

# 滚装船在波浪中横摇时船上滑动 重载荷的同步效应\*

张银龙<sup>1</sup>, 沈庆<sup>2</sup>, 陈徐均<sup>2</sup>

(1. 总装备部工程兵科研二所, 北京 100036;  
2. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 南京 210007)

(鲁传敬推荐)

**摘要:** 由于波浪和内部滑动车辆共同作用, 使滚装船的横摇加剧, 这是许多滚装船发生倾覆的重要原因之一。对由滚装船和多辆滑动车辆组成的浮基多体系统, 取滚装船的横摇角和多辆自由滑动车辆在甲板上的横向位移为此系统的自由度, 通过对船舶在波浪中所受表观重力和表观浮力的分析, 导出波浪作用力矩, 运用多体系统动力学方法, 建立了系统的动力学方程。以某型海峡滚装渡轮为例, 对在多辆车自由滑动和波浪共同作用下的滚装船浮基多体系统的横摇响应和车辆位移响应进行了数值计算, 得出了多个自由滑动的重载荷因相互碰撞在舷侧舱壁的约束下随着时间的延长其运动将趋于同步的结论。

**关键词:** 滚装船; 滑动重载荷; 浮基; 多体系统; 同步效应; 动力学

**中图分类号:** O313.7; O353.2; TV131.1; U661.3 **文献标识码:** A

## 引 言

对于在海上航行的船舶, 横摇是最容易发生的一种运动。就滚装船而言, 车辆等重载荷由于固定装置失效而随船摇荡作自由滑动, 滚装船和滑动车辆等重载荷组成了一个浮基多体系统, 起重船和海上发射平台均属于这一类浮基多体系统<sup>[1~3]</sup>。因为波浪和滑动车辆等重载荷的共同作用, 使得滚装船的横摇加剧, 这是许多滚装船发生倾覆的重要原因之一。因此, 滑动车辆对船舶摇摆运动影响的研究和分析对船舶的安全行驶和装载作业也就显得尤为必要和重要。但是, 对这类浮基多体系统的动力学研究必须基于流固耦合理论, 而且不可避免的需要运用多体系统动力学方法。

本文对由滚装船和多辆滑动车辆组成的浮基多体系统, 取滚装船的横摇角和甲板上滑动车辆的横向位移为系统的自由度。通过对船舶在波浪中所受表观重力和表观浮力的分析, 导出波浪作用力矩, 运用多体系统动力学方法, 建立了系统的动力学方程。以 1 500 t 级的 30 辆车/300 客海峡滚装渡轮为例, 对在多辆卡车自由滑动和波浪共同作用下的滚装船浮基多体系统的横摇响应和车辆位移响应进行了数值计算, 得出了多辆自由滑动的车辆在舷侧舱壁的约

\* 收稿日期: 2005\_07\_29; 修订日期: 2006\_03\_28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50309018)

作者简介: 张银龙(1968—), 男, 江苏兴化人, 工程师, 博士(联系人, Tel: + 86\_10\_51950186; Fax: + 86\_10\_51950524; E\_mail: yinlong.zhang@163.com)。

束下随着时间的延长其运动可趋于同步的结论。

## 1 浮基在流体中的作用力矩

如图 1 所示, 根据波浪理论<sup>[4]</sup>, 流体各质点在波浪中运动的迹线是一个圆。波面上质点  $A$  在受重力  $mg$  作用的同时, 还受到由圆周运动引起的离心力  $F$ 。两者的合力  $R$  偏离铅垂方向而垂直于波面, 称为表观重力。流体对质点  $A$  的支持力  $P$  则与  $R$  等值反向, 称为表观浮力。利用表观重力和表观浮力的概念可以直接导出作用力矩的表达式<sup>[5-7]</sup>。

