

# 主动式钩连体结构孔隙率研究\*

魏祥<sup>1</sup>, 夏云峰<sup>2</sup>, 吴道文<sup>2</sup>, 徐华<sup>2</sup>, 尚倩倩<sup>2</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 主动式钩连体作为国际上一种新型消能护滩结构, 以其新颖的结构形式和良好的整体性及突出的消能效果, 已经在荷兰等国得到了工程实际应用。利用钩连体模型试验研究其基本结构特性, 为今后进一步研究其水动力特性提供理论基础。

**关键词:** 主动式钩连体; 结构特征; 孔隙率

中图分类号: TV 135.2\*3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0008-05

## Porosity characteristics of active ground consolidators

WEI Xiang<sup>1</sup>, XIA Yun-feng<sup>2</sup>, WU Dao-wen<sup>2</sup>, XU Hua<sup>2</sup>, SHANG Qian-qian<sup>2</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** As a new river bank protection and dike reinforcement structure, the active ground consolidator has been applied to some engineering projects for the novel type of construction, favorable integrality and outstanding effect in energy dissipation. The study on the basic structural characteristics of the GCs will provide the fundamental theoretical basis for the research on the hydrodynamic characteristics.

**Key words:** active ground consolidators; structural characteristics; porosity

## 1 概述

长期以来, 河流堤防和岸滩防护都是水利工程建设以及后期管理的重要课题。我国采取的水下护岸方式有多种, 从传统的抛石护岸、混凝土块铰链排、土工织物软体排护岸到近期逐渐兴起的生态护岸以及新型四面六边体框架结构群<sup>[1]</sup>。传统的块石护岸虽然具有取材简单和低投资的特点, 但是由于自身的散状结构导致其易发生位移和流失, 不利于长期的护岸管理。而生物护岸技术由于缺少成熟的理论研究和实际工程应用, 目前并没有得到广泛应用。近几年, 四面六边体框架结构群在长江南京河段的成功应用为护岸结构研究指明了新的方向<sup>[2]</sup>, 唐洪武等<sup>[3]</sup>对于此结构消

能护滩效果已有较深研究。从现有成果来看, 透水框架的研究主要是基于工程实施效果的分析研究, 关于其结构基本特性、水动力特性及防冲促淤的机理性研究仍较少。

主动式钩连体结构(简称GCs)首先由荷兰学者提出, 目前国内外公开发表的资料中, 尚未见有关于钩连体对消能、防冲促淤、结构优化等方面的研究成果, 仅有部分关于生产加工、施工方法的阐述。它作为一种开放式结构, 由正方体框架的其中7根杆件构成(图1)。钩体相互钩连形成一个相互交错、具有较强透水性的结构, 突出在床面之上。由于钩体杆件伸入水体中, 水体受到钩连体的扰动, 会对床面阻

收稿日期: 2013-05-09

\*基金项目: 交通运输建设科技项目(2013328J17500)

作者简介: 魏祥(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事港口航道工程研究。

力分布、水流结构以及泥沙运动等产生影响。钩连体相互之间能主动连接,具有非常好的整体性,能有效减小河床底部流速、减弱水流紊动,防止河床底部泥沙起动,对整治工程区易冲刷部位进行消能、减小护底范围及减轻河床局部冲刷的作用。

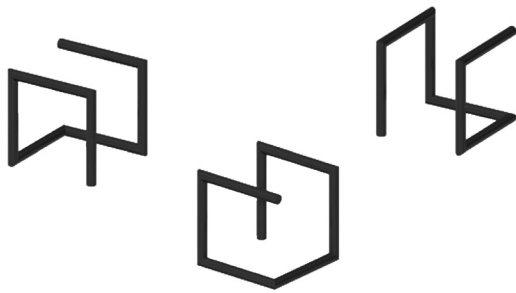


图1 钩连体空间结构

钩连体在国外主要应用在4个方面:1)增强土体稳定性,将钩连体埋在土体中,相当于在土体中加筋以增强土体整体的稳定性;2)生态型护滩,采用可降解材料将钩连体抛投在近岸边滩,为近岸植被及其他生物提供相对稳定的生长环境,达到保护近岸生态改善环境的作用(图2);3)利用钩连体建设人造堤防,起到防浪消能的作用(图3);4)护岸消能促淤(图4)。

