

深水养殖网箱试验中网衣相似准则的应用

李玉成¹, 桂福坤¹, 张怀慧², 关长涛³

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2. 大连水产学院, 辽宁 大连 116023; 3. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:通过分析试验相结合的方法对重力相似准则在网衣试验中的适用性进行研究。试验以在国内应用较广的田内相似准则作为参照, 分析讨论了两种相似准则的异同, 推导得出了重力相似准则结合大小尺度比在网衣模型设计中的质量校正公式及刚度校正公式。并据此按照两种相似准则, 设计了包括网衣、底杆和沉子系统的两套模型, 模型上端固定于设置了受力传感器的刚性直杆上。试验在纯流条件下进行, 分别设置5组流速, 试验水深0.8 m。各组流速重复试验3次, 受力由固定于刚性直杆上的传感器测量获得, 网衣的变形则通过系缚在网衣上的二极管的坐标确定。在进行受力分析时, 由于两相似准则的受力比尺不同, 因此必须将模型受力按照对应比尺统一转换为原型值, 同时利用受力与流速的回归关系式将模型受力校正为同一流速下的数值然后再进行比较。试验结果表明, 相同流速条件下, 两种相似准则的模型受力及变形总体上吻合较好, 说明重力相似准则在网衣试验中采用质量校正及刚度修正后同样能够得到令人满意的结果, 而且试验中模型的大尺度比达到1:20, 这无疑为涉及波浪问题的深水网箱模型试验的设计提供了保障, 从而避免了田内相似准则在深水网箱试验研究中应用的局限性。

关键词:深水网箱; 网衣; 模型试验; 相似准则

中图分类号: S872.29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8737-(2005)02-0179-09

网衣模型的设计在渔网渔具模型试验中, 包括数模和物模一直都是一个比较棘手的问题。虽然早在20世纪初就有人从事拖网网衣受力问题的研究, 也逐步提出了一系列的关于网衣模型比尺选择的相似准则, 如田内准则, 狄克逊准则及克里斯登生准则等^[1-2]。以上准则都有各自的优缺点, 如田内准则要求流速按照小尺度比尺的平方根缩小, 这样势必给实验条件的设计带来困难; 而狄克逊准则和克里斯登生准则要求网衣的模型比尺控制在1/8(狄克逊)或1/15(克里斯登生)以内, 这些准则较多地应用于尺度较大的拖网试验中^[3], 但养殖网箱试验有其特殊性, 不仅需要考虑流的作用还要考虑到波浪的作用, 模型比尺往往达到1/20或更小。在网箱试验中, 关于网衣模型的设计不同学者采用的方法不同。Fredriksson^[4]基于莫里森公式考虑水阻力系数的变化, 采用网线投影面积修正的方法对网衣模型进行设计。这一方法的不足在于水阻力系数的变化

也需要通过模型试验确定, 而水阻力系数又受到雷诺数、网线的投影面积系数及冲角等因素的影响^[5], 试验工作量大且相关关系不易确定。Pål Furset Lader^[6]则在试验中直接采用原型网衣, 而没有做任何质量或投影面积的修正。可见, 网衣模型的设计在网箱试验中确实是一个非常棘手却又必须解决的问题。目前, 国内较为常用的是田内相似准则, 本研究主要从受力及变形特性上论证重力相似准则结合网衣变尺度模型与田内相似准则在网衣试验中的一致性。所谓变尺度模型是指对于网衣的整体尺寸采用与网箱其他部件相同的模型比尺, 而对于网目大小和网线直径则采用另一较小的模型尺度, 尽量减小雷诺数的改变, 使模型处于自动模拟区, 从而保证水动力相似并使网衣模型的制作可行。这样, 可以为大尺度比达到1/20或更小, 且同时考虑波浪作用的深水网箱试验提供科学依据。

收稿日期: 2003-10-27; 修订日期: 2004-08-27。

基金项目: 国家“863”高新技术研究发展项目(2001AA623010); 国家自然科学基金资助项目(50279002); 辽宁省教育厅高教科研项目基金(20102138)。

作者简介: 李玉成(1932-), 男, 教授, 主要从事海洋工程研究。E-mail: liyuch@dlut.edu.cn

1 网衣试验的重力相似准则(亦称弗洛德相似准则)

网衣模型的相似条件一般应遵循几何相似、水阻力相似、重量相似及柔度(或刚度)相似^[1-2,7]。若严格按照弗洛德相似准则中的几何相似,则网衣的网线直径及网目大小均需要同步缩放,但在模型比尺较小的情况下,这样不仅使网衣模型的制作难以实现,也会因为网衣参数的大幅度变化而导致模型附近的水流流态的改变,从而可能严重影响试验的结果。因此对于网衣模型的设计提出了变尺度的概念和方法。单纯对于网衣来讲,控制受力的主要动力因素是水流阻力和网衣在水中的重量。而关于网衣所受的水流阻力无论是从莫里森公式还是从国内外各学者得出的经验公式来看,均与网线与水流的垂直投影面积(或网线直径与目角长度的比值 d/a)有关。这样从特种相似准则的角度来说,在满足网衣的主要动力因素相似的前提下,改变网线直径和网目大小的几何相似比尺是可能的。

