

文章编号:1673-9469(2021)03-0102-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.03.015

## 基于模型试验的镍矿流态化特性与判别

李琳<sup>1</sup>,赵程<sup>1,2\*</sup>,白彪天<sup>3</sup>,于仕才<sup>4</sup>,周健<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系,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. 四川长园工程勘察设计有限公司,  
四川 成都 610063;4. 上海中建东孚投资发展有限公司,上海 200120)

**摘要:** 随着我国对镍矿需求的不断上升,其运输过程中出现的流态化问题也亟待研究。通过室内可视化小型振动台模型试验,对镍矿流态化细观规律及判别准则进行了研究。首先借助数字图像采集与分析系统,分析了镍矿在流态化过程中的宏观演化现象,对其分层含水率及孔隙水压力的变化规律进行了研究;并根据镍矿流态化机理,借鉴含细粒土液化的判别方法,提出了基于塑性指标的镍矿流态化判别新方法。结果表明:镍矿发生流态化的主要原因是高含水率条件下发生了振动软化,在其振动过程中水分基本不发生迁移,孔隙水压力也基本不发展。通过该判别方法计算得到的含水率结果与模型试验结果基本一致,因此新方法适用于高细粒含量镍矿流态化临界含水率的确定。

**关键词:** 镍矿;流态化;模型试验;临界含水率;判别

**中图分类号:** TU411

**文献标识码:** A

## Mechanical Characteristics and Criterion for Nickel Ore's Fluidization Based on Model Test

LI Lin<sup>1</sup>, ZHAO Cheng<sup>1,2\*</sup>, BAI Biaotian<sup>3</sup>, YU Shicai<sup>4</sup>, ZHOU Jian<sup>1,2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University,  
Shanghai 200092, China; 3. CYG Consulting and Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610063, China;  
4. Shanghai CSC Dongfu Assets Management Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** With the increasing demand for nickel ore in China, the import volume of nickel ore is increasing day by day. The fluidization of nickel ore in the process of marine transportation needs to be studied urgently. By means of indoor small vibration table modeling tests, the fluidization evolution process and the criterion for nickel ore's fluidization is studied. Firstly, with the aid of digital image acquisition and analysis system, the macro-evolution of nickel ore in fluidization process is analyzed, and the change rules of water content in layers and pore water pressure are studied. Based on the fluidization mechanism of nickel ore and the discrimination method for liquefaction of fine-grained soil, a new method for fluidization discrimination of nickel ore based on plasticity index is proposed. The results show that the fluidization of nickel ores is mainly caused by vibration softening under high water content conditions, during which water hardly migrates and pore water pressure hardly develops. The moisture content calculated by the discriminant method in this paper is basically consistent with the result of the model test. Therefore, the new method is suitable for determining the critical water content of fluidization of nickel ores with high fine particle content.

**Key words:** nickel ore; fluidization; model test; critical water content; criterion

收稿日期:2021-05-25

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51479138);国家公益性基金资助项目(201310065)

作者简介:李琳(1990-),女,山东聊城人,博士研究生,从事岩土工程方面的研究。

\* 通讯作者:赵程(1982-),男,内蒙古呼和浩特人,博士,教授,主要从事岩土工程方面研究。

镍矿作为一种重要的战略矿产资源,需求不断上升。我国散装精镍矿的进口量逐年增长,其主要运输方式是海上运输。镍矿在储存和运输过程中,往往存在中心层温度过高、粉尘飞扬等问题,需要人为喷水来解决。精粉矿散货自身含水量、露天存放时遭受雨淋及喷水措施等因素导致在其运输过程中发生流态化的可能性增加<sup>[1-2]</sup>。我国曾发生过多起因运载精粉矿导致的沉船事故,带来船毁人亡的重大损失<sup>[3]</sup>。镍矿由于颗粒粒径很细,且黏粒含量较高,其流态化机理与其他矿粉等存在显著差异<sup>[4-7]</sup>,很多学者对其流态化风险及特点进行了单独研究<sup>[8-10]</sup>。这些研究为镍矿流态化的振动台模型试验提供了参考。而对于镍矿发生流态化的机理,目前研究尚属于初步探讨阶段。当前国际上关于矿粉流态化判别的方法主要是将矿粉含水率值与流动水分点进行比较,认为只有其含水率大于流动水分点时,矿粉才有可能发生液化<sup>[11]</sup>。诸多学者就流动水分点的测定方法进行了研究<sup>[12-13]</sup>。但考虑细粒含量对镍矿流态化的影响,目前对镍矿流态化的判别并不十分完善。

