

文章编号:1001-4888(2023)04-0507-10

循环应力比与有效围压对北部湾 海砂动力特性的影响*

王家全^{1,2,3}, 张涛艺^{1,2,3}, 唐毅^{1,2,3}, 唐滢^{1,2,3}

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西柳州 545006; 2. 广西壮族自治区岩土灾害与生态治理工程研究中心, 广西柳州 545006;
3. 广西高校防灾减灾与预应力技术重点实验室, 广西柳州 545006)

摘要: 海砂作为围填海工程中的填料, 研究其在循环荷载作用下的动力特性有重要意义。为揭示北部湾海砂填料的动力特性, 利用 GDS 动三轴测试系统对北部湾海砂开展不同循环应力比与有效围压下海砂的饱和和不排水循环加载三轴试验, 探究了海砂的动强度与破坏振次之间的关系, 并分析了轴向累积应变、回弹模量和动孔压的发展规律。结果表明: 动强度与破坏振次之间呈现出良好的线性关系, 且动强度随着循环振次的增加而降低; 海砂的轴向累积应变呈现“稳定发展—失稳破坏—增量破坏”的发展模式, 并且轴向累积应变与振次的拟合曲线可以用幂函数进行描述; 回弹模量随轴向累积应变的变化曲线呈现“骤降—缓慢减小—基本稳定”的趋势, 同一振次水平下, 回弹模量随循环应力比和有效围压的增大而增大, 当循环应力比为 2.0 时, 试样回弹模量随应变的关系曲线主要表现为“突增—逐渐减小—趋于稳定”的规律; 孔压的发展模式为“骤增—稳定—线性增长”和“骤增—阶梯式增长”两种形式, 且两种模式之间相互转换。

关键词: 北部湾海砂; 动三轴试验; 循环应力比; 有效围压; 动力特性

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-236

0 引言

广西北部湾经济区自从被纳入国家发展战略以来, 基础设施建设进入了快速发展期, 国家大力提升北部湾地区交通运输、机场、港口、桥梁、通信、水利及城市供排水、供气、供电等基础设施的建设。然而, 由于其地域的特殊性, 这些基础设施建设不可或缺地需要进行围填海工程, 因此, 研究北部湾海砂在循环荷载作用下的动态响应特性, 对评价围填海地区的地基不均匀沉降、砂土地震液化等灾害具有重要意义。

针对海砂的力学性质, 王家全等^[1]以北部湾海砂为材料, 研究了其在循环荷载下的动力特性, 陈硕^[2]以北部湾海砂为填料, 探究了长周期循环荷载作用下相对密实度、振动频率、固结压力、海积软土黏粒含量、固结应力比等因素对动力特性的影响。还有学者以珊瑚钙质砂为研究对象, 研究了钙质砂的动强度变化规律^[3]、应力主轴旋转条件下钙质砂的特性^[4]、波浪荷载作用下钙质砂的动力响应特征^[5-6]、

* 收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41962017); 广西自然科学基金重点项目(2022GXNSFDA035081); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人才[2020]6号); 广西科技大学研究生教育创新计划项目(GKYC202328); 广西研究生教育创新计划项目(YCSW2022441); 广西大学生创新创业训练计划资助项目(202210594057); 广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2020KY08026)

通信作者: 王家全(1981-), 男, 博士, 教授。从事土木工程灾害防治、加筋结构、地基基础等方面的教学与研究工作。Email: wjqian1999@163.com

初始主应力方向对钙质砂动力响应的影响^[7],以及内孔隙与各向异性对钙质砂液化的影响^[8]。研究手段主要有常规动三轴^[9-10]、共振柱^[11-12]和循环单剪^[13]。吴琪等^[14]以南海珊瑚砂为材料,开展了一系列共振柱试验,探究了相对密度、初始有效围压、细粒含量对珊瑚砂动力变形的影响规律,并重点研究了细粒含量对最大剪切模量 G_{max} 、阻尼比特性和剪切模量比 G/G_{max} 的衰退特性。何绍衡等^[15]对珊瑚砂开展了一系列不同有效围压 σ_c 和循环动应力比 CSR 的长期排水循环加载三轴试验,建立了能反映初始固结状态和循环动应力比的珊瑚砂循环残余累积应变显式计算模型,并基于安定理论,分析了珊瑚砂在长期荷载作用下的累积变形发展模式。Jafarian 等^[16]对钙质砂和硅质砂开展各向同性和各向异性应力条件下的共振柱和动三轴试验,研究了有效围压 σ_c 对剪切模量 G 和阻尼比的影响规律。Shahnazari 等^[17]研究了围压、相对密度、轴向应变、排水条件和粒度分布对钙质砂颗粒破碎的影响。Brandes^[18]发现,由于矿物和结构的差异,钙质砂的循环强度通常高于石英砂。此外,Nicholson^[19]和 Salem 等^[20]的研究表明钙质砂在等效应力条件下具有较高循环强度。Salem 等^[20]指出,与硅质砂相比,颗粒形状的不均匀性可能导致钙质砂的循环强度更高,这一发现与 Cavarretta^[21]、Shin^[22]和 Sivathayalan^[23]等通过试验和数值模拟得出的结论一致,这些研究均表明了颗粒形状对土体行为的显著影响。