对于作用在网衣上的水阻力,常用莫里森公式(单纯水流作用时不存在加速度项)^[8-10]:

$$F = \frac{\rho}{2} C_D A u^2 \quad (1)$$

式中, A 为网线的投影面积, C_D 为水阻力系数, u 为流速, ρ 为流体密度。按照重力相似(假定缩放尺度为 λ)则力的比尺应为 λ^3 , 流速 u 的比尺为 $\sqrt{\lambda}$, 因此网线投影面积 A 的比尺为 λ^2 。可见,只要使试验处于自动模拟区即可以满足动力相似条件。从这点来看,在保证模型网衣的网线投影面积相等的条件下,网线直径及目脚的模型比尺可以有多种选择,这也是重力相似条件下采用大、小尺度比的基础。

网衣的重量相似理论上也应当按照重力相似进行缩放。但由于网衣网线按照小尺度 λ' 缩放,因而必然会带来网衣模型重量上的差异,故此需要对网衣模型进行重量校正。其质量差异的计算公式推导如下:

基本参数假定:网线直径为 d (cm), 目脚长度为 a (cm), 大尺度比为 λ , 小尺度比(网线直径的原、模型比值)为 λ' , 模型网衣的缩结面积为 S (m²), 水平缩结系数为 μ_1 , 垂直缩结系数为 μ_2 , ρ 为网衣的材质密度 (g/cm³), ρ_w 为流体密度 (g/cm³), 脚标 p 表示原型, 脚标 m 表示模型。推导中涉及到的受力均以 gf 为单位。

一个原型计算网目(1节点2目脚,见图1)的体积为(忽略结节影响):

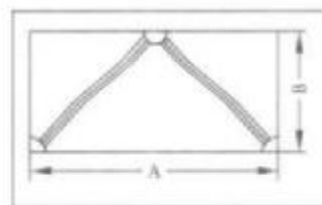


图1 计算网目示意图

Fig.1 Sketch of calculating mesh

$$V_p = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot 2a \quad (2)$$

一个按小尺度 λ' 缩放的网目的体积为:

$$V'_m = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{\lambda'} \right)^2 \cdot 2 \cdot \frac{a}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda'^3} \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot 2a = \frac{1}{\lambda'^3} V_p \quad (3)$$

一个按大尺度 λ 缩放的网目(暂称作理论模型网目)的体积为:

$$V_m = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \cdot 2 \cdot \frac{a}{\lambda} = \frac{1}{\lambda^3} V_p \quad (4)$$

试验时,使用小尺度 λ' 缩放的网衣代替理论模型网衣时,从投影面积上看,一个按小尺度 λ' 缩放的网目就相当于 $(\lambda/\lambda')^2$ 个理论模型网目。因此这 $(\lambda/\lambda')^2$ 个理论模型网目的体积为:

$$\begin{aligned} V &= (\lambda/\lambda')^2 V_m = \frac{1}{\lambda \cdot \lambda'^2} \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot 2a \\ &= \frac{1}{\lambda \cdot \lambda'^2} V_p = \frac{\lambda'}{\lambda} V'_m \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{即: } V'_m = \frac{\lambda}{\lambda'} V \quad (6)$$

可见,为了保证原、模型网衣的投影面积相等,则一个按照小尺度 λ' 缩放的网目的网线体积相当于相同面积下按照大尺度 λ 缩放的理论网目网线体积的 λ/λ' 倍。故由此带来的质量差异为:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{M} &= \rho \left(\frac{\lambda}{\lambda'} - 1 \right) \cdot V \cdot q = \rho \left(\frac{\lambda}{\lambda'} - 1 \right) \cdot \frac{\lambda'}{\lambda} V'_m \cdot q \\ &= \rho \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda} V'_m \cdot q \end{aligned} \quad (7)$$

式中, q 为网线填充率,其值大小与网线的加工工艺及材质有关。可根据网线的百米重及对应的名义直径^[11],求出其名义密度,然后将名义密度与网线的材质密度相比,得出对应的网线填充率。一般情况下,对于常用的尼龙渔网, q 为 0.768;聚乙烯渔网, q 为 0.677。

同理,浮力增加:

$$\Delta \bar{F} = \rho_w \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda} V_w q \quad (\rho_w \text{ 为水密度}) \quad (8)$$

由此可得,一个按 λ' 缩放的网目的竖向作用力增量为:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{G} &= \Delta \bar{M} - \Delta \bar{F} = \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda} (\rho - \rho_w) V_w q \\ &= \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda} \cdot \frac{1}{\lambda'^3} (\rho - \rho_w) V_w q \end{aligned} \quad (9)$$

