

基于模型试验的散装铁精矿流态化细观规律

简琦薇^{1,2}, 李 宁³, 周 健¹, 李 晨³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海工程技术大学 机械工程学院, 上海 201620;
3. 上海出入境检验检疫局, 上海 200135)

摘要: 利用室内振动台模型试验, 对散装铁精矿流态化细观规律进行了研究。基于细观图像采集分析系统, 研究了铁精矿在流态化演化过程中颗粒间及颗粒与水分间的相互作用, 分析了颗粒长轴方向、平均接触数、平面孔隙率等演化规律, 探讨了铁精矿流态化细观规律及其与宏观现象间的联系。结果表明: 水分迁移在铁精矿流态化演化过程中至关重要, 其宏观表现是水液面上升; 细观组构是控制铁精矿宏观力学行为的重要参数, 其所反映的规律与宏观现象一致。

关键词: 铁精矿; 流态化; 细观组构; 配位数; 模型试验
中图分类号: TU411 **文献标志码:** A

Mesoscopic Mechanism of Fluidization for Bulk Iron Ore Concentrates Based on Model Test

JIAN Qiwei^{1,2}, LI Ning³, ZHOU Jian¹, LI Chen³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 3. Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Shanghai 200135, China)

Abstract: A shaking table model test was carried out to study the mesoscopic mechanism of fluidization for iron ore concentrates in bulk under dynamic loading. By means of micro visualization system, meso evolutions of granular fabric were investigated including orientation of particle long axis, average coordination numbers and porosity. And the interaction between particles and water during the fluidization was analyzed. Then, the connection between meso mechanism and macro phenomenon was discussed. The results show that the water transfer, namely, the rising of water level, is important in the fluidization of iron ore concentrates. The mesoscopic fabric of iron ore concentrates, which is consistent with macro phenomenon, is an important parameter for the control of macroscopic mechanical behavior

of iron ore concentrates.

Key words: iron ore concentrates; fluidization; meso-fabric; coordination number; model test

近年来, 在我国管辖水域发生了多起载运铁精矿船舶倾覆事故, 造成海上生命、财产重大损失^[1]。铁精矿在海运中受风浪振动作用时易发生水分析出至矿体表面, 形成自由液面的现象, 即流态化^[2]。

目前, 国内外关于铁精矿流态化特性的试验研究较少, 大多数研究集中在铁精矿货物流动水分点(FMP)的测定^[3]和载运铁精矿散货发生事故的原因、危害及安全措施等经验控制两个方面^[4-5]。周健等^[6-7]利用空心圆柱扭剪试验, 探讨了铁精矿的动力特性, 并通过室内振动台试验研究了铁精矿流态化析出水的演化历程, 从宏观角度探讨不同因素对铁精矿流态化特性的影响, 并发现含水率是影响铁精矿流态化的关键因素。众所周知, 对于由散粒状介质组成的颗粒集合体, 外荷载作用下其微观结构的变化是引发其宏观力学性状的真正内因^[8]。

本文利用室内振动台, 研究了铁精矿在动荷载作用下的流态化细观机理。通过分析铁精矿流态形成过程中颗粒间及颗粒与水分间的相互作用, 分析颗粒长轴方向、平均配位数、平面孔隙率等细观组构的演化规律, 探讨了铁精矿流态化演化过程中细观机理及其与宏观现象间的联系。

1 试验设备与过程

1.1 试验设备

船舶在海浪作用下的运动具有随机性^[9], 若假

收稿日期: 2014-06-18

基金项目: 国家公益性基金(201310065)

第一作者: 简琦薇(1987—), 女, 博士生, 主要研究方向为土动力学宏观细观分析。E-mail: 09jqw@tongji.edu.cn

通讯作者: 周 健(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土体细观力学和离散元数值分析等。

E-mail: tjugezhoujian@tongji.edu.cn

定海浪是规则和稳定的,那么船舶在波浪作用下的运动可认为由简谐运动组成,这将给分析研究带来方便,且研究结果同样具有参考价值^[10]. 本文利用自主研发的室内小型振动台^[11],对其施加水平简谐循环荷载,来模拟载运过程中船舶受到海浪作用的水平横摇.

