



# 超深水铺排作业计算方法与结果分析

周涛, 何炎平, 黄超, 孟龙, 赵永生

(上海交通大学高新船舶与深海开发装备协同创新中心,  
上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

**摘要:** 基于非线性有限元软件 ABAQUS, 对超深水铺排作业时排体所受水水力进行模拟计算, 给出了简化公式。对翻板端软体排所受水平力及垂直力进行比较分析, 结果表明在工程实际中可以使用该简化公式对水平力进行估算以及使用软体排重力与浮力之差对垂直力进行估算, 此外垂直力引起的横倾角需要在铺排过程中调整压载。

**关键词:** 铺排船; 软体排; 有限元; 水水力

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0156-06

## Calculation method and result analysis of mattress' s laying in ultra-deep water

ZHOU Tao, HE Yan-ping, HUANG Chao, MENG Long, ZHAO Yong-sheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering,

Collaborative Innovation Center of Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Based on the nonlinear finite element software ABAQUS, we analyze the current force of mattress in ultra-deepwater and give the simplified formula. Comparing the horizontal force and vertical force at the end of the platform trap door, we obtain the results that the horizontal force can be estimated by the simplified formula and the vertical force can be reckoned by the difference between the gravity and buoyancy of mattress in the engineering application. In addition, it is necessary to adjust the ship ballasts in the process of the geotextiles-laying to balance the hell angle caused by the vertical force.

**Keywords:** geotextile-laying vessel; flexible mattress; finite element; current force

长期的实践证明, 在航道整治工程中, 土工布织物是对于防止水流冲刷以保护河床最常用而且也是最有效的保护结构。由于土工布软体排价格低廉、整体性较好, 现已广泛应用于护岸、护底等工程, 能有效防止河床因水流冲刷而导致的变形问题。尤其是在长江南京以下 12.5 m 深水航道整治工程中, 铺排船的应用已经非常广泛。软体排受力情况与软体排的铺设以及铺排船的强度直接相关, 因此需要对排体受力进行预计。在铺排过程中, 如果排体受力过大会导致铺排设备损

毁甚至是铺排船翻沉。

朱宪武<sup>[1]</sup>结合长江口深水航道治理工程, 介绍了混合联锁块软体排的设计与计算。张景明等<sup>[2]</sup>进行室内模型试验, 分别对软体排在静水和动水中的受力进行测定, 分析排体在沉放过程中的受力情况。刘颖等<sup>[3]</sup>利用非线性有限元软件对排体在静水沉放过程中的受力情况进行分析, 结果表明沿排体宽度方向受力并不均匀。袁立莎等<sup>[4]</sup>通过对沉排过程中软体排的受力状态进行有限元分析, 提出移船距离与排体所受水流力的关

收稿日期: 2015-12-06

作者简介: 周涛 (1993—), 男, 硕士研究生, 从事船舶与海洋结构物设计制造的研究。

系。张群<sup>[5]</sup>建立在动水中铺排船移动时的受力计算模型,并同时进行软体排受力测试试验,结果显示理论计算对现场试验和实际工程能够起到一定的预告作用。肖庆华<sup>[6]</sup>描述D型软体排在施工中的缩撕断排现象,并从受力角度研究缩撕断排机理。

总体来说,目前对于软体排受力情况的研究较少。本文采用非线性有限元软件ABAQUS,在Standard模块中建立单位宽度软体排有限元模型,利用AQUA模块<sup>[7]</sup>计算水流对软体排的作用力和浮力,得到翻板在50 m水深中的形状分布以及翻板端软体排内部所受到的水平力与垂直力。在水深度增加和水流速度增加时,目前国内缺乏有效的实践经验,为了提高实际工程中软体排的铺设效率,不考虑软体排在水中的曲线分布:1)直接使用平板莫里森公式,计算作用于翻板端软体排的水平力,将ABAQUS计算得出的水平力与平板莫里森公式计算的垂直力进行比较分析。2)直接计算软体排重力与浮力之差,得到作用于翻板端软体排的垂直力;将ABAQUS计算出来的垂直力与软体排重力与浮力之差进行比较分析。