按 λ' 缩放的网衣每平方米的网目个数为:

$$\bar{N}' = \frac{100}{2 \frac{a}{\lambda'} \mu_1} \times \frac{100}{2 \frac{a}{\lambda'} \mu_2} \times 2 = \frac{1}{2 a^2 \mu_1 \mu_2} \times \lambda'^{-2} \times 10^4 \quad (10)$$

设模型网衣的缩结面积为 S , 则按 λ' 缩放的网衣总网目个数为:

$$N' = \bar{N}' \cdot S = \frac{S}{2 a^2 \mu_1 \mu_2} \times \lambda'^{-2} \times 10^4 \quad (11)$$

由此我们即可得到按 λ' 缩放的模型网衣的竖向力总增重为:

$$\begin{aligned} \Delta G &= N' \cdot \Delta \bar{G} \\ &= \left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{1}{2 a^2 \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \cdot (\rho - \rho_w) \cdot q \cdot S \cdot V_p \end{aligned} \quad (12)$$

将式(2)代入式(12)可得:

$$\Delta G = \left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda} \right) \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4 a \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \cdot (\rho - \rho_w) \cdot q \cdot S \quad (13)$$

需要注意的是,在利用式(13)计算时, S 为模型网衣的缩结面积(m^2)。

由式(13)可知,当原、模型网衣采用同一材质,若均为尼龙网时, $\Delta G > 0$, 说明网衣模型超重,需要通过增加浮力来进行平衡;若均为聚乙烯网时, $\Delta G < 0$, 说明模型网衣偏轻,需要通过增加沉力来进行平衡。如果原、模型网衣的材质不同,则网衣的补重包括两部分:一是采用小尺度比带来的补重,二是材质差异带来的补重。对于由材质差异带来的补重,推导如下:假设 ρ_1 、 ρ_2 分别为两种网衣的材质密度, q_1 、 q_2 分别为两种网衣的网线填充率,则有:

第1种网衣每平方米原型网衣的重量为:

$$\begin{aligned} \bar{M}_1 &= (\rho_1 - \rho_w) \cdot \left(\frac{1}{2 a \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \cdot V_p \cdot q_1 \\ &= (\rho_1 - \rho_w) \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4 a \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \cdot q_1 \end{aligned} \quad (14)$$

第2种网衣每平方米原型网衣的重量为:

$$\begin{aligned} \bar{M}_2 &= (\rho_2 - \rho_w) \cdot \left(\frac{1}{2 a \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \cdot V_p \cdot q_2 \\ &= (\rho_2 - \rho_w) \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4 a \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \cdot q_2 \end{aligned} \quad (15)$$

均换为模型重量为(仍以每平方米计):

$$\bar{M}'_1 = \frac{1}{\lambda} (\rho_1 - \rho_w) \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4 a \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \cdot q_1 \quad (16)$$

$$\bar{M}'_2 = \frac{1}{\lambda} (\rho_2 - \rho_w) \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4 a \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \cdot q_2 \quad (17)$$

因此每平方米模型网衣由材质差异带来的质量差异为:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{G}' &= (\bar{M}'_1 - \bar{M}'_2) \\ &= \frac{1}{\lambda} [(\rho_1 - \rho_w) \cdot q_1 - (\rho_2 - \rho_w) \cdot q_2] \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4 a \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \end{aligned} \quad (18)$$

故此缩结面积为 S 的模型网衣由材质差异导致的质量差异可按下式计算:

$$\begin{aligned} \Delta G' &= \frac{1}{\lambda} [(\rho_1 - \rho_w) \cdot q_1 - (\rho_2 - \rho_w) \cdot q_2] \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4 a \mu_1 \mu_2} \times 10^4 \right) \cdot S \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)中,若原型网衣的材质密度为 ρ_1 , 模型网衣的材质密度为 ρ_2 , 则当 $\Delta G' > 0$ 时,说明模型网衣偏轻,模型网衣应当补重 $\Delta G'$ 。反之,则应减重 $\Delta G'$ 。结合由小尺度比带来的质量差异,由式(13)计算,即可对原、模型材质不同且采用变尺度模拟系数时的模型网衣进行竖向总力差异校正。实际对网衣模型进行质量校正时,可以考虑采用网线混编法或直接增加配重或浮力的方法来进行平衡,本实验采用的是增加配重的方法,效果较好。

网衣刚度的模拟对受力也具有一定的影响。网衣的刚度主要是指其柔挺性^①,可将网线假定为弹性杆件进行推导,其推导方法与一般杆件相同^[11],推导过程在此省略。经推导为满足网线的刚度相似,网线直径需满足以下公式:

$$\frac{d_p}{d'_m} = \lambda \cdot \sqrt[4]{\lambda' \cdot \frac{E_m}{E_p}} \quad (20)$$

