂土的动强度也在不断增大。在相对密度或固结应力比下, 动强度和振动周次在半对数坐标上成线性关系。

关键词: 动三轴试验; 饱和含细砾砂土; 动强度; 相对密度; 固结应力比

中图分类号: TU441

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)06-0212-05

Influence of relative density and consolidation stress ratio on the dynamic strength of saturated fine gravel sand

LIU Kai, ZHANG Yuanfang

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: A series of dynamic triaxial tests of different relative densities and different consolidation stress ratios for the saturated fine gravel sands were done by using the TAJ - 20 vibration triaxial apparatus, the effects of the two factors on the dynamic strength of saturated fine gravel sands were studied. The results showed that, the effects of relative density on the dynamic strength of saturated with fine gravel sands I were relatively significant. With the increase of relative density, the dynamic strength of saturated fine gravel sand also increased, but the magnitude of the increase was not great. The effects of consolidation stress ratio on the saturated fine gravel sand dynamic strength was very significant. With the increase of the consolidation stress ratio, the dynamic strength of saturated fine gravel sand also increased, and the soil dynamic strength significantly increased when the consolidation stress ratio increased. Under the relative density or consolidation stress ratio, the dynamic strength and vibration time on semi - log coordinate showed a linear relationship.

Key words: dynamic triaxial test; saturated fine gravel sand; dynamic strength; relative density; consolidation stress ratio

1 研究背景

随着国家西部大开发战略的实施,“一带一路”中“丝绸之路经济带”以新疆为核心区的发展规划的推进,新疆已拥有大量已建成或正在建设的高速公路、地下工程、土石坝等建筑工程。这些建筑工程

的地基经常会承受地震、车辆等动力循环荷载的作用,将会导致土体内部的强度发生变化,其中土体液化是一种特殊的强度问题,是土体由固体状态转变为液体状态的现象和过程,即此时的孔隙压力升高而有效应力降低,承载能力下降。国内外震害资料表明,饱和砂土在动荷载作用下能液化^[1]。

收稿日期:2016-07-28; 修回日期:2016-10-08

基金项目:新疆水利水电工程重点学科基金资助项目(xJzdxk-2010-02-12)

作者简介:刘凯(1991-),男,湖北天门人,硕士研究生,研究方向为土的动力特性。

通讯作者:张远芳(1963-),女,江苏无锡人,教授,研究方向:环境岩土工程、土动力学及冻土工程特性的研究。

目前许多学者如张建民^[1]、凌华等^[2]、洪小星等^[3]、刘凯等^[4]、陈宇龙等^[5]、王海东等^[6]、张凌凯^[7]、曹振中等^[8-9]、谢定义^[10]、陈国兴等^[11]、王炳辉等^[12]对砂土的工程特性和动力特性进行研究并取得了丰硕的研究成果,比如饱和砂土地震液化机理、影响因素,饱和砂土体变和孔隙水压力理论,饱和砂土液化的判别方法以及各种方法的应用条件,饱和砂土的动本构模型,饱和砂土的液化破坏的微观结构特征,砂土液化后大变形的基本规律、物理机制、各种模型理论等。但这些理论的研究对象为均匀纯净砂土,对于自然界中普遍存在的非均匀砂土的研究较少^[13],尤其对于含细砾(砾径为 2~5 mm)砂土的研究更少。本文针对饱和含细砾砂土,通过循环振动三轴试验来探讨相对密度和固结应力比这两个因素对饱和含细砾砂土动强度的影响。

2 试验概况

2.1 试验设备

本次试验设备为天水红山试验机有限公司生产的 TAJ-20 振动三轴仪,采用两套电液伺服闭环控制系统,其幅频特性好,频率响应快,从而可对试样做静、动三轴振动试验,具有自动采集和处理试验数据的功能。

2.2 试验土样

试验所用土料采用新疆头屯河流域某建筑场地的含细砾砂土。土料试样采用直径 $D = 50$ mm,高度 $H = 100$ mm 的实心圆柱体。土料的粒径范围及含量百分比如表 1 所示。该土料主要物理性质指标为:细砾含量为 25% 砂土,最小与最大干密度分别是 $\rho_{dmin} = 1.72$ g/cm³ 和 $\rho_{dmax} = 2.01$ g/cm³;不均匀系数 $C_u = 0.491$,曲率系数 $C_c = 6.837$ 。细砾含量为 12% 砂土最小与最大干密度分别是 $\rho_{dmin} = 1.69$ g/cm³ 和 $\rho_{dmax} = 1.96$ g/cm³;不均匀系数 $C_u = 0.514$,曲率系数 $C_c = 5.989$ 。根据《土工试验规程》可知,该土料为级配不良土。