通过上述分析,为实际工程提供一种方便快捷的计算软体排所受水流力的思路 and 方案。

## 1 软体排简介

### 1.1 两类护底软体排

软体排作护底用,一般包括混凝土联锁块软体排和砂肋软体排两种。混凝土联锁片由若干小混凝土块连接而成,国内通常采用的是每张尺寸为4 m×5 m的混凝土联锁片。在铺排船上将混凝土联锁片人工绑扎在软体排布上,以形成混凝土联锁块软体排;砂肋软体排一般是在软体排布上预制有冲砂带,在铺排船上冲灌泥沙而形成砂肋软体排。

### 1.2 混凝土联锁片相关参数

本文计算采用4 m×5 m的混凝土联锁块软体排,5 m方向沿排体铺设方向放置,4 m方向沿排

体宽度方向放置,其中包括厚度分别为12、20 cm的两种混凝土联锁块软体排,其中排头边缘5 m范围内采用20 cm厚混凝土联锁块(即长度为5 m),其它均采用12 cm混凝土联锁块。混凝土联锁块软体排排体宽度取36 m,即每排分别安放混凝土联锁片8片。表1给出0.12、0.20 m高的混凝土联锁片的相关参数。

表1 混凝土联锁片相关参数

长 <sup>①</sup> /m	宽 <sup>②</sup> /m	高/m	密度/(t/m <sup>3</sup> )	质量/t
4.00	5.00	0.12,0.20	2.35	4.63,7.36

注:①铺排时船舶长度方向;②铺排时船舶宽度方向。

## 2 载荷理论和有限元模型

一般而言,在需要铺设软体排的区域为水流速度较大的江河入海口区域。水流速度较大时,波浪的波高较小、波长较短。且由于波浪因素计算的复杂性,本文不考虑波浪的影响。

### 2.1 水流断面分布

水流一般包括潮流和风生流两部分。由于太阳、月亮对地球的引力使得水面涌起,随后引起水平方向的水流运动,这种水流运动称为潮流。潮流虽然存在季节性的变化,但总体来说以一定的方向流动<sup>[8]</sup>。铺排作业一般在内河区域,不考虑风生流。因而平均水流速度沿深度方向的变化分布可由挪威船级社(DNV)推荐的公式计算<sup>[8]</sup>:

$$v_z = v_0 \left( \frac{d-z}{d} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: $v_z$ 为水中 $z$ 处的水流速度(m/s); $v_0$ 为水表层流速(m/s); $d$ 为河床距离水面深度(m); $z$ 为水面以下深度(m); $\alpha$ 为速度分布指数,取为1/7。

### 2.2 水流力计算理论

软体排在水中受到水流力、浮力、重力作用,通过下面的计算得出翻板段软体排所受到的水平力 $F_H$ 和垂直力 $F_V$ (图1),这里取水深 $h$ 为50 m,图中右侧为取软体排一小段的受力示意图。其中浮力与重力的计算较为简单,这里只讨论水流水平力的计算。

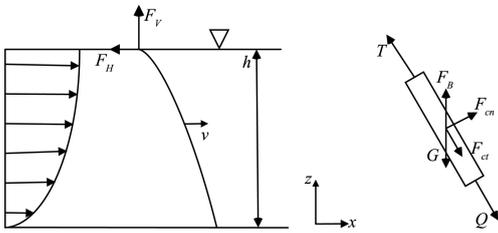


图1 软体排受力情况

采用平板莫里森公式对水平力进行简化计算。使用平板莫里森公式时，不考虑由于水流作用导致软体排飘起而产生水流与软体排不再垂直的问题。单位面积平板莫里森公式<sup>[9]</sup>如下：

$$f_h = \frac{1}{2} C_D \rho_w v^2 \quad (2)$$

式中： $f_h$  为水流对单位面积的混凝土联锁片的水平力(kN/m<sup>2</sup>)； $C_D$  为水流拖曳力系数，该值的选取并不影响最终的结论； $\rho_w$  为水的密度； $v$  为水流速度(m/s)。