本文基于室内可视化小型振动台模型试验,利用数字图像采集和分析系统,分析了在缩尺条件下镍矿流态化演化历程及形成机理,确定了镍矿试样在较不利加速度下的流态化临界含水率,探讨了影响镍矿流态化的关键因素,最后提出了新的镍矿流态化判别方法,并分析了流盘试验所得流动水分点(Flow Moisture Point, FMP)的可靠性。本研究拟从源头上对散装镍矿流态化风险进行有效判定,具有重要的工程意义。

## 1 振动台模型试验

### 1.1 试验材料

镍矿颗粒粒径很细,且其中黏粒含量较高,难以制备多种级配的镍矿,因此镍矿流态化模型试验只采用一种级配的镍矿,研究其在较不利工况下发生流态化的临界含水率。试验所用镍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。基本物理力学性质见表1,其中FMP为流动水分点,TML(Transportable Moisture Limit)为适运水分限量。

### 1.2 试验装置

由于海浪运动的随机性,船舶在其作用下的运动通常也是随机的。为了使分析计算更为方便,可以假定海浪的运动是规则及稳定的,那么在其作用下,船舶运动则可以认为是由简谐运动组成的,该计算结果同样具有参考价值<sup>[14]</sup>。试验通

过教研室自主研发的室内小型振动台<sup>[15]</sup>对模型箱施加水平往复简谐荷载,以此来模拟在波浪作用下船舶的水平横摇<sup>[16]</sup>。

表1 镍矿基本性质

Tab. 1 The physical parameters of nickel ore

矿种	土类	比重 $G_s$	设计干 密度 $\rho$ $/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 $e$	流动 水分点 FMP /%	适运 水分 限量 TML /%
镍矿	粉质粘土	2.215	0.95	1.33	36.6	32.94

试验模拟 $5.7 \times 10^4$  t级散货船在5舱均匀装载时精粉矿散货的堆载情况。由模型相似设计的基本原则,首先确定模型几何尺寸的相似比为1/25;其次,考虑重力加速度 $g$ 的近似模拟,质量密度的相似关系为1;最后,根据量纲分析的 $\pi$ 定理确定相似规律推导出的室内振动台模型试验的相似系数如表2所示。

表2 室内模型试验的模型相似比

Tab. 2 Similarity relations of modeling test

类型	物理量	相似关系	相似比
几何	长度 $l$	$C_l$	1/25
特征	位移 $r$	$C_r = C_l$	1/25
材料	重力加速度 $g$	$C_g$	1
	密度 $\rho$	$C_\rho$	1
特征	动孔压 $u$	$C_u = C_l$	1/25
	输入振动持时 $T$	$C_T = C_l^{0.5}$	$1/\sqrt{25}$
动力	振动频率 $\omega$	$C_\omega = \frac{1}{C_T}$	$\sqrt{25}$
特征	输入振动加速度 $A$	$C_A$	1
	动力加速度 $a$	$C_a$	1

根据模型相似比,设计模型箱长66 cm,宽32 cm,高40 cm。为了便于观测,在模型高度方向设置横向标志砂,每层间隔10 cm,在长度方向中间位置设置竖向标志砂。试验在模型箱一侧设置高清数码相机实时记录精粉矿流态化宏观演化过程,观测流态化发生发展全过程中的矿体变形。试验中采用孔隙水压力传感器采集全过程孔隙水压力的变化,采样方式和采样频率等都通过计算机进行控制,采样频率设定为50 Hz。镍矿模型及水压传感器在矿体内的布置如图1所示。