水平振动台采用曲柄滑块装置实现振动台模型箱的水平往复简谐振动,通过改变曲柄半径大小来变换振动台振幅,从而调节模型箱基底振动加速度. 实际船运中,货船船舱为刚性舱壁,故采用刚性模型箱能较好地模拟实际散货船载运时铁精矿的边界条件^[12]. 试验中铁精矿模型尺寸:长度为 66 cm,宽度为 32 cm,高度为 40 cm,模型示意图如图 1 所示.

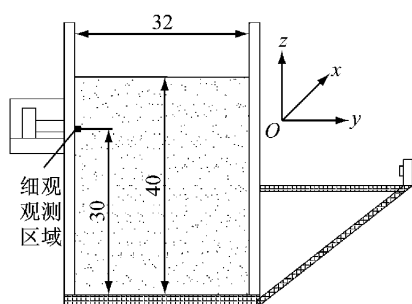


图 1 铁精矿模型示意图(单位:cm)

Fig.1 Model sketch of iron ore concentrates (unit: cm)

数据采集装置由数字图像数据采集、细观图像采集等部分组成,包括高精度数码成像设备、高放大倍数数码摄录设备. 数据采集装置均固定在振动台轨道上,与模型箱同步运动. 细观图片与数据采集采用日本 JAI 公司 CM-030GE-RA 高速细观摄像机,对距离模型箱底部 30 cm(z 方向)、距离模型箱侧壁 33 cm(x 方向)的铁精矿局部区域进行拍摄,拍摄范围为 8 mm×6 mm,拍摄频率为 90 帧·s⁻¹.

1.2 试验材料

试验所用铁精矿产自加拿大,由上海出入境检验检疫局提供. 试样颗粒级配曲线见图 2. 颗粒级配为:颗粒直径>0.50 mm 的占 7.2%,>0.25~0.50 mm 的占 32.6%,>0.10~0.25 mm 的占 48.4%. 铁精矿颗粒大小属于细砂范畴,本文利用岩土力学试验方法,将其作为一种特殊材料,研究铁精矿在水平循环荷载下的流态化机理. 试样基本物理指标如下:渗透系数 $k = 5.03 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,颗粒相对密度 $d_s = 4.95$,干密度 $\rho_s = 2.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,休止角 34.5°,平均粒径 $D_{50} = 0.22 \text{ mm}$,其余物理参数见表 1.

1.3 模型试验过程

波浪谱的特征频率一般为 0.1~1.0 Hz,上海出

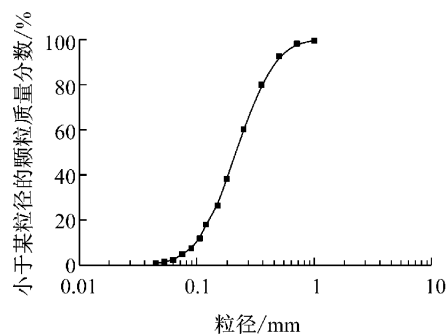


图 2 铁精矿级配曲线

Fig.2 Grain size distribution curve of the samples

表 1 铁精矿试样的物理参数

Tab.1 Physical parameters of the samples

C_u	C_c	$\varphi/(\circ)$	$\rho_{\max}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho_{\min}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	D_r	e_{\max}	e_{\min}
2.44	1.13	34.5	3.12	2.56	0.33	0.93	0.59

注: C_u 为不均匀系数, C_c 为曲率系数, φ 为内摩擦角, ρ_{\max} 为最大密度, ρ_{\min} 为最小密度, D_r 为相对密实度, e_{\max} 为最大孔隙率, e_{\min} 为最小孔隙率.