综上所述,国内外学者对于海砂的研究对象大多数是以钙质砂为主,其研究的主要内容为钙质砂在循环荷载作用下的轴向累积应变、动弹性模量、剪切模量、孔压发展规律、阻尼比、动强度、颗粒破碎、液化特性及采用微生物固化后的动力特性,但对北部湾海砂动力特性的研究较少涉及。因此,本文以广西北部湾海砂为材料,开展了不同循环应力比 CSR 与有效围压 σ_c 下北部湾饱和海砂的动三轴试验,探究了循环荷载作用下动强度和破坏振次之间的关系,分析了北部湾海砂填料在长期循环荷载作用下的轴向累积应变发展规律、回弹模量的变化规律、动孔压的发展模式,以期为北部湾地区围填海工程地基不均匀沉降、地震液化等工程案例提供一定的参考。

1 试验介绍

1.1 试验材料

试样为广西北部湾大风江口的海砂(图1),取土深度为10m~30m,经清洗风干后其颜色整体呈黄白色,颗粒形状较不规则但表面较为光滑,通过土工试验得到海砂基本物理参数见表1。由《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019)^[24]土的分类标准可知,该土样为级配不良粗砂,经筛分试验确定其颗粒级配如图2所示。



图1 北部湾海砂

Fig.1 Beibu Gulf sea sand

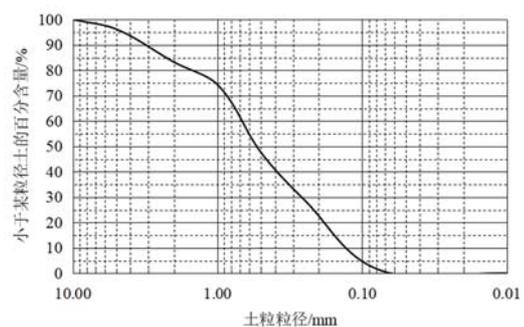


图2 北部湾海砂填料粒径级配累积曲线

Fig.2 Cumulative curve of particle size gradation of sea sand filler in Beibu Gulf

表1 北部湾海砂填料物理参数

Tab.1 Physical parameters of Beibu Gulf sea sand filler

| 土粒比重 | 最大干密度 /($g \cdot cm^{-3}$) | 最小干密度 /($g \cdot cm^{-3}$) | 最大孔隙比 e_{max} | 最小孔隙比 e_{min} | 不均匀系数 C_u | 曲率系数 C_c |
|------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|----------------|---------------|
| 2.66 | 1.949 | 1.652 | 0.610 | 0.365 | 4.960 | 0.770 |

1.2 试验方案

参考陈国兴等^[25]对于循环应力比 CSR 的定义,本文主要研究北部湾海砂填料在不同 CSR 和不同有效围压下的动力特性,试验方案见表 2。采用直径 $d=50\text{mm}$,高度 $h=100\text{mm}$ 的圆柱形试样,施加的荷载波形采用半正弦波模拟交通荷载的单向脉冲振动^[15](如图 3 所示)。试验加载频率为 1Hz,试样采用均等固结,相对密度为 50%^[26]。所有试验均在英国 GDS 动态三轴试验设备上进行。

表 2 试验加载方案

Tab. 2 Test loading scheme

| 试验工况 | 有效围压 σ_c/kPa | 动应力幅值 σ_d/kPa | 循环应力比 CSR |
|------|----------------------------|-----------------------------|-----------|
| A-1 | | 50 | 0.5 |
| A-2 | 50 | 100 | 1.0 |
| A-3 | | 150 | 1.5 |
| A-4 | | 200 | 2.0 |
| B-1 | 25 | 50 | |
| B-2 | 75 | 150 | 1.0 |
| B-3 | 100 | 200 | |

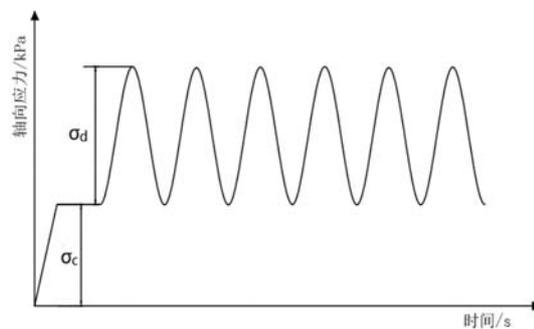


图 3 半正弦波循环荷载加载波形

Fig. 3 Cyclic loading waveform of half sine wave

1.3 试验步骤

试样采用湿装法分四层装样,根据干密度控制每层需要装入试样的质量,向每层加入质量分数为 5% 的无气水进行拌合,然后迅速将试样用小勺加入至成样模具并对其进行击实,控制每层试样的击实高度为 2.5cm,每击实一层后,对其表面进行刮毛处理,避免出现分层现象。接下来依次对试样进行饱水和、固结、剪切,试样停止的标准为单幅振动轴向累积应变达到 5%。

2 循环荷载作用下海砂的动力特性

2.1 海砂的动强度特性

土体的动强度是指一定荷载振次下土体产生破坏应变($\epsilon_d=5\%$)所需动应力的的大小,土体在循环荷载作用下发生破坏的标准可分为两种,一种是孔压标准,另一种是应变标准。在均等固结条件下,砂土的破坏标准目前有两类,一是以超静孔压比 100% 为标准^[27-28],二是以单幅轴应变 2%~2.5% 或双幅轴应变 5% 为标准^[29]。本文以单幅轴向应变达到 5% 为标准,图 4 为轴向应变达到 5% 时,同一有效围压 σ_c 与同一循环应力比 CSR 下,饱和海砂的动强度 σ_d 和破坏振次 N_f 之间的关系,通过对动强度 σ_d 与破坏振次 N_f 的关系曲线进行拟合分析,可得决定系数 $R^2 > 0.95$,呈现出良好的线性关系。从图 4 可以看出,土体的动强度始终随着循环振次的增加而减小,且本文得出的动强度 σ_d 与破坏振次 N_f 变化规律与陈硕^[2] 和杨果岳等^[30] 得出的规律一致。

