

潮间带泥沙起动切应力现场测量装置

龚政^{1,2}, 甘全², 徐贝贝², 张茜², 赵堃², 张长宽²

(1. 河海大学江苏省海岸海洋资源开发与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为了准确获得泥沙起动参数,减小对原状土的扰动,研制了一种潮间带泥沙起动切应力现场测量装置,利用Fluent软件模拟了装置内部流场与底部切应力,确定了在底部产生均匀切应力时的内外筒最佳转速比,建立了转速与底部切应力之间的关系,探讨了装置的最佳转速比受装置尺寸的影响。结果表明,该装置的内圆筒、外圆筒、剪力环三者同向转动时可以产生较大的底部切应力。以内圆筒半径310 mm、外圆筒半径410 mm、工作水深260 mm为例,如不设置剪力环且内外圆筒同向转动,装置最佳转速比为3:1,此时底部切应力在距离轴心0.33~0.38 m范围内最为均匀;如设置剪力环且内圆筒、外圆筒、剪力环同向转动,装置最佳转速比为3:1:3,此时底部切应力在距离轴心0.33~0.40 m范围内最为均匀。底部切应力与外圆筒转速之间符合二次函数关系。

关键词:潮间带;泥沙运动;临界起动切应力;现场测量装置;最佳转速比

中图分类号:TV149.3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)03-0056-06

An in situ measurement device for sediment critical shear stress in intertidal zone//GONG Zheng^{1,2}, GAN Quan², XU Beibei², ZHANG Qian², ZHAO Kun², ZHANG Changkuan² (1. Jiangsu Key Laboratory of Coast Ocean Resources Development and Environment Security, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: An in situ measurement device for sediment critical shear stress in the intertidal zone was developed to accurately obtain the parameters of sediment incipient motion and to reduce perturbation to the undisturbed soil. The inner flow field and the bed shear stress of the device were simulated using the software Fluent. The optimal speed ratio of the inner cylinder and outer cylinder for the most uniform bed shear stress was put forward. The correlations between the rotating speed and the bed shear stress was established and the influence of the device size on the optimal speed ratio was explored. It is found that higher bed shear stress can be obtained when the inner cylinder, outer cylinder and the shear ring rotate in the same direction. A device with an inner cylinder's radius of 310 mm and an outer cylinder's radius of 410 mm operating in a water depth of 260 mm was taken as an example. When the inner cylinder and outer cylinder rotate in the same direction without a shear ring, the most uniform bed shear stress distributes in the annular area with a distance of 0.33~0.38 m from the axis, and the optimal speed ratio is 3:1. When the inner cylinder, outer cylinder and the shear ring rotate in the same direction, the most uniform bed shear stress distributes in the annular area with a distance of 0.33~0.40 m from the axis and the optimal speed ratio is 3:1:3. There is a quadratic function relation between the bed shear stress and the rotating speed of the outer cylinder.

Key words: intertidal zone; sediment movement; critical shear stress; in situ measurement device; optimal speed ratio

泥沙起动条件是泥沙运动力学中最基本的问题之一,是海岸三角洲演变^[1]、航道回淤^[2]、潮滩演变^[3]、河湖淤积^[4]等的重要影响因子,是建立潮汐河口泥沙数学模型^[3]或物理模型^[5]必须要考虑的因素。自1936年希尔兹曲线提出以来^[6],国内外学者建立了一系列泥沙起动流速公式^[6-12],但由于采

用的试验手段或测量方法不同,不同公式的计算结果差异较大。目前,泥沙起动的测量方法主要分为室内试验和现场测量。室内试验最早在长直水槽中进行^[6-7,13],但长直水槽占用空间大,用水量多,尽管设置消能设施,但出入流边界影响仍不可避免。1963年,美国麻省理工学院建立了第一个单向环形

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51620105005);国家自然科学基金(51879095)

作者简介:龚政(1975—),男,教授,博士,主要从事海岸滩涂系统演变动力机制、河口海岸水动力及泥沙运动数值模拟等研究。E-mail: gongzheng@hhu.edu.cn