表 1 试样粒径组成 %

细砾 含量	粒径组成/mm					
	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.075
25	25.0	6.6	28.9	7.1	24.9	7.5
12	12.0	8.4	34.6	5.3	31.6	8.1

2.3 试验方案

所用土料的细砾含量为 25%,控制试验的围压为 100 kPa,振动频率为 1.0 Hz。所有土样均采用水

头饱和法进行饱和。在相同围压和振动频率下,对饱和细砾砂进行 3 种相对密度和 3 种固结应力比的振动三轴试验,并且选用细砾含量为 12% 的土样进行对比分析。具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案

组别	含细砾 量/%	周围压 力/kPa	振动频 率 Hz	相对密度	固结应力比
1	25	100	1	0.50、0.65、0.80	1
2	25	100	1	0.65	1.0、1.5、2.0
1	12	100	1	0.50、0.65、0.80	1
2	12	100	1	0.65	1.0、1.5、2.0

2.4 破坏准则

土体的动强度在不同破坏标准下随着振动荷载的作用与循环效应的改变而改变,从而动强度的确定与土体破坏标准密不可分。破坏标准主要分为孔压破坏标准和应变破坏标准。本文中,在等压固结条件下,选择孔压破坏标准,控制值为 $u = 0.9\sigma_3$,在非等压条件下,选择应变破坏标准,应变控制值为 $\varepsilon_{dmax} = 5\%$ 。

3 结果与分析

3.1 相对密度对饱和含细砾砂土动强度的影响

选用细砾含量为 25% 的砂土,围压 $\sigma_3 = 100$ kPa,频率 $f = 1.0$ Hz,固结应力比为 $K_c = 1.0$,相对密度 D_r 为 0.5,0.65,0.80。研究当相对密度不同的情况下,分析饱和细砾砂的动强度随振动周次的变化而变化的规律。动强度 (σ_d) 与振动周次 (N_f) 的关系曲线见图 1。

从图 1 中可知,饱和含细砾砂的动强度随相对密度的增大而增大,换言之,在细砾砂的相对密度相同时,随着饱和细砾砂的动剪应力增大,发生液化需要的振动周次逐渐减少。且在一定相对密度,有如下数学模型:

$$D_r = 0.50 \text{ 时, 满足:} \\ \sigma_d = -16.53 \ln(N_f) + 125.21 \quad (1)$$

$$D_r = 0.65 \text{ 时, 满足:} \\ \sigma_d = -16.02 \ln(N_f) + 128.66 \quad (2)$$

$$D_r = 0.80 \text{ 时, 满足:} \\ \sigma_d = -16.73 \ln(N_f) + 136.14 \quad (3)$$

通过上述 3 个方程的截距可知,在土体不发生振动的情况下,不同的相对密度土体静强度改变较小,且在初始静应力相同时,动强度随着振动循环次数的增加而减少。

同理,在细砾含量为12%时,动强度(σ_d)与振动周次(N_f)的关系曲线见图2。

且在一定相对密度,有如下数学模型:

$D_r = 0.50$ 时,满足:

$$\sigma_d = -16.96\ln(N_f) + 123.44 \quad (4)$$

$D_r = 0.65$ 时,满足:

$$\sigma_d = -16.34\ln(N_f) + 126.38 \quad (5)$$

$D_r = 0.80$ 时,满足:

$$\sigma_d = -16.98\ln(N_f) + 136.33 \quad (6)$$

显然,从图2可知,相对密度对饱和含细砾砂的动强度的影响与图1中显示的规律基本一致。

这主要是由于当土样相对密度较小时,土样颗粒之间引力较小,颗粒结构比较松散,导致颗粒之间的孔隙较大、接触面不够充分,在土体受到某一循环动应力时,导致孔隙水压力在短时间内增大到接近围压,这样土体的有效应力急剧减少,直到孔隙水压力完全等于围压,此时土体的有效应力为零,土体承载力消失即土样发生液化破坏;反之,随着土体相对密度增大时,土体颗粒之间孔隙逐渐变小,颗粒之间