2.2 循环应力比与有效围压对海砂轴向累积应变的影响

图 5(a) 为同一有效围压 σ_c 下不同 CSR 的饱和海砂轴向累积应变 ϵ_d 与振次 N 的对数关系曲线,图 5

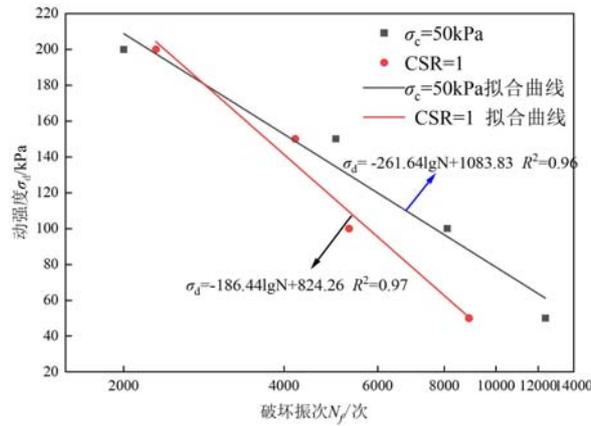


图4 动强度 σ_d 与破坏振次 N_f 之间的关系

Fig. 4 Relationship between dynamic strength σ_d and failure vibration number N_f

(b)为同一 CSR 下不同有效围压 σ_c 的饱和海砂试样轴向累积应变 ϵ_d 与振次 N 的对数关系曲线。从图 5 (a)、(b) 可以发现, 加载初期 ($N < 1000$ 次), 轴向累积应变增长缓慢, 到达某一振次时, 曲线出现转折点, 随后急剧增长, 呈现出增量破坏的形式。图 5(a) 中, 当 CSR 为 0.5、1、1.5、2 时, 试样分别在振次达到 4600 次、2600 次、1400 次、400 次左右时开始失稳。图 5(b) 中, 当 σ_c 为 25kPa、50kPa、75kPa、100kPa 时, 试样分别在振次达到 3700 次、2600 次、1700 次、1400 次左右时开始失稳。参考高盟等^[26] 对非饱和和钙质砂动力特性的研究, 本文定义 ϵ_d-N 关系曲线在单对数坐标上的转折点为试样由应变累积缓慢向失稳破坏的转变点, 将该点对应的应变值定义为失稳应变。从图 5(a)、(b) 可知各工况下试样的失稳应变值较小, 均小于 1%, 仅为土体达到破坏时应变的 1/5。因此, 在实际工程中, 以该类材料作为路基填料时, 应将失稳应变作为设计、施工以及后期运营、养护的一个重要因素进行考虑。随着 CSR 的增加, 试样失稳应变逐渐上升, 且曲线往左上方移动。各工况下 ϵ_d-N 关系曲线可采用式(1)进行拟合, 模型拟合参数 a 、 b 及决定系数 R^2 见表 3, 决定系数 R^2 均大于 0.97, 拟合效果良好。参数 a 随 CSR 的增大而增大, 与 CSR 之间的关系可用式(2)描述; 参数 b 随 CSR 的增大而减小, 与 CSR 之间的关系可用式(3)描述。