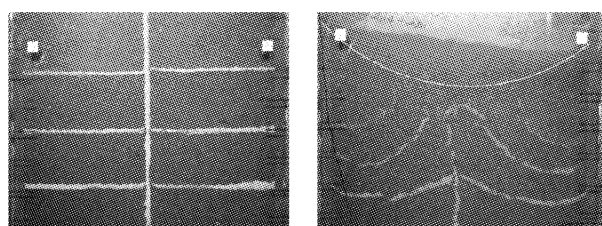
入境检验检疫局利用流盘试验法测铁精矿的适运水分限量(TML)时,流盘振动台的振动频率为 50 次·min⁻¹^[13]. 实测资料表明,5.7 万吨级散货船在五个舱均匀装载时,舱内铁精矿的横向加速度幅值范围为 0.15g~0.42g. 根据周健等^[7]的研究表明,含水率是影响散装铁精矿流态化形成的关键因素,当水分上升至矿体上表面时,表层矿水混合物呈流动状态.

本文主要研究铁精矿流态化形成的细观规律,试验振动频率为 1 Hz,加速度为 0.5g,试样含水率为 10%. 试样的制备采用分层湿捣法,均匀配置铁精矿试样,分八层进行,控制每层试样的相对密实度基本保持在同一数值,各层接触面刮毛以保证上下接触良好. 试样制备完成后铁精矿表面铺设湿毛巾,并静置 1 h 使铁精矿的含水率保持充分均匀. 在所有准备工作完成后,开启高速细观摄像机采集细观图像,施加振动荷载. 试验最大振动周数为 600 次,确保铁精矿模型试验现象已稳定.

2 试验结果与讨论

2.1 铁精矿流态化的宏观现象

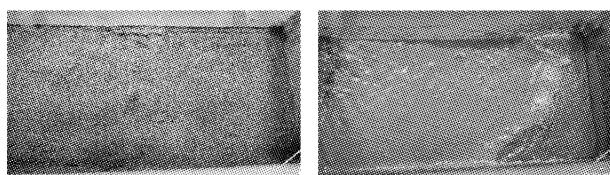
图 3 和 4 是试验在施加循环荷载时,试样流态化前后的现象. 从图中可看出,流态化现象的出现与水分迁移密切相关,其宏观表现为矿粉孔隙减少,表层矿粉滑动,水分迁移和水液面上升以及自由液面形成. 水分迁移始终贯穿整个流态化演化过程.



a 0 振次 b 220 振次

图3 铁精矿流态化现象正视图

Fig.3 Front view of the fluidization of the model



a 0 振次 b 220 振次

图4 铁精矿流态化现象俯视图

Fig.4 Top view of the fluidization of the model

2.2 铁精矿流态化的细观分析

2.2.1 水分迁移的细观规律

由铁精矿流态化的宏观规律分析可知^[7],水分的迁移对铁精矿的流态化发生至关重要.图5所示为利用高速细观摄像机采集的铁精矿流态化演化过程中的细观变化.细观观测位置为距离模型箱底部30 cm、短边侧壁33 cm处,观测范围为6 mm×8 mm.通过对不同振次时铁精矿细观照片的直观分析,研究散装铁精矿流态化演化过程中水分在铁精矿颗粒间迁移运动的细观规律.

试验开始前,不同粒径铁精矿颗粒均匀分布,矿体相对比较松散,粒间孔隙体积较大,水分均匀分布在铁精矿颗粒间孔隙中(见图5a);振动开始后,矿体体积被压缩,孔隙体积减小,孔隙中均匀分布的水分逐渐聚集,形成水膜裹附在铁精矿颗粒表面(见图5b);孔隙体积进一步减小,颗粒表面的包裹水膜厚度增加,水分汇集连接成片,形成连续水体,观测到铁精矿孔隙体积明显减小(见图5c);随着孔隙水分的进一步析出,细观观测区域内的铁精矿水分含量增多,矿体饱和度增大,颗粒间作用力降低,观测区域内的连续水体与铁精矿颗粒共同做水平往复运动(见图5d).

振动至40振次时,细观观测区域内的细颗粒含量明显减少,颗粒间接触紧密,观测区域内水分含量减少,这是因为水分在迁移过程中带动细颗粒一起运动,细颗粒流失后矿体粒径粗化(见图5e);振动至60振次时,孔隙间析出水继续迁移,析出水量逐渐减小,此时由宏观观测到的水液面已上升至细观观测

区域的位置(见图5f);振动至100振次时,析出水量逐渐减小(见图5g);振动至600振次时,铁精矿细颗粒嵌合在粗颗粒孔隙间,颗粒间咬合紧密,矿体孔隙体积很小,颗粒间剩余水分含量很少(见图5h).