### 2.3 有限元模型

实际工程中，软体排受力最大位置位于翻板端处。利用非线性有限元软件 ABAQUS，在 Standard 模块中建立单位软体排有限元模型，这里计算模型采用混凝土联锁块软体排，也可以对砂肋软体排进行计算分析。计算考虑浮力、软体排自身重力和水流作用力。坐标系采用右手坐标系， $x$  方向为水流方向， $z$  为垂向，见图 1。计算模型的边界条件为软体排前端  $y$  方向位移约束，软体排末端采用固定约束。

### 2.4 简化计算方法

水流作用将对软体排产生水平力和垂直力，其中水平力需要铺排船的锚泊定位来克服。为方便快速计算出软体排所受到的水平力和垂直力，分别作简化计算。

#### 2.4.1 水平力简化方法 1

利用公式(1)、(2)得出单位宽度软体排所受水平力简化公式：

$$F_H = \int_0^d \frac{1}{2} C_D \rho v_0^2 \left( \frac{d-z}{d} \right)^{\frac{2}{7}} dz = \frac{7}{18} C_D \rho d v_0^2 \quad (3)$$

#### 2.4.2 水平力简化方法 2

类似 2.4.1，仍然采用平板莫里森公式对水平力进行简化计算，不过为了更方便地计算水平力，取水流为均匀流，流速均为水面流速，此时水平力的简化公式即为：

$$F_H = \int_0^d \frac{1}{2} C_D \rho v_0^2 dz = \frac{1}{2} C_D \rho d v_0^2 \quad (4)$$

#### 2.4.3 垂直力简化方法

垂直力的简化方法比较简单，取零流速时悬挂于水中的软体排重力与浮力之差来简化计算垂直力。即：

$$F_V = G - F_B \quad (5)$$

## 3 计算结果与分析

### 3.1 软体排的空间形状

利用 ABAQUS 计算得出各单元节点的位移，给出在水深 50 m 时，软体排在不同流速下的空间形状，见图 2。图 3 为软体排悬挂长度随水流速度的变化，表 2 为不同流速时软体排的长度。