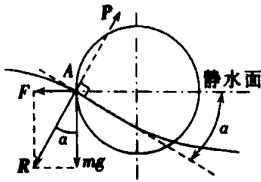


图 1 表观重力和表观浮力

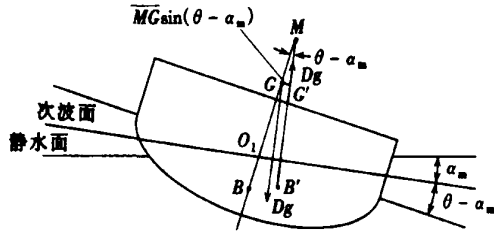


图 2 浮基在波浪上的受力

区别于质点, 船舶有一定的吃水和宽度。波浪上的船舶所受表观重力和表观浮力不是垂直于波面, 而是垂直于某一深度的次波面(如图 2 所示)<sup>[5-7]</sup>。  $M$  为浮基的横稳心,  $B$ 、 $B'$  分别为正浮时和横摇时的浮心。设浮基排水量为  $D$ , 则表观重力和表观浮力大小均为  $D$  与重力加速度的乘积  $Dg$ , 而分别作用于质心  $G$  和浮心  $B'$ , 作用线均垂直于次波面。二者组成一对力偶, 其力矩大小为  $-Dg \overline{MG} \sin(\theta - \alpha_m)$ ,  $\overline{MG}$  即船舶的横稳心高度。当浮基的横摇角  $\theta$  与瞬时波倾角  $\alpha_m$  之差  $\theta - \alpha_m$  用弧度表示时, 可近似取  $\sin(\theta - \alpha_m) = \theta - \alpha_m$ 。而对于正弦波次波面, 瞬时波倾角  $\alpha_m$  与最大波面角  $\alpha_0$  的关系为  $\alpha_m = \alpha_0 \cos(2\pi t / \tau_b)$ ,  $\tau_b$  为波周期。则图 2 所示力矩可表示为  $-Dg \overline{MG} \theta + Dg \overline{MG} \alpha_0 \cos(2\pi t / \tau_b)$ 。其中第 1 项为线性的恢复力矩, 第 2 项为波浪(周期性)扰动力矩。

另外, 浮基在流体中所受的作用力矩还应包括流体阻尼力矩, 对线性阻尼力矩, 取  $M(\theta) = -2N_0 \theta$ ; 其中  $2N_0$  为线性阻尼系数。所以可以得到浮基在流体中作线性横摇时所受的总的的作用力矩为

$$M = -Dg \overline{MG} \theta - 2N_0 \theta + Dg \overline{MG} \alpha_0 \cos(2\pi t / \tau_b) \quad (1)$$

## 2 浮基多体系统的运动学描述

由船舶耐波性理论可知<sup>[7]</sup>, 浮基在正横浪作用下危害较大的运动响应是横摇。本文主要分析波浪和车辆滑动共同作用而引起的浮基横摇运动。

如图 3 所示, 设浮基的质心  $G_1$  到水线面的垂足为  $O_1$ 。现假设滚装船甲板上  $n-1$  个重载荷(如车辆等), 则整个浮基多体系统由浮基  $B_1$  和重载荷车辆  $B_2, B_3, \dots, B_n$  等  $n$  个物体组成。取  $e_1^{(1)}, e_2^{(1)}$  为固结于浮基  $B_1$  上动坐标系的基矢, 取  $e_1^{(0)}, e_2^{(0)}$  为静止坐标系的基矢。固结于重载荷如车辆  $B_i (i = 2, 3, \dots, n)$  上动坐标系的基矢  $e_1^{(i)}, e_2^{(i)}$ , 分别与  $e_1^{(1)}, e_2^{(1)}$  平行。对于系统内各物体  $B_j (j = 1, 2, \dots, n)$  的质心矢径  $p_j$ 、质心速度  $\dot{p}_j$ 、质心加速度  $\ddot{p}_j$  和各物体的角速度  $\omega^{(j)}$ 、角加速度  $\dot{\omega}^{(j)}$ , 均可以导出以浮基  $B_1$  的横摇角  $\theta$  和车辆  $B_i$  的滑动位移  $s_i$  为变量的表达式。

$$\begin{cases} p_1 = r_1, \\ p_i = q_i + s_i + r_i, \end{cases} \quad (2)$$

式中  $r_j$ 、 $q_i$  ( $i = 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n$ ) 在各相关物体的动坐标系中的投影不随时间改变, 属于给定参数。把  $p_j$  投影于静坐标系  $e^{(0)}$  中有