### 1.3 试验设计

#### (1) 试验方案

根据课题组前期的研究成果<sup>[8]</sup>,影响镍矿流

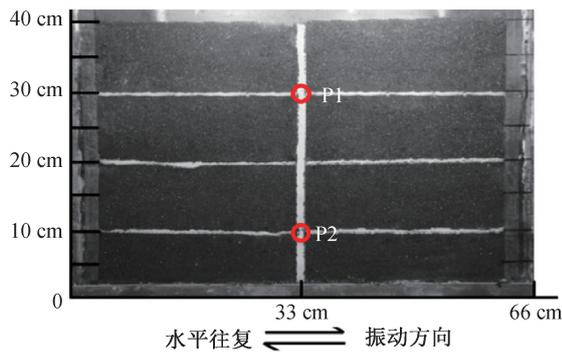


图1 镍矿模型及孔压测点布置图

Tab. 1 The physical parameters of nickel ore

态化特性的关键因素为含水率和加速度,因此在试验中将其作为主要控制变量。根据上海出入境检验检疫局提供的资料<sup>[17]</sup>显示,波浪谱的特征频率一般为0.1~1 Hz,本试验按较不利情况,设计频率为1 Hz。实测资料表明,散装镍矿货船在载运时,舱内镍矿的横向加速度幅值范围为0.16~0.42 g。为了获得偏安全的临界含水率,取较不利的加速度工况进行试验,不考虑镍矿在加速度为0.1~0.3 g的情况。试验设计施加在试样上的加速度值分别为0.4和0.5 g,对应振幅分别为82和99 mm。具体方案如表3所示。

表3 模型试验方案

Tab. 3 Schemes of modeling tests

试验编号	含水率/%	加速度/g	振幅/mm	FMP/%
1#	36	0.4	82	36.60
2#	37	0.4	82	36.60
3#	38	0.4	82	36.60
4#	38	0.5	99	36.60
5#	39	0.4	82	36.60

## (2) 试验过程

为了精确控制试样含水率并保证合适的相对密实度,本试验采用分层湿捣法均匀配置镍矿试样,将镍矿在110℃的烘箱里烘置24 h,待充分烘干后,根据设计含水率配置所需试样,将配置好的试样分10层装样,控制每层试样的密实度相同。为使镍矿内部含水率保持充分均匀,装样后于镍矿表面铺设湿毛巾,并静置1 h。准备工作完成后,启动振动台施加振动荷载,最大振动周数为600次,当试验中发生明显流态化破坏现象后即停止振动台振动。

## 2 试验结果分析

本次试验所用的镍矿,按照土力学分类,属于

粉质粘土,其黏性很高,其流态化机理主要从宏观现象、分层含水率、孔隙水压力三个方面进行探讨。

### 2.1 镍矿流态化现象

试验以是否出现破坏变形与滑动面为依据来判定是否出现流态化。表4为五组镍矿模型试验的试验结果。当含水率较小,镍矿不发生流态化,镍矿矿体在试验过程中基本不发生变形;当含水率较大,镍矿发生流态化时,镍矿矿体丧失强度,在振动荷载作用下产生大变形。镍矿由于污染玻璃面的原因,侧面宏观现象并不能很直观地反应镍矿的流态化发展过程,这需要在后续研究中继续优化试验方案。但在试验过程中,可以实际观测到其流态化发展规律。

