



# 透水框架护岸模型试验

况宏伟, 谷祖鹏, 雷国平, 尹书冉

(长江航道规划设计研究院, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430011)

**摘要:** 透水框架护岸是将透水框架铺设在岸坡坡面上, 利用透水框架的减速促淤机理来防护岸坡。本试验开展了四面六边透水框架和扭双工字型透水框架铺设在岸坡坡面上的试验研究, 对其护岸效果、减速促淤机理进行分析, 了解透水框架护岸的优缺点, 分析透水框架护岸的应用部位。

**关键词:** 四面六边透水框架; 扭双工字型透水框架; 护岸; 防冲促淤

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)03-0112-08

## Experimental study on bank protection by penetrating frame

KUANG Hong-wei, GU Zu-peng, LEI Guo-ping, YIN Shu-ran

(National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation,

Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

**Abstract:** To protect the slope, penetrating frames, which have the effect of deceleration and accretion promotion, are laid on the slope surface for bank protection. Carrying out the experiments of bank protection by laying tetrahedron-like penetrating frame and twist double H permeable frame on the bank slope surface, we analyze the effect of bank protection and mechanism of deceleration and accretion promotion and recognize the advantages and disadvantages and the applying position of bank protection by penetrating frames.

**Keywords:** tetrahedron-like penetrating frame dam; twist double H permeable frame; bank protection; deceleration and accretion promotion

透水框架结构具有明显的减速促淤效果, 传统的四面六边透水框架及新型框架结构在长江护滩护底中都有成功应用。扭双工字型新型透水框架是长江航道规划设计研究院发明的一种新型框架结构, 于2013年在长江南京以下12.5 m深水航道建设一期工程通州沙潜堤护底中成功试验应用<sup>[1]</sup>, 效果显著。四面六边框架也被用于护滩工程的边缘守护和固脚护岸。王南海等<sup>[2-4]</sup>介绍在长江干流及堤防加固整治工程中成功地应用框架群护岸固脚, 效果理想。但目前都没有将框架直接用于坡面护坡的实际工程。为了扩展框架的应用

范围, 本文开展了透水框架直接护岸模型试验研究。目前有部分框架保护坡面的研究, 但不全面。徐锡荣等<sup>[5-6]</sup>在水槽中部的凹槽中铺设模型沙, 模型沙顶面与水槽底面齐平, 在沙面上均匀抛铺透水框架四面体, 通过分析流速变化来分析护岸效果, 但他们研究的不是斜坡坡面。卢金友等<sup>[6]</sup>在水槽中开展了四面六边透水框架的保护坡面试验, 但未开展扭双工字型等新型透水框架的保护斜坡坡面试验。本试验研究目的是分析透水框架能否直接保护岸坡坡面, 为其工程应用提供技术指导。本试验使用2种框架形式: 四面六边透水框架和

收稿日期: 2015-08-22

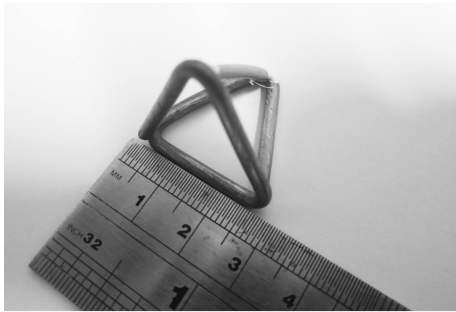
作者简介: 况宏伟 (1981—), 男, 博士, 从事河流演变、航道工程的设计和研究工作。

扭双工字型透水框架,通过将不同密度的框架铺设在坡面上,在不同流速水流下冲刷,然后量测试验后岸坡的地形,来分析透水框架保护坡面的效果。

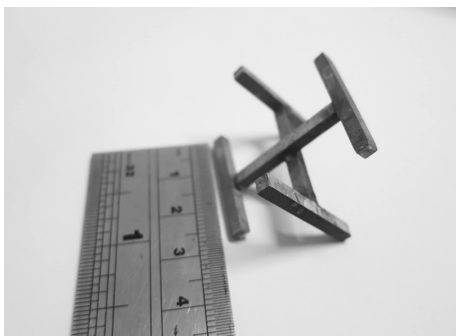
## 1 框架护岸试验

### 1.1 模型试验透水框架

考虑试验中的岸坡与长江中下游河道岸坡形态基本相似,结合水槽尺寸和长江岸坡的高度,本模型试验采取正态比尺,即平面比尺=垂直比尺: $\lambda_L = \lambda_H = 30$ ,流速比尺: $\lambda_v = \lambda_H^{1/2} = 5.477$ 。四面六边透水框架和扭双工字型透水框架原型杆件尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 80\text{ cm}$ ,材料为钢筋混凝土,密度为 $2.5\text{ g/cm}^3$ 。模型四面六边透水框架用直径 $3\text{ mm}$ 的铝丝制作,杆件长度 $27\text{ mm}$ ;模型扭双工字型透水框架由铝板切割成“H”型,然后粘接而成,模型杆件尺寸为 $3.3\text{ mm} \times 3.3\text{ mm} \times 27\text{ mm}$ 。模型透水框架结构见图1。