水槽,后来佛罗里达大学将其改进为现在普遍使用的双向环形水槽^[14],理论上可以模拟无限长的直水槽,通过剪力环与环形槽的反向转动,可以减小二次流,使底部切应力分布较为均匀^[15-16]。因此,在长直水槽和环形水槽中进行泥沙起动试验,成为获取泥沙起动参数的重要手段。但后来的研究发现,室内试验的泥沙样本与天然状态差异较大,难以准确反映天然泥沙起动条件^[17-18],因此,开展现场泥沙起动条件的原位测试非常必要。

1970年,第一个便携式环形水槽应用于现场测量^[19],后来得到逐步改进^[20-22],虽然该环形水槽体积小、重量轻,但其内部的二次流比较显著。1989年,Moore等^[23-25]开发出了一种小而便携的测量泥沙侵蚀特性的装置CSM(cohesive strength meter),利用装置顶部的喷嘴向滩面喷射水流,并利用光学传感器感知浊度变化来判断泥沙是否起动,由于该装置用垂直水流冲刷床面,与自然状态下的水平流侵蚀床面的原理不同,因此测量结果受到质疑。此外,还有一些泥沙起动现场观测仪器,包括跑道型循环水槽^[26]、ISIS(instrument for shear stress in situ)^[27]等,但这些装置都没有能够在现场产生均匀的水平切应力,因此测量结果的准确性还有待提高。本文设计了一种潮间带泥沙起动切应力现场测量装置,对该装置内的水动力特性进行数值模拟研究,确定最佳转速比,建立起动切应力和转速之间的定量关系。

1 试验装置及试验流程

1.1 试验装置

本装置主要由3部分构成,包括底部支撑结构、上部结构和固定支架结构,如图1所示。底部支撑结构主要包括插入滩面的内金属圆筒(半径330 mm)和外金属圆筒(半径400 mm),半径330 mm的支撑内圆盘连接于内金属圆筒上,内外半径分别为400 mm和465 mm的支撑外圆环连接于外金属圆筒上,距离圆心330~400 mm之间的滩面出露。底部支

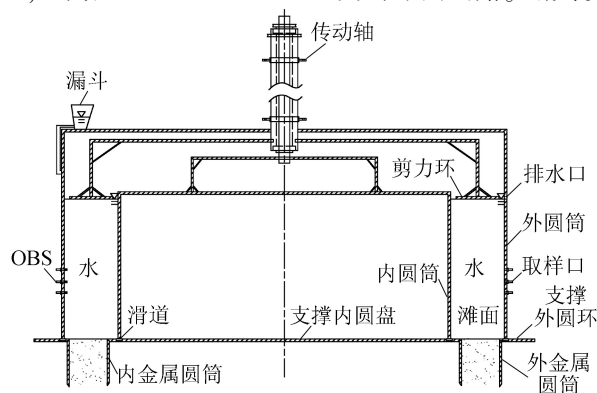


图1 试验装置示意图

撑结构用于支撑上部结构,使滩面不致产生沉降。

上部结构由内圆筒、外圆筒、剪力环、电机和传动轴组成。内圆筒和外圆筒用有机玻璃制成,分别放置于支撑内圆盘和支撑外圆环的滑道上。内圆筒外半径310 mm,高270 mm;外圆筒内半径410 mm,高400 mm。剪力环内外半径分别为320 mm和400 mm,下表面与水体表面接触,距离滩面(工作水深)260 mm。三者通过传动轴相连,由电机带动以不同速度转动。外圆筒上安装光学后向散射浊度计(optical back scattering, OBS),监测水体内浊度的变化。

固定支架结构底部插入滩面,顶部连接上部结构,将上部结构重量传至滩面,并保持装置在工作过程中的整体稳定。

1.2 试验流程

使用装置前,先确定最佳转速比,并建立底部切应力与转速之间的关系;现场测量选择在低潮位时期潮间带露滩时进行,先在研究区域选定较为平整的测量区域,依次安放好底部支撑结构、上部结构、固定支架;通过漏斗向装置内缓慢加水至排水口有水流出(图1);开启电机,使内圆筒、外圆筒、剪力环按照最佳转速比转动,并使转速逐级增大,每级转速保持几分钟;当OBS电流值明显增大时,认为此时泥沙已经起动;利用率定的底部切应力与转速之间的关系,得到泥沙起动切应力。