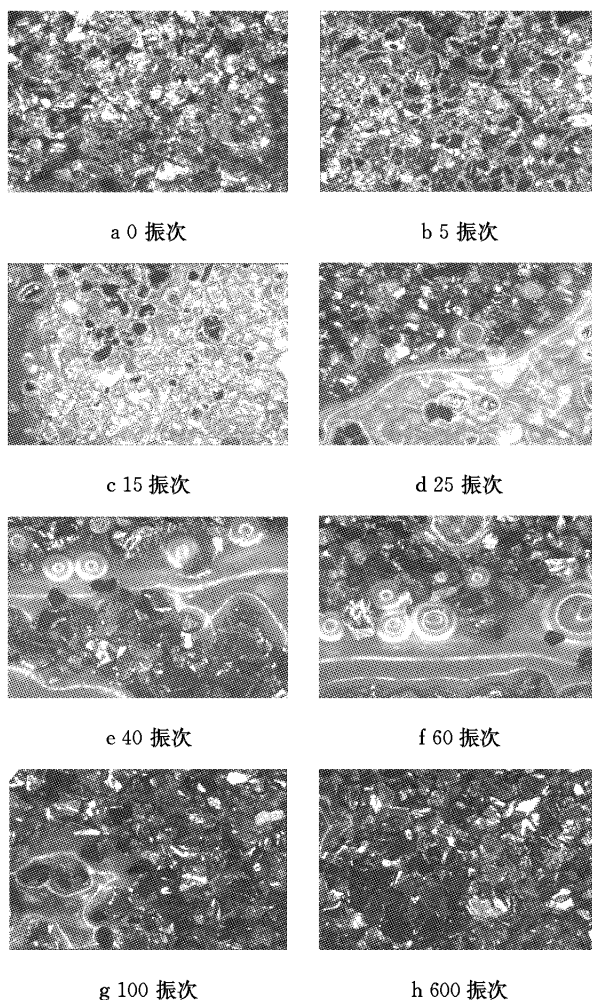


图5 铁精矿流态化水分迁移细观变化过程

Fig.5 Micro process of water migration of the fluidization

在缩尺条件下,散装铁精矿流态化形成的水分迁移细观规律大致相同.在振动过程中,铁精矿体积被压缩;颗粒孔隙间水分被挤出并汇集成片,形成连续水体;水分在重力作用下向下迁移,其宏观表现为形成水液面上升.同时孔隙水迁移带动矿体中细颗粒运动,细颗粒填充了粗颗粒骨架之间的孔隙,进一步促使孔隙体积减小,导致孔隙水分析出.

2.2.2 铁精矿细观组构

研究铁精矿细观组构的目的是通过对颗粒间相互作用的定量描述,在某种假设或力学原理的基础上做出统计平均,建立铁精矿细观组构指标与铁精矿宏观特性响应间的关系.本文通过模型试验对铁精矿流态化形成过程中的宏观现象和组构参量之间

的关系进行了定性探讨,尝试从铁精矿细观组构的演化解释铁精矿流态化现象的细观机制^[14]。

利用课题组自主开发的 Geodip 数字图像处理软件^[15],对试验过程中记录的高清照片进行处理,分析铁精矿在循环荷载作用下颗粒细观组构变化,包括铁精矿颗粒长轴方向,平均接触数和平面孔隙率的变化等。通过对比在流态化形成过程中不同振次