a) 四面六边透水框架模型



b) 扭双工字型框架模型

图1 透水框架原型和模型结构

### 1.2 模型沙选择

本试验主要考虑沙质推移质,要求起动流速比尺与流速比尺相等, $\lambda_{v_0} = \lambda_v = \lambda_H^{1/2} = 5.477$ 。用起动流速公式计算原型沙各种不同流量级下的起动流速,而相应的模型沙的起动流速则通过水槽试验来确定。原型沙起动流速采用沙玉清公式计算。原型沙粒径约 $0.125\text{ mm}$ 在水深 $6.0 \sim 12.0\text{ m}$ 情况下的起动流速约为 $0.57 \sim 0.66\text{ m/s}$ 。试验段铺设的模型沙选用 $D_{50} = 0.2\text{ mm}$ 的聚丙烯酸甲酯轻质沙,密度 $\rho_s = 1.22\text{ g/cm}^3$ 。经水槽试验,在相应的模型水深为 $0.20 \sim 0.40\text{ m}$ 时,起动流速约为 $10.15 \sim 12.79\text{ cm/s}$ 。起动流速比尺是 $5.15 \sim 5.65$ ,接近设计要求的比尺 $\lambda_{v_0} = 5.477$ ,基本满足起动相似要求。

### 1.3 水槽试验介绍

透水框架护岸试验是在长江航道规划设计研究院的定坡玻璃水槽中开展( $36\text{ m} \times 3.2\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ (长×宽×高)),最大流量 $200\text{ L/s}$ 。水槽上游来水流量由薄壁矩形堰测量,末端用平板闸门和水位计协同控制水槽出口水位。试验采用单侧定床动岸模拟,水槽试验段长 $5.2\text{ m}$ ,试验斜坡上留有 $10\text{ cm}$ 高度铺设模型沙来模拟自然岸坡。在该试验段上下游分别是长 $14\text{ m}$ 、 $4\text{ m}$ 的固定斜坡,固定斜坡高 $0.5\text{ m}$ ,坡度 $1:2$ ,坡度 $30^\circ$ 。水槽供水系统见图2。在试验段做有水泥底坡,这样在该试验段斜坡上每次铺设约 $10\text{ cm}$ 厚模型沙后能与前后两边的混凝土斜坡同平面齐平。然后将水槽中加水至 $40\text{ cm}$ 深。在水槽注水过程中,模型沙会逐渐向水中坍塌形成一个稳定的岸坡,坡度 $1:2.75$ 。然后缓慢将水槽中水以小流量逐渐排出,再将斜坡略微整平以备试验。在整备过的模型沙岸坡中间长为 $1\text{ m}$ 或 $2\text{ m}$ 部分铺设透水框架,并将水槽中水位升高至 $30\text{ cm}$ 以备放水试验。试验前量测初始地形,此时水中模型沙斜坡的坡比是 $1:3$ ,坡度 $18.5^\circ$ 。

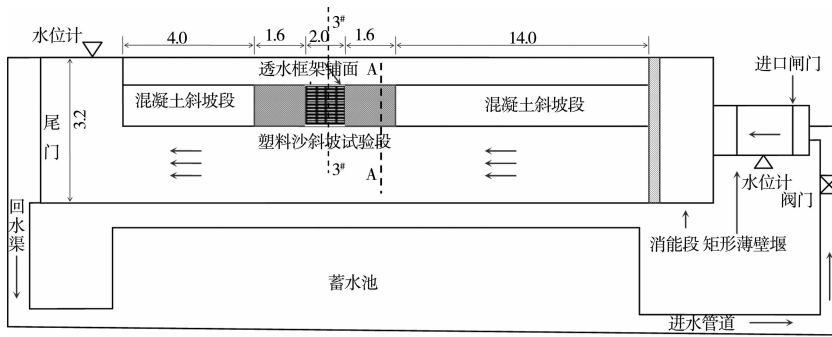


图2 透水框架护岸水槽试验模型平面布置及水槽供水系统 (单位: m)