2 试验装置水动力模型

采用内、外圆筒和剪力环的合理旋转方式,在近底层产生均匀的切应力分布,是试验装置研究成败的关键。本文通过数值模拟的方法,寻求该装置的最佳转速比,建立底部切应力和转速之间的关系。

2.1 控制方程

考虑到模型研究区域为旋转轴对称的圆环柱,为了减小计算量,采用Ansys Fluent软件中的二维旋转轴对称模型^[28],相应的连续方程和动量方程^[29]如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_r v_x)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \eta \mu \left[2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{V}) \right] \right\} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\eta \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v_r)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_x v_r)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_r v_r)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \eta \mu \left[2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{V}) \right] \right\} -$$

$$2\mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \mathbf{V}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_r v_z)}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left(r \mu \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_z}{r} \right) \right] - \rho \frac{v_r v_z}{r} \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度(液态水密度取 998.2 kg/m^3); t 为时间; v_x 、 v_r 、 v_z 分别为轴向(x 方向)、径向(r 方向)、旋转方向(z 方向)的流速; $\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r}$; p 为流体微元所受的压力; μ 为分子黏性系数; F_x 、 F_r 分别为流体微元所受 x 方向、 r 方向外力。

湍流模型选用标准 $k-\varepsilon$ 模型,其中,湍动能 k 输运方程和湍流耗散率 ε 输运方程分别为

$$\rho \frac{dk}{dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{2\varepsilon} G_b) - C_{3\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: $i, j = 1, 2, 3$; x_i 代表空间直角坐标系的 3 个方向; u_i 为 x_i 方向上的速度分量; μ_t 为紊流黏性系数, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$, $C_\mu = 0.09$; σ_ε 、 σ_k 分别为耗散率和湍动能对应的普朗特数, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $\sigma_k = 1.0$; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能产生项, $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$, u'_i 、 u'_j 分别为 x_i 、 x_j 方向上的脉动流速; G_b 是由浮力影响引起的湍动能产生项, $G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{P_n} \frac{\partial T}{\partial x_i}$, β 为热膨胀系数, g_i 为 x_i 方向上的流体微元体积力分量, P_n 为能量的湍流普朗特数, $P_n = 0.85$, T 为温度; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{3\varepsilon} = 1.92$; $C_{2\varepsilon}$ 为浮力对耗散率的影响。

2.2 模型构建

由于本模型采用二维旋转轴对称模型,因此其计算域是宽 100 mm 、高 260 mm 的矩形。边界为矩形的 4 条边,分别为内圆筒、滩面、外圆筒、剪力环。当有剪力环时,4 个边界都设置为不可滑移光滑壁面边界;当无剪力环时,上部边界设置为与空气接触的自由液面,其他边界设置为不可滑移光滑壁面边界。由于壁面附近存在较大的流速梯度,需要提高网格分辨率,因此在固体壁面附近设置边界层加密网格。边界层第一个网格点距离边缘 0.3 mm ,网格尺寸放大因子(垂直边界方向)为 1.1 ,边界层网格数为 13 ,其他网格长度为 1 mm 。近壁面流动采用增强壁面处理^[28]。方程离散时动量、湍动能 k 、湍流耗散率 ε 用二阶迎风格式;求解时采用基于压力的求

解器,并使用收敛快的 SIMPLEC 算法^[28]。

2.3 模型验证

Gharabaghi 等^[30]在加拿大国家环形水槽进行了试验,利用 Preston 管测得底部摩擦流速分布,根据环形水槽的不同转速(剪力环与环形槽反向转动,转速比为 1.17)共测得 6 组试验数据。为了验证采用的数学模型能否准确模拟底部切应力的分布,本文建立了 Gharabaghi 等^[30]环形水槽的水动力数学模型,各组次的摩擦流速验证结果如图 2(图中转速为环形槽转速)。模拟结果表明,随着转速增大,底部摩擦流速增大,总体趋势合理;随着转速增大,模拟值逐步大于实测值,但最大相对误差小于 5% ,表明该数学模型可以较为准确地模拟环形水槽内的底部切应力分布。