表4 模型试验结果

Tab. 4 Results of modeling tests

试验编号	1#	2#	3#	4#	5#
是否流态化	否	否	否	否	是

图2和图3为第5#组试验镍矿在振动前后宏观现象的对比图。可以看到,试验前在矿体内设置的三道横向标志砂在试验结束后基本不可见,由于矿体发生了大变形,导致标志砂与矿粉混合在了一起,而在表面可以看到在部分地方出现较大的张拉裂缝,并且左边出现了隆起,右边出现了塌陷。在试验过程中可以观测到流态化发展过程仍是顶部先破坏,出现圆弧滑动面,并逐渐向下发展。在整个试验过程中没有表现出明显的水分迁移现象。

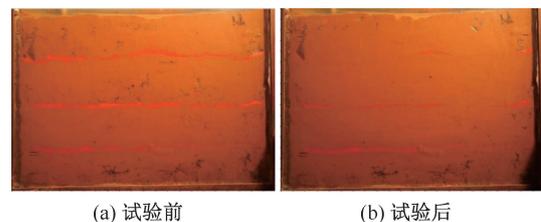


图2 5#试验镍矿流态化现象正视图

Fig. 2 The front view of nickel concentrate ore's fluidization



图3 5#试验镍矿流态化现象俯视图

Fig. 3 The top view of nickel concentrate ore's fluidization

### 2.2 分层含水率规律

在试验结束后,测定了镍矿的分层含水率分布,来探究镍矿在振动荷载作用下的水分迁移规律。图4为各组试验中镍矿分层含水率沿模型高度方向分布的变化情况,横坐标表示含水率值,纵坐标表示模型的高度。其中,第1#、2#、3#、4#四组试验中镍矿未发生流态化,第5#组试验中镍矿发生了流态化。

比较各组试验中分层含水率的分布情况可以发现,对于镍矿来说,无论是否发生流态化,其含水率分布均表现为从上往下均匀分布,含水率的离散型较大。其主要原因为镍矿细粒中黏粒含量较多,因此导致其渗透性非常低,在振动荷载作用下矿体内水分基本不发生迁移。

### 2.3 孔隙水压力规律

在镍矿模型试验中,测定了两个测点的孔隙水压力随振动荷载的变化情况,关于孔隙水压力测点布置情况见图1。图5为第1#、2#、4#、5#组试验中镍矿在振动荷载作用下孔隙水压力的时程曲线。比较各组试验可以发现,当镍矿未发生流态化时,孔隙水压力未发展;当含水率较大,镍矿发生流态化时,孔隙水压力有小幅发展,但其值很

小,顶部孔压甚至出现了负值,说明在镍矿中由于黏粒含量较大,同时试验又处于非饱和状态,因此在镍矿中存在负孔压,但由于其饱和度较高,所以负孔压很小。而由分层含水率规律可知在试验过程中水分基本不发生迁移,因此在试验过程中孔压基本不发展。

通过以上分析可以发现,镍矿是否发生流态化和孔压发展无明显关系。镍矿在动力荷载作用下会发生流态化的主要原因是其颗粒粒径非常细小,比表面积很大,导致颗粒之间产生界面活性等胶体特性,从而在颗粒表面形成吸着水层,进而导致镍矿形成非常复杂的絮状构造。在振动荷载作用下,絮状构造被破坏,镍矿强度逐渐降低,产生振动软化,进而导致流态化。因此,镍矿发生流态化的主要原因是在高含水率下发生了振动软化。

## 3 镍矿流态化判别

当前矿粉流态化判别的主要方法是比较其含水率值与流动水分点(FMP)的大小,只有当含水率大于FMP时,才认为其可能发生流态化。目前流动水分点的测定方法主要包括流盘试验法、针