式中, d_p 为原型的网线直径, d'_m 为按刚度要求缩放的网线直径; E_m 、 E_p 分别为原、模型网线的弹性模量。实际上为了保证网衣模型投影面积的相似,网线直径应该按照 $d_p/d'_m = a_p/a_m = \lambda'$ 进行缩放,两

① Gerhard Klasi 编著(钟若英译),纤维绳索[M],上海水产大学,1988。

者无法同时满足。作为近似处理,可将网线进行部分截断,如图2所示。应当指出,实际的操作可以有多种方法,并不一定要求每个网线都进行部分截断,同时还需要考虑缩放后的强度要求。在本试验中,将网衣模型沿水深分成若干片(编织时直接处理),然后将各网片利用按照公式(20)计算的 d'_m 直径的柔软细线连接。对无结节尼龙网还可以先将目脚剪断,然后利用尼龙线从中心穿过,将目脚重新连接。水动力较大的情况下,连接处有可能出现断裂,这种情况下可以适当考虑增加连线的直径。

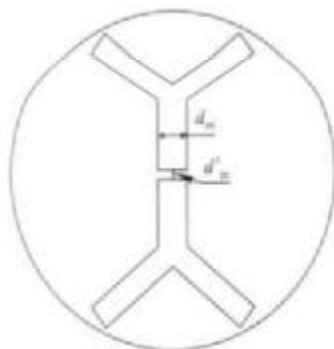


图2 网线截断示意图
Fig.2 Truncation of net line

按照以上要求,可设计出满足水动力相似条件的网衣模型,而对于小尺度的选取及网衣的材质均可以得到较满意的解决。国内比较流行采用田内相似准则对网衣进行模型设计,但由于田内相似准则的诸多限制,使得网箱试验设计尤其是考虑波浪试验条件的设计遇到困难。从以上分析可见,尽管分析的角度不同,但两种准则都可满足基本的相似原则,以下将从不同方面对这两种准则做进一步讨论。

2 莫里森公式和田内经验公式的比较

2.1 莫里森公式

在计算网衣受力时,可采用简化后的莫里森公式^[5,8]:

$$F = \frac{\rho}{2} C_D A u^2 \quad (21)$$

式中, A 为网衣与水流垂直时的网线投影面积。考虑有结节网衣时,单位面积缩结面积的网线投影面积为:

$$A = \frac{1}{\mu_1 \mu_2} \left[\frac{d}{a} - 0.73 \left(\frac{d}{a} \right)^2 \right] \quad (22)$$

忽略式(22)中右端第二项小量,并取整个网片的缩结面积为 S ,则式(21)近似写为:

$$F = \frac{\rho}{2} C_D \cdot \frac{d}{a} \cdot \frac{S}{\mu_1 \mu_2} u^2 \quad (23)$$

当取缩结系数为 $\mu_1 = \mu_2 = 0.707$ 时,则有:

$$F = \rho \cdot C_D \cdot \frac{d}{a} \cdot S \cdot u^2 \quad (24)$$

式中各符号的意义与前文相同。

2.2 田内公式

田内关于网片在单纯水流作用下的受力有如下经验公式^①:

$$F = \left[1.8 + 2\theta \left(\frac{d}{a} - 0.01 \right) \right] S \cdot u^2 \quad (25)$$

式中, α 表示目脚, θ 为冲角, S 为网衣的大尺度面积。当 $\theta = 90$ 度时,公式简化为:

$$F = 180 \frac{d}{a} S \cdot u^2 \quad (26)$$

比较式(24)和式(26),可以发现:从量纲上分析,田内公式中的180应为有量纲数,另外比较两式的系数,可得莫里森公式中水阻力系数 $C_D = 1.76$,此值与简单的圆柱形杆件的常用 C_D 值有差异^[9-10]。但仅从公式的形式上来看,两者是十分类同的。

3 重力相似准则和田内相似准则的比较

不仅田内经验公式在形式上与莫里森公式相似,而且田内关于网衣试验的相似准则的推导在原理上与莫里森公式也是相同的^②。其受力分析模型如图3所示,取单元网片分析,则按照动力相似准则有:

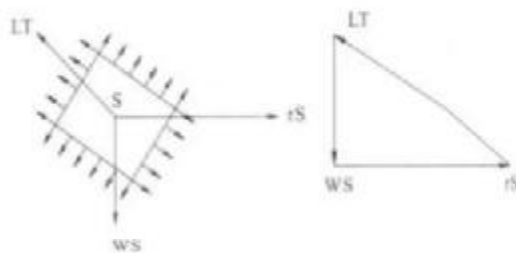


图3 网片受力分析模型

Fig.3 Force analysis model of net

① 王尔光.渔具力学[M].大连水产学院,1995.