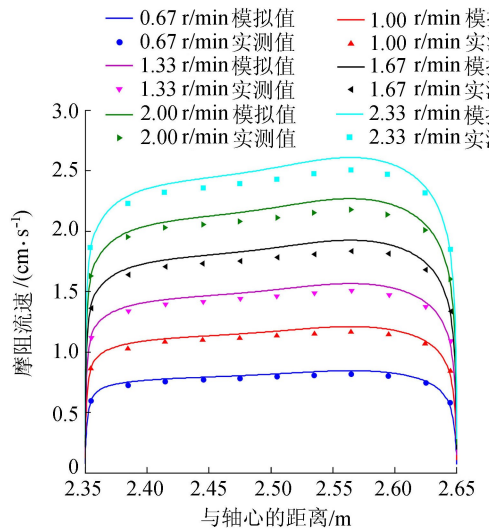


图 2 底部摩擦流速验证

3 试验装置使用方法

3.1 内外筒和剪力环最佳旋转方向

现行的室内环形水槽大多是通过剪力环与环形槽(由内外筒和底部构成)的反向转动来减小二次流,并采用最佳转速比使得底部切应力分布最为均匀。与其不同的是,本装置只有内外筒和剪力环与水体接触,水体在底部直接与滩面接触。设内圆筒转速为 n_1 ,外圆筒转速为 n_2 ,剪力环转速为 n_3 ,距离轴心 360 mm 处(内外圆筒中间点)的底部切应力为 τ 。本文试算了 $n_3 = 30 \text{ r/min}$, n_1 和 n_2 分别从 -30 r/min (负号表示反向转动)变化到 30 r/min 的情况下内外圆筒中间点底部切应力大小,如表 1 所示。

由表 1 可见,当内外圆筒与剪力环反向转动时,底部切应力较小;当三者同向转动时,底部切应力较大。考虑到该装置在最佳转速比下除了底部切应力应当足够均匀外,切应力的量值也应该尽量大,使得底部泥沙能够起动。因此,该装置应通过内外筒和

表1 剪力环转速为 30 r/min 时内外筒不同转速组合下
内外圆筒中间点底部切应力

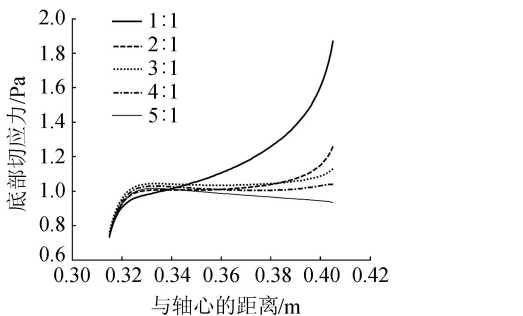
$n_2/$ ($r \cdot$ min^{-1})	τ/Pa						
	$n_1 =$ -30 r/min	$n_1 =$ -20 r/min	$n_1 =$ -10 r/min	$n_1 =$ 0	$n_1 =$ 10 r/min	$n_1 =$ 20 r/min	$n_1 =$ 30 r/min
-30	0.413	0.407	0.364	0.328	0.274	0.208	0.131
-20	0.430	0.176	0.135	0.138	0.126	0.067	0.102
-10	0.499	0.227	0.037	0.042	0.047	0.100	0.207
0	0.525	0.126	0.252	0.365	0.427	0.538	0.743
10	0.095	0.296	0.550	0.820	0.988	1.093	1.331
20	0.286	0.523	0.800	1.067	1.278	1.397	1.652
30	0.643	0.944	1.276	1.568	1.824	1.939	2.121