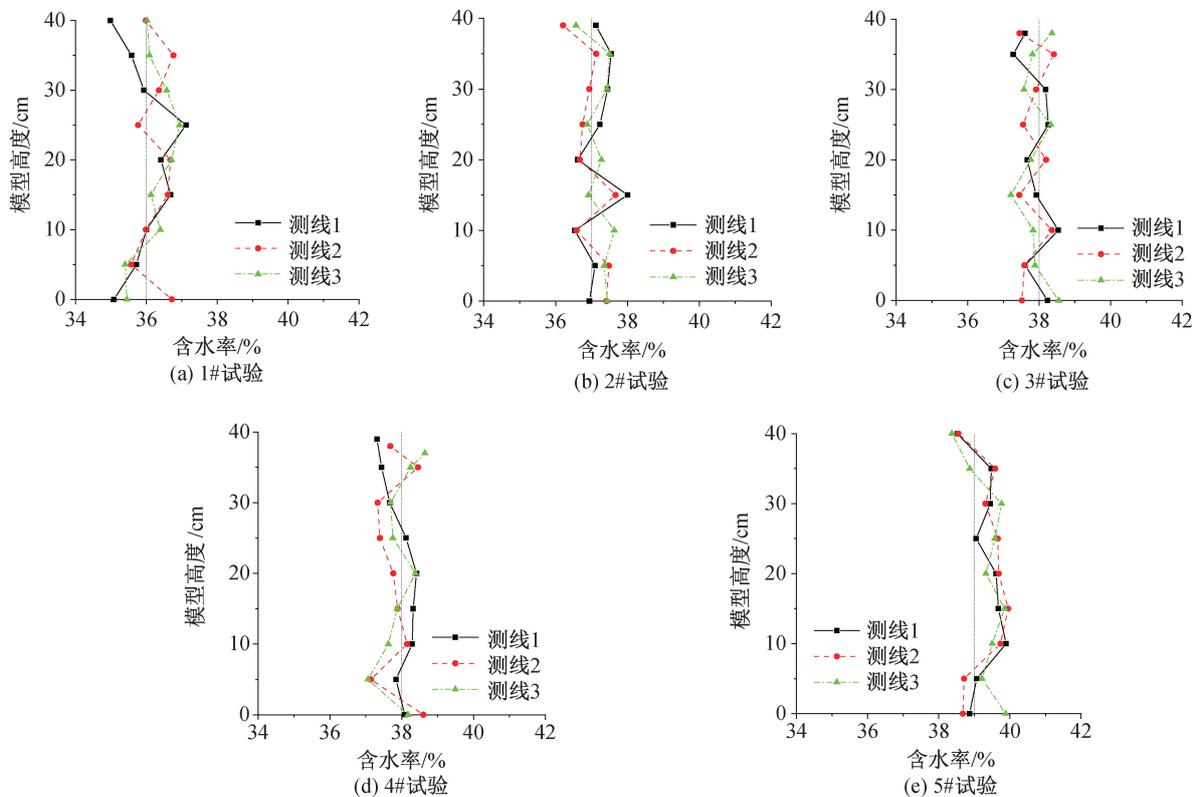


图4 镍矿试验后分层含水率

Fig. 4 Moisture contents at different layers after tests

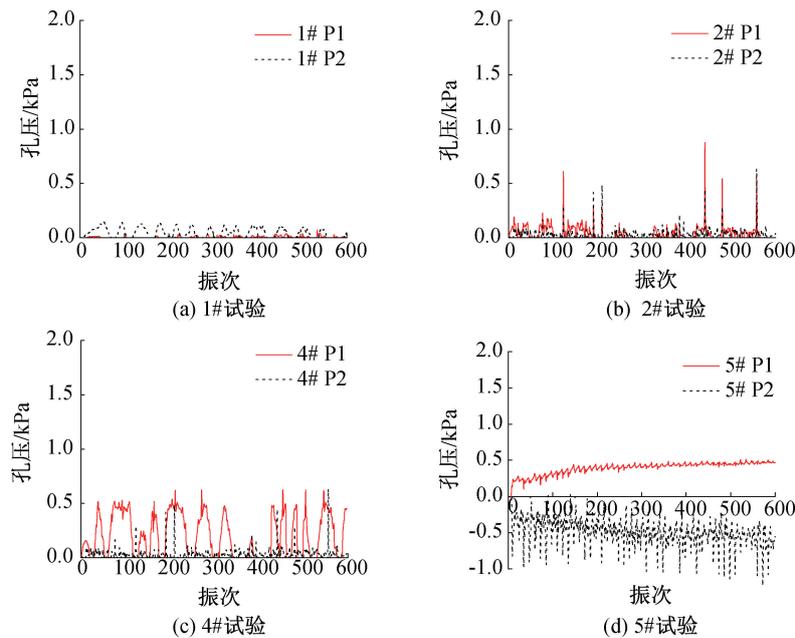


图5 镍矿孔隙水压力时程曲线

Fig. 5 The pore pressure curves of nickel concentrate ore

入度试验及卢梭饱和度试验法。本文借鉴土力学相关知识,基于细粒含量对镍矿流态化的影响,提出一种新的确定镍矿流动水分点的方法,将其与流盘试验法进行比较,进一步完善镍矿流态化判别方法。

Bray J D<sup>[18]</sup>于2006年提出的细粒土液化初判标准,通过考虑不同的塑性指数(PI),建立了确定细粒土是否流态化的三条准则:(1)当 $PI < 12$ 时,只有当 $\omega_c/LL > 0.85$ 时,细粒土才可能发生液化;(2)当 $12 < PI < 18$ 时,只有当 $\omega_c/LL > 0.8$ 时,细粒土才可能发生液化;(3)当 $18 < PI$ 时,在低有效围压条件下细粒土不会发生液化。其中,PI指塑性指数, $\omega_c$ 指含水率(此处含水率指水的质量与土质量的比值),LL指液性指数。但由于镍矿与细粒土之间存在差异,考虑到镍矿比重较大,质量含水率较细粒土质量含水率小,此处按最保守条件考虑,即只有当 $\omega_c/LL > 0.8$ 时,才认为镍矿可能发生流态化,将以此标准确定的含水率作为镍矿流态化的临界含水率。