的接触面慢慢变大,此时颗粒之间结构紧密程度逐渐增大,土体摩擦力和引力也逐渐变大。当土体中孔隙水压力逐渐增大时,不易克服土体颗粒的摩擦力和引力,土体的结构发生变化就相对困难,不会使土体的承载能力很轻易丧失,从而使土体的动强度就相对提高了。

在相对密度较大的条件下,当动应力幅值太小时,即使土样振动周次增大,土样最终也不会发生液化破坏。因为当动应力幅值很小时,土样的变形仅处于微小变形阶段,此阶段属于可恢复的弹性变形阶段,土样难以达到不可恢复的塑性变形阶段,所以土样在动应力幅值较低的情况下均难以到达破坏阶段,即发生液化。

3.2 固结应力比对饱和含细砾砂动强度的影响

围压 $\sigma_3 = 100$ kPa,频率 $f = 1.0$ Hz,相对密度 $D_r = 0.65$,固结应力比 K_c 为1.0,1.5,2.0。分析研究在不同固结应力比的情况下,饱和含细砾砂的动强度随振动周次的变化规律。动强度(σ_d)与振动周次(N_f)的关系曲线见图3。

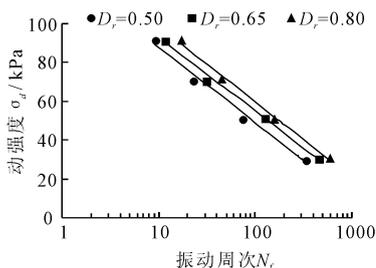


图1 细砾含量25%不同相对密度下 $\sigma_d - N_f$ 曲线

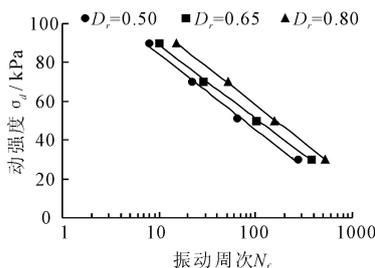


图2 细砾含量12%不同相对密度下 $\sigma_d - N_f$ 曲线

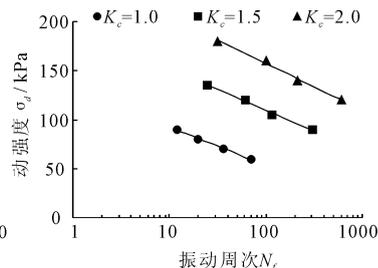


图3 细砾含量25%下不同固结应力比 $\sigma_d - N_f$ 曲线

从图3中可知,饱和含细砾砂的动强度(σ_d)随固结应力比(K_c)的增大而增大,当循环振动周次达到某一定值时,由于固结应力比的增大,土体发生液化时动强度显著增大。

且在一定固结比,有如下数学模型:

$K_c = 1.0$ 时,满足:

$$\sigma_d = -16.02\ln(N_f) + 128.66 \quad (7)$$

$K_c = 1.5$ 时,满足:

$$\sigma_d = -18.42\ln(N_f) + 194.46 \quad (8)$$

$K_c = 2.0$ 时,满足:

$$\sigma_d = -20.70\ln(N_f) + 252.81 \quad (9)$$

通过上述3个方程的截距可知,在土体不发生振动的情况下,不同的固结应力比土体静强度改变较大,同一固结应力比,动强度随着振动周次不断降低。

在细砾含量为12%时,动强度(σ_d)与振动周

次(N_f)关系曲线见图4。且在同一固结应力比,有如下数学模型:

$K_c = 1.0$ 时,满足:

$$\sigma_d = -16.34\ln(N_f) + 126.38 \quad (10)$$

$K_c = 1.5$ 时,满足:

$$\sigma_d = -17.26\ln(N_f) + 186.22 \quad (11)$$

$K_c = 2.0$ 时,满足:

$$\sigma_d = -20.55\ln(N_f) + 248.62 \quad (12)$$

从图4可知,固结应力比对饱和含细砾砂的动强度的影响与图3中显示的规律基本一致。

这主要是由于饱和含细砾砂土在等压固结时,初始剪应力为零,土颗粒处于某种相对平衡的状态,当饱和含细砾砂土在某种偏压固结状态时,侧向应力小于轴向应力,土体受到初始剪应力作用,使土粒骨架变形趋于更加紧密,在颗粒之间产生的相互接