② 王尔光.渔具力学[M].大连水产学院,1995.

$$\frac{W_1 S_1}{W_2 S_2} = \frac{r_1 S_1}{r_2 S_2} = \frac{T_1 L_1}{T_2 L_2} = \frac{F_1}{F_2} \quad (27)$$

式中,下标1表示原型,2表示模型; W 为单位面积网片在水中的重量, r 为单位面积网片的水阻力, T 为网片边缘的单位长度所受阻力。若取大小尺度分别为 λ (整体缩放比尺)和 λ' (网目及网线直径的缩放比尺),则当原、模型的试验介质和材料相同时,上式可写为(此处略去中间推导过程):

$$\lambda^2 \lambda' = \lambda^2 \frac{V_1^2}{V_2^2} = \lambda \frac{T_1}{T_2} = \frac{F_1}{F_2} \quad (28)$$

由式(28)可见,仅有网衣的重力项中含有 λ' ,即网衣在采用小尺度 λ' 来缩放网线直径和网目大小时,其水中的重量变为原型条件下的 $1/(\lambda^2 \lambda')$ 倍。而当我们设法对网衣的重量进行调整,使其满足模型条件下的网衣重量 $G_m = G_p / \lambda^3$,则此时即可以采用重力相似准则来设计其他物理量。实际上,当原型网衣为聚乙烯网,小尺度取 $\lambda' = 2$ 时,对应于常见的深水网箱试验,网衣模型的质量校正可达10 g以上,而沉子的有效重量为20 g左右,相比之下这种影响是不可忽略的。为了验证这一思路的可行性,以下将设计试验来比较两种相似准则对试验结果的影响,考虑到现有条件及常见网箱模型试验需求,模比系数大尺度取为 $\lambda = 20$,小尺度取为 $\lambda' = 2$ 。

4 试验模型设计

鉴于按照田内相似准则,波浪试验在实验室内无法进行,试验仅针对水流作用下的网衣特性进行研究比较。同时,考虑到以后的网箱试验,本试验中的模型将不仅包括网衣部分,还将包括底杆及沉子系统。现将各模型部件的设计分析进行说明。

4.1 网衣模型

网衣材质为聚乙烯,有结。网目的目脚长度为1 cm,网线直径1.18 mm。按照两种相似准则,模型网衣的总体尺寸是相同的,设计时均取为100 cm × 43 cm(对应原型尺寸均为20 m × 8.6 m),网目总个数为 $67 \times 32 \times 2 = 4288$ 个(水平缩结系数为0.746,垂直缩结系数为0.666)。网片在纵向按每4个网目分片进行部分截断,以模拟网衣的刚度相似。同时,网衣在悬挂时由于两边裁剪会导致网衣的横向收缩,为此在网衣的底部加设一条底杆,用于减小横向收缩,同时也有利于平衡水流流速的横向差异。底杆长100 cm,采用细竹竿或铁丝制作。由第1、3节的分析可知,对于采用重力相似准则的网衣模型

需要考虑补重问题,按式(13)计算。另外考虑细竹竿的水中重量平衡,网衣共需补重3.7 g,可通过沉子来平衡。

4.2 沉子模型

对于沉子外形的设计依然应按照重力相似的原则进行缩放,其推导如下:

水流对球形结构物的作用基本方程(忽略加速度力)为^[9-10]:

$$F = \frac{\rho}{2} C_D A V^2 \quad (29)$$

按照田内相似准则有 $V_p/V_m = \sqrt{\lambda'}$,则对应外力原、模型比值满足:

$$\frac{F_p}{F_m} = \lambda^2 \lambda' \quad (30)$$

按几何相似,式(29)中 A 应当按照 λ^2 缩放,即沉子的直径按照 λ 进行缩放。本试验中,两种相似准则对应的原型沉子的水中有效重量为240 kg,则田内准则下的沉子模型重量按 $W_m = W_p / (\lambda^2 \lambda')$ 换算为300 g,采用铅块制成直径1.6 cm的10个沉子,其空气中重量共计242.3 g(有效重量为220.9 g),距要求的总有效重量还差79.1 g,可采用相当重量的细钢丝来代替重力相似条件下的细竹竿以弥补重量差异,但前提是细钢丝和细竹竿的直径相同。重力相似条件下的沉子重量按 $W_m = W_p / \lambda^3$ 进行缩放。本试验所采用的大尺度为 $\lambda = 20$,换算沉子的有效重量为30 g,对应空气中的重量为51.4 g,采用橡皮泥内包铅块制成10个,每个直径1.6 cm。

4.3 模型的布置设计

试验表明,直接将网衣上端悬挂在钢筋上,当水流流速较大时,钢筋附近将有部分网衣脱离水面。而这种情况又由于网衣的变形复杂性不便于对受力进行校正,因此,需要对网衣的布置模型专门设计。经分析采用如图4所示布置方式可以满足要求。