剪力环同向转动产生较大的底部切应力,并通过调整转速比使底部切应力均匀分布。

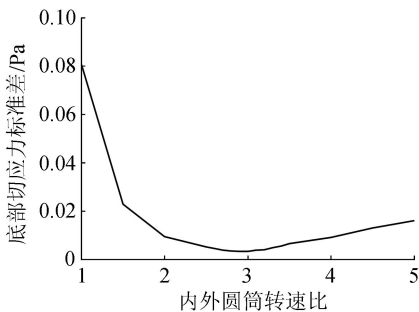
3.2 最佳转速比

3.2.1 无剪力环时的最佳转速比

首先考虑当无剪力环、仅有内外圆筒以不同转速比同向转动时底部切应力的分布。为了使不同转速比时底部切应力总体大小相差不大,规定 $n_1 + 2/3n_2 = 36.67 \text{ r/min}$ 。由于靠近内外筒壁面时底部切应力会急剧增大,因此图 3(a) 仅绘出了底部距离轴心 0.315 ~ 0.405 m 的区域内切应力分布,即忽略了距离内外圆筒壁 5 mm 以内的切应力分布。



(a) 底部切应力分布随内外筒转速比变化



(b) 底部切应力标准差随内外圆筒转速比变化

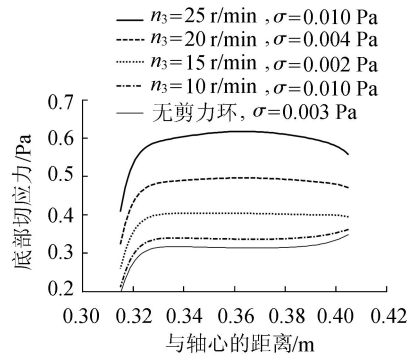
图3 无剪力环时底部切应力的分布规律

由图 3(a) 可以发现,随着内外圆筒转速比的增大,外侧底部切应力与内侧底部切应力的相对大小降低。转速比为 2 : 1 到 5 : 1 之间时,底部切应力分布在轴向距离为 0.33 ~ 0.38 m 之间较为均匀,因此,以距离轴心 0.33 ~ 0.38 m 范围的底部切应力为研究对象,计算该区域的底部切应力标准差,见图 3(b)。由图 3(b) 可见,当内外圆筒转速比为 3 : 1

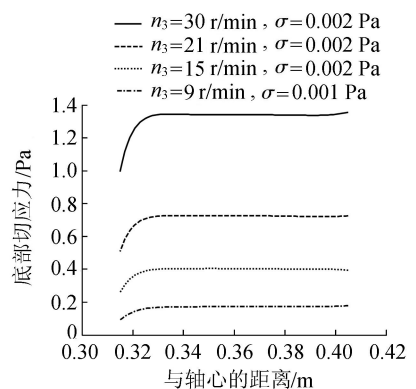
时底部切应力标准差最小,表明底部切应力分布最均匀。因此,内外圆筒转速比为 3 : 1,距离轴心 0.33 ~ 0.38 m 区域的底部切应力分布最均匀。

3.2.2 有剪力环时的最佳转速比

当内外圆筒以 3 : 1 的转速比(内圆筒转速为 15 r/min,外圆筒转速为 5 r/min)转动,剪力环以不同转速同向转动时,底部切应力随剪力环转速的变化如图 4(a),图中 σ 为底部距离轴心 0.33 ~ 0.40 m 区域的切应力标准差。由图 4(a) 可知,当剪力环转速为 15 r/min 时,底部切应力分布最为均匀,切应力均匀分布的范围从无剪力环时距离轴心 0.33 ~ 0.38 m 扩大到了 0.33 ~ 0.40 m,此时内圆筒、外圆筒、剪力环三者转速比为 3 : 1 : 3。



(a) $n_1 = 15 \text{ r/min}$, $n_2 = 5 \text{ r/min}$ 时底部切应力随剪力环转速变化



(b) $n_1 : n_2 : n_3 = 3 : 1 : 3$ 时底部切应力随剪力环转速变化

图4 有剪力环时底部切应力的分布规律

保持转速比为 3 : 1 : 3,改变剪力环转速(内、外筒转速相应调整),底部切应力分布如图 4(b),底部切应力仍然在距离轴心 0.33 ~ 0.40 m 区域保持均匀。因此,本装置设计中,距离轴心 0.33 ~ 0.40 m 范围的滩面作为泥沙起动的试验区域,其它区域采用底部支撑圆盘挡住(见图 1), $n_1 : n_2 : n_3 = 3 : 1 : 3$ 为最佳转速比。