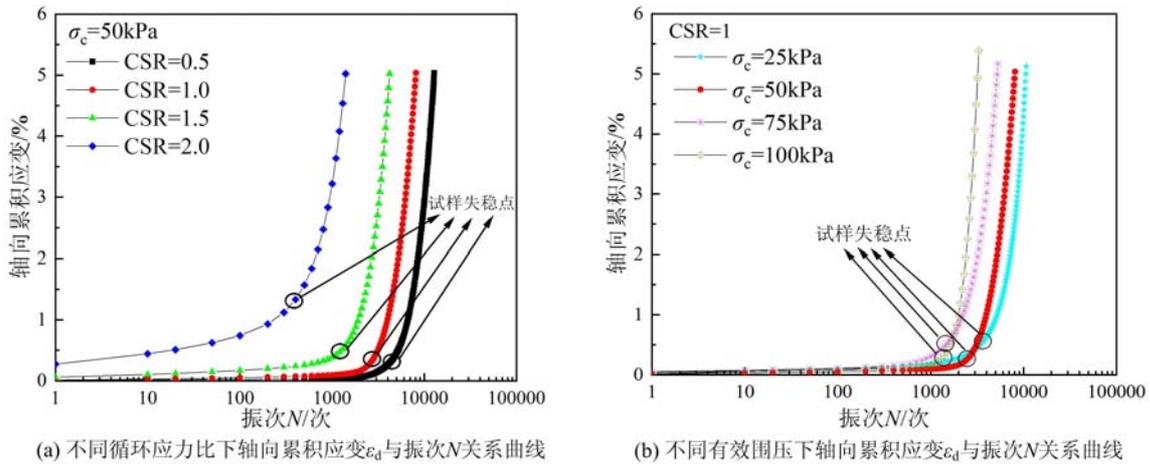


图5 轴向累积应变 ϵ_d 与振次 N 的关系

Fig. 5 Relationship between axial cumulative strain ϵ_d and vibration N

$$\epsilon_d = aN^b \tag{1}$$

$$a = e^{(-26.65+10.39CSR)} + 2.528 \times 10^{-7} \tag{2}$$

$$b = -0.1735CSR^3 + 2.466 \tag{3}$$

对比图 5(a) 中同一有效围压 σ_c 下不同 CSR 的轴向累积应变 ϵ_d 与振次 N 的对数关系曲线发现,

CSR 越高,即动应力幅值越大,同一振次水平下对应轴向累积应变 ϵ_d 越大,这一结果与王家全等^[31]不同动应力比下加筋前后砾性土的动三轴试验分析中得出的结论一致。为了便于分析不同工况、同一振次水平下轴向累积应变的差异性,表 4 给出了同一有效围压 σ_c 下不同 CSR,振次 $N=1000$ 时对应的应变统计值。由表 4 可以得到,循环应力比 $CSR=1.0$ 相较于 $CSR=0.5$ 的轴向累积应变 ϵ_d 增加了 0.060% ; $CSR=1.5$ 相较于 $CSR=1.0$ 的轴向累积应变 ϵ_d 增加了 0.292% ; $CSR=2.0$ 相较于 $CSR=1.5$ 的轴向累积应变 ϵ_d 增加了 2.832% ,可见 ϵ_d 增长幅度随 CSR 的等差增长而增大,表明 CSR 的改变对海砂试样变形特性的影响随 CSR 基数的增加而增大。当 $CSR=0.5$,试样破坏时对应的振次 $N=12800$,为 $CSR=2.0$ 的 9.143 倍。这是因为 CSR 越大,在相同时间和频率内,土体受到的荷载越大,达到破坏时所需的时间也就越短,从而在短期内会产生较大的变形,故达到破坏时所需要的振次就越少。

表 3 模型参数 a, b 及决定系数 R^2

Tab. 3 Model parameters a, b and determination coefficient R^2

| 有效围压 σ_c /kPa | 动应力幅值 σ_d /kPa | 循环应力比 CSR | a | b | R^2 |
|----------------------|-----------------------|-----------|-------------------------|------|-------|
| 50 | 50 | 0.5 | 6.807×10^{-10} | 2.40 | 0.99 |
| | 100 | 1.0 | 8.970×10^{-9} | 2.24 | 0.99 |
| | 150 | 1.5 | 2.386×10^{-7} | 2.02 | 0.99 |
| | 200 | 2.0 | 2.822×10^{-3} | 1.02 | 0.97 |
| 25 | 50 | | 5.121×10^{-9} | 2.23 | 0.99 |
| 75 | 150 | 1.0 | 5.004×10^{-7} | 1.88 | 0.99 |
| 100 | 200 | | 5.165×10^{-11} | 3.13 | 0.99 |

表 4 $N=1000$ 次不同 CSR 下对应的应变值

Tab. 4 Corresponding strain values under $N=1000$ times of different CSR

| CSR | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| $\epsilon_d/\%$ | 0.034 | 0.094 | 0.386 | 3.218 |
| 增幅/ $\%$ | 0 | 0.060 | 0.292 | 2.832 |

对比图 5(b)中同一 CSR 下不同有效围压 σ_c 的轴向累积应变 ϵ_d 与振次 N 的对数关系曲线发现,在同一振次水平下,有效围压 σ_c 越高,对应的轴向累积应变 ϵ_d 越大、试样破坏时所需振次越少,从而达到破坏时试样的动强度也越小。已有研究表明土体动应变随着有效围压的提升而降低,随动应力幅值的增加而上升^[31],原因在于保持同一 CSR 时,在等向固结的情况下,增大围压的同时,动应力幅值增长的大小为围压的 2 倍。而本文得出的结论是在同一振次下,随有效围压 σ_c 的增加, ϵ_d 随之增大,说明动应力幅值对轴向累积应变的影响占主导地位。由此可见,以该类海砂作为围填海工程的路基时,应将列车轴重作为设计的主要设计参数,从而在后期运行养护时能够最大化地减小成本,进而保证其良好的服役性能。

2.3 循环应力比与有效围压对回弹模量的影响

不同循环应力比 CSR 及有效围压 σ_c 下,回弹模量 E_d 随轴向应变 ϵ_d 的变化规律分别如图 6(a)、(b) 所示。对于 $CSR \leq 1.5$ 时,各试样 $E_d-\epsilon_d$ 关系曲线的发展趋势保持一致,均表现为轴向应变 $\epsilon_d \leq 0.5\%$ 时,在循环荷载作用下回弹模量 E_d 骤降; $0.5\% \leq \epsilon_d \leq 2.0\%$ 时, E_d 减小速率逐渐下降; $\epsilon_d \geq 2.0\%$ 时, $E_d-\epsilon_d$ 关系曲线基本趋于稳定。总体而言,回弹模量 E_d 随 ϵ_d 变化曲线呈现“骤降—缓慢减小—基本稳定”的发展趋势。 $CSR=2.0$ 时试样 $E_d-\epsilon_d$ 关系曲线在振动初期整体呈现上升趋势,随后随着轴向应变的增加逐渐减小,后期基本稳定。这是因为在该工况下的动应力幅值较大,加载的瞬间会产生一个突增的应变,故绘图时将试样的初始回弹模量和 $\epsilon_d=0.27\%$ 时取为同一个值,所以当 $\epsilon_d \leq 0.27\%$ 时,回弹模量没有变化。但是在 $\epsilon_d \leq 0.62\%$ 时,回弹模量整体的发展趋势是上升的,这是由于加载初期 ($\epsilon_d \leq 0.62\%$),在高动应力幅值作用下,试样的密实度瞬间得到加强,土体刚度增高,而后随着循环次数的增加和轴向应变

