

循环荷载下铁精矿动力特性试验研究

周 健^{1, 2}, 简琦薇^{1, 2*}, 张 姣³, 李 宁⁴

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海城市管理职业技术学院, 上海 200432; 4. 上海出入境检验检疫局, 上海 2000135)

摘 要: 利用空心圆柱扭剪仪(HCA)施加竖向—环向耦合循环荷载模拟波浪荷载的作用, 对船载散装铁精矿进行了动力特性试验。通过对动应变、动强度和孔隙水压力变化曲线进行分析, 探讨了含水率、动应力和振动周数等因素对铁精矿动力特性的影响。试验表明: 含水率是影响铁精矿动力特性的关键因素。铁精矿存在临界含水率, 如果超过这一临界含水率, 铁精矿即使在较小的动应力、足够长的振动周数下, 也会缓慢发展达到破坏状态。而高含水率的铁精矿试样即使在较小的动应力作用下也会迅速发生破坏。对比常规动三轴试验, 可以发现竖向—扭向循环耦合剪切试验得出的铁精矿动强度随含水率的增加而迅速降低。研究可为实际船载铁精矿提供安全的含水率范围。

关键词: 循环荷载; 铁精矿; 空心圆柱扭剪仪; 广义剪应变, 动强度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)12-2346-07

作者简介: 周 健(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土体细观力学和离散元数值分析等方面的研究工作。E-mail: tjugezhoujian@tongji.edu.cn。

Dynamic behaviors of iron ore concentrate under cyclic loading by hollow cylinder apparatus

ZHOU Jian^{1, 2}, JIAN Qi-wei^{1, 2}, ZHANG Jiao³, LI Ning⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, Shanghai Technical College of Urban Management, Shanghai 200432, China; 4. Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Shanghai 200135, China)

Abstract: Groups of triaxial and torsional coupling cyclic shear tests on onboard iron ore concentrate are carried out by hollow cylinder apparatus to study the deformation and mechanical properties of iron ore concentrate subjected to cyclic loading. By analyzing curves of strain, dynamic strength and pore pressure, the influence factors on fluidization of the iron ore concentrate are explored. The experimental results show that the moisture content is the key factor for the dynamic behaviors of the iron ore concentrate. There is an critical moisture. When it is above the critical moisture content, the sample will be slowly destroyed under a small dynamic stress and long enough vibration times. The sample with high moisture content will be destroyed rapidly even under a small dynamic stress. Compared with that of the dynamic triaxial tests, the dynamic strength by hollow cylinder apparatus decreases rapidly with the increase of the moisture content. It has certain practical significance that the experiments provide safe moisture content range for the onboard iron ore concentrate.

Key words: cyclic loading; iron ore concentrate; HCA; generalized shear strain; dynamic strength

0 引 言

精粉矿货物的主要运输方式是散装海洋运输, 其在储存和运输过程中往往需要采用人为喷水来控制它的中心层温度或者克服粉尘飞扬等问题。精粉矿自身含水率加上人为喷水等因素往往导致其海运时发生流态化风险增高。近年来, 在中国管辖水域发生了多起载运精粉矿船舶沉船事故, 造成海上人命、财产重大损失。

国内外相关研究大多是集中在载运精粉矿发生事故的原因、危害及安全措施等方面^[1-2], 而工程力学应用于精粉矿海运过程的研究很少。国内有文献研究了不同含水率的精矿在震动荷载作用下发生流态化的机理, 但只是针对矿物属性如粒度分布、相对密度、颗

基金项目: 国家公益性基金项目(201310065)

收稿日期: 2013-05-15

*通讯作者

粒尺寸、剪切强度与 TML 进行关联研究^[3]; 对于铁精矿的动力特性研究很少, 王伟等^[4]通过室内动三轴试验探讨了含水率对铁矿粉的动力特性影响。然而, 动三轴试验只能施加竖向循环荷载, 而精矿粉在船运过程中还要受到由船舶水平横摇产生的剪切力的作用^[5]。

空心圆柱扭剪仪 (hollow cylinder apparatus, 简称 HCA) 是目前可以实现多种复杂应力路径包括竖向一扭向循环耦合剪切试验的最先进的土工试验设备^[6-7]。本文利用同济大学 GDS 空心圆柱扭剪仪 (TJ-1) 对船载散装铁精矿进行了圆形循环耦合剪切试验, 通过分析波浪荷载作用下铁精矿的动力特性, 探讨了影响铁精矿流态化失稳的关键因素。