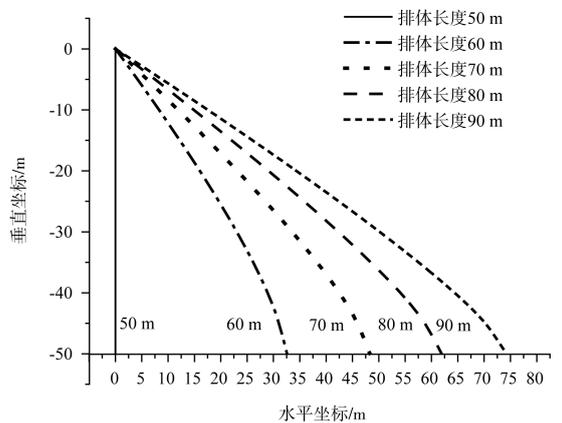


图2 软体排在不同流速下的空间形状

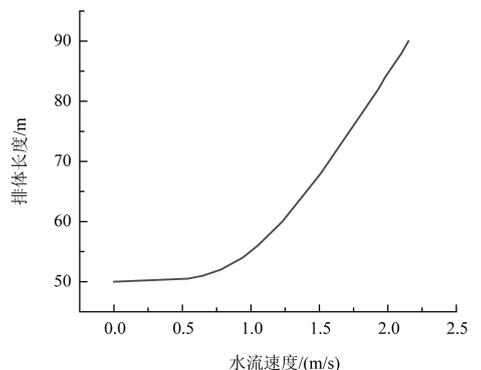


图3 排体悬挂长度随水流速度的变化

表 2 不同流速软体排长度

水流速度/(m/s)	软体排长度/m
0	50
1.23	60
1.57	70
1.87	80
2.15	90

由图 2、3 可以看出, 随着水流增加, 水中漂浮的软体排长度将增加, 当速度达到 2.15 m/s 时, 软体排在水中的悬挂长度达到 90 m。

### 3.2 软体排受力

#### 3.2.1 水平力

图 4 为利用 ABAQUS 和简化方法 1、2 计算得出的作用于软体排的水平力。

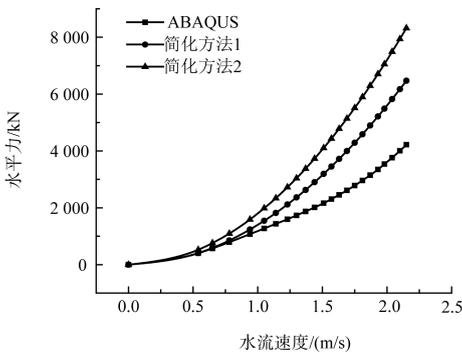


图 4 软体排所受水平力

由图 4 可以看出: 1) 随着水流增加, 翻板外端软体排拉力的水平分量增加很快, 该水平分力将需要铺排船的锚泊定位来克服; 2) 水平力由简化方法 1 给出, 水流速度较小时, 其计算结果与 ABAQUS 计算结果相差不大, 但是当水流速度超过 1.05 m/s 时, 平板莫里森公式计算出的水平力明显增大, 当速度达到 2.15 m/s 时, 其值超过 ABAQUS 计算的水平力 53.3% 之多; 3) 水平力由简化方法 2 给出, 其计算结果较 ABAQUS 计算结果更大。

#### 3.2.2 垂直力

图 5 为利用 ABAQUS 和重力浮力之差计算得出的作用于软体排的垂直力。

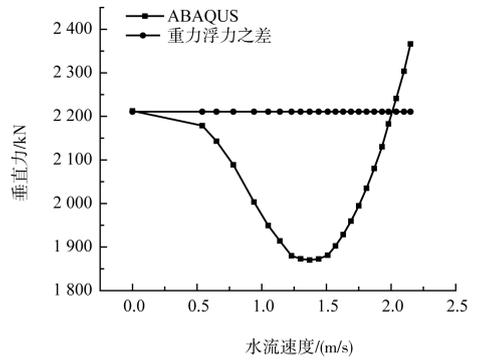


图 5 软体排所受垂直力

由图 5 可以看出: 1) 逆流铺设软体排时, 随着水流速度的增加, 垂直力减小到一定程度后将会增加; 2) ABAQUS 计算出的垂直力在速度较小时相比于重力浮力之差为小, 但当速度达到 1.98 m/s 时, ABAQUS 计算出的垂直力相比于重力浮力之差为大, 但是二者相差并不大, 水流速度为 2.15 m/s, ABAQUS 计算结果也仅比重力浮力之差大 7.03%。