ϵ_d 的增长,原始稳定的土体骨架受到一定的扰动,土颗粒发生重排,待重排结束后土体内部塑性势能消散,因此曲线经过短暂的上升后逐渐减小,土体刚度出现一定程度的衰减,后期($\epsilon_d \geq 3\%$)逐渐趋于稳定。

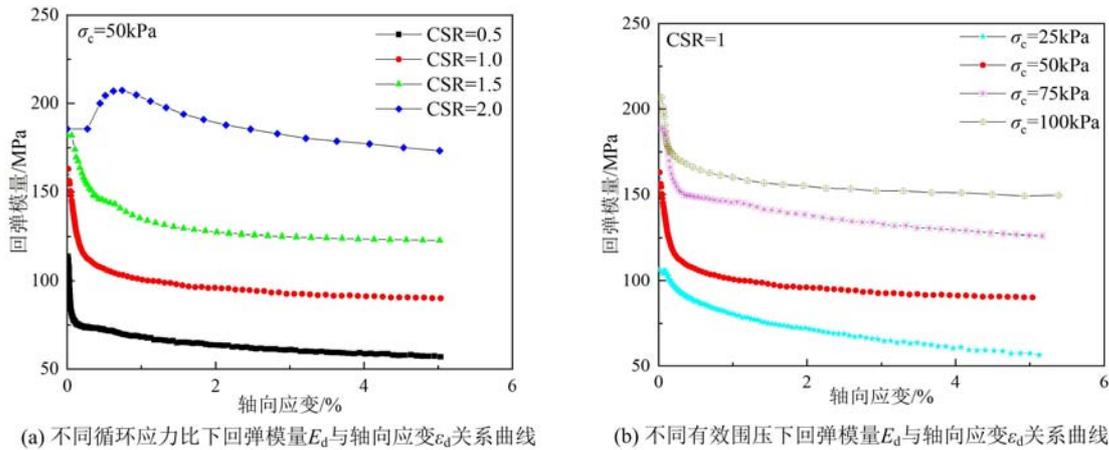


图6 回弹模量 E_d 与轴向应变 ϵ_d 之间的关系

Fig. 6 Relationship between resilient modulus E_d and axial strain ϵ_d

图6(a)为有效围压 $\sigma_c = 50\text{kPa}$ 时不同CSR下饱和海砂的 E_d - ϵ_d 关系曲线。表5统计了轴向应变 $\epsilon_d = 2.0\%$ 时,不同CSR下的回弹模量,与CSR=0.5相比,CSR=2.0时海砂试样 E_d 增长了195.64%。这是因为循环应力比CSR越高,对于相同密度的试样,在高动应力幅值下,土体致密化的程度越高,也就是说,在同一应变水平下,随着CSR的增加,土体回弹模量 E_d 随之增大。

表5 轴向应变为2%时对应的回弹模量

Tab. 5 The corresponding resilience modulus when the axial strain is 2%

| CSR | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
|----------|-------|-------|--------|--------|
| 回弹模量/MPa | 63.53 | 96.08 | 127.24 | 187.82 |
| 增幅/% | 0 | 51.24 | 100.28 | 195.64 |

图6(b)为CSR=1.0时不同有效围压 σ_c 下试样的 E_d - ϵ_d 关系曲线。在同一轴向应变水平下,回弹模量 E_d 随有效围压 σ_c 的增大而增加。这是因为有效围压 σ_c 的增大使得海砂试样孔隙比减小,围压增大的同时,也增大了颗粒间的接触面积,土体颗粒间的摩擦阻力增强,则颗粒间的相对错动越发不易,从而有利于应力波的传播,试样的整体强度和抗变形能力得到提高,因此回弹模量 E_d 随有效围压 σ_c 的增加而增大^[31]。由此可得出,提高有效围压 σ_c 可以提高土体抗变形能力。

2.4 循环应力比与有效围压对动孔压的影响

图7(a)、(b)为不同循环应力比CSR与有效围压 σ_c 下饱和海砂的动孔压 u_d 与振次 N 的关系曲线。由图7(a)、(b)可知,在不同循环应力比CSR与有效围压 σ_c 下,海砂试样的动孔压 u_d 随振次 N 的发展模式具有一定程度的波动性,主要可分为以下两种发展模式:模式①“骤增—稳定—线性增长”,如图7(a)中的CSR=1.5、CSR=2.0及图7(b)中的 $\sigma_c = 75\text{kPa}$ 、 $\sigma_c = 100\text{kPa}$ 。随着振次的增加,试样动孔压 u_d 在加载初期出现骤增,随后保持一定程度上的稳定,后期因试样轴向变形的急剧增长,孔隙水压力逐渐累积,土体内部的有效应力减小,动孔压 u_d 随振次 N 的增加近似线性增长。模式②“骤增—阶梯式增长”,如图7(a)中的CSR=1.0、CSR=0.5及图7(b)中的 $\sigma_c = 25\text{kPa}$ 、 $\sigma_c = 50\text{kPa}$ 。试样在振动初期动孔压迅速增长,而后随着振次 N 的增加,动孔压 u_d 呈现阶梯式增长趋势。从图7(a)、(b)可以看出,随着CSR及有效围压 σ_c 的增大,动孔压 u_d 与振次 N 关系曲线的发展模式由模式②向着模式①转变,综上所述,动孔压 u_d 随振次 N 的变化规律受动应力幅值及有效围压的影响显著。