环形水槽与直水槽不同,不可避免会存在二次流^[15]。以内圆筒、外圆筒、剪力环同向转动, $n_1 = 30 \text{ r/min}$ 、 $n_2 = 10 \text{ r/min}$ 、 $n_3 = 30 \text{ r/min}$ 为例,分析本装置以最佳转速比转动时的流场特点。图 5 显示装置内流场,图 5(b) 中流速等值线值从外向内依次为

0.1 m/s、0.2 m/s、0.3 m/s、0.4 m/s、0.5 m/s、0.6 m/s。由图 5(a) 可见, 断面内流速整体较小, 在近底水流由外侧向内侧流动, 断面内外侧近底流速小于内侧近底流速。由图 5(b) 可见, 垂直于断面的外侧近底流速大于内侧近底流速。由于底部切应力是断面内近底流速和垂直于断面的近底流速共同作用形成的, 因此两者各自导致的内外侧流速差叠加, 在装置底部形成较为均匀的切应力分布。

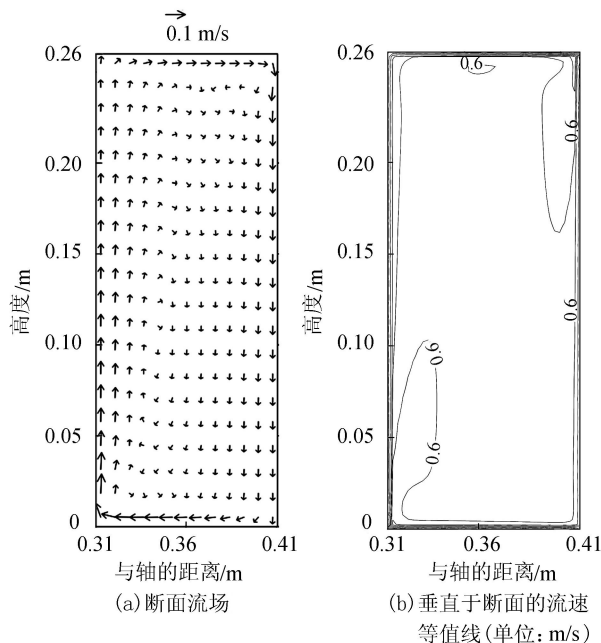


图 5 装置内流场

3.2.3 有剪力环时转速与切应力的关系

在实际使用本装置时, 需要根据泥沙起动时的转速来推求对应的泥沙起动切应力, 为此需要获得最佳转速比时转速与切应力的关系。保持试验装置转速比 $n_1 : n_2 : n_3 = 3 : 1 : 3$, 运用建立的数值模型分别模拟外圆筒转速 $n_2 = 0, 1, 2, \dots, 20$ r/min 时试验装置内外圆筒中间点处底部切应力 τ 的大小, 拟合出二者的定量关系, 见图 6。由图 6 可见, 当转速比为 $3 : 1 : 3$ 时, τ 与 n_2 的关系可以用二次函数 $\tau = 0.0106n_2^2 + 0.0303n_2 - 0.007$ 拟合, 确定系数 $R^2 \approx 1$ 。

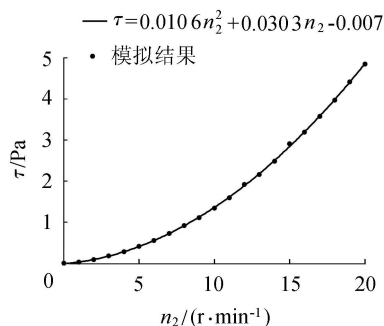


图 6 最佳转速比时外圆筒转速与底部切应力之间的关系

4 装置尺寸对最佳转速比的影响

对于无剪力环的装置, 为了研究装置尺寸对最佳转速比的影响, 设内圆筒半径 r 的范围为 $200 \text{ mm} \leq r \leq 500 \text{ mm}$, 外圆筒半径 R , 工作水深 H , 最佳内外圆筒转速比为 z_0 , $x_0 = R/r$, $y_0 = H/r$, 则最佳转速比 z_0 随 x_0 、 y_0 变化见表 2。