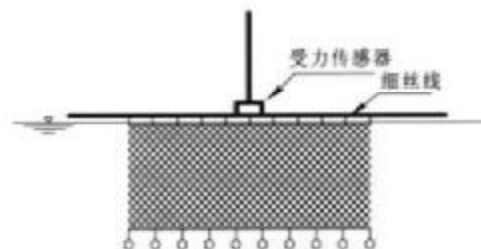


图4 网衣模型布置示意图

Fig.4 Sketch of net model

5 结果及分析

按照试验设计分别进行了田内相似试验和重力相似试验,每组重复3次,试验受力和流速数据的采集均为电脑自动采集,网衣变形为人工目测采集。由于所采集数据点没有特定的分布形式,因此试验

数据直接采用均值进行处理。

5.1 受力分析

由于相似准则的差异,两者的试验工况亦有差异,为了方便比较,采用回归方法将两种准则下的实测结果校正到同一种流速条件下进行比较,结果见表1。

表1 两种相似准则的比较(原型值)

Tab.1 Comparison between two different similarity criterions (prototype value)

	流速/(cm·s ⁻¹) Velocities	受力实测值/kN Measured forces	重力回归值/kN Regression forces under gravity similarity	Error/ %		流速/(cm·s ⁻¹) Velocities	受力实测值/kN Measured forces	田内回归值/kN Regression forces under Tauti similarity	Error/ %
田内相似 Tauti similarity	25.55	2.55	3.32	30.2	重力相似 Gravity similarity	33.87	4.24	3.90	-8.1
	33.59	3.86	4.27	10.4		49.19	6.13	5.73	-6.4
	46.18	5.37	5.71	6.4		69.45	8.44	8.19	-3.1
	60.43	7.10	7.31	2.9		92.24	10.63	10.98	3.2
	67.67	7.96	8.10	1.8		116.72	13.29	14.00	5.3

由表1及图5和图6可见,除田内相似准则下对应原型流速25.55 cm/s时的差值较大外,其余差值均较小,基本上在10%以内。由此可以得出结论认为,在重力相似准则条件下,采用小尺度比对网衣的网目及网线直径进行缩放,同时进行网衣重量补偿后,从受力特性的角度上来看可以满足常规条件下的网衣模型要求,其结果和按田内相似准则获得的结果十分相近,但却避免了田内相似准则有关的其他很多约束条件而造成网箱模型试验中的困难。

5.2 变形分析

试验在水槽玻璃面板上建立直角坐标系,网衣下端用一发光二极管作为网衣变形的示踪点,通过

目测方法测定网衣变形,试验结果如表2所示。

表中最后一列网衣在不同流速下的投影面积 A_i 近似按照下式计算:

$$A_i = A \times \frac{H_i}{H} = 99.7 \times (2ad - 1.46d^2) H_i \quad (31)$$

$A = (2ad - 1.46d^2) \times n = (2ad - 1.46d^2) \times 4288$
式中, A 为网片与水流垂直时的网线投影面积; H_i 为变形后的网片高度; H 为网片初始高度; n 为网目的个数; a, d 分别为网目大小和网线直径。由于两种相似准则下的试验流速并不完全相同,采用与受力分析相同的方法,将其校正到同一流速条件下进行比较,结果见表3和图7。

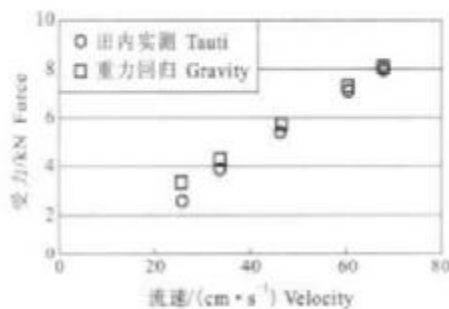


图5 重力回归与田内实测值的比较

Fig.5 Comparison between the regression values under gravity similarity criterion and the measured values under Tauti similarity criterion

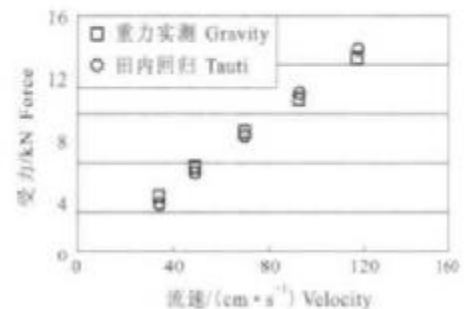


图6 田内回归与重力实测值的比较

Fig.6 Comparison between the regression values under Tauti similarity criterion and the measured values under gravity similarity criterion