1 试验用料和试验方法

1.1 试样制备及试验方案

同济大学 GDS 空心圆柱扭剪仪可制备试样的最大尺寸为 60 mm (内径) × 100 mm (外径) × 200 mm (高), 试样厚度为 20 mm。试验所用铁精矿为加拿大铁精矿, 由上海出入境检验检疫局提供, 取自上海罗泾码头自由堆场。试样颗粒级配曲线见图 1。试样物理指标渗透系数 $k = 5.03 \times 10^{-3}$ cm/s, 颗粒比重 $G_s = 4.95$, 干密度 $\rho_s = 2.72$ g/cm³, 最小孔隙比 $e_{\min} = 0.59$, 最大孔隙比 $e_{\max} = 0.93$, 平均粒径 $D_{50} = 0.19$ mm, 相对密度 $D_r = 33\%$ 。试验中铁精矿的含水率分别取 8%, 9%, 10%, 11%, 12% (国际海运中的含水率通常指水的质量与总矿质量之比)。

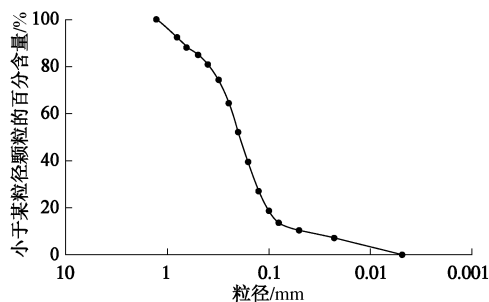


图 1 铁精矿级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution curve of sample

本试验制样采用分层湿捣法。试验前配置不同含水率的铁精矿, 分别放入有标记的密封塑料袋中, 静置 24 h 使袋内的铁精矿含水率充分均匀。制样时, 通过物理换算, 称取相同干矿质量的铁精矿, 分 10 层装入空心圆柱试样模具中。利用每次称取的相同干矿质量铁精矿和相同装样高度, 控制每层试样的相对密度基本保持在同一水平, 各层接触面刮毛以保证上下接触良好。通过多次试验测试, 保持铁精矿试样相对密

实度在 33% 左右。

1.2 试验方法

HCA 工作的基本原理是通过在压力室内安设空心圆柱状试样, 对其施加轴力 W 、扭矩 M_T 、内围压 P_i 及外围压 P_o , 试样单元体的应力状态如图 2 所示^[6]。相关应力、应变公式推导详见文献^[8], 在此仅列出加载参数与应力参数之间的定量关系:

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + \frac{(P_o r_o^2 - P_i r_i^2)}{(r_o^2 - r_i^2)}, \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{(P_o r_o + P_i r_i)}{(r_o + r_i)}, \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(P_o r_o - P_i r_i)}{(r_o - r_i)}, \quad (3)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)}. \quad (4)$$

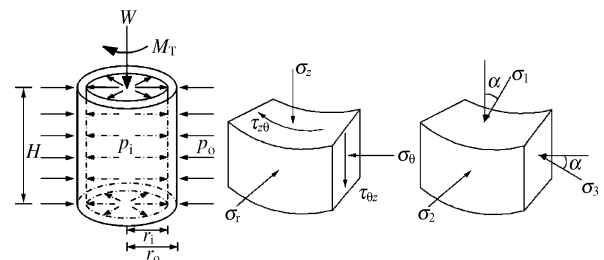


图 2 空心圆柱试样单元体应力状态

Fig. 2 Stress on an element of hollow cylinder sample

本文采用 HCA 对进行了竖向 - 扭向循环耦合剪切试验。为了对比不同含水率的铁精矿的变形和力学特性, 反映铁精矿在循环耦合荷载下的动强度, 必须采用统一的破坏标准。铁精矿作为一种特殊材料, 其粒径大小属粉土范畴, 本文考虑铁精矿作为特殊土材料在竖向 - 扭向循环耦合作用下的破坏情况, 因此采用广义剪应变 γ_g 作为判别铁精矿变形破坏的判断标准^[9], 试验认为铁精矿广义剪应变达到 5% 时, 试样发生破坏。广义剪应变定义如下:

$$\gamma_g = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (5)$$

式中, σ_1 , σ_2 , σ_3 和 ε_1 , ε_2 , ε_3 分别为大、中、小主应力和大、中、小主应变。

1.3 竖向 - 扭向耦合循环荷载的实现

根据上海船舶运输科学研究所提供的资料表明, 铁精矿在船运过程中不仅随着波浪作用上下颠簸, 还要受到由船舶水平横摇产生的剪切力作用。本试验拟采用应力控制, 按正弦波形式施加加载轴力和扭矩, 控制循环扭矩 M_T 比循环轴力 W 的相位滞后 90° , 试验过程中保持扭剪应力 $\tau_{z\theta}$ 与 $(\sigma_z - \sigma_\theta)/2$ 相等。试验均采用空心圆柱试样, 保持内围压 P_i 、外围压 P_o 不变

