

文章编号: 1000-5013( 2010)01-0069-05

# 强风作用下港口集装箱群干扰效应的数值模拟

张春晖, 孙 伟, 彭兴黔

( 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021 )

摘要: 数值模拟港口集装箱群在强风作用下的倾覆干扰效应, 分析集装箱群的倾覆临界风速干扰因子随集装箱堆放的排数、间距和层数变化的规律, 并比较两堆和三堆集装箱的干扰因子. 结果表明, 集装箱堆局部集装箱的倾覆临界风速要比集装箱堆整体倾覆临界风速要小; 随着层高的增加, 各堆集装箱群的倾覆临界风速均相应的减小; 随着排数的增加, 各堆集装箱群的倾覆临界风速均相应的增大; 随着间距的增加, 各堆集装箱群的倾覆临界风速逐渐接近于单堆集装箱群.

关键词: 集装箱群; 倾覆; 数值模拟; 干扰因子

中图分类号: U 169. 65; P 435<sup>+</sup> . 1

文献标识码: A

集装箱堆场是受台风灾害破坏较为严重的地方, 台风灾害经常造成集装箱起重机吹倒滑落和集装箱吹落掀倒. 1999 年 9 月 9 日, 广东湛江港遭受台风袭击, 造成 16 台大型起重机械被毁. 2003 年 9 月 2 日, 台风“ 杜鹃” 正面登陆广东深圳, 登陆时中心最大风力为 12 级, 赤湾港的 7 个空集装箱被吹落, 盐田港货柜码头的 200 个集装箱被吹落毁坏. 国内外对结构的抗风研究做了许多工作, 也取得了许多成果, 但已有的研究主要是偏重于房屋结构、桥梁结构等方面, 对港口集装箱在台风作用下的破坏研究尚未见报道. 鉴于此, 本文对港口集装箱群在强风作用下的倾覆干扰效应进行数值模拟及分析.

## 1 集装箱倾覆分析原理<sup>[1]</sup>

集装箱体受力和风向角, 如图 1 所示. 集装箱在强台风作用下保持稳定必须满足以下两个条件:

- (1) 横向风力必须小于集装箱的最大静摩擦力;
- (2) 风压作用于其中一条边的弯矩小于重力作用于该边的弯矩. 由此可得出风力计算公式为

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leqslant (G + F_z) \mu, \tag{1}$$

$$F_y \cdot \frac{h}{2} + M_x \pm (G - F_z) \frac{b}{2} \leqslant 0, \tag{2}$$

$$F_x \cdot \frac{h}{2} - M_y \pm (G - F_z) \frac{a}{2} \leqslant 0 \tag{3}$$

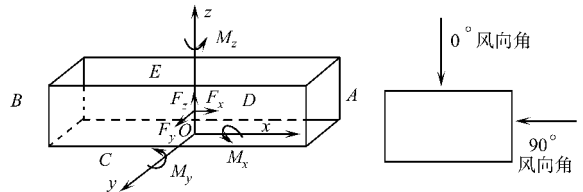


图 1 集装箱体受力及风向角

Fig. 1 Forces of container and wind angles

式(1)~(3)中:  $p(x, y, z)$  为点  $(x, y, z)$  的风压;  $F_x, F_y, F_z$  分别为风力作用下集装箱受到的  $x, y, z$  方向的集中力;  $M_x, M_y, M_z$  分别为风力作用下, 集装箱受到的围绕  $x, y, z$  轴方向的弯矩;  $\mu$  为集装箱的最大静摩擦系数, 一般取 0. 74;  $G$  为集装箱质量;  $a, b, h$  分别为集装箱的长度、宽度和高, 选用比较国际上常见的, 尺寸为 11. 8 m  $\times$  2. 13 m  $\times$  2. 72 m 的高柜集装箱, 质量为 224. 1 t. 令

$$M_x = F_y \cdot \frac{h}{2} + M_x \pm F_z \cdot \frac{b}{2},$$

收稿日期: 2009- 03- 14

通信作者: 彭兴黔( 1959- ), 男, 教授, 主要从事结构抗风的研究. E- mail: pxq@ hqu. edu. cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 50708040); 福建省科技重大专项基金资助项目( 2005YZ1016); 厦门市发改委科技基金资助项目( 2008- 70)

$$M_y = F_x \cdot \frac{h}{2} - M_y \pm F_z \cdot \frac{b}{2},$$

$$F_L = (\sqrt{F_x^2 + F_y^2}) / \mu - F_z.$$

为了便于比较, 将横向力系数, 绕  $x$  轴、 $y$  轴的倾覆力矩系数分别表示为

$$\mu_L = \frac{F_L}{1/2 \rho v^2}, \quad \mu_x = \frac{M_x}{1/2 \rho v^2 H}, \quad \mu_y = \frac{M_y}{1/2 \rho v^2 H}. \quad (4)$$