表2 两种相似准则下的网衣变形

Tab.2 Net deflection under two different similarity criterions

相似准则 Similarity criterion	流速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) Velocities	跟踪点垂向坐标/cm Vertical coordinate of the tracing point	网衣上端距水面距离/cm Distance between the upper edge of the net and water surface	变形后网衣高度/cm Net height after deflection H_t	变形后的垂直投影面积/ cm^2 Vertical projected area of the net after deflection A_t
田内相似 Tauti similarity	25.55	40.77	2.0	38.77	833.56
	33.59	35.67	1.7	33.97	730.35
	46.18	—	1.3	—	—
	60.43	20.00	1.0	19.0	408.54
	67.67	17.40	0.7	16.7	359.08
重力相似 Gravity similarity	33.87	33.60	1.6	32.0	688.06
	49.19	—	1.0	—	—
	69.45	16.27	0.6	15.67	336.86
	92.24	11.27	0	11.27	242.26
	116.72	9.10	0	9.10	195.67

表3 两种相似准则下的网衣变形比较

Tab.3 Comparison of the net deflection under two different similarity criterions

流速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) Velocities	垂直投影面积/ cm^2 Vertical projected area		差异/% Difference
	田内相似 Tauti similarity	重力相似 Gravity similarity	
25.55	833.56	793.85	4.8%
33.59	730.35	688.89	5.7%
33.87	722.03	688.06	4.7%
60.43	408.54	410.32	-0.4%
67.67	359.08	358.23	0.2%
69.45	340.95	336.86	1.2%
92.24	204.69	242.26	-18.4%
116.72	139.04	195.67	-40.7%

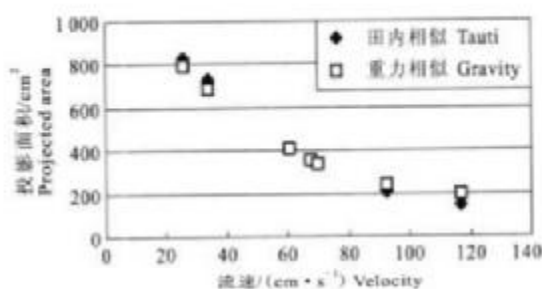


图7 两种相似准则下的网衣变形比较

Fig.7 Comparison of the net deflection under two different similarity criterions

由表3结果可知,当流速在70 cm/s 以下时,两种相似准则下的网衣沿与流向垂直面的投影面积差异

小于6%。仅最后两组较大流速对应投影面积差异较大,估计是由于流速太大,回归时带来的差异,实际上田内相似的造流最大流速仅为67.67 cm/s (原型值)。总体上来说,流速相同时,两种相似准则下的网衣变形也非常接近,进一步说明受力分析的可靠性。

6 结语

本研究从理论上分析了利用重力相似准则结合大小比尺对网衣试验模型进行缩放的可行性,并且通过试验从受力和变形的角度验证了其正确性。由于田内相似准则对流体速度的限制,使得涉及到波浪试验时,也要相应地采用小尺度比尺对波浪进行缩放,而由此得到的波浪要素在实验室内往往是无法实现的。而狄克逊准则对网衣的缩放比尺限制太

大,也使得这一准则在深水养殖网箱模型试验中难以运用。本试验验证了重力相似准则结合大小比尺对网衣试验模型进行缩放,在水流作用下与田内相似准则的一致性,并给出了具体的质量及刚度差异的修正公式。对于波浪问题也已经从理论上验证过^[8],起主要作用的依然是水阻力,这样将重力相似准则结合大小比尺的方法依然可以应用到网衣的波浪试验中,不仅解决了田内相似准则对实验条件的限制,也克服了狄克逊等准则对模型比尺的约束,为以后涉及到波浪条件的深水养殖网箱试验及其他相关实验提供了解决网衣相似问题的科学依据。

参考文献:

- [1] 黄锡昌. 实用拖网渔具渔法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1984.
- [2] 国家水产总局. 渔具模型试验[M]. 北京: 中国农业出版社, 1980.
- [3] Tran Duc Locing. An alternative design of trawls for offshore fishing in Vietnam[J]. UNU-Fisheries Training Programme, 2001. <<http://www.unuftp.is/prj01/LocingPDF.pdf>>
- [4] David Fredriksson. Open ocean fish cage and mooring system dynamics[D]. UMI, 2001.
- [5] 余延伟. 计算渔具力学导论[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2001.
- [6] Pål Furset Lader, Birger Enerhaug. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow[J]. 2003. <http://www.marint.ntnu.no/~lader/pdf/Paper_Explosive_Force_IEEE.pdf>
- [7] 弗里德曼著, 倪恩准等译. 渔具理论与设计[M]. 北京: 海洋出版社, 1988.
- [8] 桂福坤, 李玉成, 张怀慧. 网衣受力试验的模型相似条件[J]. 中国海洋平台, 2002, 17(5): 22-25.
- [9] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [10] Det Norske Veritas. Environmental conditions and environmental loads[M]. Det Norske Veritas AS, Norway, 2002. 24-26.
- [11] 龙驭球, 包世华. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.