1.4 试验工况

根据试验情况在不同的铺设面积上 (2 m × 1.2 m, 1 m × 1.2 m) 抛投不同框架数目得到不同的铺设密度。将抛投密度 1 886 个/m<sup>2</sup> 称为单层 (原型 1.37 个/m<sup>2</sup>)，抛投密度 943 个/m<sup>2</sup> 称为半层

(原型 0.69 个/m<sup>2</sup>)，抛投密度 3 773 个/m<sup>2</sup> 称为双层 (原型 2.74 个/m<sup>2</sup>)。试验开展不同流量、有无框架守护、试验岸坡上下游有无排体守护、平顺护岸和水流顶冲护岸、四面六边透水框架和扭双工字型透水框架的试验。各试验工况见表 1。

表1 框架护岸试验不同工况条件设置

工况	水深/cm	流量/(L/s)	模型平均流速/(cm/s)	原型平均流速/(m/s)	守护两侧排体	框架类型	层数
A1	30	91.8	18	1.0	无	四面六边	单层
A2	30	137.7	27	1.5	无	四面六边	单层
A3	30	197.0	38	2.0	无	四面六边	单层
B1	30	91.8	18	1.0	有	无	无
B2	30	137.7	27	1.5	有	无	无
C1	30	91.8	18	1.0	有	四面六边	单层
C2	30	137.7	27	1.5	有	四面六边	单层
C3	30	137.7	27	1.5	有	四面六边	双层
C4	30	197.0	38	2.0	有	四面六边	双层
D1	30	91.8	18	1.0	有	扭双工字型	半层
D2	30	91.8	18	1.0	有	扭双工字型	单层
D3	30	137.7	27	1.5	有	扭双工字型	单层
D4	30	197.0	38	2.0	有	扭双工字型	单层
E1	30	91.8	18	1.0	有	扭双工字型	单层

1.5 试验测量

试验在 2 h 或 3 h 和 7 h 时刻量测了 3<sup>#</sup>断面地形。3<sup>#</sup>断面位于试验岸坡中间，位置见图 2。试验在记录所护岸坡变形冲刷的同时，使用 ADV 声学多普勒流速仪测量了试验 3<sup>#</sup>断面流速分布，测量试验工况见表 2。试验测量了试验岸坡段中间断面，即断面 3<sup>#</sup>的流场。流场测量垂线布置见图 3。垂线间隔 20 cm，每条垂线上的点间隔 2 cm。由于工况 D3、D2 和 C1 试验 7 h 后地形变化非常小，认为是定床测量。

表2 流场测量工况

工况	框架	定/动坡	流量/(L/s)	模型平均流速/(cm/s)	原型平均流速/(m/s)
1	无	定坡	91.8	18	1.0
2	无	定坡	137.7	27	1.5
3	无	定坡	197.0	38	2.0
D2	扭双工字	动坡(定)	91.8	18	1.0
4	扭双工字	定坡	137.7	27	1.5
5	扭双工字	定坡	197.0	38	2.0
C1	四面六边	动坡(定)	91.8	18	1.0
D3	扭双工字	动坡(定)	137.7	27	1.5

