

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.017

曹民雄, 马爱兴, 胡颖, 等. 航道整治建筑物及防护结构模拟技术研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 115-123. (CAO Min-xiong, MA Ai-xing, HU Ying, et al. Simulation technology of waterway regulation structures and protective structures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 115-123.)

航道整治建筑物及防护结构模拟技术研究

曹民雄¹, 马爱兴¹, 胡颖¹, 邓涯²

(1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 航道整治建筑物及防护结构的模型试验中, 往往采取一些简化方式进行模拟, 由此对试验结果的影响目前尚无定论, 试验规程也无相应的技术要求指导试验中防护结构物的模拟。基于相似理论提出了整治建筑物及防护结构模型的相似条件与设计方法。在可调密度易成型复合材料研发的基础上, 提出了小比尺防护结构的模拟技术。通过水槽试验研究了软体排联接方式与几何相似偏离对软体排模拟的影响。结果表明小比尺的软体排与框架宜采用密度可调、形状可重塑的复合材料进行模拟; D型软体排的压载块与排布系简化为粘结方式时, 对排体的稳定性与变形特征没有影响; 混凝土联锁块软体排采用粘结方式对排体的稳定性无影响, 对变形相似初期有一定影响, 后期无明显影响; 在保证压载块质量相似而放弃几何相似时, 将影响排体的临界失稳底流速与失稳模式。研究结果可为防护结构的模拟提供技术参考, 也为相关试验规程的修订提供技术支撑。

关键词: 航道工程; 整治建筑物模拟; 软体排模拟; 水槽试验

中图分类号: U617.9

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)05-0115-09

航道整治建筑物及防护结构就结构特点而言主要有: 坝体整治建筑物、软体排护底(或护滩)结构、框架结构、散抛石等, 其中软体排、框架、散抛石往往作为防护结构之一。以往河工模型或水槽试验研究中, 主要采用建筑物的几何相似, 模拟建筑物对水沙运动的影响, 专门针对防护结构开展模拟研究的成果^[1]较少, 但坝体附近的局部冲刷可能引起防护结构的相应变形, 反过来影响冲刷的形态与深度等试验结果。目前的试验规程均无相应的技术要求指导试验中防护结构的模拟。

航道整治建筑物及防护结构中, 散抛石如采用石英石模拟, 则保证几何相似便可满足质量相似, 进而稳定性的研究较为方便, 下文将不再讨论; 散抛石坝局部冲刷研究中往往简化为实体坝, 如采用水泥、有机玻璃或木头等材料制成, 则难以模拟局部冲刷引起的坝体垮塌对冲刷形态与深度的影响; 软体排模拟受模拟材料的限制, 以前多直接采用马赛克模拟, 近年来按压载块体质量相似而偏离几何相似的方法进行模拟^[2-5], 其中排布采用棉布模拟、压载块体用铝片^[6]、马赛克(小比尺模型)或混凝土加铁粉块^[7](大比尺模型)进行模拟, 压载块体与排布间的联接简化为特定胶水将块体直接粘贴于棉布上。但压载块体几何尺寸相似的偏离与联接方式的差异可能使得排体所受水流作用力不同, 进而影响软体排稳定性与变形的相似程度, 这一系列简化对排体变形与稳定性的影响目前没有定论; 框架结构模拟主要考虑几何相似或者质量相似, 模拟的材料常为塑料^[8-9](密度 $1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、混凝土^[10-12](密度 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、铝丝^[4](密度 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、紫铜管^[13](密度 $8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、复合可调塑料^[14](密度 $2.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)等, 如果采用与原体系不同的材质进行模拟, 往往无法在几何与质量上同时满足相似, 同时杆件尺度缩小可能引起杆件周边分离边界层的消失, 从

收稿日期: 2015-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579216, 51309160); 西部交通建设科技项目(201132874640)

作者简介: 曹民雄(1965—), 男, 江西永新人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事港口航道与工程泥沙研究。

E-mail: mxcao@nhri.cn

而影响框架的消能减速效果及框架的稳定性。

上述模拟的处理方式使得防护结构的模型加工较为容易。为使试验结果尽可能反映实际,需要研究航道整治建筑物及防护结构模拟的相似条件、设计方法及模拟技术,特别是软体排的模拟技术,以提高建筑物模型试验的模拟精度,为修订相关技术规范提供技术支撑。