Simulation criteria of fishing nets in aquiculture sea cage experiments

LI Yu-cheng¹, GUI Fu-kun¹, ZHANG Hui-hui², GUAN Chang-tao³

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 2. Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China; 3. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Qingdao 266071, China)

Abstract: The deep water sea cage engineering developed very fast, but the research on its hydrodynamic characteristics is relatively weak. Model experiments are important methods for such study, but the main difficulty is how to give a reasonable simulation criteria for the model test of fishing net. Many researchers proposed different methods to solve this problem when dealing with sea cage experiments. Based on Morison Equation together with consideration on the change of drag force coefficient, Fredriksson (2001) in his study proposed a method to model the fishing net by compensating the error of twine projected areas. But the relationship between drag force coefficient and Reynold number has to be set up firstly through experiments. While the experiment results, in great sense, depend on the conditions of the model configuration, the components and material used, Pål Furset Lader (2003) applied directly the prototype net to the sea cage model without any modification on net mass and twine projected area for the difficulties in modelling the net system reported in one of his research papers. In trawl net experiments, several simulation criteria of net models were proposed by various scholars. The familiar criteria are Dickson criteria, Christensen criteria and Tauti criteria. Dickson criteria, which is used popularly in west Europe and Christensen criteria, is often used in America, and Tauti criteria was worked out by Professor Tauti and is used frequently in Japan and China. But for sea cage experiments, all these simulation criteria encounter different problems and have different restricts. The main difficulty of Tauti criteria applied in sea cage experiments is the large scale of particle velocities which will make the wave conditions difficult or even impossible to implement. So once more we paid our attention to the Froude law.

This paper focused on the feasibility of the application of Froude law for fishing nets model design and

during the experiments the Tauti law was selected for comparison. Through this analysis, the differences were found out between Froude law and Tauti law and the mass and rigidity modification formula of fishing nets was proposed. Based on this consideration two models including net, low-bar and weighting system were designed according to Froude law and Tauti law respectively. The model scale of mesh was 1:2 while that of other parts of the model was kept as 1:20. The models were fixed on the rigid bar on which a force transducer was attached. And then the total model system were assembled in a wave flume with 69 m long, 2 m wide and 1.8 m high in the State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering in Dalian University of Technology. The water depth was kept at 0.8 m constantly in the whole experiment. And five values of flow velocities under each simulation criteria were selected respectively. Force data were measured by the transducer fixed on the rigid bar and transferred to the computer data collecting center through data lines. During the experiment, total three diodes were attached to the net model along the water depth direction and a Cartesian coordinate was set up on the glass plate where the model was assembled. Net deflection then was measured by tracing the diodes on the net model. Analyzed results of forces and net deflections showed the consistency between Tauti simulation criteria and Gravity simulation criteria. This achievement ensures the use of smaller model scale as 1:20 for deep water sea cage experiments which is smaller than the scale usually used for trawl model test and avoids the restrict of Tauti simulation criteria.

Key words: deep water sea cage; fishing net; model test; simulation criteria

(上接 191 页 Page 191 continued)

Cloning and sequence analysis of cDNA encoding β -actin from rice field eel *Monopterus albus* Zuiewu

LI Jian-lin, YU Ju-hua, TANG Yong-kai, CAO Li-ping, WU Ting-ting

(Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, WuXi 214081, China)

Abstract: β -actin is an important component of cytoskeleton and sarcomere. It plays important roles in many biological processes. Because its expression is stable during the development, it is usually used as internal standards of quantitative RT-PCR. A cDNA encoding β -actin is derived from the rice field eel (*Monopterus albus* Zuiewu) liver tissue using RT-PCR and RACE methods. The cDNA is 1 765 bp with 12 bp 5' UTR, 625 bp 3' UTR (excluding poly(A)) and 1 128 bp ORF, which encodes 375 amino acids and has a predicted molecular weight of 41.77 kD. Sequence analysis reveals the identity rate of β -actin cDNA nucleotide sequence between the rice field eel and *Tilapia mossambica*, *Salmo salar*, *Oryzias latipes*, *Oncorhynchus mykiss*, *Danio rerio*, *Carassius auratus*, *Physalaemus pustulosus*, *Bos taurus*, *Gallus gallus*, *Mus musculus*, *Homo sapiens* are 68% - 95%; and the similarity of β -actin amino acid sequence is 97% - 100%. This suggests β -actin is highly conserved. The phylogenetic tree constructed on the basis of β -actin nucleotide sequence suggests that the relationship of β -actin gene between rice field eel and *Tilapia mossambica* is the most intimate.

Key words: *Monopterus albus* Zuiewu; β -actin; RACE; phylogenetic relatedness

Corresponding author: WU Ting-ting. E-mail: wutt@ffrc.cn