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} p_{01}^{(1)} \\ p_{02}^{(1)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} r_{11}^{(1)} \\ r_{12}^{(1)} \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} p_{01}^{(i)} \\ p_{02}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q_{11}^{(i)} + r_{i1}^{(i)} + s_i \\ q_{12}^{(i)} + r_{i2}^{(i)} \end{pmatrix}, \end{cases} \quad (3)$$

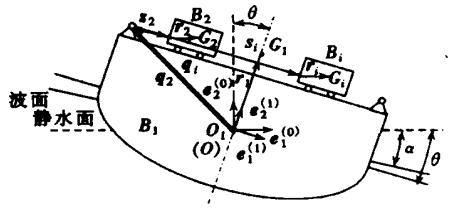


图3 系统内各物体的运动学关系

式中各投影量的上标为物体编号, 两个下标分别为坐标系和坐标轴的编号。等号右侧的坐标转换矩阵中的元素, 在浮基横摇角  $\theta$  不大时可作  $\cos \theta = 1, \sin \theta = \theta$  的简化。

进而可导出各物体  $B_j$  质心速度  $\{p_{01}^{(j)} \quad p_{02}^{(j)}\}^T$ 、质心加速度  $\{\dot{p}_{01}^{(j)} \quad \dot{p}_{02}^{(j)}\}^T$  以及角速度  $\omega^{(j)}$  和角加速度  $\dot{\omega}^{(j)}$  的表达式。

由(2)、(3)两式可知, 浮基多体系统具有  $\theta, s_2, s_3, \dots, s_n$  等  $n$  个自由度。取  $\theta, s_2, s_3, \dots, s_n$  为广义坐标,  $\dot{\theta}, \dot{s}_2, \dot{s}_3, \dots, \dot{s}_n$  为广义速率<sup>[8]</sup>。将系统内各物体的速度、角速度对广义速率的偏导数定义为偏速度和偏角速度。根据定义可以导出各偏速度和偏角速度的表达式。

### 3 浮基多体系统动力学分析

在多体系统动力学中, Kane 方法把系统中各物体的受力分为主动力和惯性力两类<sup>[8]</sup>。本文所分析的浮基多体系统中的各物体需要考虑的主动力有(1)式所示的力矩和滑动重载荷  $B_i$  的重力-  $m_i g$  等  $n$  项。

浮基多体系统中各物体所受的惯性力均包含主矢和主矩两项, 其投影分别为

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} F_{01}^{(j)} \\ F_{02}^{(j)} \end{pmatrix} = - (m_j + \Delta m_j) \begin{pmatrix} \dot{p}_{01}^{(j)} \\ \dot{p}_{02}^{(j)} \end{pmatrix} \\ M^{(j)} = - (J_j + \Delta J_j) \dot{\omega}^{(j)} \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

式中  $m_j$  和  $J_j$  分别为浮基多体系统内各物体  $B_j$  质量和转动惯量。由于浮基  $B_1$  运动时必然带动一部分流体一起运动, 所以式(4)中出现了  $\Delta m_1, \Delta J_1$  这些附连水质量和附连水转动惯量。而重载荷车辆  $B_i$  因不直接在水中运动, 不存在相应的附连水质量和附连水转动惯量, 式(4)中  $\Delta m_i = 0, \Delta J_i = 0$  ( $i = 2, 3, \dots, n$ )。

Kane 方法将主动力(矩)与作用点偏速度(作用物体偏角速度)的点积定义为广义主动力  $f$ , 将惯性力(矩)与作用点偏速度(作用物体偏角速度)的点积定义为广义惯性力  $f^*$ 。按定义分别计算出关于  $\dot{\theta}, \dot{s}_2, \dot{s}_3, \dots, \dot{s}_n$  的广义主动力  $f$  和广义惯性力  $f^*$ 。Kane 方程就是对每一广义速率而言, 多体系统内所有物体的广义主动力与所有物体的广义惯性力之和为 0。

$$\sum_{j=1}^n f_{jl} + \sum_{j=1}^n f_{jl}^* = 0 \quad (l = \theta, s_2, s_3, \dots, s_n). \quad (5)$$