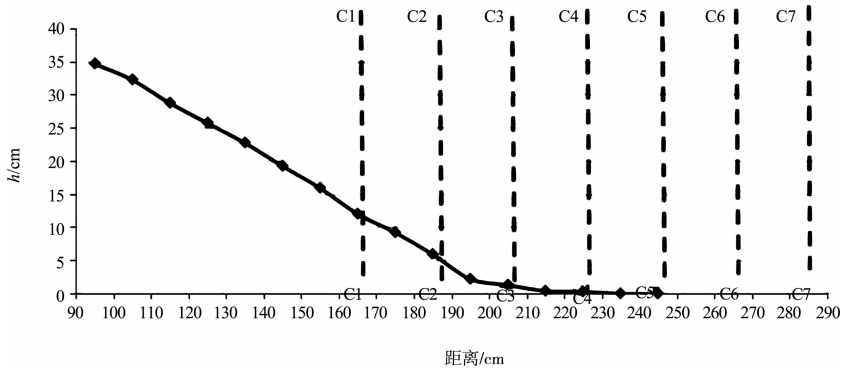


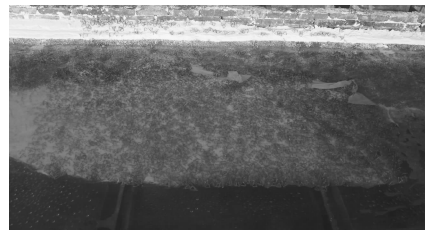
图3 坡面及测量断面垂线

## 2 试验结果分析

### 2.1 框架护岸试验岸坡守护情况

#### 2.1.1 两端无排体守护、中间四面六边透水框架守护

从工况 A1 ~ A3 情况看, 虽然有框架守护, 在不同流量下, 框架守护下的岸坡冲刷情况不一样, 但总的趋势是流量越大, 框架下的泥沙冲刷越严重, 防护效果越差。在小流量 (91.8 L/s) 试验 150 min 后 (图 4a)), 框架所护区域与初始条件对比, 地形略有冲刷, 但变化较小, 框架岸坡两端未守护的岸坡有一定冲刷。在中流量 (137.7 L/s) 下试验, 守护岸坡地形冲刷更明显, 岸坡大面积显示框架出露, 尤其是坡脚上游端, 框架完全出露, 框架岸坡两端未守护岸坡显示部分冲刷见底。在大流量 (197.0 L/s) 下试验 150 min (图 4b)), 两端未守护岸坡显示全部冲刷见底, 框架守护区域也是冲刷严重。岸坡区域显示框架全部出露, 其坡脚上游端更是显示地形冲刷, 框架下沉。虽然在大流量情况下, 泥沙被大量冲刷, 但是框架总体上仍然保持稳定, 仅有少量处于边缘的框架偶尔被水流带走, 大部分框架随着泥沙的冲刷而位置逐渐下降。



b) 工况 A3, 197.0 L/s

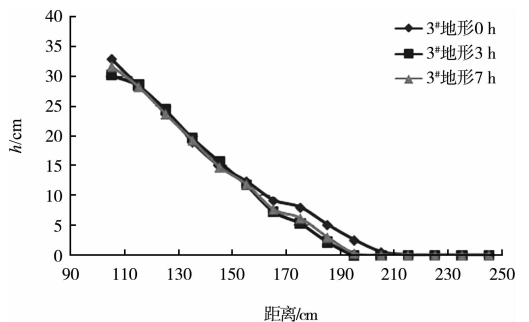
图4 两端无排体守护、中间四面六边透水框架守护下岸坡冲刷试验

#### 2.1.2 两端有排体守护、中间无透水框架守护

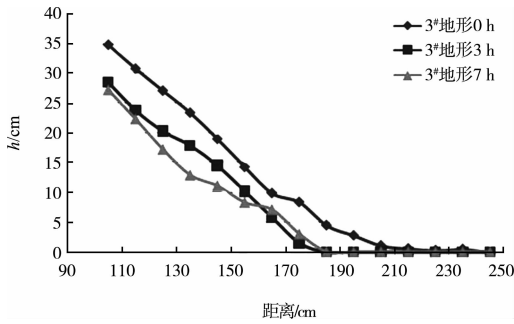
本组试验采取排体保护试验段两端岸坡, 中间无框架守护。从试验结果来看, 岸坡没有守护区域有一定的冲刷, 主要是在前 3 h 内发生, 其中斜坡上部泥沙冲刷较少, 下部较多。在 3 h 后, 岸坡坡面变化较少, 基本稳定下来。工况 B2 在工况 B1 的基础上, 采用中水, 平均流速也由 18 cm/s 增大到 27 cm/s。试验结果见图 5。地形图显示在中水流量下, 没有框架守护的岸坡冲刷严重, 在前 3 h 平均冲深 5 cm, 在岸坡上部, 还直接冲刷到泥沙斜坡下面的水泥底坡, 泥沙冲蚀严重。在接下来的 4 h, 岸坡泥沙继续被冲刷, 泥沙斜坡高



a) 工况 A1, 91.8 L/s



a) 工况 B1, 91.8 L/s, 无框架



b) 工况 B2, 137.7 L/s, 无框架

图5 两端有排体守护、中间无透水框架守护试验

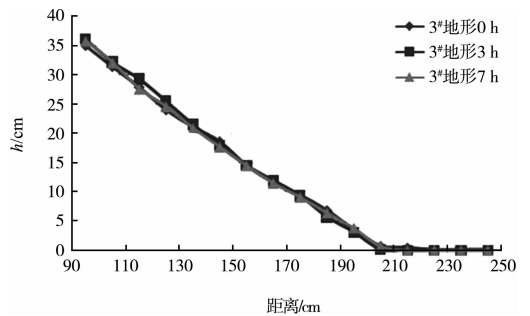
度进一步减少。到7 h时,斜坡只剩堆积在坡脚处少量泥沙。与初始岸坡比较,在中水流量下,泥沙减少了2/3。为此,接下来采用透水框架抛投在岸坡上,对比其守护效果。