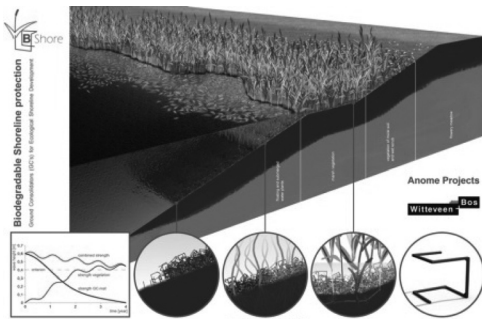


图2 生态型护滩



图3 人造堤



图4 消能护滩

## 2 钩连体结构特征研究

### 2.1 模型设计

本试验模型为正态模型,满足几何和重力相似的原则。原体构件体尺寸边长50 cm,截面半径5 cm。考虑到构件体消能效果不同和抛投层数防冲促淤效果,另外考虑到天然河道水流流速及工程区模拟范围等,结构特征以及定床水动力试验杆件的长度比尺采用3种:7.5,15及30,分别用符号I-0,II-0,III-0表示,对于变态模型则分别用符号I-1,II-1,III-1表示。

不同比尺钩连体模型构件共5种(图5):

1)边长6.67 cm,截面半径为4.0,6.7 mm,材料采用钢筋。

2)边长3.33 cm,截面半径为2.3,3.33 mm,材料用铅丝。

3)边长1.7 cm,截面积半径1.7 mm,材料采用细钢丝。

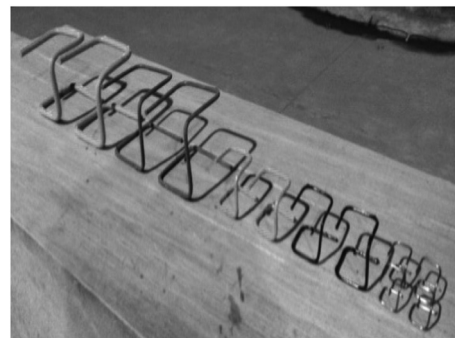
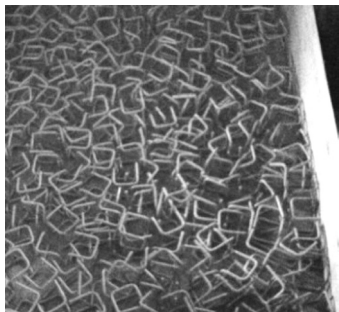


图5 钩连体试验模型

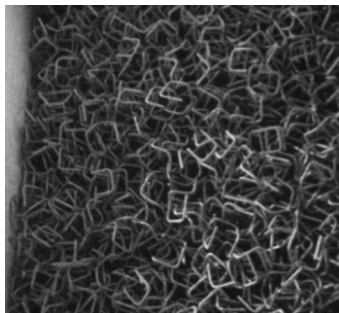
### 2.2 空间结构特征

试验时,依据单个钩体的尺寸大小选定不同的区域进行抛投。抛投层数控制在5~7层,试验时

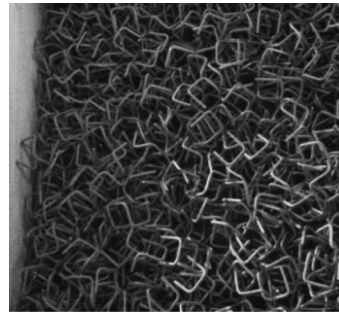
观察各层的钩体姿态，记录堆积高度以及各层的数量等，并对每种钩体进行重复性试验，每组均抛投6次以上。通过系列试验发现，钩连体在不断抛投堆叠的过程中，钩体的姿态和相互钩连的模式会随着抛投高度的增大而发生一定变化。钩连体不同抛投层数的状态见图6，单位面积钩连体高度与数量的关系见图7。