分别把相关各式代入 Kane 方程(5)式可得到

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[ (m_1 + \Delta m_1)(r_{12}^{(1)2} + r_{11}^{(1)2}) + \sum_{i=2}^n m_i [(q_{12}^{(i)} + r_{12}^{(i)})^2 + (q_{11}^{(i)} + r_{11}^{(i)} + s_i)^2] + \right. \\ & \left. \left[ J_1 + \Delta J_1 + \sum_{i=2}^n J_i \right] \right\} \ddot{\theta} + 2 \sum_{i=2}^n m_i s_i \dot{\theta} (q_{11}^{(i)} + r_{11}^{(i)} + s_i) \dot{\theta} + 2N_0 \dot{\theta} + \\ & \sum_{i=2}^n m_i \ddot{s}_i (q_{11}^{(i)} + r_{11}^{(i)} + s_i) \dot{\theta} + Dg \overline{MG} \dot{\theta} = \\ & Dg \overline{MG} \alpha_0 \cos(2\pi t / \tau_b) + \sum_{i=2}^n m_i g (q_{11}^{(i)} + r_{11}^{(i)} + s_i) - m_i \ddot{s}_i (q_{12}^{(i)} + r_{12}^{(i)})], \\ & m_i [q_{12}^{(i)} + r_{12}^{(i)} + (q_{11}^{(i)} + r_{11}^{(i)} + s_i) \dot{\theta}] \ddot{\theta} + 2m_i \dot{\theta} \dot{s}_i \dot{\theta} - \\ & m_i g \dot{\theta} + m_i (\theta^2 + 1) \ddot{s}_i = 0 \quad (i = 2, 3, \dots, n), \end{aligned} \right. \tag{6}$$

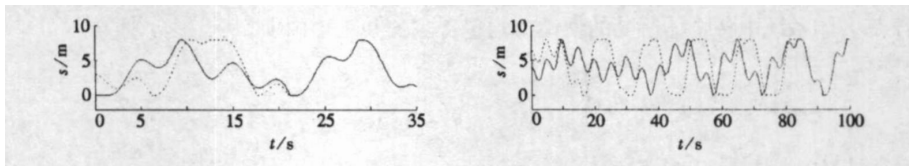
式(6)是一组以  $\theta(t), s_2(t), s_3(t), \dots, s_n(t)$  为未知函数的联立常微分方程。设定  $\theta(t), s_2(t), s_3(t), \dots, s_n(t)$  等相关初始条件后, 作时间离散可在时域内数值求解  $\theta(t), s_2(t), s_3(t), \dots, s_n(t)$ 。

### 4 算 例

滚装船取为 30 辆车/300 客紫荆型海峡滚装渡轮<sup>[9]</sup>, 其稳性满足 II 类海区船舶要求。满载排水量 1 435.31 t, 船宽 15 m, 型深 4.5 m, 吃水 2.6 m, 重心高 5.43 m, 初稳心高 2.33 m。取附加质量近似等于满载排水量所对应的质量, 总的横摇惯性矩(包括附加惯性矩)为  $1.65 \times 10^7 \text{ kg/m}^2$ , 横摇固有周期 6.90 s。滚装船装有舭龙骨, 近似取其横摇阻尼比为  $0.06^{[7]}$ 。

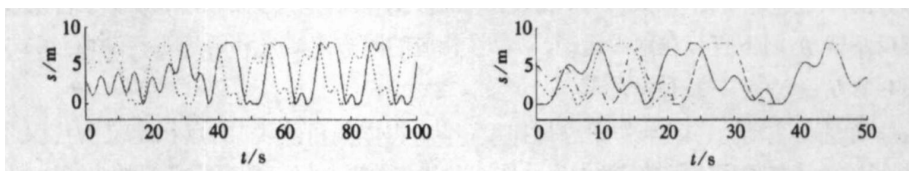
车辆均取为 5 t 东风牌卡车, 全重 10 t, 长、宽、高尺寸为  $7 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$ 。惯性矩为  $4.56 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$ 。车辆从左舷滑动到右舷的整个行程为船宽与车长之差 8 m。