把式(4)分别代入式(1)~(3), 可求出临界风速为

$$v_p = \min\{v_L, v_x, v_y\}, \quad (5)$$

$$v_L = \sqrt{\frac{2G}{\rho \mu_L}}, \quad v_x = \sqrt{\frac{G \cdot b}{\rho H \mu_x}}, \quad v_y = \sqrt{\frac{G \cdot a}{\rho H \mu_y}}. \quad (6)$$

上式中:  $\rho$  为空气密度(25 °C 时空气密度取  $1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $v$  为参考点风速,  $H$  为参考高度,  $v_L$  为横向力使集装箱失稳的临界风速,  $v_x$  为绕  $x$  轴倾覆力矩使集装箱失稳的临界风速,  $v_y$  为绕  $y$  轴倾覆力矩使集装箱失稳的临界风速. 计算表明,  $v_L > v_x > v_y$ , 即表明绕长边方向倾覆的临界速度最小.

以上分析是基于单堆集装箱的单个集装箱在台风作用下倾覆失稳临界风速. 同样, 也可以得到整堆集装箱的整体倾覆临界风速. 计算结果发现, 角部单个集装箱局部稳定性明显要低于整体的稳定性. 因此, 以下所讨论的干扰效应中, 临界风速均为集装箱堆局部失稳时的临界风速.

## 2 数值风洞模拟

### 2.1 基本方程及湍流模型

由于群体建筑间存在相互气流干扰, 风场存在着强各向异性流动<sup>[2]</sup>, 因而采用  $k-\varepsilon$  RNG 湍流模型<sup>[3-5]</sup>. 气流流动控制方程的通用形式<sup>[3]</sup> 为

$$\frac{\partial(\rho \Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \Phi \mathbf{v}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \Phi) - S. \quad (7)$$

式中: 各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项,  $\Phi$  为通用变量,  $\Gamma$  为广义扩散系数,  $S$  为广义源项.

### 2.2 边界条件设定<sup>[6-7]</sup>

(1) 入口. 模拟大气边界层风速剖面指数分布, 即  $v(z) = v_0(z/z_0)^a$ . 其中:  $z_0 = 1 \text{ m}$ ,  $v_0 = 6.97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , A 类风场取  $a$  为 0.12. (2) 出口. 由于出流接近完全发展, 采用完全发展出流边界条件. (3) 流域顶部和两侧采用对称边界条件, 等价于自由滑移的壁面; 建筑模型表面和地面采用无滑移的壁面条件.

### 2.3 计算网格

为适应群体建筑的体型要求, 采用了具有良好适应性的四面体离散单元. 模型附近网格小, 分布密集, 而远离模型的地方网格较大, 分布稀疏<sup>[8]</sup>, 总计产生约 100 万个体单元.

## 3 计算及分析

干扰的程度受诸多因素影响, 干扰效应的量化一般用干扰因子表示. 因此, 以干扰因子来定量描述群集装箱群的干扰效应, 即干扰因子  $I = v_{\min, I} / v_{\min, A}$ <sup>[9-11]</sup>. 其中:  $v_{\min, I}$ ,  $v_{\min, A}$  分别为多个集装箱堆场时和单个集装箱堆场时的临界风速. 单堆集装箱的层数、排数与多堆集装箱中各堆的排数、层数是一样.

### 3.1 不同工况下两堆集装箱群的干扰因子

两堆集装箱的第 2 堆处在上风向, 对第 1 堆集装箱产生遮挡效应, 其临界风速要比第 1 堆小. 所以, 选取的干扰因子均为第 2 堆的. 不同工况下, 两堆集装箱群的干扰因子, 如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 干扰因子均小于 1, 即两堆时的倾覆临界速度小于单堆的, 且不利方向角均为  $0^\circ$  风向角. 究其原因, 该风向角下, 两堆形成的狭管效应使得背风面上吸力增大.

3.1.1 层高 各种间距工况下, 干扰因子都随着层高( $n$ ) 的增加有所减小, 即集装箱群的倾覆临界风速随着层高的增加而减小, 干扰趋于明显, 第 6 层以上减小缓慢.