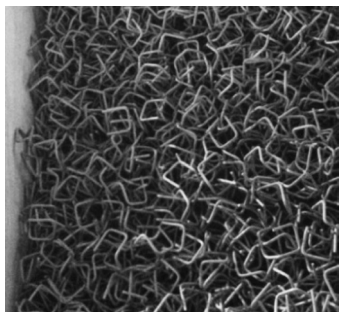
a) 1层 (底层)



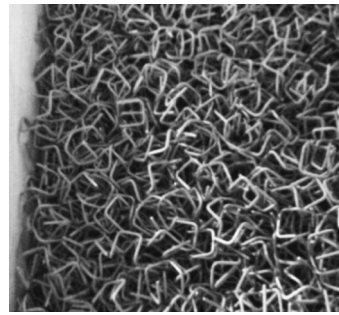
b) 2层



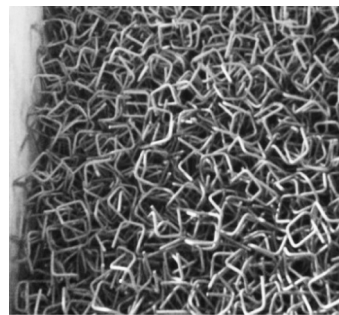
c) 3层



d) 4层



e) 5层



f) 6层

图6 钩连体不同抛投层数图像

第1层 (底层)：钩体平落于地面，相互之间错位钩连。

由于第1层直接抛投在平地上，钩体主要呈任一平面平落于地面上的姿态，钩体基本与地面贴合，不同钩体之间相互错位钩连，杆件之间存在部分搭接，第1层的高度略微高于单个钩体的高度，约为其1.05倍左右。

第2层：倾斜嵌入底层框架，初步形成随机分布的空间格局。

由于第1层钩体之间存在间隙空间，第2层钩体抛投后任一平面不平行于地面，而是以一定的角度呈倾斜状态嵌入底层框架内，使得第2层的堆叠姿态和钩连间隙的选择较底层更大，因此在抛投数量上略大于底层数量，高度上也骤升为单个钩体高度的2倍左右。钩连体的第2层是衔接底层和以上各层的过渡层，在第2层的空间内钩体姿态得以调整，基本形成了较为随机分布的空间钩连格局，为第3层及其以上各层奠定格局基础。

第3层及更多层数：钩体以多种姿态存在并相互钩连。

由于第2层形成了姿态较为随机的空间结构,第3层及以上各层抛投的钩体存在姿态的自由度较高,与下层钩体交错并重叠有一定高度,与同层钩体之间也是相互钩连交错,由于与下层钩体在高度上有一部分重叠,每层的上升高度有所减小,基本稳定在0.3倍的钩体高度左右,并且每层的数量也逐渐趋于稳定,单层数量约为底层数量的一半左右。

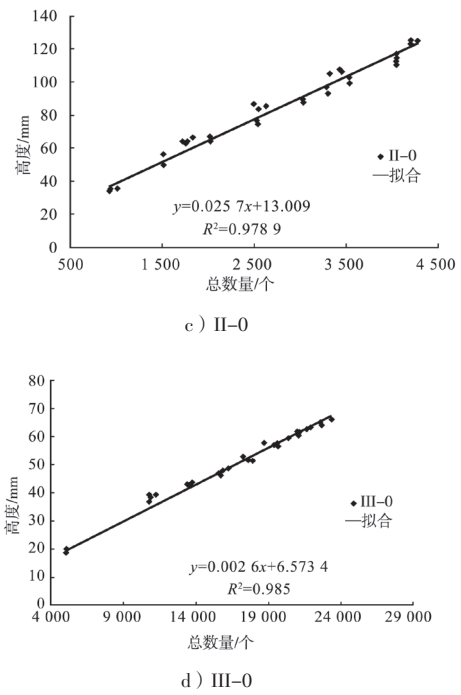
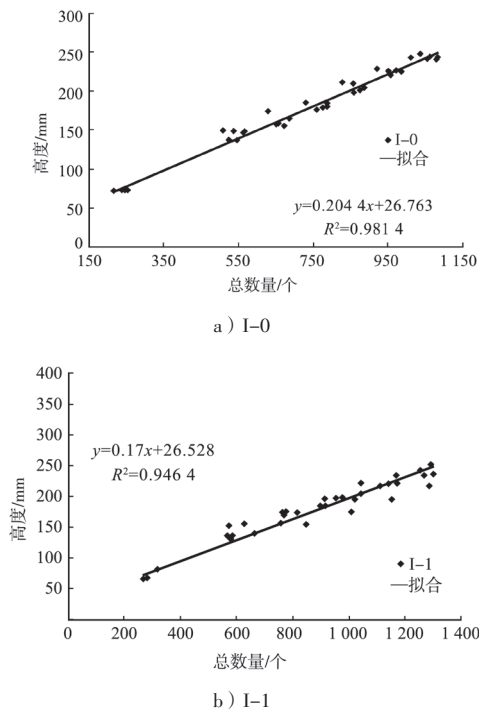