### 2.1.3 两端有排体守护、中间四面六边透水框架守护

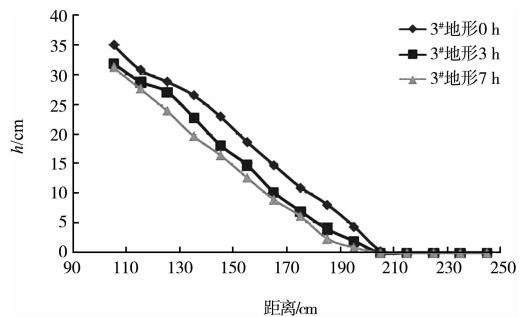
在小水流量下,四面六边透水框架单层守护效果较好,岸坡泥沙冲刷较少,守护区域的地形在试验7 h过程中基本无变化(图6工况C1)。这与没有框架守护的小水流量下(工况B1)岸坡有明显的冲刷形成了鲜明的对比,说明小水流量下,框架对岸坡的减速促淤和守护岸坡有较好的作用。在中水流量下,随着时间增多,冲刷越发明显,框架逐渐显露。工况C2框架中间3#断面地形在前3 h被冲刷较深,平均达4 cm,而在后4 h冲刷深度平均仅在1 cm左右。与工况B2比较,在中水流量下,工况C2中有四面六边透水框架守护的岸坡得到一定的防护,但仍不能避免泥沙冲刷、岸坡降低,防护效果较弱。

为了克服单层框架在流量较大情况下守护效果不理想的缺点,C3和C4开展了中、大水条件双层框架守护岸坡的冲刷试验。工况C3在双层框架守护下,岸坡泥沙冲刷较少,在3 h内岸坡高度减少约2 cm(图7),与单层框架守护比较,岸坡泥沙高度降低了一半。双层框架守护效果提升明显。同时也注意到,框架守护区域两侧有排体的岸坡在中水流量下,也有所变形。工况C4在C3基础上,开展大水流量试验。同时在C3试验时,框架守护与下游排体边缘发现排体有被掀起可能,在C4试验中,排体与框架交界处都用框架进行了压载,避免排体掀起。从试验结果来看,框架守护

区域的岸坡地形在3 h内减少4~5 cm之后就基本稳定下来。放置在守护区域下游侧与排体交界处起压载作用的框架在大流量下也难以保持稳定,部分框架被水流带走。在实际工程应用中,宜将四面六边透水框架铺设成双层或更多,增加防护效果。