3.1.2 排数 当间距( $d$ ) 为 0.6 m 时, 第 12 排的干扰因子最大, 第 1 排的干扰因子次之, 第 2, 4, 8 排的干扰因子比较接近, 第 12 排的临界速度最接近单堆的临界风速. 当间距( $d$ ) 为 3, 6, 10 m 时, 随着排数

( $m$ ) 增加, 干扰因子增大, 但均小于 1, 集装箱群的倾覆临界风速越接近单堆集装箱的临界风速. 究其原因, 随着排数的增加, 减缓了风在背风面与侧风面的分离, 使得背风面上吸力减小. 因而, 倾覆临界风速增大, 干扰因子增大, 但与单堆相比, 背风面上吸力还是要大.

3.1.3 间距 随着间距( $d$ )的增加, 狭管效应减弱<sup>[12]</sup>, 第 2, 4, 8, 12 排的干扰因子均相应的增大, 说明间距增大, 干扰趋于不明显, 接近单堆集装箱情况.

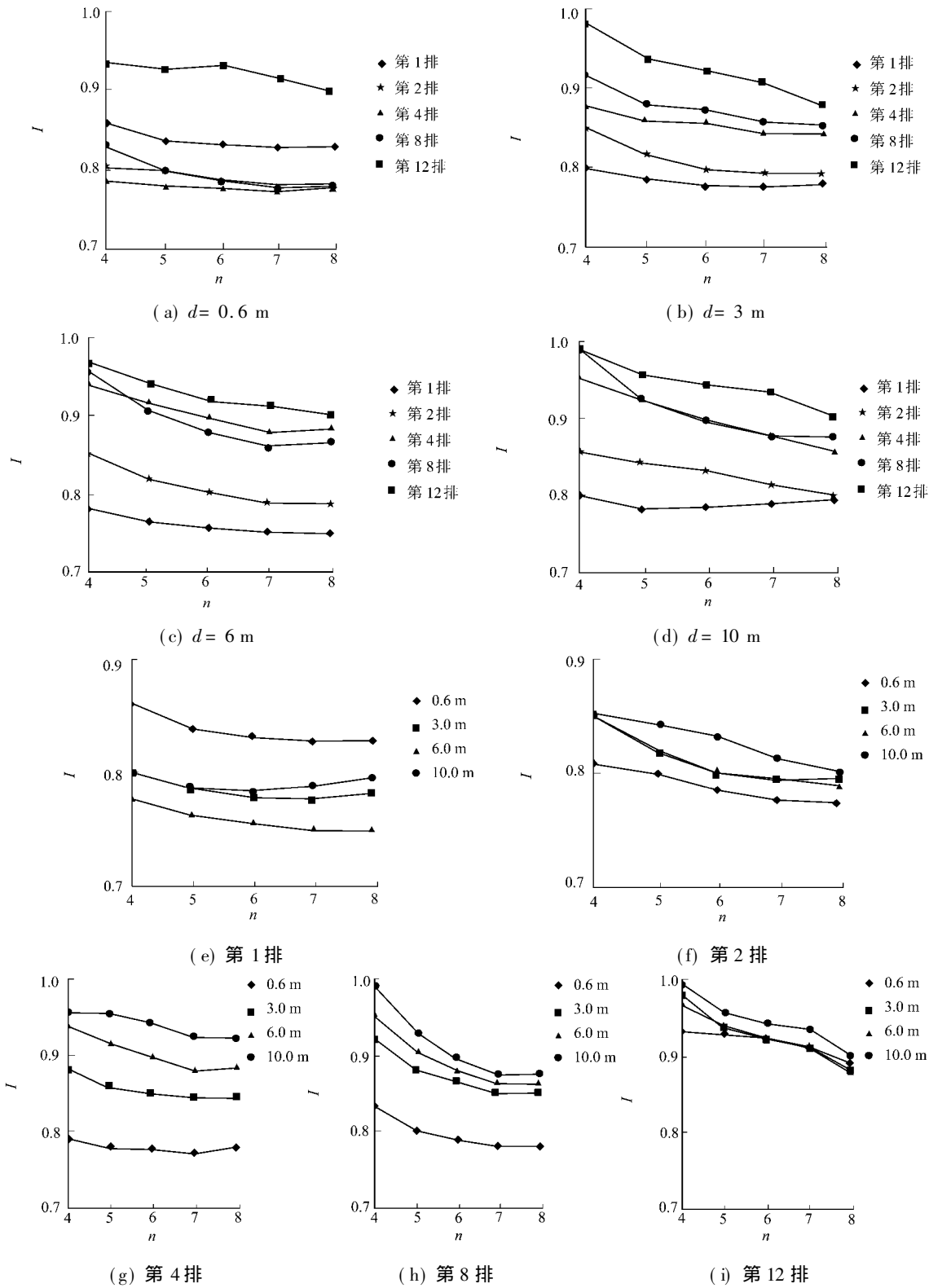


图 2 不同工况下两堆集装箱群的干扰因子

Fig. 2 Interference factors of 2-pile container group under different conditions

3.2 不同工况下三堆集装箱群的干扰因子

不同工况下,三堆集装箱群的干扰因子,如图 3 所示. 图 3 中的间距均取为 0.6 m.