且相等, 维持 $P = 100 \text{ kPa}$ 。由于波浪谱的频率取值范围一般在 $0.1 \sim 1 \text{ Hz}$ 之间, 且该范围内频率对散装精粉矿货物发生流态化的影响不大, 本次试验考虑最不利的情况, 取振动频率为 1 Hz 。

由式(2)、(3)可得, 内、外围压相等时, $\sigma_r = \sigma_\theta$, 此时, 将式(1)、(2)和(4)化简可得

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} + P, \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r = P, \quad (7)$$

$$\tau_{z\theta} = \frac{3M_T}{2\pi(r_o^3 - r_i^3)}, \quad (8)$$

$$W = 2\pi(r_o^2 - r_i^2) * \cos\omega t, \quad (9)$$

$$M_T = \frac{2}{3}\pi(r_o^3 - r_i^3) * \sin\omega t, \quad (10)$$

$$\tau_f = \sqrt{\left(\frac{\sigma_d}{2}\right)^2 + (\tau_d)^2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_z - \sigma_\theta}{2}\right)^2 + (\tau_{z\theta})^2}. \quad (11)$$

式中 P 为内外围压, 等于 100 kPa ; ω 为角频率, $\omega = T/2\pi$, $T = 1 \text{ Hz}$; t 为循环加载的时间; τ_f 为动应力值。由式(11)确定的动应力幅值在几何上相当于加载应力路径对应的圆的半径^[10]。图3为铁精矿含水率8%, 动强度为 30 kPa 时在模拟波浪荷载下的应力路径。

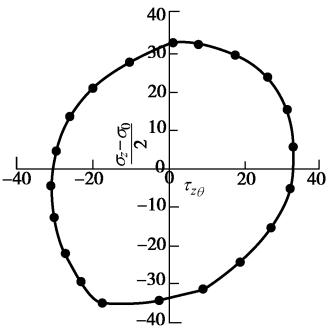


图3 铁精矿在波浪荷载下的应力路径

Fig. 3 Stress path of iron ore concentrate under wave loading

根据动三轴试验结果, 含水率为6%, 8%, 10%, 12%的铁精矿发生破坏的临界动强度值为32.5, 22.5, 20, 17.5 kPa^[5]。而本试验中不仅施加了竖向循环荷载, 还同时施加了扭向循环荷载提供剪切力, 故在试验设计中考虑 τ_f 动应力值分别取15, 20, 25, 30 kPa。试验方案见表1所示。

表1 铁精矿试验方案

Table 1 Test schemes of concentrate iron powders

含水率/%	8	9	10	11	12
τ_f	15	15	15	15	15
/kPa	20	20	20	20	20
	25	25	25	25	25
	30	30	30	30	30

注: 本试验铁精矿试样的相对密度均为33%, 频率为1 Hz。

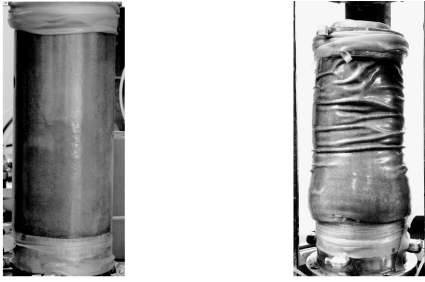
铁精矿的三轴动强度用轴向循环荷载所产生的轴

向动应力幅值之半与达到某种破坏标准时对应的振次之间的关系表示, 动应力: $\tau_d = 1/2 \sigma_{\max}$, 其中 σ_{\max} 为应变达到5%时对应的轴向动应力幅值。