波浪条件取为三级波浪, 周期 5.06 s, 最大波面角  $6.76^\circ$ 。



(a)  $s_2(0) = 0, s_3(0) = 3 \text{ m}$                       (b)  $s_2(0) = 4 \text{ m}, s_3(0) = 6.5 \text{ m}$

图 4 2 辆车自由滑动趋于同步



$s_2(0) = 3 \text{ m}, s_3(0) = 6 \text{ m}$

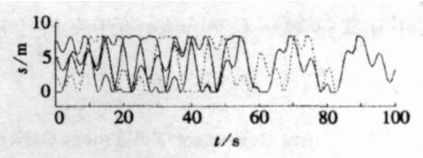
图 5 2 辆车自由滑动未趋于同步

$s_2(0) = 0 \text{ m}, s_3(0) = 3 \text{ m}, s_4(0) = 5 \text{ m}$

图 6 3 辆车滑移位置随时间的变化

初始条件均取  $t = 0$  时船的横摇角  $\theta(0) = \alpha_0$  (最大波面角)、 $\dot{\theta} = 0$  及各车辆  $B_i$  的初始位移  $s_i(0)$  (具体数值详见计算过程, 以车辆位于滚装船左舷为位移 0 点)。用上述联立常微分方程组数值求解  $\theta(t), s_2(t), s_3(t), \dots, s_n(t)$  随时间的变化规律。

计算结果如图 4~ 图 7 所示, 图中实线或虚线表示  $B_i$  车辆位移量的变化。图 4 和图 5 表示两辆车  $s_2(0)$ 、 $s_3(0)$  取不同初始位置组合时, 两车在浮基上滑动位置随时间变化的情况。其中图 4 表示了两例各车滑动趋于同步的情况, 而图 5 表示了一例未能趋于同步的情况。图 6、图 7 分别为 3 辆、4 辆车自由滑动时, 给定任意选取初始位置组合后的滑动位置随时间变化的情况。



$$s_2(0) = 0, s_3(0) = 2.5 \text{ m}, \\ s_4(0) = 5 \text{ m}, s_5(0) = 7.5 \text{ m}$$

图 7 4 辆车滑移位置随时间的变化

在计算图 4~ 图 7 所示各车滑移位置随时间的变化时, 还计算了相应各组合中浮基横摇角随时间的变化。结果表明最大横摇角均小于  $14^\circ$ 。

为了说明不同初始位置组合下多辆车滑动的同步效应, 共选取 1 445 种初始位置组合进行了数值计算, 结果如表 1 所示。表中同步比例表示在不长的时间内即达到同步的组合占总组合的比例。

表 1 不同初始位置组合下车辆同步滑动的比例

表 1	2 辆车滑动	3 辆车滑动	4 辆车滑动
本文所分析的组合数	289	289	867
车辆同步滑动的比例	153/289	283/289	867/867

由表 1 可见, 对于大多数初始位置组合, 浮基上的多辆自由滑动车辆会趋于同步。特别是滑动车辆超过 3 辆时, 各种初始工况下基本上都有同步效应。

## 5 结 论

1) 使用本文提出的分析方法和导出的由滚装船和滑动重载荷组成的浮基多体系统动力学方程, 可以通过对波浪、滚装船和重载荷的不同组合, 进行滚装船横摇响应和重载荷位移响应的数值计算。进而可以为滚装船的驾驶和装载作业安全, 提供理论指导。

2) 多个具有不同初始位移的重载荷在甲板上自由滑动, 经过一段时间之后, 重载荷的运动可能趋于同步, 特别是滑动重载荷超过 3 个时, 各种初始工况下基本上都有同步效应。所以, 滚装船中车辆等重载荷因固定装置失效而随船作自由滑动时, 由于重载荷之间不可避免地相互间的反复碰撞使得在甲板上作自由滑动的重载荷随时间增多, 在舷侧舱壁的约束下这些重载荷的运动将趋于同步, 这时可以将各重载荷组合视为一个集中了各载荷质量的等效滑动载荷, 从而减少多体系统自由度的数量而进一步简化计算。