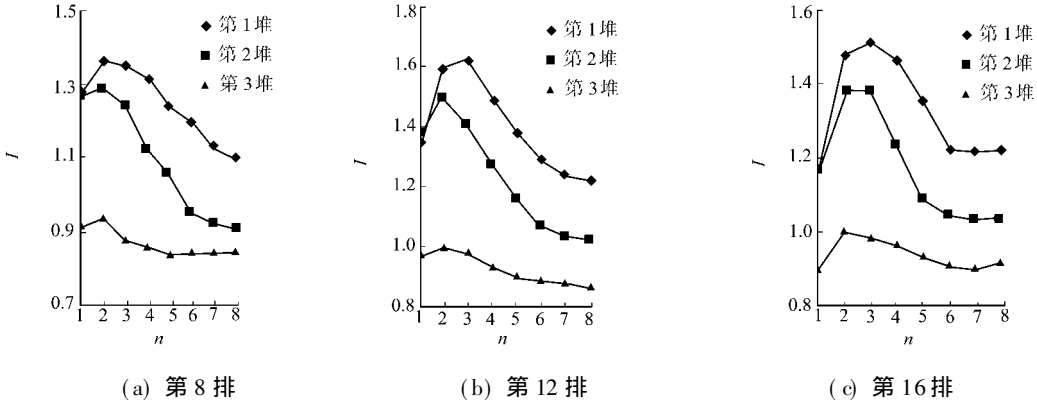


图 3 不同工况下三堆集装箱群干扰因子

Fig. 3 Interference factors of 3 pile container group under different conditions

从图 3 可以看出,对于第 8 排,第 1 堆的干扰因子最大,第 3 堆的干扰因子最小,即第 1 堆的临界风速>第 2 堆的临界风速>第 3 堆的临界风速. 究其原因,处于上风向的集装箱堆对处于下风向的集装箱堆有明显的遮挡效应. 第 1 堆在所有工况下,其干扰因子均大于 1,即临界风速大于单堆集装箱的临界风速. 第 1 层到第 2 层的干扰因子有上升的趋势,两层以上干扰因子随着层高的增加而减小,6 层以上减小趋于平缓. 第 2 堆的变化规律与第 1 堆的很相似,6 层以后的干扰因子小于 1. 第 3 堆的干扰因子均小于 1,这是不利的干扰,要引起注意.

对于第 12 排,第 1 堆和第 2 堆在所有工况下的干扰因子均大于 1,第 1 层到第 3 层的干扰因子有上升的趋势,3 层以后的干扰因子随着层高的增加而减小;第 3 堆的干扰因子变化规律与第 8 排时的情况非常相似. 第 16 排的干扰情况与第 12 排类似,可以看出,变化规律与两堆的很相似. 3 堆集装箱群的临界风速干扰因子随着排数、间距的变化规律与两堆的也相似,不再详述.

3.3 不同堆集装箱群的干扰效应

为了全面分析三堆集装箱群在强风作用下的倾覆干扰效应,分别对各堆集装箱进行单独分析,结果如图 4 所示.