2 试验结果及讨论

2.1 试样破坏形态

铁精矿空心圆柱试验过程中, 试样受轴力、扭矩的循环作用, 基本上呈鼓状破坏, 并出现一定的径向变形; 试验结束后, 试样完全瘫软, 强度基本消失(见图4)。



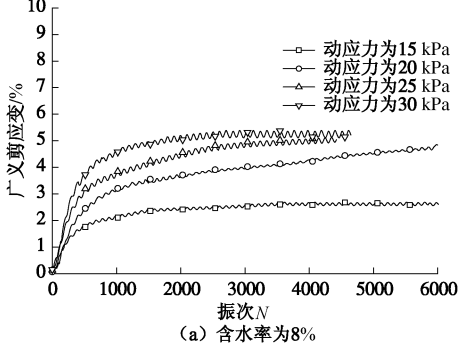
(a) 破坏前试样 (b) 破坏后试样

图4 试样破坏形态——鼓状破坏

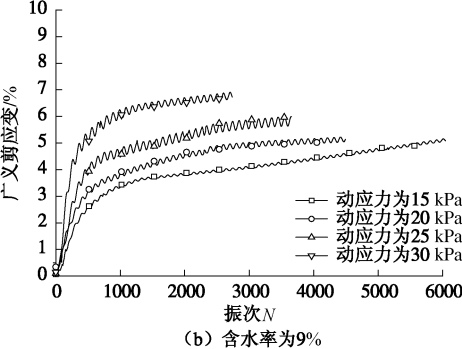
Fig. 4 Failure of test sample

2.2 动变形特性分析

本文采用广义剪应变 γ_g 作为判别铁精矿变形破坏的判断标准(文中简称广义剪应变为动应变), 精矿变形破坏的判断标准, 试验认为铁精矿广义剪应变达到5%时, 试样发生破坏。不同含水率的铁精矿试样在不同动应力下的变形特性, 动应变随着振动周数($\gamma_g - N$)的变化曲线如图5所示。



(a) 含水率为8%



(b) 含水率为9%

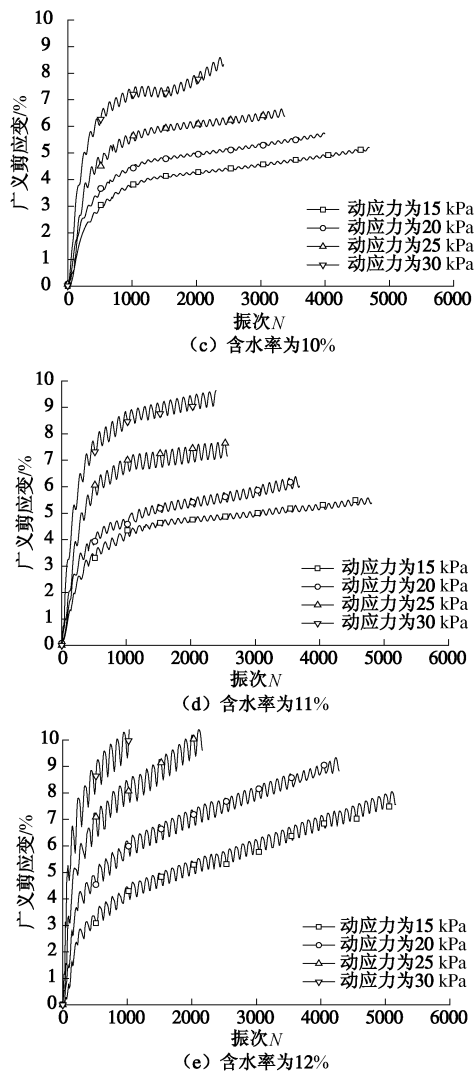
图 5 同一含水率试件在不同动应力下 $\gamma_g - N$ 曲线

Fig. 5 $\gamma_g - N$ curves with same moisture content under different dynamic stresses

由图 5 可见, 铁精矿的动应变随振动周数的增长而累积增长; 试样动应变的累积主要发生在最初的振动中, 且随着动应力的增加, 试样破坏所需的振动周数减少; 相同含水率试样在不同动应力下的动应变曲线拐点大致出现在 1000 振次以内, 含水率低的试样 (含水率 8%) 在动应变曲线出现拐点后基本不发生二次增长。

图 6 为同一动应力下不同含水率的动应变曲线。振动初始阶段, 相同应力条件下, 动应变曲线发展迅速, 且含水率越高, 动应变增长速率越快; 约至 1000 振次左右, 动应变曲线均出现拐点。