对比图7(a)中同一有效围压 σ_c 、不同CSR下动孔压 u_d 与振次 N 的关系曲线发现,随着CSR的增大,饱和海砂试样动孔压 u_d 骤增阶段越短,同一振次水平下CSR越大,试样达到破坏时对应的 u_d 越小。

这是因为随着 CSR 的增加,在加载初期,试样的密实度越高,即试验伊始土骨架所承受的有效应力也会随之增加,相应的动孔压越小。与此同时,还可以发现,在同一振次水平下,随着 CSR 的增大,试验后期试样动孔压的增长速率不断加快,且试样破坏时($\epsilon_d=5\%$)对应动孔压 u_d 的间隔距离越来越小,这是因为动应力幅值越高,土骨架结构失稳速度越快导致的。

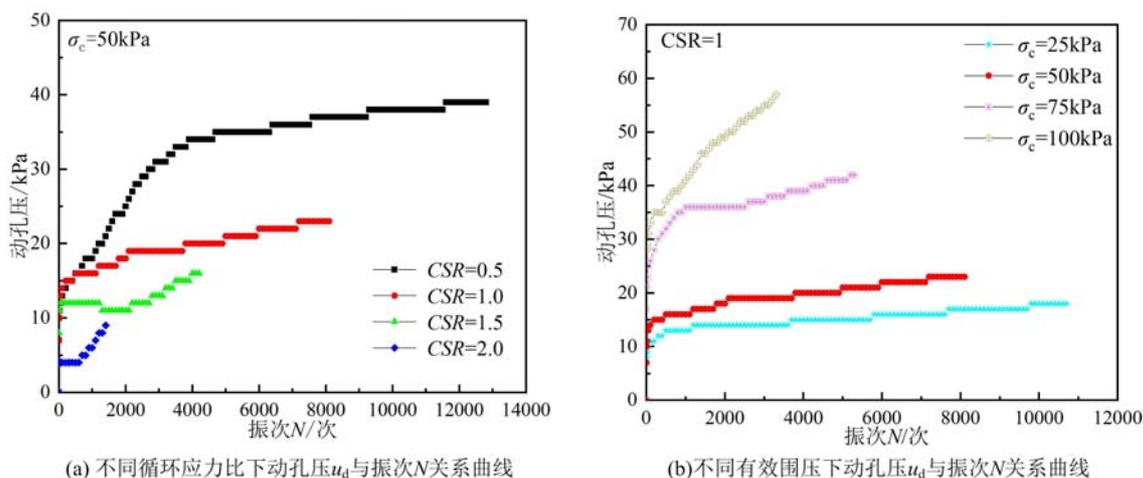


图7 动孔压 u_d 与振次 N 的关系

Fig. 7 Relationship between dynamic pore pressure u_d and the vibration N

图 7(b) 给出了当 CSR=1 时,不同有效围压 σ_c 下动孔压 u_d 与振次 N 的关系曲线,在同一振次水平下,动孔压 u_d 随有效围压 σ_c 的增加而增大。振次 $N=1000$ 时,有效围压 $\sigma_c=100\text{kPa}$ 时的动孔压 $u_d=41\text{kPa}$,为有效围压 $\sigma_c=25\text{kPa}$ 时动孔压的 3.154 倍。为保证 CSR 的一致性,增大有效围压 σ_c 的同时动应力幅值 σ_d 呈等比例增大,图 7(a) 中动孔压 u_d 随 CSR 的增加而减小,而图 7(b) 中增大有效围压 σ_c 会导致动孔压 u_d 的上升,本文得出的结论与文献[32]对单幅值循环动载作用下饱和砾砂动力特性试验研究中得出的结论一致。综合图 5(a) 和图 7(a)、(b) 可知,幅值的增大加快了土体的变形和孔压的累积速率,但当变形达到破坏时($\epsilon_d=5\%$),土体的孔隙水压力数值比较小,以图 7(a) 中 CSR=2.0 为例,此时 $u_d/\sigma_c=0.18$,土体并没有达到液化。综上所述,有效围压 σ_c 对动孔压 u_d 的影响程度大于动应力幅值 σ_d 。

3 结论

利用 GDS 动态试验系统开展了北部湾海砂的饱和和不排水循环三轴试验,通过试验研究不同循环应力比与有效围压对北部湾海砂填料的动力特性,探究了海砂动强度和破坏振次之间的关系,并分析了海砂轴向累积应变、回弹模量和动孔压的发展规律,得到以下结论:

(1) 北部湾海砂的动强度 σ_d 和破坏振次 N_f 的对数关系曲线之间符合一次函数关系,且动强度随着振次的增加而逐渐减小;轴向累积应变 ϵ_d 与振次 N 符合幂函数 $\epsilon_d=aN^b$ 关系,轴向累积应变 ϵ_d 均存在失稳应变值,且均小于 1%,在失稳应变之前,累积应变 ϵ_d 的增长速率缓慢,超过失稳应变以后,增长速率加快;在同一振次水平下,轴向累积应变 ϵ_d 随着 CSR 的增大而增大,随着有效围压 σ_c 的增大而增大。

(2) 回弹模量 E_d 随 ϵ_d 变化曲线呈现“骤降—缓慢减小—基本稳定”的发展趋势,同一应变水平下随有效围压 σ_c 的增加而增加,随 CSR 的增加而增大。高循环应力比 CSR=2.0 时,试样 E_d - ϵ_d 关系曲线在振动初期出现上升趋势,随后随着轴向应变的增加逐渐减小,后期基本稳定。

(3) 孔压的发展模式主要表现为“骤增—稳定—线性增长”和“骤增—阶梯式增长”两种,且两种模式之间存在相互转换的关系,有效围压 σ_c 对孔压的累积影响大于动应力幅值 σ_d 。在同一振次水平下,孔压随 CSR 的增大而减小,随有效围压 σ_c 的增加而增加。

参考文献:

[1] 王家全, 陈胜前, 唐毅, 等. 北部湾地区海砂填料的动力特性分析[J]. 海洋工程, 2020, 38(5): 149—155

- (WANG Jiaquan, CHEN Shengqian, TANG Yi, et al. Dynamic characteristics analysis of sea sand filler in Beibu Gulf area[J]. *The Ocean Engineering*, 2020, 38(5):149–155 (in Chinese))
- [2] 陈硕. 北部湾吹填砂土在长周期循环荷载条件下的动力特性试验研究[D]. 南宁:广西大学, 2015 (CHEN Shuo. Experimental research of dynamic characteristics of the reclaimed sand in Beibu Gulf under the conditions of cyclic loading for a long period of time[D]. Nanning: Guangxi University, 2015 (in Chinese))
- [3] 虞海珍, 汪稔. 钙质砂动强度试验研究[J]. *岩土力学*, 1999, 20(4):6 (YU Haizhen, WANG Ren. The cyclic strength test research on calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(4):6 (in Chinese))
- [4] 虞海珍. 复杂应力条件下饱和钙质砂动力特性的试验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006 (YU Haizhen. Experimental study on dynamic characteristics of saturated calcareous sand under complex stress conditions[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006 (in Chinese))
- [5] 虞海珍, 汪稔, 赵文光, 等. 波浪荷载下钙质砂孔压增长特性的试验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2006, 28(11):86–89 (YU Haizhen, WANG Ren, ZHAO Wenguang, et al. Experimental research on development pattern of pore water pressure of carbonate sand under wave loads [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006, 28(11):86–89 (in Chinese))
- [6] 李建国. 波浪荷载作用下饱和钙质砂动力特性的试验研究[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2005 (LI Jianguo. Experimental research on dynamic behavior of saturated calcareous sand under wave loading[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005 (in Chinese))
- [7] 李建国, 汪稔, 虞海珍, 等. 初始主应力方向对钙质砂动力特性影响的试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(5):723–727 (LI Jianguo, WANG Ren, YU Haizhen, et al. Experimental research on effect of initial principal stress orientation on dynamic properties of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(5):723–727 (in Chinese))
- [8] 孙吉主, 黄明利, 汪稔. 内孔隙与各向异性对钙质砂液化特性的影响[J]. *岩土力学*, 2002, 23(2):166–169 (SUN Jizhu, HUANG Mingli, WANG Ren. Influence of inner pore and anisotropy on liquefaction characteristics of calcareous sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(2):166–169 (in Chinese))
- [9] Jafarian Y, Javdanian H, Hadda A. Dynamic properties of calcareous and siliceous sands under isotropic and anisotropic stress conditions[J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(1):172–184.
- [10] Giang P H H, Van Impe P O, Van Impe W F, et al. Small-strain shear modulus of calcareous sand and its dependence on particle characteristics and gradation[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 100:371–379.
- [11] Van Impe P O, Van Impe W F, Manzotti A, et al. Compaction control and related stress-strain behaviour of off-shore land reclamations with calcareous sands[J]. *Soils and Foundations*, 2015, 55(6):1474–1486.
- [12] 李小梅, 王芳, 韩林, 等. 珊瑚砂最大剪切模量和阻尼比的共振柱试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(S1):60–64 (LI Xiaomei, WANG Fang, HAN Lin, et al. Resonant column tests on maximum shear modulus and damping ratio of coral sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(S1):60–64 (in Chinese))
- [13] Mao X, Fahey M. Behaviour of calcareous soils in undrained cyclic simple shear[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(8):715–727.
- [14] 吴琪, 杨铮涛, 刘抗, 等. 细粒含量对饱和珊瑚砂动力变形特性影响试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(8):1386–1396 (WU Qi, YANG Zhengtao, LIU Kang, et al. Experimental study on the influence of fines content on dynamic deformation characteristics of saturated coral sand[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(8):1386–1396 (in Chinese))
- [15] 何绍衡, 刘志军, 夏唐代, 等. 长期循环荷载下珊瑚砂累积变形特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(S2):161–164 (HE Shaoheng, LIU Zhijun, XIA Tangdai, et al. Experimental study on cumulative deformation characteristics of coral sand under long-term cyclic loading[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S2):161–164 (in Chinese))
- [16] Jafarian Y, Javdanian H, Hadda A. Dynamic properties of calcareous and siliceous sands under isotropic and anisotropic stress conditions[J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(1):172–184.
- [17] Shahnazari H, Rezvani R. Effective parameters for the particle breakage of calcareous sands: an experimental study[J]. *Engineering Geology*, 2013, 159(9):98–105.