1 模型相似条件

在航道整治建筑物局部冲刷及防护结构的模型试验中,首先要满足床面冲淤变形相似,再满足防护结构形态变形相似。按规程^[15]要求,床面泥沙冲淤变形相似需满足水流连续性、重力、阻力等水流运动相似条件,以及泥沙起动、输沙率、河床冲刷变形等泥沙运动相似条件。以下主要讨论建筑物结构形态变形相似问题,此处建筑物结构变形不是指组成建筑物的单元(如坝体块石、排体压载块体、框架杆件)因结构强度不足而出现的变形,是指建筑物群体在水流作用下产生的体积或形态改变。

航道整治建筑物往往修建或抛投于泥沙可动的床面,建筑物将引起周边局部水流结构的改变,引发附近局部冲刷坑发展,从而引起整治建筑物坍塌、塌陷等相应的形态变形,只是建筑物的结构特点不同而呈现出不同的变形特征:抛石坝体伴随床面冲刷而坝体坍塌;护底软体排随着排体边缘局部冲刷的形成、发展而诱发排边塌陷或悬挂,护滩软体排随着排边冲刷坑发展而排体下垂塌陷、悬挂或鼓包;框架群边缘伴随局部冲刷坑发展而框架下沉、滚落。可见,要保证建筑物结构形态变形相似,需满足结构物的几何、质量、稳定性与变形特征等相似。

几何相似:主要为整治建筑物形状与尺寸的相似。如抛石坝的长度、高度、坝顶宽度、向河坡、迎水坡、背水坡以及抛石块体的粒径组成等相似;软体排压载块体的长、宽、厚等几何形状相似,且压载块体的间距相似;框架结构的杆件长度、截面尺寸以及空间形态相似。

质量相似:这是建筑物在水流作用下维持自身稳定相似的基础,在几何相似前提下,只要模型材料密度与原型一致,则质量必然相似,如模型材料密度与原型不一致,则几何相似与质量相似无法同时满足。

稳定性相似:指建筑物在水流或波浪等荷载作用下的临界失稳流速、波浪等条件的相似。抛石坝体护面块石可能受水流作用发生晃动而逐渐失稳,软体排受水流作用发生侧掀失稳,框架结构在汛期受水流冲击可能发生位移或滚动而失稳。

建筑物变形特征相似:指建筑物在水沙运动作用下产生的体积或形态改变的相似,如抛石坝的坍塌变形、软体排边缘的塌陷或悬挂、框架群边缘下沉、滚落等变形,因而衡量建筑物变形的相似性可采用群体的体积或位移相似。

2 模型设计方法

整治建筑物局部冲刷及防护结构的研究,应按上述相似条件进行,一般首先确定几何比尺、水流与泥沙比尺、选择模型沙并确定粒径比尺,最后进行整治建筑物及防护结构模型设计。水流与泥沙比尺确定可按规范确定,本文主要探讨整治建筑物及防护结构模型设计,以下按不同的结构形式分别论述。

2.1 坝体模拟

原型坝体通常为抛石坝,一般由不同质量的堤心石和护面块石组成。对于抛石坝体的模拟,除了保证坝体外形尺寸相似外,还需保证抛石块体或护面块石的质量与级配相似,块石质量为: $W = \pi d^3 \gamma_b / 6$, 其中: W 为单个块体质量, d 为块体等效粒径; γ_b 为块石密度。块石质量比尺为 $\lambda_w = \lambda_d^3 \lambda_{\gamma_b}$ 。

当采用石英石模拟时, $\lambda_{\gamma_b} = 1$, 块石等效粒径比尺为几何比尺, 则 $\lambda_w = \lambda_H^3$ 。这表明只要采用等效粒径 $d_m = d_p / \lambda_H$ 的级配块石模拟, 即可满足质量相似, 自动满足坝体稳定性及坝体变形相似。

2.2 软体排模拟

软体排结构常用型式主要有应用于长江中游的 X 型系混凝土块软体排、D 型系混凝土块软体排, 以及

应用于长江下游的混凝土连锁块软体排等。因它们结构特点不同,以下分别论述。

2.2.1 X型系块软体排 X型系混凝土块软体排由排垫和压载块体组成(图1);排垫采用聚丙烯土工编织布缝制而成,一般沿排体宽度方向每隔0.5 m设1根宽0.05 m的纵向加筋条,用于加固系接条和增加排垫抗拉强度^[1];在纵向加筋条底下设有每2根1组的防老化型涤纶系接条 $1.000\text{ m} \times 0.012\text{ m}$ (长 $\times$ 宽),用于系接压载块体。排上压载块体为正方形C20混凝土块 $0.45\text{ m} \times 0.40\text{ m} \times 0.08\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚,下同),单块质量33.10 kg,在混凝土块内预埋2根 $1.050\text{ m} \times 0.012\text{ m}$ (长 $\times$ 宽)的系接条,用于排垫与压载块体系接,块体间距为0.05 m。