表 2 装置尺寸变化时内外圆筒最佳转速比

x_0	z_0						
	$y_0=0.3$	$y_0=0.5$	$y_0=0.7$	$y_0=0.9$	$y_0=1.1$	$y_0=1.3$	$y_0=2.0$
1.3	1.8	2.4	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
1.5	1.7	2.0	2.5	3.0	3.1	3.1	3.1
1.7	1.6	2.1	2.5	2.9	3.3	3.3	3.4
1.9	1.8	2.2	2.4	2.8	3.2	3.4	3.4

由表 2 可见, 当 $y_0 = 0.3$ 时, z_0 接近 1.7; 当 x_0 不变时, z_0 随着 y_0 先增大, 再保持稳定。利用该规律线性插值, 令 $t_0 = (x_0 - 1.3) / 0.2$, 则最佳转速比 z_0 近似满足:

$$z_0 = \begin{cases} 1.7 + \frac{1.3 + 0.13t_0}{0.4 + 0.2t_0}(y_0 - 0.3) & 0 < y_0 < 0.7 + 0.2t_0 \\ 3 + 0.13t_0 & y_0 \geq 0.7 + 0.2t_0 \end{cases} \quad (7)$$

为了验证经验式(7)的准确性, 选取了若干装置尺寸, 运用式(7)计算最佳转速比 z_0 , 将 z_0 与通过 3.2.1 节中方法获得的最佳转速比 z_1 进行比较, 见表 3。可以发现两种方法获得的最佳转速比较为接近, 证明该公式适用性较好。由于内圆筒、外圆筒、剪力环三者转速比变化的情况较为复杂, 经研究暂未发现有剪力环时最佳转速比与装置尺寸的定量关系式。

表 3 不同装置尺寸最佳转速比值

组合	R/mm	r/mm	H/mm	x_0	y_0	z_0	z_1
1	480	300	210	1.600	0.700	2.554	2.500
2	700	500	550	1.400	1.100	3.065	3.040
3	410	310	260	1.323	0.839	3.015	3.000

5 结论

a. 装置内、外圆筒与剪力环反向转动时, 产生的床面切应力较小, 三者同向转动时产生的底部切应力较大。

b. 当无剪力环时, 内圆筒与外圆筒同向转动转速比为 $3 : 1$ 时, 底部切应力在距轴心 $0.33 \sim 0.38 \text{ m}$ 的范围内最为均匀。当考虑同向转动的剪力环, 内圆筒、外圆筒、剪力环同向转动最佳转速比为 $3 : 1 : 3$, 底部切应力在距轴心 $0.33 \sim 0.40 \text{ m}$ 的范围内最为均匀, 底部切应力与外圆筒转速的关系近似可用二

次函数表示。

c. 对于无剪力环的装置,最佳转速比与尺寸存在定量关系。对于有剪力环的装置,最佳转速比与装置尺寸关系较为复杂,下阶段拟进一步研究。

参考文献:

[1] 孟祥梅,贾永刚,杨忠年,等. 现代黄河三角洲潮滩沉积物抗侵蚀性原位试验[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010,30(3): 39-45. (MENG Xiangmei, JIA Yonggang, YANG Zhongnian, et al. Field testing of the erodibility of tidal flat sediment in the modern yellow river delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2010, 30(3): 39-45. (in Chinese))

[2] 刘杰,程海峰,赵德招. 长江口12.5m深水航道回淤特征[J]. 水科学进展, 2014, 25(3): 358-365. (LIU Jie, CHENG Haifeng, ZHAO Dezhao. Siltation characteristics of the 12.5 m deepwater navigation channel in Yangtze estuary [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(3): 358-365. (in Chinese))

[3] 龚政,张长宽,陶建峰,等. 淤长型泥质潮滩双凸形剖面形成机制[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 212-219. (GONG Zheng, ZHANG Changkuan, TAO Jianfeng, et al. Mechanisms for the evolution of double-convex cross-shore profile over accretional mudflats [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 212-219. (in Chinese))