## 4 铺排船安全影响分析

### 4.1 顺流、逆流铺设与分析

按照铺排船移动方向与水流方向的关系, 可分为顺流铺排和逆流铺排, 见图 6。

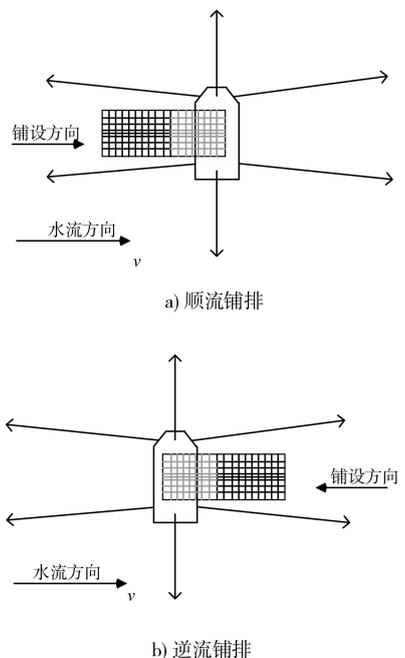


图 6 顺流和逆流两种铺排方案

对于顺流铺排和逆流铺排两种方案，其受力见图7。

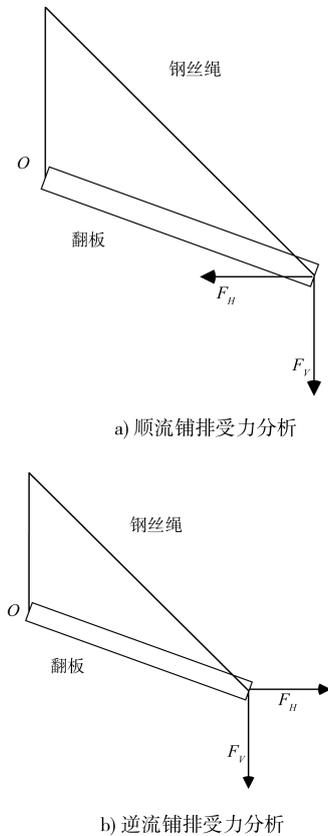


图7 两种铺排方案受力

逆流铺排时，水流作用将抬升翻板，使得翻板的钢丝绳受力减小，而顺流铺排的水流作用将下压翻板，使得翻板的钢丝绳受力增加，钢丝绳的力臂也将随之减小，而且水平力与垂直力对点O的力矩同方向，这就使得翻板的下翻力矩增大，翻板危险增加；软体排在水流作用下将产生飘移，水流速度增加时，水中软体排长度将增加，顺流铺排时会由此产生翻板钢丝绳受力增加，增加了危险。

#### 4.2 横倾角分析

垂直力会引起铺排船在铺排过程中的横倾变化，横倾角过大对铺排船的运作及安全不利。根据横倾角计算公式可以求得横倾角：

$$\tan\theta = \frac{F_V l}{GM\Delta} \quad (6)$$

式中： $\theta$ 为横倾角； $F_V$ 为翻板端软体排所受垂直力，利用ABAQUS计算结果； $l$ 为翻板端至船中距离，本计算取19.8 m； $\overline{GM}$ 为铺排船初稳性高，本计算中铺排船初稳性高为10.64 m； $\Delta$ 为铺排船排水量，这里取4 780 t。图8为铺排船横倾角随水流速度的变化。

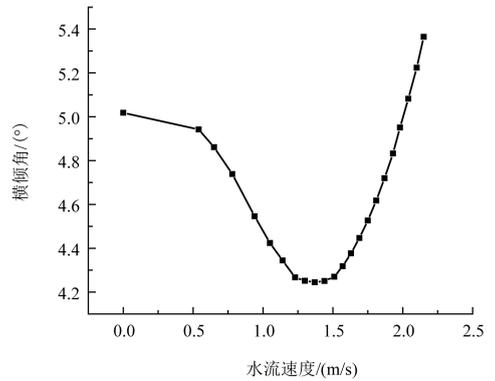


图8 横倾角随水流速度的变化

由图8可以看出，零流速时，横倾角为5.02°，随着水流速度的增大，其横倾角将减小，但是当水流速度达到1.44 m/s时，横倾角又开始增大，当水流速度达到2.15 m/s时，横倾角能达到5.36°。

#### 5 结语

1) 铺设软体排过程中，水流速度较大时，根据设备能力也可采用顺流铺设软体排的方案。不过从安全角度考虑，为了避免过大水流作用对钢丝绳及翻板产生危险，采用逆流铺设软体排更加安全。

2) 在实际铺排过程中，水流速度并不是一直不变的，但是其大小一般都小于2 m/s，因此直接使用水平力简化计算方法1可以方便快速地计算水平力，使用软体排重力与浮力之差计算垂直力，同时还能起到留有安全余量的作用，便于快速确定施工方案。

3) 而在实际铺排工程中，水流速度一般小于2 m/s，因此横倾角的调整以零流速为参考作适当调整。

参考文献:

[1] 朱宪武. 混凝土联锁块软体排的受力分析与计算[J]. 水运工程, 2000 (12): 21-26.