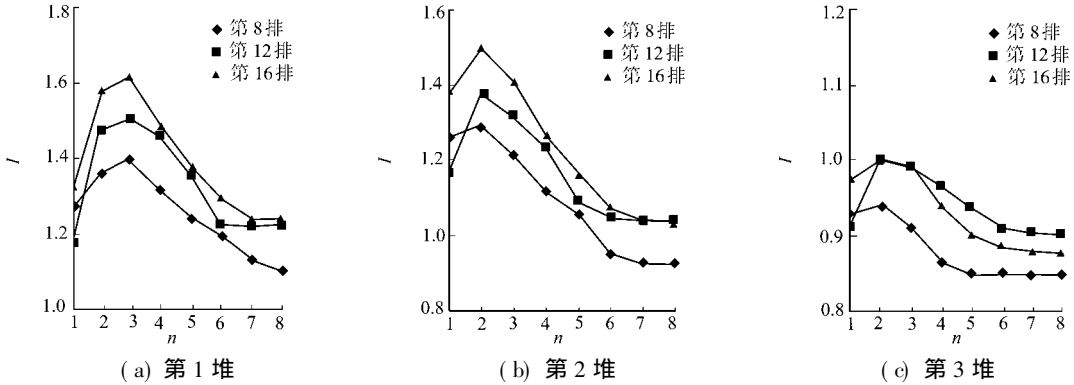


图 4 不同堆集装箱群的干扰效应

Fig. 4 Interference effect of different container pile groups

(1) 第 1 堆集装箱位于下风向. 从图 4(a) 可看出,所有的干扰因子均大于 1,其上集装箱倾覆临界速度均大于单堆集装箱临界速度. 在相同层高的情况下,堆放的排数越多,其干扰效应表现得越明显. 在相同排数的情况下,3 层以下,随着层数的增加,干扰因子均上升,而在 3 层以上,干扰因子均在减小.

(2) 第 2 堆集装箱位于 3 个集装箱堆中间,排数不同,其干扰效应也有所不同. 从图 4(b) 可看出,第 16, 12 排的干扰因子均大于 1,表现出遮挡效应<sup>[13]</sup>,其临界速度均大于单堆集装箱;第 8 排的 5 层以上的干扰因子小于 1,临界速度小于单堆集装箱,出现不利的干扰效应;总体的变化规律与第 1 堆集装箱的相似.

第3堆集装箱位于上风向。从图4(c)可看出, 总体上干扰因子均小于1, 表现出不利的干扰效应。两层以后的干扰因子随着层高的增加而减小, 6层以上的干扰因子减小趋势平缓, 受层高影响不明显。

## 4 结束语

本文仅对港口集装箱群在强风作用下的倾覆干扰效应进行了数值模拟及分析。相应的结论可为港口码头集装箱群的堆放布局优化, 以及进一步大堆场集装箱群的抗台风研究提供一定的参考。后期的工作可以结合风洞实验再做进一步的研究探讨。

### 参考文献:

- [1] 赵青春, 彭兴黔, 乔常贵, 等. 港口集装箱强风作用下的抗倾覆计算[J]. 郑州轻工业学报: 自然科学版, 2008, 23(4): 59-63.
- [2] 李万平. 计算流体力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004: 58-59.
- [3] 杨伟, 黄鹏, 顾明. 高层建筑风致静力干扰效应的试验和数值研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(2): 152-156.
- [4] MURAKAMI S, MOCHIADA A. 3-D numerical simulation of air flow around a cubic model by means of the  $k\epsilon$  model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 31(2): 283-303.
- [5] 周大伟. 高层建筑风压风流场稳态与大涡模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [6] 张昕, 齐辉, 肖伟, 等. 厦门国际会展中心多功能厅风压分布的数值模拟[J]. 结构工程师, 2003, 20(4): 31-36.
- [7] SAKAMOTO H, HANIU H. Aerodynamic forces acting on two square prism placed vertically in a turbulent boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988, 31(1): 41-66.
- [8] 谢壮宁, 顾明, 倪振华. 三并列方柱风荷载特性的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(3): 290-293.
- [9] 乔常贵, 彭兴黔, 赵青春. 港口集装箱群数值模拟中计算域设置的研究[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2008, 23(2): 104-107.
- [10] 谢壮宁, 顾明, 倪振华. 群体高层建筑静力干扰效应的定量分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(1): 149-152.
- [11] 谢壮宁, 顾明, 倪振华. 群体高层建筑静力干扰效应的试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 38(6): 16-22.
- [12] FERREIRA A D, SOUSA A C M, VIEGAS D X. Prediction of building interference effects on pedestrian level comfort[J]. J Wind Eng Indus Aerodyn, 2002, 90(7): 305-319.
- [13] SYKES D M. Interference effects on the response of a tall building model[J]. J Wind Eng Indus Aerodyn, 1983, 11(1): 365-380.

## Numerical Simulation of Interference Effects on the Port Container Groups under Strong Wind

ZHANG Chunhui, SUN Wei, PENG Xingqian

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The overturning interference effect on port container groups under strong wind is simulated numerically. The variation of the overturning critical wind velocity interference factor of container groups to the number of rows, spacing and layers is analyzed. The comparison of interference factor between 2 pile container group and 3 pile is carried out. The results indicate that the overturning critical wind velocity of local container in container pile is lower than the velocity of container pile as a whole. The overturning critical wind velocity of each container group decreases with the increase of the layers, but increases with the increase of the row number, closes to the single container group with the increase of spacing.

**Keywords:** container groups; overturning; numerical simulation; interference factor

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)