- [18] Brandes H G. Simple shear behavior of calcareous and quartz sands[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2011, 29(1):113–126.
- [19] Nicholson P G. Liquefaction evaluation discrepancies in tropical lagoonal soils[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2006, 24(5):1259–1269.
- [20] Salem M, Elmamlouk H, Agaiby S. Static and cyclic behavior of North Coast calcareous sand in Egypt[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 55:83–91.
- [21] Cavarretta I, Coop M, O'sullivan C. The influence of particle characteristics on the behaviour of coarse grained soils[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(6):413–423.
- [22] Shin H, Santamarina J C. Role of particle angularity on the mechanical behavior of granular mixtures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(2):353–355.
- [23] Sivathayalan S, Ha D. Effect of static shear stress on the cyclic resistance of sands in simple shear loading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(10):1471–1484.
- [24] GB/T 50123–2019, 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版, 2019 (GB/T 50123–2019, Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019 (in Chinese))
- [25] 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 (CHEN Guoxing, SUN Tian, WANG Binghui, et al. Undrained cyclic failure mechanisms and resistance of saturated sand-gravel mixtures[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(12):2140–2148 (in Chinese))
- [26] 高盟, 彭晓东, 陈青生. 南海非饱和钙质砂动力特性三轴试验研究[J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(6):625–635 (GAO Meng, PENG Xiaodong, CHEN Qingsheng. Triaxial test on dynamic characteristics of unsaturated calcareous sand in South China Sea[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(6):625–635 (in Chinese))
- [27] Ishihara K. Stability of natural deposits during earthquakes[C]//International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1985:321–376.
- [28] Seed H B, Lee K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1966, 92(6):105–134.
- [29] National Research Council. Liquefaction of soils during earthquakes[M]. Washington: National Academy Press, 1985.
- [30] 杨果岳, 程雨竹, 徐运龙, 等. 交通荷载作用下安宁地区超固结重塑红黏土的动力特性试验研究[J]. *实验力学*, 2019, 34(4):675–683 (YANG Guoyue, CHENG Yuzhu, XU Yunlong, et al. Experimental study on dynamic characteristics of over-consolidated remolded red clay subjected to traffic load in Anning area[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2019, 34(4):675–683 (in Chinese))
- [31] 王家全, 畅振超, 王晴, 等. 不同动应力比下加筋前后砾性土的动三轴试验分析[J]. *水力发电*, 2020, 46(4):120–125 (WANG Jiaquan, CHANG Zhenchao, WANG Qing, et al. Dynamic triaxial test study on saturated gravel soil before and after reinforcement[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 46(4):120–125 (in Chinese))
- [32] 王家全, 祝梦柯, 唐毅, 等. 单幅值循环动载下饱和砾砂动力特性试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(6):1821–1828, 1874 (WANG Jiaquan, ZHU Mengke, TANG Yi, et al. Experimental study on dynamic characteristics of saturated gravel under cyclic dynamic load with single amplitude[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(6):1821–1828, 1874 (in Chinese))

Influence of cyclic stress ratio and effective confining pressure on dynamic characteristics of Beibu Gulf sea sand

WANG Jiaquan^{1,2,3}, ZHANG Taoyi^{1,2,3}, TANG Yi^{1,2,3}, TANG Ying^{1,2,3}

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Engineering Research Center of Geotechnical Disaster and Ecological Control, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 3. Guangxi University Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation and Prestress Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China))

Abstract: As the filling material in reclamation engineering, it is particularly important to study the dynamic characteristics of sea sand under cyclic loading. In order to reveal the dynamic characteristics of the Beibu Gulf sea sand, the GDS dynamic triaxial test system was used to carry out the saturated undrained cyclic loading triaxial test of the Beibu Gulf sea sand under different cyclic stress ratios and effective confining pressures. The relationship between the dynamic strength and the failure vibration number of the sea sand was explored, and the development law of the axial cumulative strain, resilience modulus and dynamic pore pressure was analyzed. The results show that there is a good linear relationship between the dynamic strength and the failure vibration times, and the dynamic strength decreases with the increase of the cyclic vibration times. The axial accumulative strain of sea sand presents the development mode of “stable development–instable failure–incremental failure”, and the fitting curve of axial accumulative strain and vibration number can be described by power function. The change curve of resilient modulus with the axial cumulative strain presents the development trend of “sudden drop–slow decrease–basic stability”. Under the same vibration level, the resilient modulus increases with the increase of the cyclic stress ratio and the effective confining pressure. When the high cyclic stress ratio is 2.0, the relationship curve of resilient modulus with strain mainly presents the development law of “sudden increase–gradually decrease–stability”. The development modes of pore pressure are “sudden increase–stable–linear growth” and “sudden increase–stepwise growth”, and the two modes are converted to each other. The research results can provide some reference for the uneven settlement and seismic liquefaction of reclamation foundation in Beibu Gulf area.

Keywords: Beibu Gulf sea sand; dynamic triaxial test; cyclic stress ratio; effective confining pressure; dynamic characteristic