含水率为 8% 的铁精矿在动应力为 15 kPa 时, 动应变曲线增长速率趋于平缓, 不会达到破坏状态, 动应力为 20, 25, 30 kPa 时, 试样的破坏振次分别约为 7000, 3000, 1500; 而含水率为 9%, 10%, 11%, 12% 的铁精矿, 即使在动应力为 15 kPa、足够长的振动周数的情况下, 依然会达到破坏状态。另外, 在低含水

率、低动应力的情况下 (含水率为 9%, 动应力为 15 kPa), 动应变发展相对缓慢, 振次约为 6000 次时, 试样的动应变达到 5%, 认为试样发生破坏; 在高含水率、高动应力的情况下 (含水率为 12%, 动应力为 30 kPa), 动应变在最初的振动中急剧发展, 约 70 振次时, 试样即发生破坏。

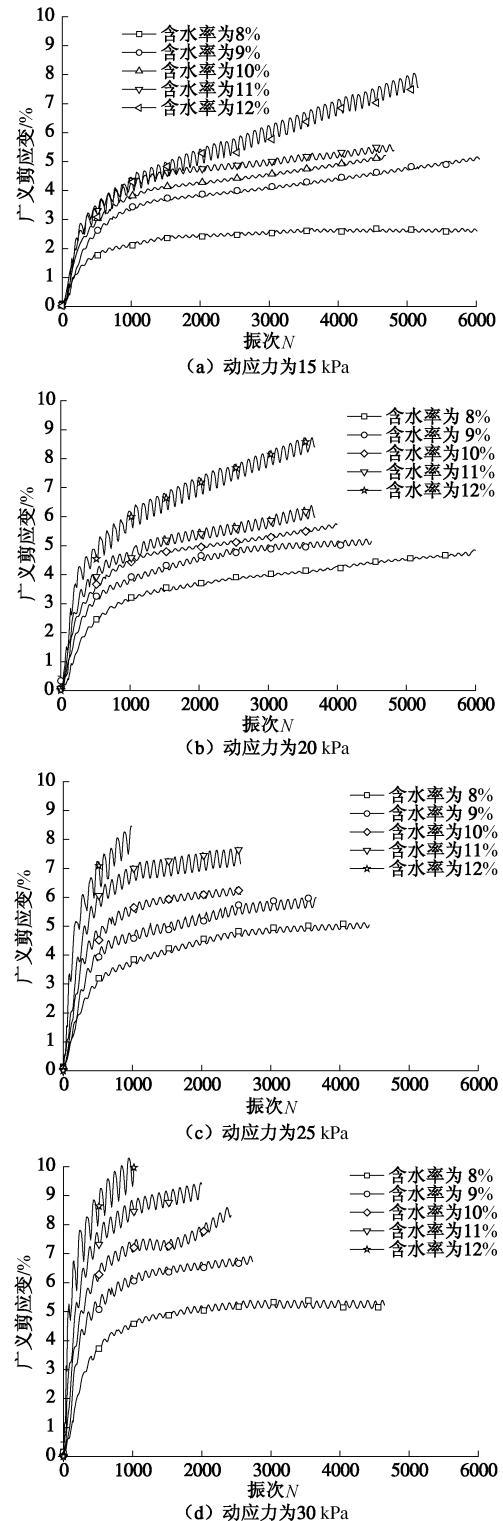
图 6 同一动应力下不同含水率的 $\gamma_g - N$ 曲线

Fig. 6 $\gamma_g - N$ curves with same dynamic stress under different moisture contents

含水率、动应力和振动周期对铁精矿的动变形特性均有影响，其中含水率是关键影响因素。含水率临界值在 8% 以下，超过临界值，铁精矿即使在较小动应力下，振动周数长的情况下动应变也会缓慢发展达到破坏状态。建议实际航运中，考虑气象等不可测因素，可控制铁精矿的含水率在 8% 以下。