计算临界含水率时还需考虑,土力学中含水率指的是水的质量和固体质量的比值,而海运中含水率指的是水的质量和固体与水总质量的比值,因此在研究过程中需区分这两种含水率,以 $\omega_c$ 指代土力学中含水率,以 $\omega_s$ 指代海运含水率。公式(1)和公式(2)给出了两种含水率的计算方法,联合公式(1)和(2),可以得出 $\omega_c$ 与 $\omega_s$ 之间关系如式(3)所示,将其代入上述标准,即 $\omega_s/((1 - \omega_s)LL) > 0.8$ 时,

镍矿可能发生流态化。因此,镍矿发生流态化的临界含水率公式如式(4)所示。

$$\omega_c = m_w/m_s \quad (1)$$

$$\omega_s = m_w/(m_s + m_w) \quad (2)$$

$$\omega_c = \omega_s/(1 - \omega_s) \quad (3)$$

$$\omega'_s = 0.8LL/(1 + 0.8LL) \quad (4)$$

式中: $m_w$ 为水质量; $m_s$ 为固体质量, $\omega'_s$ 为镍矿流态化临界含水率。

结合以上分析,通过试验测出镍矿流态化的液限,即可计算出其流态化临界含水率。表5为室内模型试验、计算、流盘试验三种方法所得临界含水率。比较结果可以看出,对于高细粒含量的镍矿,通过计算所得临界含水率为38.1%,传统流盘试验所得的FMP为36.6%,而试验所得的临界含水率区间为38%~39%。计算所得含水率位于试验临界区间内,因此,该方法适用于高细粒含量的镍矿的流态化临界含水率确定,而传统的流盘试验结果相对偏保守。

表5 临界含水率比较

Tab. 5 Comparison between different results of critical moisture content

矿种	塑限 /%	液限 /%	塑性 指数	试验	镍矿流态	流动
				临界 含水 率/%	化临界含 水率 $\omega'_s$ /%	水分点 FMP /%
镍矿	42.14	76.96	35	38~39	38.1	36.6