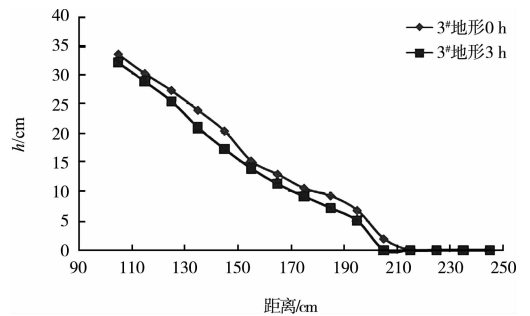


a) 工况 C1, 91.8 L/s, 四面六边单层

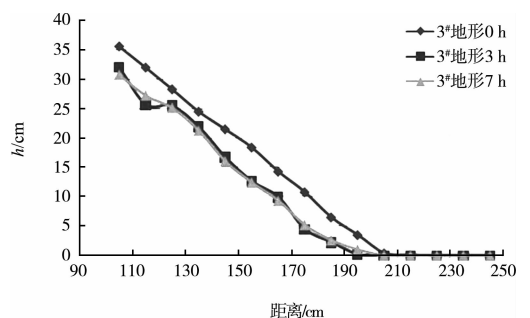


b) 工况 C2, 137.7 L/s, 四面六边单层

图6 两端有排体守护、中间有四面六边透水框架单层守护试验



a) 工况 C3, 137.7 L/s, 四面六边双层

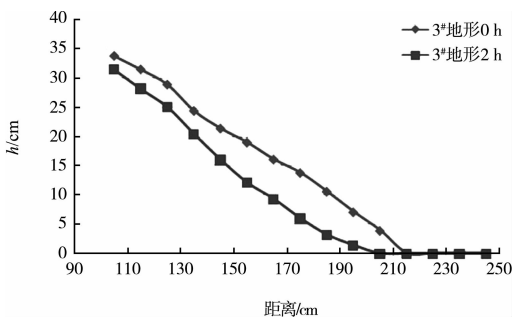


b) 工况 C4, 197.0 L/s, 四面六边双层

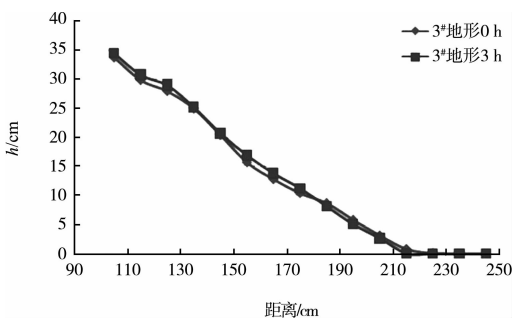
图7 两端有排体守护、中间有四面六边透水框架双层守护试验

### 2.1.4 两端有排体守护、中间扭双工字型透水框架守护

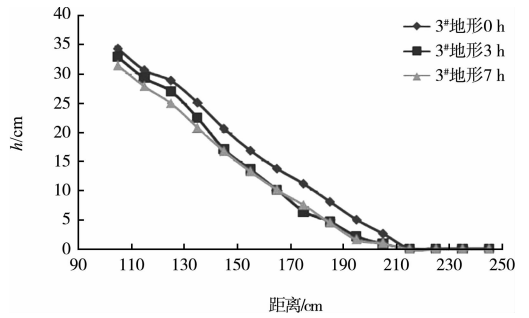
在中水流量下, D1 的半层扭双工字型框架防护岸坡效果不理想。在图 8a) 中, 2 h 后岸坡高度降低较大, 在坡脚处, 岸坡高度降低甚至达到 8 cm; 岸坡上部分, 泥沙冲刷相对较少, 也达到了 4 cm 左右。工况 D2、D3 和 D4 采取了单层框架, 提高了框架密度, 分别采用小、中和大流量试验来分析防护效果。工况 D2 相对 D1 框架密度翻倍, 由于是小水流量, 其防护效果和工况 C1 利用四面六边体防护效果相似: 岸坡泥沙在 3 h 内有少许冲刷, 岸坡高度变形较小, 基本可以不计。由于工况 D2 3 h 地形变化几乎没有, 故工况 D3 直接在 D2 基础上开展, 即 D3 的初始时刻地形为 D2 的 3 h 试验后地形。工况 D3 增加流量到中水流量。D3 试验在 3 h 和 7 h 分别记录了岸坡形态。在图 8c) 中显示在框架防护下, D3 岸坡地形在 3 h 后变化基本停止, 即基本达到稳定状态。对比原有岸坡, 岸坡高度降低明显, 约 3 cm。工况 D4 和 D3 比较, 流量由中水增加到大水条件。试验 3 h 和 7 h 后的地形测量显示大水下泥沙冲刷稳定后的岸坡比中水下岸坡略有降低, 说明大水冲刷强度更大。在实际工程应用中, 宜将扭双工字型框架铺设成单层或双层, 增加防护效果。



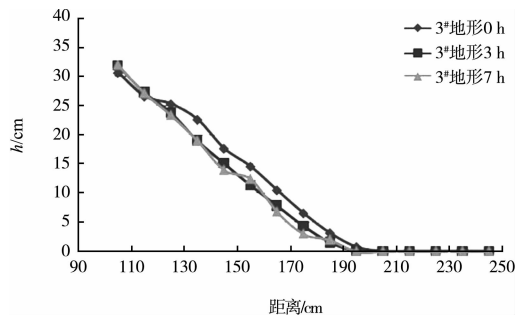
a) 工况 D1, 137.7 L/s, 扭双工字型半层



b) 工况 D2, 91.8 L/s, 扭双工字型单层



c) 工况 D3, 137.7 L/s, 扭双工字型单层



d) 工况 D4, 197.0 L/s, 扭双工字型单层

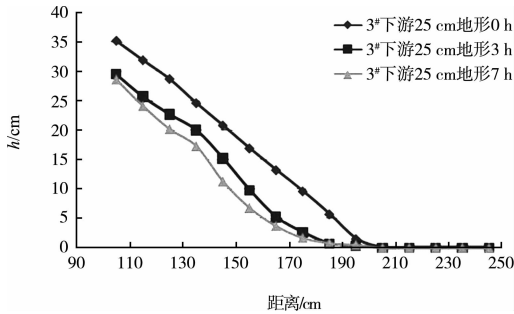
图 8 两端有排体守护、中间有扭双工字型透水框架守护试验

### 2.1.5 两端有排体守护、中间扭双工字型透水框架守护顶冲试验

前面试验都是岸坡平顺于水流, 工况 E1 是水流顶冲岸坡。工况 E1 和 D4 一样采用相同的扭双工字型透水框架和框架密度。工况 E1 以导流墙来引导水流, 同时束窄了顶冲水流的横断面(图 9)。试验导流墙宽 0.70 m, 采用小水流量 91.8 L/s, 但平均流速达 0.40 cm/s, 速度和工况 D4 平顺护岸相似。水流顶冲角为 37°。近岸坡侧导流墙一端正好到岸坡防护区域上游侧, 使得顶冲水流穿过岸坡上游侧坡脚, 直接顶冲到 3# 断面下游 25cm 处。实验显示水流顶冲岸坡处, 泥沙大量冲刷下移, 框架外露, 甚至在边缘有少量的扭双工字框架发生移动。而在顶冲点上游, 如 3# 和 3# 上游 25 cm 处, 泥沙仅少量冲刷及地形变化较小。到 7 h 时, 在顶冲位置上部冲刷见底, 框架直接搁置到底坡上(图 9b))。框架防护试验中, 顶冲试验是冲刷最严重, 并且扭双工字框架移动也是仅在顶冲下发生。试验结果说明框架不适合直接用于水流顶冲段岸坡防护。