2.3 孔隙水压力时程曲线

采用孔隙水力来反映循环加载中铁精矿孔压的基本响应情况，采集不同含水率下孔压 - 振次 ($P_d - N$) 曲线如图 7 所示。

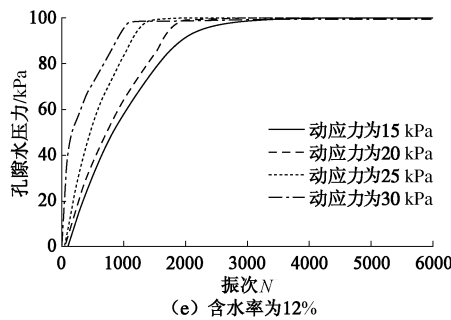
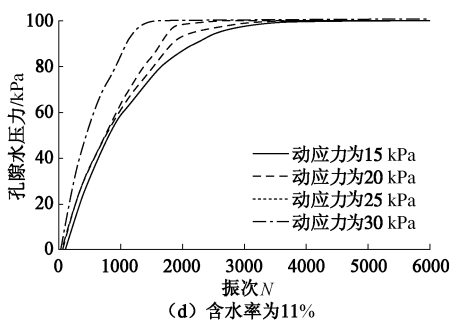
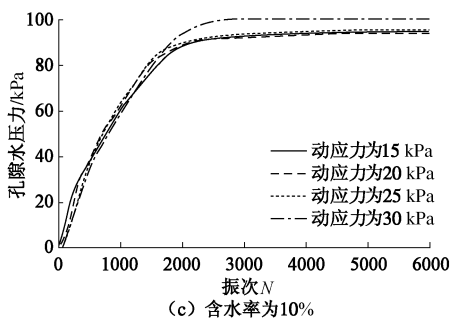
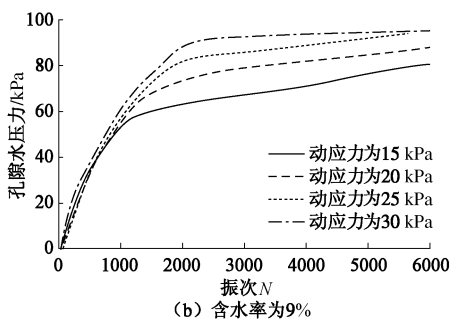
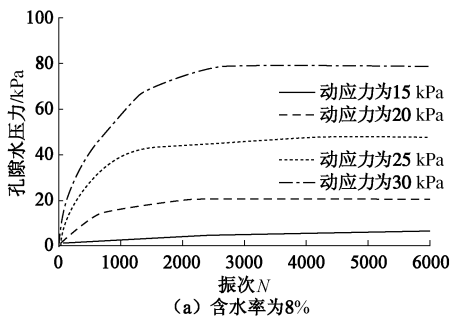
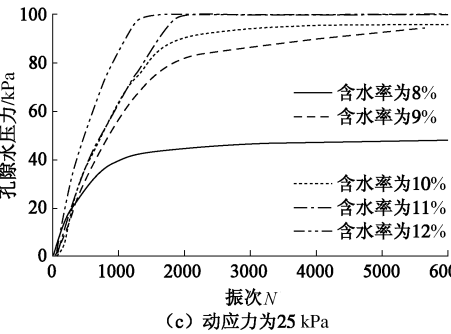
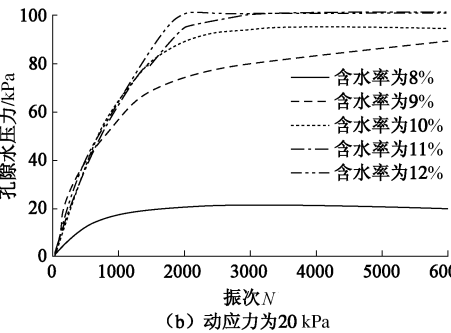
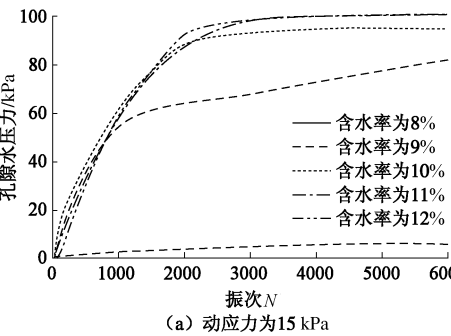
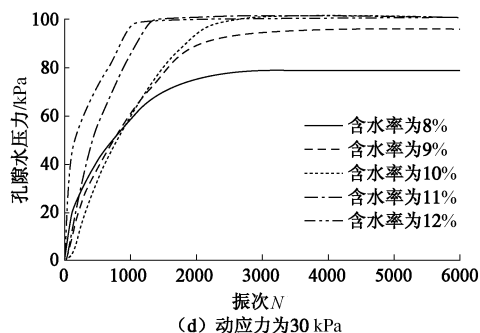