[4] 马菲,韩其为,赵弟明. 黏性细泥沙起动的探讨[J]. 泥沙研究, 2015(1): 75-80. (MA Fei, HAN Qiwei, ZHAO Diming. Study on the incipient of cohesive fine sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2015(1): 75-80. (in Chinese))

[5] 熊绍隆,曾剑,韩海寿. 潮汐河口泥沙物理模型若干问题探讨[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(1): 19-23. (XIONG Shaolong, ZENG Jian, HAN Haiqian. Various problems of sediment physical models of tidal estuaries [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(1): 19-23. (in Chinese))

[6] 钱宁. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社, 1983.

[7] 窦国仁. 论泥沙起动流速[J]. 水利学报, 1960(4): 46-62. (DOU Guoren. Study on incipient velocity of sediment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1960(4): 46-62. (in Chinese))

[8] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. 水利学报, 1964(2): 3-14. (TANG Cunben. Laws of sediment incipient motion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964(2): 3-14. (in Chinese))

[9] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京:中国工业出版社, 1965.

[10] 杨美卿,王桂玲. 黏性细泥沙的临界起动公式[J]. 应用基础与工程科学学报, 1995, 3(1): 99-109. (YANG Meiqing, WANG Guiling. The incipient motion

formulas for cohesive fine sediments [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 1995, 3(1): 99-109. (in Chinese))

[11] 张瑞瑾. 河流泥沙工程学[M]. 北京:水利电力出版社, 1981: 49-52.

[12] 李华国,袁美琦,张秀芹. 淤泥临界起动条件及冲刷率试验研究[J]. 水道港口, 1995(3): 20-26. (LI Huaguo, YUAN Meiqi, ZHANG Xiuqin. Study on critical motion and erosion of cohesive sediment [J]. Journal of Waterway and Harbor, 1995(3): 20-26. (in Chinese))

[13] SUNDBORG A. The River Klaralven; a study of fluvial processes [J]. Geografiska Annaler, 1956, 38(3): 238-316.

[14] 蒋睢耀,冯学英. 环形水槽在泥沙研究中的应用[J]. 水道港口, 1990(1): 27-35. (JIANG Juyao, FENG Xueying. Application of circulating flume to sediment studies [J]. Journal of Waterway and Harbor, 1990(1): 27-35. (in Chinese))

[15] BOOIJ R, UIJTTEWAAL W S J. Modelling of the flow in rotating annular flumes [J]. Engineering Turbulence Modelling and Experiments, 1999, 15(4): 339-348.

[16] 庞启秀,白玉川,杨华,等. 淤泥质浅滩泥沙临界起动切应力剖面确定[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 249-255. (PANG Qixiu, BAI Yuchuan, YANG Hua, et al. Critical stress profile for incipient sediment motion on muddy shoals [J]. Advances in Water Science, 2012, 23(2): 249-255. (in Chinese))

[17] GUST G, MORRIS M J. Erosion thresholds and entrainment rates of undisturbed in situ sediments [J]. Journal of Coastal Research, 1989, 5(5): 87-99.

[18] TOLHURST T J, BLACK K S, PATERSON D M, et al. A comparison and measurement standardisation of four in situ devices for determining the erosion shear stress of intertidal sediments [J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(10): 1397-1418.

[19] TURVILLE C M D, PEIRCE Y J, JARMAN R T. An experimental study of silt scouring [J]. Ice Proceedings, 1970, 45(2): 231-243.

[20] AMOS C L, GRANT J, DABORN G R, et al. Sea carousel; a benthic, annular flume [J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 1992, 34(6): 557-577.

[21] MAA P Y, WRIGHT L D, LEE C H, et al. Vims sea carousel; a field instrument for studying sediment transport [J]. Marine Geology, 1993, 115(3/4): 271-287.

[22] WIDDOWS J, BRINSLEY M D, BOWLEY N, et al. A benthic annular flume for in situ measurement of suspension feeding/biodeposition rates and erosion potential of intertidal cohesive sediments [J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 1998, 46(1): 27-38.

(下转第74页)