## 4 结论

本文通过室内模型试验,研究了镍矿在振动荷载作用下的流态化规律,分析了其流态化演化过程,确定了镍矿试样流态化临界含水率,借鉴含细粒土液化的判别方法,提出了镍矿流态化的判别方法。主要得到以下结论:

1) 散装镍矿流态化演化历程:其发生流态化时滑动面首先出现在矿粉顶部,并逐渐向下迁移,最终形成矿体整体左右滑移状。

2) 含水率是影响镍矿矿粉流态化形成的关键因素,镍矿存在含水率临界值,高于该含水率时,镍矿会发生流态化,低于该含水率时,镍矿不会发生流态化。

3) 镍矿由于黏粒含量很高,其在振动过程中水分基本不发生迁移,孔隙水压力也基本不发展,其发生流态化的主要原因是高含水率条件下发生了振动软化。

4) 通过测定镍矿的液塑性指标,提出了其流态化的判别方法。计算得到的流态化临界含水率与模型试验结果基本一致。对于镍矿这种高细粒含量的试样,通过流盘试验测定的 FMP 值在实际中偏保守。

### 参考文献:

- [1] MICHAEL C Munro, ABBAS Mohajerani. Bulk Cargo Liquefaction Incidents During Marine Transportation and Possible Causes[J]. Ocean Engineering, 2017, 141:125-142.
- [2] SHEN, JIANG. Nickel Ore and Its Safe Shipment[J]. Advanced Materials Research, 2011, 396-398:2183-2187.
- [3] LEE Hiok Liang. Nickel Ore Bulk Liquefaction A Handy-max Incident and Response[J]. Ocean Engineering, 2017, 139:65-73.
- [4] 简琦薇,李宁,周健,等. 基于模型试验的散装铁精矿流态化细观规律[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2015,043(007):1019-1024.
- [5] DAOUD S, SAID I, ENNOUR S, et al. Numerical Analysis of Cargo Liquefaction Mechanism Under the Swell Mo-

tion[J]. Marine Structures, 2018, 57:52-71.

- [6] JU L, VASSALOS D, WANG Q, et al. Numerical Investigation of Solid Bulk Cargo Liquefaction[J]. Ocean Engineering, 2018, 159:333-347.
- [7] 吴宛青,丁一鸿,徐华德,等. 基于波浪载荷的易流态化固体散货海运安全量化研究[J]. 大连海事大学学报, 2020,46(02):1-9.
- [8] 周健,朱耀民,简琦薇,等. 红土镍矿流态化特性的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, (8):1515-1520.
- [9] ZOU Youjia, XI Xiangying, SU Yan. A Numerical Study of a Highly-viscous Liquefied Cargo in a Rectangular Ship Tank[J]. Ocean Engineering, 2018, 170:298-305.
- [10] 张建伟,吴文锋,朱发新,等. 红土镍矿运输船倾覆特性数值研究[J]. 水动力学研究与进展:A辑, 2019,34(01):81-88.
- [11] MUNRO M C, MOHAJERANI A. Laboratory Scale Reproduction and Analysis of the Behaviour of Iron Ore Fines Under Cyclic Loading to Investigate Liquefaction during Marine Transportation[J]. Marine Structures, 2018, 59:482-509.
- [12] 李晨,江丽,刘曙,等. 氟石粉适应水分限量的测定[J]. 化学世界, 2010,51(011):660-662.
- [13] VAN Paassen L A, VARDON P J, MULDER A, et al. Investigating the Susceptibility of Iron Ore to Liquefaction[C]//Poromechanics Proceedings of the Fifth Biot Conference on Poromechanics, ASCE, 2013.
- [14] 丁振东. 大型浮吊海浪作用下结构静态性能研究[D]. 上海:上海交通大学, 2010.
- [15] 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(12):165-172.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] BRAY J D, SANCIO R B. Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(9):1165-117.

(责任编辑 王利君)