图 7 试件在同一含水率下不同动应力 $P_d - N$ 曲线图
Fig. 7 $P_d - N$ curves with same moisture content under different dynamic stresses

从图 7 可以看出：铁精矿试样的孔压曲线与动应变曲线规律类似，孔压随振动周数的增加而增加，且振动前期孔压增长较快。图 8 是同一动应力幅值时不同含水率下孔压随振次的变化曲线。在同一动应力的条件下，铁精矿试样在循环振动中孔压随着含水率的增加而增加。

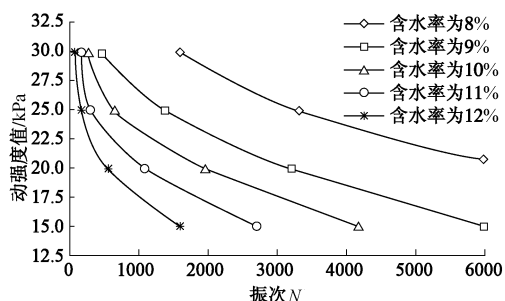


图 8 同一动应力下不同含水率的 $P_d - N$ 曲线Fig. 8 $P_d - N$ curves with same dynamic stress under different moisture contents

在振动初始阶段, 颗粒骨架迅速压缩, 试样内的孔隙水压力急剧升高。另一方面, 因为铁精矿级配好, 不均匀系数大且存在少量细小颗粒, 使铁精矿具有一定的结构强度, 阻碍和限制了孔隙水压力的增长, 致使达到一定振次后孔压增长较缓慢, 直至趋于稳定, 铁精矿的孔隙水压力曲线基本规律与一般无黏性砂土孔压发展规律大致相同。此外, 动孔压的发展速率也是随着动应力的增大而提高的。在含水率较低时 (含水率为 8%, 9%), 铁精矿的孔隙水压力发展缓慢, 且稳定后尚不能完全达到围压值; 当含水率较高 (10%, 11%, 12%), 孔压响应剧烈, 幅值也较大, 且随着动应力的增加, 孔压达到围压的振次缩短。

值得注意的是: 由于铁精矿试样未完全饱和, 文中所述的“孔压”并不能完全体现真实的孔压, 尤其在含水率较低时。但从试验结果可看出, 孔压的发展规律虽存在一定的滞后性, 仍与动应变曲线规律较为一致。

图 9 为铁精矿的动强度曲线。从图 9 中可以看出, 相同振次条件下的动强度随含水率的递增而减小。高含水率的试样即使在较小的动应力作用下也会迅速发生破坏。

图 9 不同含水率下铁精矿 $\tau_d - N$ 曲线Fig. 9 $\tau_d - N$ curves under different moisture contents

2.4 铁精矿的动强度特性

对于常规动三轴试验, 土的动强度可用轴向循环荷载所产生的轴向动应力幅值之半与达到某种破坏标

准时对应的振次之间的关系表示。而对于竖向 - 扭剪循环耦合的空心圆柱试验, 应同时考虑偏差正应力与剪应力的共同作用, 因此采用式 (11) 所给出的最大剪应力幅值作为动强度。本文考虑广义剪应变达到 5% 作为破坏标准, 文中简称动应变。

铁精矿含水率为 8% 时, 动强度曲线趋势平缓, 在较大动应力情况下, 当振动次数足够大时才会达到破坏状态; 当含水率为 9% 时, 虽然随着动应力的增加, 破坏振次递减缓慢, 曲线较为平缓, 但动强度相比于含水率为 8% 时明显折减; 而含水率为 10%, 11% 和 12% 时, 三者的动强度曲线规律相似, 试样破坏迅速。当含水率达到 12%, 动应力为 30 kPa 时, 试样在振次约至 70 时便发生了破坏。

图 10 为相同密实度相同含水率时铁精矿在不同加载条件下的动强度曲线。可看出, 对比动三轴试验的铁精矿动强度曲线^[4], 竖向 - 扭向循环耦合剪切试验得出的铁精矿动强度随含水率的增加而折减迅速。当含水率为 8% 时, 由空心圆柱试验得出的铁精矿动强度明显高于动三轴试验的; 当含水率 10% 时, 在空心圆柱试验条件下得出的铁精矿动强度略小于动三轴试验的; 当含水率为 12% 时, 相同振次条件下空心试样达到破坏时所需的动应力值明显低于动三轴试样。综合分析, 含水率的增加将明显降低铁精矿动强度值。然而, 在实际海运中, 考虑到不可测的气象等诸多不确定因素的影响, 铁精矿的含水率限值建议需控制在 8% 范围以内。