a) 水流顶冲岸坡防护试验设置

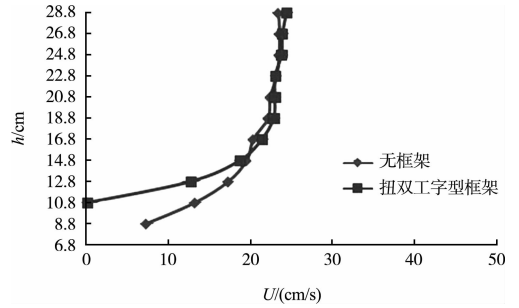


b) 工况 E1 在顶冲点处地形测量

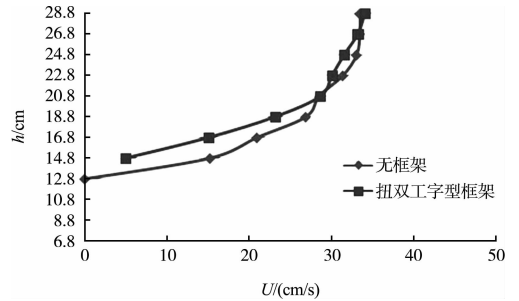
图9 两端有排体守护、中间扭双工字型透水框架  
水流顶冲守护试验

### 2.2 框架护岸流速变化

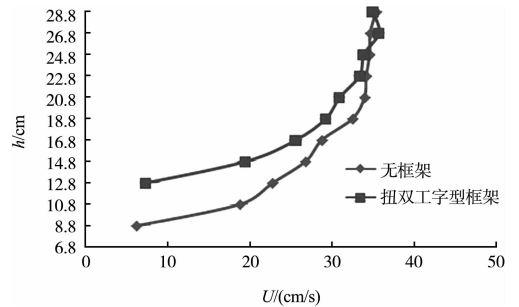
测量结果显示(图10),对于小、中和大水条件下在坡面上铺设透水框架,在各测点的底部流速均有不同程度的减少。并且,在越接近底部,框架的减速效果越明显。对于垂线C2,以高度18.8 cm为例,小、中和大水下,框架对底部流速的减少分别为:30%、14%和9%。对于垂线C3在高度12.8 cm,小、中和大水下,框架对底部流速的减少分别为:26%、68%和68%。并且在垂线C2中,小、中和大水下,框架的减速范围高度约为8 cm,约为 $3L$ ( $L$ 为框架杆件长度);在垂线C3中,小、中和大水下,框架的减速范围高度约为4~10 cm,约为 $1.5 \sim 3.7L$ ( $L$ 为框架杆件长度)。