下铁精矿颗粒的细观组构规律,探讨铁精矿发生流态化的内在机理。

(1) 颗粒长轴方向

颗粒定向性的发展是流态化形成过程中铁精矿颗粒重新排列的反映。图6是不同振次时铁精矿颗粒长轴方向演化的玫瑰图,扇形大小反映颗粒长轴方向的角度频数分布。

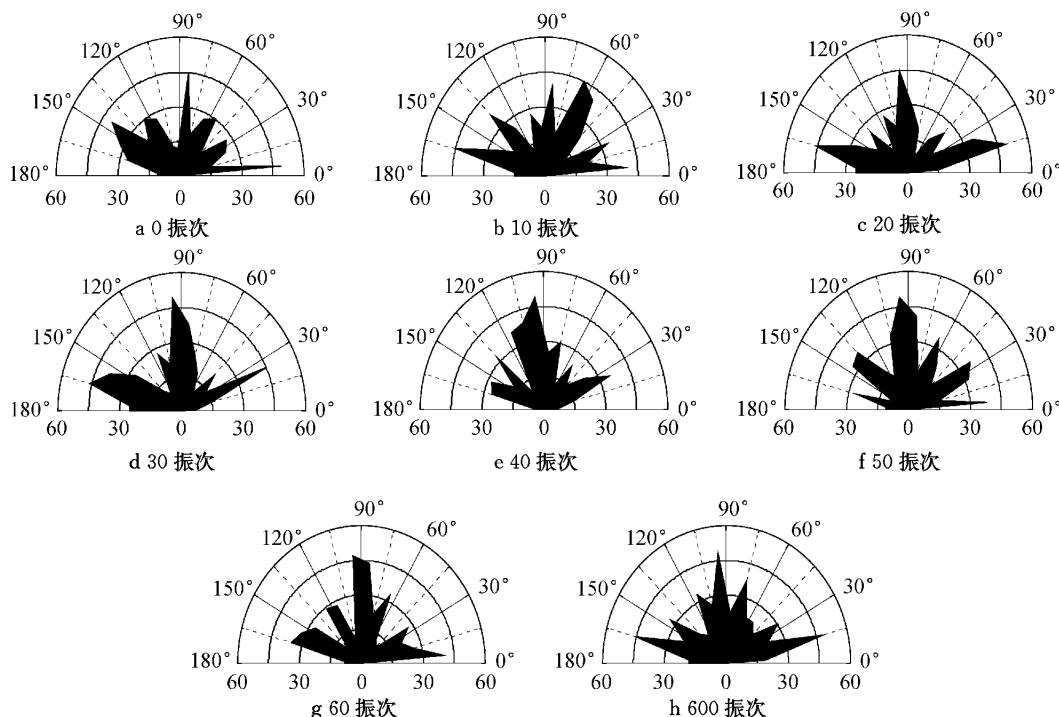


图6 铁精矿颗粒在流态化形成过程中长轴方向演化玫瑰图
Fig.6 Evolutions of the orientation of particle long axis

从长轴方向的演化来看,由于采用分层湿捣法进行制样,因此试样的铁精矿颗粒长轴方向分布相对比较均匀(见图6a)。振动初始,由于不规则形状的铁精矿颗粒受到水平往复振动的作用,颗粒发生错动和旋转,颗粒的长轴方向趋于水平方向发展(见图6b)。铁精矿颗粒孔隙间水分不断汇集形成连续水体,由于同时受到水平往复荷载和水流的作用,铁精矿颗粒长轴主要分布在水平 0° 方向和竖直 90° 方向(见图6c,d)。随着水平荷载的继续施加,孔隙间水分携带部分细颗粒趋于向矿体上层迁移,颗粒长轴明显偏向于竖直方向发展(见图6e)。约至50振次时,铁精矿颗粒间孔隙充分压缩,粒间孔隙中的水分已充分析出,颗粒间残存少量水分,水流作用减弱,原来受水流影响偏向竖向的颗粒长轴稍微向水平方向偏转(见图6f)。至60振次时,细观拍摄处的铁精矿颗粒主要受到水平往复荷载的作用,颗粒的长轴继续向水平方向发展,宏观上的表现为水液面迁移至矿粉表面、流态化基本完成(见图6g);待振动结束时

(见图6h),铁精矿骨架相对稳定,颗粒只是在原位附近轻微错动和旋转,并没有明显的颗粒滚动,长轴方向变化不大。

综上所述,在铁精矿流态化形成演化过程中,由于受到水平往复荷载和水流的综合作用,颗粒长轴方向由初始的均匀分布变化到定向分布,并且偏向于竖直方向和水平方向。颗粒长轴方向的演化过程,反映了在流态化形成过程中铁精矿颗粒的重新排列过程。