3) 多个在甲板上滑动的重载荷其运动是否能够同步与滑动重载荷的初始位置和数量有关。其中一些不能同步的现象很可能属于工程中非线性动力系统中的混沌分岔现象。由浮基和多个滑动重载荷组成的浮基多体系统作为一个确定的非线性动力系统, 其中, 滑动重载荷的运动是系统的确定性行为, 它们的初始位置则是系统的可变参量。确定性行为随着可变参量和其它一些不确定因素不断改变, 使得滑动重载荷的运动有时可以趋于同步, 有时则不能同步。这说明系统的响应对条件初始条件很敏感而且响应形式有重大差别, 这两点正是非线性动力系统出现混沌分岔现象的必要条件<sup>[10]</sup>。关于这个问题还必须深入研究工作。

4) 本文仅仅分析考虑了由滚装船和滑动重载荷组成的浮基多体系统作线性横摇时滑动重载荷的运动可否同步的情况, 如果再考虑各种非线性因素的影响, 船舶的摇摆响应和重载荷的运动响应将变得更加复杂。另外, 滑动重载荷与滚装船甲板之间的摩擦、滑动重载荷之间的

相互碰撞等一系列问题都还有待于进一步研究探讨。

### [参 考 文 献]

- [1] Kral R, Kreuzer E, Wilmers C. Nonlinear oscillations of a crane ship[A]. Kreuzer E, Mahrenholtz O. Proceedings of the 3rd International Conference on Industrial and Applied Mathematics 1995, Suppl. 4[C]. Berlin: Akademie Verlag, 1996, 5—8.
- [2] Schellin T E, Jiang T, Ostergaard C. Response analysis and operating limits of crane ships[J]. Journal of Ship Research, 1993, 37(3): 225—238.
- [3] Ellermann K, Kreuzer E, Markiewicz M. Nonlinear dynamics of floating cranes[J]. Nonlinear Dynamics, 2002, 27(2): 107—183.
- [4] 周光 , 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993, 8—13.
- [5] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987, 133—150.
- [6] 朱军. 舰船静力学[M]. 湖南: 国防科技大学出版社, 2002, 31—41; 75—87.
- [7] 彭英声. 舰船耐波性基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989, 28—42; 62—73.
- [8] 休斯敦, 刘又午. 多系统动力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1987, 上册: 37—138; 下册: 51—64.
- [9] 林明锦. 海峡车/客渡船——紫荆壹号的总体设计[J]. 武汉造船, 1998(1): 1—5.
- [10] 盛昭瀚, 马军海. 非线性动力系统分析引论[M]. 北京: 科学出版社, 2001, 1—7.

## Synchronous Effect of Slipping Heavy Loads on a Ro\_Ro Ship Rolling in Waves

ZHANG Yin\_long<sup>1</sup>, SHEN Qing<sup>2</sup>, CHEN Xu\_jun<sup>2</sup>

(1. Second Engineers Scientific Research Institute of the General Armaments Department,  
Beijing 100036, P. R. China;

2. Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science and Technology,  
Nanjing 210007, P. R. China)

**Abstract:** Common effect of wave and slip of internal vehicles will make rolling of the roll\_on ship serious. This is one of the important reasons for overturn of ro\_ro ships. The multibody system with a floating base is composed of ro\_ro ship and slipping vehicles. The rolling angle of the ship and the transverse displacements of the slipping vehicles on desk are taken as freedoms. Making use of the analysis of apparent gravitation and apparent buoyancy, the wave rolling moment is derived. By means of dynamic method of multibody system, dynamic equations of the system are established. Taking a certain channel ferry as an example, a set of numerical calculation have been carried out for rolling response of the multibody system with a floating base of a ro\_ro ship and displacements response of the slipping vehicles under common effect of free slipping vehicles and wave, and a conclusion has been drawn that the motion of the numerous free slipping heavy loads will trend to be synchronous under restraining of the side\_wall bulkhead with time because of repeated collision.

**Key words:** Ro\_Ro ship; slipping heavy loads; floating base; multibody system; synchronous effect; dynamics