触应力慢慢变大。当受到反复的动荷载的作用时,即使土样的孔隙水压力慢慢变大,但是由于此时颗粒之间的接触应力仍然大于逐渐上升的孔隙水压力,从而提高了土体的动强度,因此在偏压状态下饱和含细砾砂土的破坏应力较等压状态下的饱和含细砾砂土大。

3.3 动强度与液化时间的关系

在围压 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, 频率 $f = 1.0 \text{ Hz}$, 固结应力比 $K_c = 1.0$ 的条件下, 不同相对密度饱和含细砾砂土的动强度与液化破坏时间的关系见图 5。

在围压 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, 频率 $f = 1.0 \text{ Hz}$, 相对密度 $D_r = 0.65$ 的条件下, 不同固结应力比饱和含细

砾砂土的动强度与液化破坏时间的关系见图 6。

由图 5 和图 6 可知, 在同一相对密度和同一固结应力比下, 随着动应力的逐渐增加, 其达到液化破坏的时间逐渐减少; 在相同破坏时间的条件下, 当相对密度或者固结应力比逐渐增大时, 其所需要的动应力幅值也逐渐增大。

3.4 饱和含细砾砂典型动孔压比与振动周次的关系

图 7、图 8 分别为不同相对密度和不同固结应力比在细砾含量为 25% 时, 典型的动孔压比与振动周次的关系曲线。

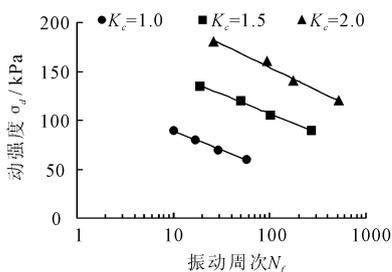


图 4 细砾含量 12% 下不同固结应力比 $\sigma_d - N_f$ 曲线

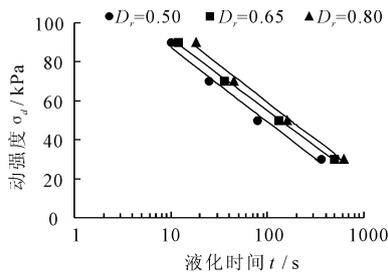


图 5 细砾含量 25% 下不同相对密度 $\sigma_d - t$ 曲线

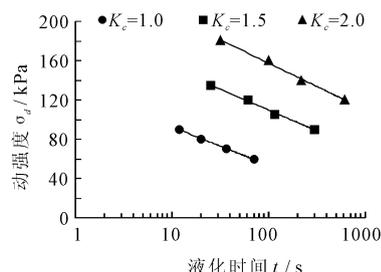


图 6 细砾含量 25% 下不同固结比下 $\sigma_d - t$ 曲线

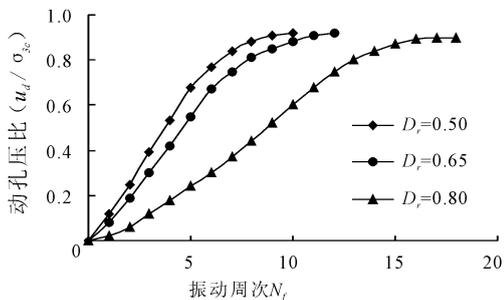


图 7 不同相对密度下细砾砂土 $u_d / \sigma_{3c} - N$ 曲线

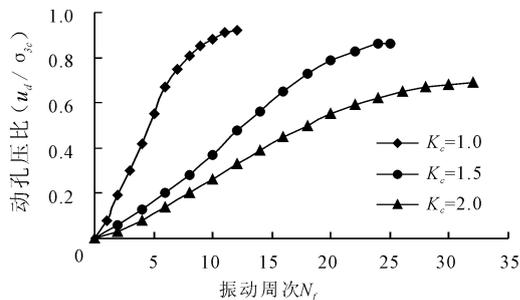


图 8 不同固结应力比下细砾砂土 $u_d / \sigma_{3c} - N$ 曲线

由图 7 可以看出, 随着相对密度的不断增大, 细砾砂土的动孔压比不断减小。当细砾砂土为中密状态以下时, 砂砾土颗粒之间的孔隙较大, 胶结能力不大, 孔隙水容易上升。而当砂砾土达到紧密状态时, 颗粒之间的骨架接触比较充分, 导致孔隙水上升较难。