(2) 平均接触数

平均接触数是指颗粒与周围颗粒接触的平均数目,用以分析颗粒运动和重新排列规律,其变化是颗粒受力变化的间接反映。图7为铁精矿在流态形成过程中平均接触数随时间变化曲线。

从图7中可看出,振动初期,铁精矿体积轻微压缩,铁精矿颗粒平均接触数略微增多;至10~20振次,颗粒间的运动使得铁精矿平均接触数略有下降,这表明颗粒间孔隙中水形成的水膜包裹了铁精矿颗

粒;至20~40振次,颗粒在水流和振动荷载的作用下,平均接触数目上下波动;至40振次以后,铁精矿颗粒的平均接触数逐渐增大,这说明颗粒间孔隙压缩充分,铁精矿越来越密实。

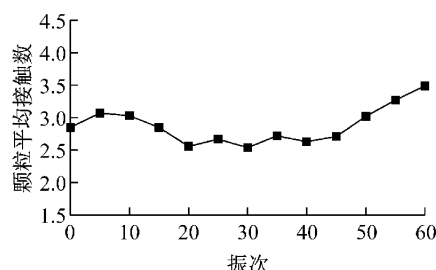


图7 铁精矿平均接触数随时间变化曲线

Fig.7 Variation of average contact number with time

总体而言,铁精矿平均接触数的总体趋势是增大的,其反映的规律与铁精矿孔隙率变化规律基本一致,即流态化演化过程中铁精矿颗粒的运动使得铁精矿总体发生压缩,粒间孔隙中的水分得以挤出并向上迁移,这与宏观流态化现象得到的结论一致。需指出,平均接触数是通过统计颗粒与其周边颗粒的平均接触数来反映土体的紧密程度,其值并不是衡量颗粒间作用力的指标。

(3) 平面孔隙率

图8所示为由不同振次时铁精矿颗粒形态细观图片,利用Geodip程序计算得到的颗粒孔隙率随时间的变化曲线。需要说明的是,这里采用的平均孔隙率为平面孔隙率,而并非铁精矿真实孔隙率。

从图8中可知,水平荷载的施加,使得铁精矿颗粒间孔隙发生压缩,孔隙体积缩小;从振次10开始,平面孔隙率经历有升有降的波动,总的趋势是减小的,这是由于铁精矿颗粒受水平荷载和水流冲力的共同作用,颗粒发生旋转、错动和移动,但颗粒孔隙仍被压缩;至振次60以后,孔隙率基本不发生波动,且远远小于初始值。总体而言,铁精矿流态化形成过程中,孔隙率呈减小趋势,在最初20振次内尤为明显,这与试样总体发生压缩的宏观现象一致。

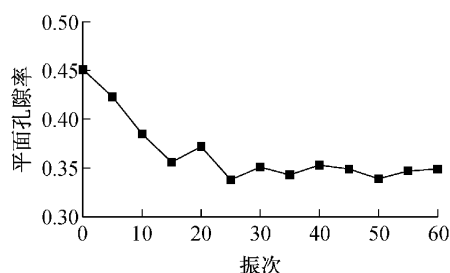


图8 铁精矿平面孔隙率变化曲线

Fig.8 Variation of plane porosity with time

3 结论

(1) 水分迁移是铁精矿流态化形成的关键诱因,在振动过程中,水分首先在重力作用下向下迁移,形成水液面后,在动荷载作用下向矿体表面析出。同时,水分在迁移过程中带动细颗粒随水运动,细颗粒不断填充粗颗粒间孔隙,造成孔隙体积减小,进一步促使水分析出。

(2) 细观组构特征反映了铁精矿颗粒与水分相互作用规律。铁精矿流态化形成过程中,颗粒受水分迁移和水平往复荷载共同作用,颗粒长轴方向由初始的均匀分布变化到定向分布,并且偏向于竖直方向和水平方向。

(3) 细观观测区域的铁精矿平面孔隙率随振动次数的增加而逐渐减小,颗粒平均接触数随之增加。这表明流态化演化过程中铁精矿颗粒的运动使得铁精矿总体发生压缩,则粒间孔隙中的水分得以挤出并在重力作用下向下迁移,形成连续水体,水液面向上迁移,与宏观流态化现象得到的结论一致。