图7 单位面积钩体数量和高度关系

由试验结果图像可以看出钩连体的高度和总数量基本满足线性关系式。假定其满足线性关系:

$$h_G = kN + c \quad (1)$$

式中:  $N$ 为单位面积钩连体个数;  $h_G$ 为钩连体抛投高度;  $k, c$ 为系数,经推导,两种不同的钩体(以下标 $p$ 和 $m$ 表示),系数存在如下关系:

$$\frac{k_m}{k_p} = \frac{c_m}{c_p} \left( \frac{l_m + d_m}{l_p + d_p} \right)^2 \lambda_\varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{c_m}{c_p} = \frac{l_m + d_m}{l_p + d_p} \quad (3)$$

表1 拟合系数比较及形状尺寸比值

差异	拟合系数比较	形状尺寸比值
改变截面大小	$\frac{k_{I-1}}{k_{I-0}} = 0.83, \frac{c_{I-1}}{c_{I-0}} = 0.99$	$\frac{l_{I-1} + d_{I-1}}{l_{I-0} + d_{I-0}} = 0.94, \left( \frac{l_{I-0} + d_{I-0}}{l_{I-1} + d_{I-1}} \right)^3 = 0.82$
改变钩连体长度	$\frac{k_{II-0}}{k_{I-0}} = 0.12, \frac{c_{II-0}}{c_{I-0}} = 0.49$	$\frac{l_{II-0} + d_{II-0}}{l_{I-0} + d_{I-0}} = 0.49, \left( \frac{l_{I-0} + d_{I-0}}{l_{II-0} + d_{II-0}} \right)^3 = 0.11$
	$\frac{k_{III-0}}{k_{I-0}} = 0.013, \frac{c_{III-0}}{c_{I-0}} = 0.25$	$\frac{l_{III-0} + d_{III-0}}{l_{I-0} + d_{I-0}} = 0.24, \left( \frac{l_{I-0} + d_{I-0}}{l_{III-0} + d_{III-0}} \right)^3 = 0.014$

由表1可知,对比所采用的几种不同钩连体,第1行系数比值接近于1,说明同一杆件长度,改变截面大小产生系数的差异较小;而第2和3行比值显示,钩连体长度的差异导致了系数的较大变化。因此可以确定钩体杆件的长度尺寸是影响抛投数量的主要因素,而截面大小的影响较小,可能与所采用

钩连体的长宽比较大导致截面变化对空间排列影响不明显有关。基于试验和理论分析,将高度-数量关系成果推延至原型(长50 cm,截面直径5 cm)可得单位面积的高度-数量公式如下:

$$h_G = 0.078N + 0.194 \quad (4)$$

式中:  $h_G$ 单位为m。

### 2.3 孔隙率

图8给出了实测数量和孔隙关系以及由拟合公式计算出的数量-孔隙曲线。由图8可知，钩连体的孔隙率随着层数的变化而变化：层数较小时，孔隙率较大。随着层数的增多，钩连体抛投的底层结构对其整个空间结构的影响逐渐减小，钩连

体结构趋于均匀稳定，孔隙率随数量的变化也逐渐变缓并趋近于某一值。抛投试验中，抛投至7层时，I-0,I-1,II-0,III-0的实测平均孔隙率分别为92.7%,97.2%,93.1%,92.9%，拟合公式计算的7层孔隙率分别为92.8%,97.3%,93.3%,92.7%，计算孔隙率与实测孔隙率相一致。