[2] 张景明, 严之菲. 软体排深水沉放结构受力试验分析[J]. 水运工程, 2002(10): 34-35.

[3] 刘颖, 杨平. 软体排沉排受力分析与非线性有限元计算[J]. 船海工程, 2011, 40(3): 52-55.

[4] 袁立莎, 马燕. 联锁块软体排深水沉排受力的线性有限元分析[J]. 水运工程, 2013 (3): 11-14.

[5] 张群. 软体排顺水流施工受力分析与实船测试研究[J].

武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2014, 38(3): 619-622.

[6] 肖庆华, 潘美元, 雷国平, 等. D 型软体排沉排施工中伸缩断排机理[J]. 水运工程, 2015 (1): 200-203.

[7] Systèmes D. Abaqus analysis user's manual[R]. USA, RI: Simulia Corp Providence, 2007.

[8] 李润培, 王志农. 海洋平台强度分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.

[9] DNV-RP-C205. Environmental Conditions and Environmental Loads[M]. [s.n.]: Det Norske Veritas, 2014.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 124 页)

参考文献:

[1] 陈益飞, 马欢欢. 超长大直径管桩在高桩码头中的应用[J]. 水运工程, 2009(8): 132-136.

[2] 许英, 徐骏, 吴兴祥. 港口工程大直径管桩竖向承载力可靠性研究[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2011(6): 5-10.

[3] 林岳. 开口管桩承载力计算方法及桩基模型研究[J]. 水运工程, 2014(8): 138-143.

[4] 孔令刚, 姜丽红, 陈仁朋, 等. 倾斜上拔荷载下挤扩支盘桩响应分析[J]. 应用力学学报, 2013(2): 228-233.

[5] 罗少锋, 杨文星. 上拔与水平力组合作用下单桩静载试验[J]. 工程勘察, 2012(6): 1-5.

[6] 周喻, 李健, 吴顺川. 上拔荷载作用下挤扩支盘桩颗粒流数值模拟[J]. 路基工程, 2011(3): 13-15.

[7] 张雁, 刘金波. 桩基手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[8] JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S].

[9] 石振明, 孔宪立. 工程地质学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 85-88.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 148 页)

3 结论

对比分析了我国规范与国外文献在碎石桩复合地基整体抗剪计算的参数取值、假设方面的差异。以港珠澳大桥香港口岸人工岛项目为例, 采用改善系数、增强系数等指标对碎石桩复合地基进行有限元分析, 对今后我国在软土地区碎石桩复合地基整体抗剪强度的计算给出了新的思路。通过计算和施工期观测分析, 证明了在土坡和地基稳定计算时, 适当考虑碎石桩承受剪切力应力集中计算方法是可行的, 为今后软土地基碎石桩设计优化打下了良好基础。

参考文献:

[1] Priebe H J. The design of vibro replacement[J]. Ground Engineering, 1995(12): 243-251.

[2] 马立仁, 张海江, 康东起. 碎石桩复合地基桩土应力比的试验研究[J]. 勘察科学技术, 2007(5): 11-13.

[3] 贺会团, 张献民, 陈涛. 一种新的桩土应力比计算公式的建立[J]. 岩土工程界, 2005(5): 35-36.

[4] 黄炳权, 黄海松. 复合地基桩土应力比的计算[J]. 工程设计与建设, 2005(3): 1-4.

[5] 韩杰, 叶书麟. 碎石桩复合地基的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1992(S1): 13-19.

(本文编辑 武亚庆)