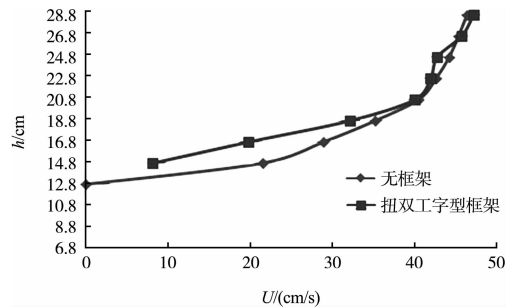
b) 小流量, 91.8 L/s, 垂线 C3



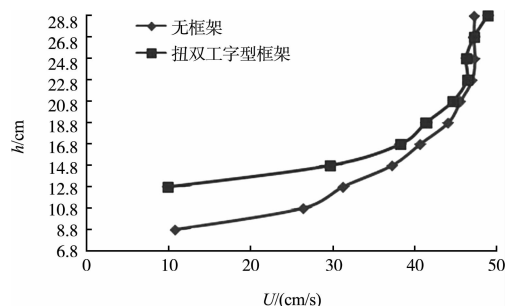
c) 中流量, 137.7 L/s, 垂线 C2



d) 中流量, 137.7 L/s, 垂线 C3

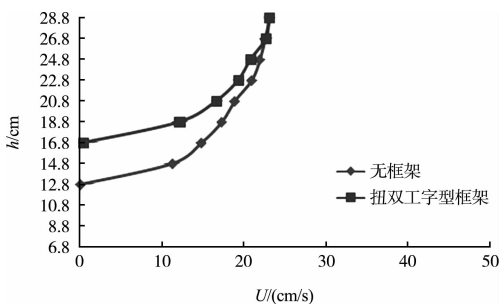


e) 大流量, 197.0 L/s, 垂线 C2



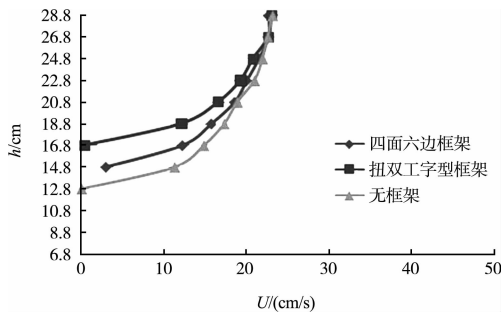
f) 大流量, 197.0 L/s, 垂线 C3

图10 小、中和大流量下扭双工字型框架  
和无框架条件下的垂线流速对比

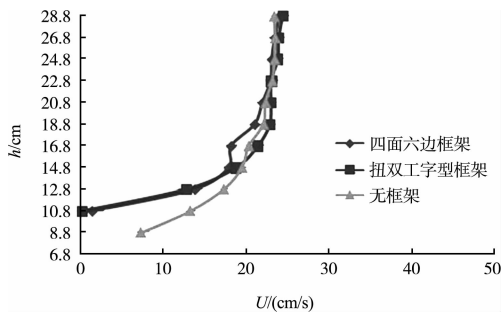


a) 小流量, 91.8 L/s, 垂线 C2

在小水流量下, 测量了铺设扭双工字型框架与四面六边框架的垂线流速情况。图 11 垂线 C2 流速分布显示扭双工字型框架的减速效果要好于四面六边框架的效果, 在 18.8 ~ 24.8 cm 范围内, 四面六边框架减速约为 1.87% ~ 9.08%, 而扭双工字型框架减速约为 5.17% ~ 29.77%。但是在垂线 C3 的流速分布两种框架的减速效果差别不大 (图 11b)。



a) 小流量, 91.8 L/S, 垂线 C2



b) 小流量, 91.8 L/S, 垂线 C3

图 11 不同框架在小水流量下的减速效果对比

### 3 结论

1) 透水框架铺设在岸坡坡面上, 被保护坡面宜采用全部铺设框架的形式, 而不采取铺设成间隔条状。透水框架保护岸坡坡面, 对于流速小于 1.0 m/s 下对岸坡的防护效果较理想, 岸坡地形变化小。可以考虑在缓流段利用透水框架来保护岸坡,

同时不阻碍岸坡与水体的水土交换。应用于实际岸坡护坡时, 对于四面六边透水框架, 宜采用双层或更多层数框架布置形式; 对于扭双工字型透水框架, 宜采用单层或双层框架布置形式。

2) 透水框架在没有其他工程辅助的情况下, 在流速大于 1.5 m/s 时, 能大幅减少水流对岸坡泥沙的冲刷, 但仍然不能避免岸坡地形的降低。随着框架密度增加, 岸坡防护效果增强。

3) 扭双工字型透水框架防护效果要好于四面六边透水框架, 在同样的防护效果下, 扭双工字型框架工程量少于四面六边透水框架。

4) 在顶冲条件下, 扭双工字型透水框架防护岸坡效果差, 框架也出现冲刷流失现象。框架不适合在没有其他工程辅助情况下用于顶冲岸段坡面的防护。

### 参考文献:

- [1] 尹书冉, 雷国平, 谭伦武, 等. 基于水槽试验及图像分析的透水框架护底检验标准研究[J]. 水运工程, 2014, 12(12): 162-167.
- [2] 王南海, 张文捷, 王玢. 新型护岸技术-四面六边透水框架群在江西护岸工程中的应用[J]. 江西水利科技, 1999, 25(1): 30-32.
- [3] 张文捷, 王南海, 王玢, 等. 四面六边透水框架群用于长江护岸固脚工程实例及设计要点[J]. 江西水利科技, 2002, 28(1): 11-16.
- [4] 邹军贤. 混凝土六边框架在长江九江段护岸中的应用及防护机理分析[J]. 江西水利科技, 2012, 38(4): 245-248.
- [5] 徐锡荣, 刘刚, 徐松年, 等. 透水框架四面体防洪护岸试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(5): 65-68.
- [6] 刘刚. 透水框架体水流特性及护岸应用试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

(本文编辑 郭雪珍)