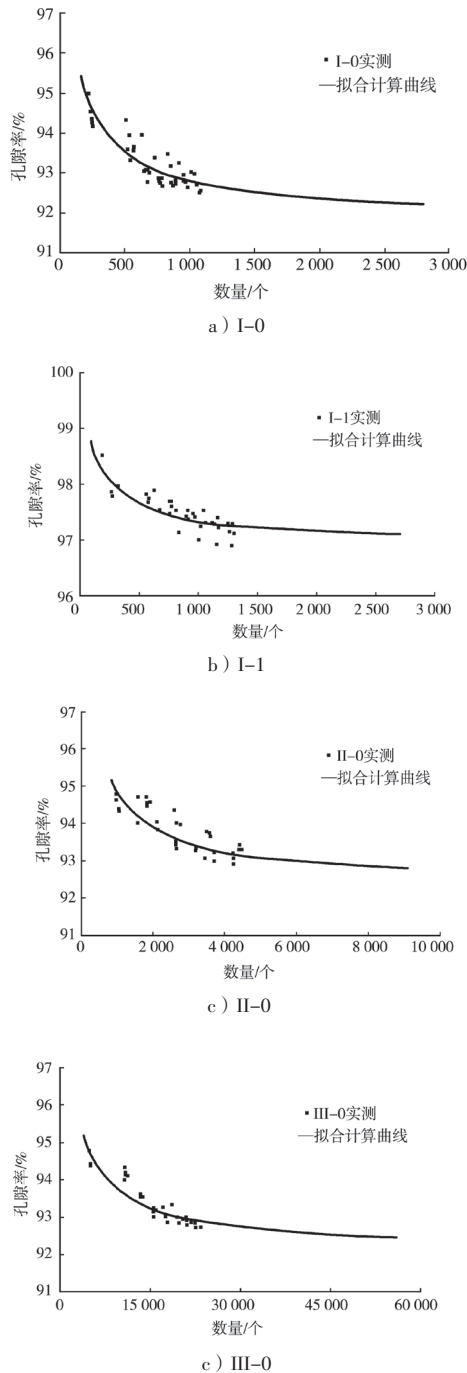


图8 孔隙率与钩体数量关系实测与拟合计算

### 3 结论

1) 主动式钩连体结构近期在荷兰岸边防冲刷以及保护植被方面得到了尝试性的应用，结果表明，在构件守护区域具有较好的防冲促淤效果。该构件与其他防护型结构相比最大的优点在于构件自身散抛状态下可实现各自钩连，整体性好，并且防冲促淤效果明显，是一种具有较好的稳定性、耐久性和经济性并且方便工程施工的结构物。

2) 本试验针对不同钩连体的数量、高度、孔隙率等特征参数的相互关系进行了分析。从数量上来看，不同比尺的钩连体单位面积的抛投数量基本与单个钩连体高度的平方成反比；从孔隙率来看，不同比尺钩连体相同层数的孔隙率基本一致，孔隙率随层数的增加逐渐趋于稳定；从抛投高度来看，各比尺钩连体在抛投相同层数的情况下，其相对高度也是一致的，前两层相对高度上升较快，3层以上每增加一层其相对高度增大0.3左右。从抛投试验的结果来看，按正态缩放钩连体，其孔隙率、相对高度、数量等参数均满足相似性要求。这为后期继续研究其水动力基本特性和防冲促淤效果提供了较好的理论依据。

### 参考文献:

[1] 徐国宾, 任晓枫. 几种新型护岸工程技术浅析[J]. 人民黄河, 2004(8): 3-4.  
 [2] 陈辉, 吴杰, 李义进. 四面六边体在长江八卦洲段护岸固脚中的应用[J]. 人民长江, 2009(5): 75-77.  
 [3] 唐洪武, 李福田, 肖洋, 等. 四面体框架群护岸型式防冲促淤效果试验研究[J]. 水运工程, 2002(9): 25-29.

( 本文编辑 武亚庆 )