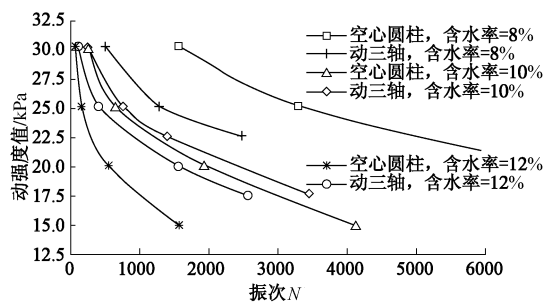


图 10 不同加载条件下铁精矿动强度曲线

Fig. 10 Dynamic strength curves under different loadings

3 结 论

本文利用同济大学空心圆柱扭剪仪 (HCA), 研究了模拟波浪荷载作用下船载散装铁精矿的动力特性, 主要分析了含水率、动应力和振动周数对铁精矿动力特性的重要影响, 探讨了影响铁精矿动力特性的关键因素, 为铁精矿的安全含水率范围提供了一定依据, 试验得出的以下 3 点结论。

(1) 含水率是影响铁精矿动力特性的关键因素。

铁精矿存在临界含水率, 如果超过这一临界含水率, 铁精矿即使在较小的动应力下, 只要振动周数足够, 也会缓慢发展达到破坏状态。建议在实际海运工程中, 控制铁精矿装样含水率在 8% 以内。

(2) 铁精矿的动强度与含水率有关, 相同振次条件下铁精矿的动强度随含水率的递增而减小。高含水率的试样即使在较小的动应力作用下也会迅速发生破坏。

(3) 铁精矿振动孔隙水压力上升规律也受铁精矿临界含水率影响。当铁精矿含水率超过临界值, 振动孔隙水压力会发生突变。

(4) 相对于动三轴试验的铁精矿动强度, 由竖向-扭向循环耦合剪切试验得出的铁精矿动强度随含水率的增加而迅速折减。

参考文献:

- [1] 黄 志. 船舶载运精矿粉的安全措施探讨[J]. 航海技术, 2012(3): 24 - 26. (HUANG Zhi. Safety measures of vessels carrying ore concentrate [J]. Marine Technology, 2012(3): 24 - 26. (in Chinese))
- [2] 孝建伟. 精矿粉安全装运研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011. (XIAO Jian-wei. Study on safety loading and transportation of concentrate[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [3] GALLAGHER B, STOGSDILL S, STEPHENSON R W. Influence of ore physical properties on the transportable moisture limit for barged materials[EB/OL]. <http://utc.mst.edu/research/r156.html>.
- [4] 王 伟. 矿粉动力特性试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2012. (WANG Wei. The dynamic characteristic of ore[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese))
- [5] 陈本良, 孙 炜, 黄正详. 精选铁矿粉的载运与航行[J]. 中国水运, 2011(1): 50 - 51. (CHEN Ben-liang, SUN Wei, HUANG Zheng-xiang. Carrying and sailing of iron ore concentrate[J]. China Water Transport, 2011(1): 50 - 51. (in Chinese))
- [6] YANG Z, LI X, YANG J. Undrained anisotropy and rotational shear in granular soil[J]. Géotechnique, 2007, **57**(4): 371 - 384.
- [7] 沈 扬, 周 建, 龚晓南. 空心圆柱仪(HCA)模拟恒定围压下主应力轴循环旋转应力路径能力分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 281 - 287. (SHEN Yang, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Analysis on ability of HCA to imitate cyclic principal stress rotation under constant confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 281 - 287. (in Chinese))
- [8] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J P R. The development of new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. Géotechnique, 1983, **33**(4): 355 - 383.
- [9] TONG Z, YU Y, ZHANG J, et al. Deformation behavior of sands subjected to cyclic rotation of principal stress axes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(8): 1196 - 1202.
- [10] 栾茂田, 聂 影, 杨 庆, 等. 不同应力路径下饱和黏土耦合循环剪切特性[J]. 岩土力学, 2009, **30**(7): 1927 - 1932. (LUAN Mao-tian, NIE Ying, YANG Qing, et al. Study of coupling cyclic test of saturated clay under different stress path[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(7): 1927 - 1932. (in Chinese))