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.
HUANG Zhi. Study on safety measures of vessels carrying ore [J]. Marine Technology, 2012(3): 24.
- [2] 孝建伟. 精矿粉安全装运研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
XIAO Jianwei. Study on safety loading and transportation of concentrate [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011.
- [3] International Maritime Organization. International maritime solid bulk cargoes code[S]. London: International Maritime Organization, 2012.
- [4] 王洪亮, 董庆如. 船舶载运易流态化货物的风险和对策[J]. 中国航海, 2011, 34(2): 101.
WANG Hongliang, DONG Qingru. The risks of the ship carrying cargoes that may liquefy and countermeasures to be taken [J]. China Maritime Safety, 2011, 34(2): 101.
- [5] 王伟博. 船载镍矿的安全运输技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
WANG Yibo. Research on the safe shipment technology of nickel ore [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.
- [6] 周健, 简琦薇, 张娇, 等. 循环荷载下铁精矿动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2346.
ZHOU Jian, JIAN Qiwei, ZHANG Jiao, et al. The dynamic behavior of iron ores concentrate under cyclic loading by hollow cylinder apparatus [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2346.
- [7] 周健, 简琦薇, 吴晓红, 等. 散装铁精矿流态化特性的模型试

- 验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2536.
- ZHOU Jian, JIAN Qiwei, WU Xiaohong, *et al.* Model experimental study of fluidization of iron ore concentrates in bulk [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2536.
- [8] Oda M, Kawamoto K, Suzuki K, *et al.* Micorstructural interpretation on reliquefaction of saturated granular soils under cyclic loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(5): 416.
- [9] Bulian G, Francescutto A, Lugni C. On the nonlinear modeling of parametric rolling in regular and irregular waves [J]. International Shipbuilding Progress, 2004, 51(2): 173.
- [10] 丁振东. 大型浮吊海浪作用下结构静动态性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- DING Zhendong. Study on static and dynamic characteristics of heavy floating crane under the action of sea waves [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.
- [11] 陈小亮. 地下结构物周围砂土层液化宏观机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2010.
- CHEN Xiaoliang. Macro-meso mechanism of liquefaction of saturated sand around underground structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [12] 伍小平. 砂土-桩-结构相互作用振动台试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
- WU Xiaoping. Soil-pile-structure interaction in shaking table tests[D]. Shanghai: Tongji University, 2002.
- [13] 上海出入境检验检疫局. 出口散装氟石粉适运水分限量(TML)检测方法的研究及其内在影响因素的探讨[R]. 上海: 上海出入境检验检疫局, 2008.
- Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau. The detection method of bulk fluorspar powder's transportable moisture limit (TML) and its internal factors [R]. Shanghai: Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, 2008.
- [14] 周健, 杨永香, 刘洋. 饱和砂土液化过程中细观结构的模型试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(4): 466.
- ZHOU Jian, YANG Yongxiang, LIU Yang. Model testing of meso-fabric of saturated sand liquefaction[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(4): 466.
- [15] 周健, 余荣传, 贾敏才. 基于数字图像技术的砂土模型试验细观结构参数测量[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2047.
- ZHOU Jian, YU Rongchuan, JIA Mincai. Measurement of microstructure parameters for granular soil model using digital image technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2047.
- (上接第 986 页)
- [9] 范立础, 聂利英, 李建中. 地震作用下板式橡胶支座滑动的动力性能分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 30.
- FAN Lichu, NIE Liying, LI Jianzhong. Dynamic characteristic analysis of laminated rubber bearing sliding under earthquake [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 30.
- [10] 汤虎, 李建中. 地震动特性对公路桥梁板式橡胶支座滑动反应影响[J]. 工程力学, 2013, 30(10): 154.
- TANG Hu, LI Jianzhong. Effect of ground motion characteristics on sliding response of elastomeric pad bearings in highway bridges [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 154.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. JT/T 663—2006 公路桥梁板式橡胶支座规格系列[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JT/T 663—2006 Series of elastomeric pad bearings for highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [12] Guirguis J E B, Mehanny S S F. Evaluating code criteria for regular seismic behavior of continuous concrete box girder bridges with unequal height piers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18: 486.