由图 8 可以看出, 偏压状态比等压状态时, 动孔压上升的速率缓慢得多, 即在达到一定动孔压比的条件下, 偏应力越大, 砂砾土达到破坏标准时需要的振动周次也就越多, 而且偏应力越大时, 动孔压比达到稳定或破坏时越小, 也可以说, 在较大的固结应力比时, 无论动荷载有多大, 砂砾土样的动孔压比均达不到破坏的条件。

4 结论及建议

(1) 相对密度对饱和含细砾砂土的动强度影响较为显著。随着相对密度的增大, 饱和含细砾砂土的动强度也在不断增大, 但增大的幅度有限; 当相对密度一定时, 若动应力越大, 则饱和含细砾砂土产生液化所需的振动周次就越少, 其液化破坏时间也逐渐减少。

(2) 固结应力比对饱和含细砾砂土动强度的影响显著。当循环振次达到某定值时, 则随着应力比的增加, 土体液化时的动强度值明显增大; 当应力比一定时, 若动应力幅值越大, 则饱和含细砾砂土产生液化所需的振次就越少, 其液化破坏时间也逐渐减

少。在土体不发生振动的情况下,不同的固结应力比土体静强度改变较大,这与吴怀忠等^[14]针对不同砂砾料的动强度大小随着固结应力比增大而逐渐递增的结论基本吻合。

(3)由于影响砂土液化强度的因素很多,其中围压、振动频率、相对密度、细砾含量、固结应力比等为主要影响因素。本文只采用了控制变量法进行分析,而这些因素之间的相互影响没有给出定性分析,因此在以后的研究中可采用正交试验设计方案对含砾砂土进行试验,以便得出更加准确的结论。

参考文献:

- [1] 张建民. 砂土动力学若干基本理论探究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 1-50.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 刘凯, 张远芳. 饱和含细砾砂孔隙水压力特性三轴试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 19: 283-287.
- [5] 陈宇龙, 张宇宁. 非塑性细粒对饱和砂土液化特性影响

的试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 507-516.

- [6] 王海东, 陈曦, 李建文, 等. 大应变作用下含水率对非饱和砂土动力特性影响的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(1): 193-199.
- [7] 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.
- [8] 曹振中. 汶川地震液化特性及砂砾土液化预测方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.
- [9] 曹振中, 刘荟达, 袁晓铭. 砾性土液化特性与机理[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1165-1174.
- [10] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [11] 陈国兴, 孙田, 王炳辉, 等. 循环荷载作用下饱和砂砾土的破坏机理与动强度[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2140-2148.
- [12] 王炳辉, 陈国兴, 孙田, 等. 砂砾土抗液化强度的小型土箱振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2094-2100.
- [13] 杨永香, 贾景超, 黄志全. 饱和非纯净砂土液化特性研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2012, 33(2): 111-115.
- [14] 吴怀忠, 王汝恒. 围压和固结应力比对砂卵石土动力特性的影响[J]. 山西建筑, 2006, 32(7): 11-12.

(上接第 211 页)

- [6] 题正义, 王卓识, 王振, 等. 采动影响下松软煤巷锚杆支护技术研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 176-179.
- [7] 朱训国, 杨庆, 栾茂田. 岩体锚固效应及锚杆的解析本构模型研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 527-532.
- [8] 杨松林, 朱焕春, 刘祖德. 加锚层状岩体的本构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 427-430.
- [9] 孟强, 赵洪波, 茹忠亮. 锚杆支护圆形隧洞的等效强度参数及可靠度分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊): 437-442.
- [10] 马刚, 周伟, 常晓林, 等. 锚杆加固散粒体的作用机制

研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1577-1584.

- [11] 蔡小林, 赵德安. 隧道计算中提高围岩参数模拟锚杆作用的探讨[J]. 兰州交通大学学报, 2004, 23(1): 10-14.
- [12] 陈浩, 任伟中, 李丹, 等. 深埋隧道锚杆支护作用的数值模拟与模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(s1): 719-724.
- [13] 陈浩, 任伟中, 舒中根, 等. 不同支护条件下锚杆支护作用的模型试验研究与数值分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(s1): 277-282.