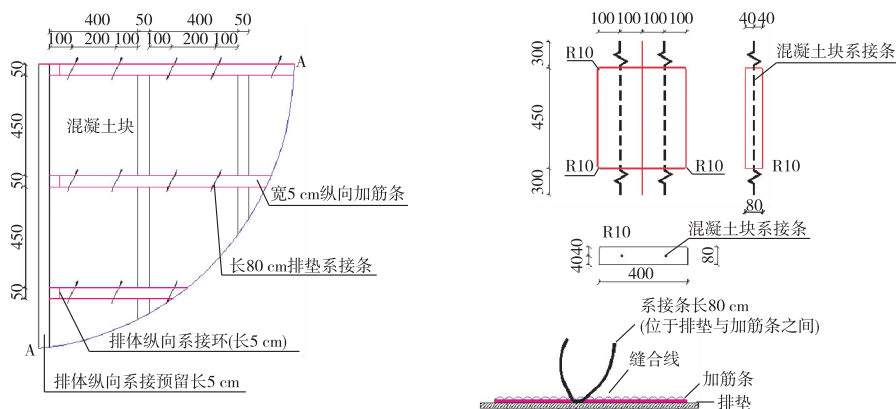


图1 X型排形状与几何尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Shape and size of X-type flexible mattress (unit: mm)

2.2.2 D型系块软体排 D型系混凝土块软体排也由排垫和压载块体组成(图2);排垫结构与X型系混凝土块软体排一致,排上压载块体为长方形C20混凝土块 $0.40\text{ m} \times 0.26\text{ m} \times 0.01\text{ m}$,单块质量21.93 kg,沿排体宽度方向块体间距0.24 m,长度方向块体间距0.1 m^[16]。

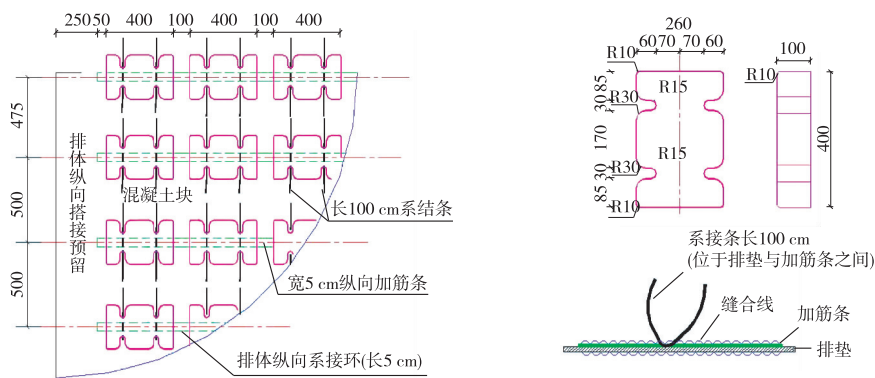


图2 D型排形状与几何尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Shape and geometric size of D-type flexible mattress (unit: mm)

2.2.3 连锁块软体排 在长江南京以下12.5 m深水航道建设工程中,混凝土连锁块软体排排垫采用长丝机织布与无纺布的复合布,单位面积质量为 0.5 kg/m^2 (0.35 kg/m^2 机织布+ 0.15 kg/m^2 无纺布)。排垫上混凝土压载块体为C20混凝土块体,密度 2400 kg/m^3 ,混凝土连锁块分为3种规格^[6]:一般为I型: $0.48\text{ m} \times 0.48\text{ m} \times 0.12\text{ m}$,质量为59.39 kg;用于堤头超前50 m护底范围的II型: $0.48\text{ m} \times 0.48\text{ m} \times 0.16\text{ m}$,质量为77.39 kg;用于排体边缘5 m范围的III型: $0.48\text{ m} \times 0.48\text{ m} \times 0.2\text{ m}$,质量为94.00 kg。在混凝土块内十字交叉预埋两根联接绳(图3),联接绳采用 $\Phi 14\text{ mm}$ 防老化丙纶绳,系结绳锚固伸入混凝土长度不小于0.2 m,长

边联接绳端头倒绕至相邻混凝土块,块体之间间距 0.02 m。

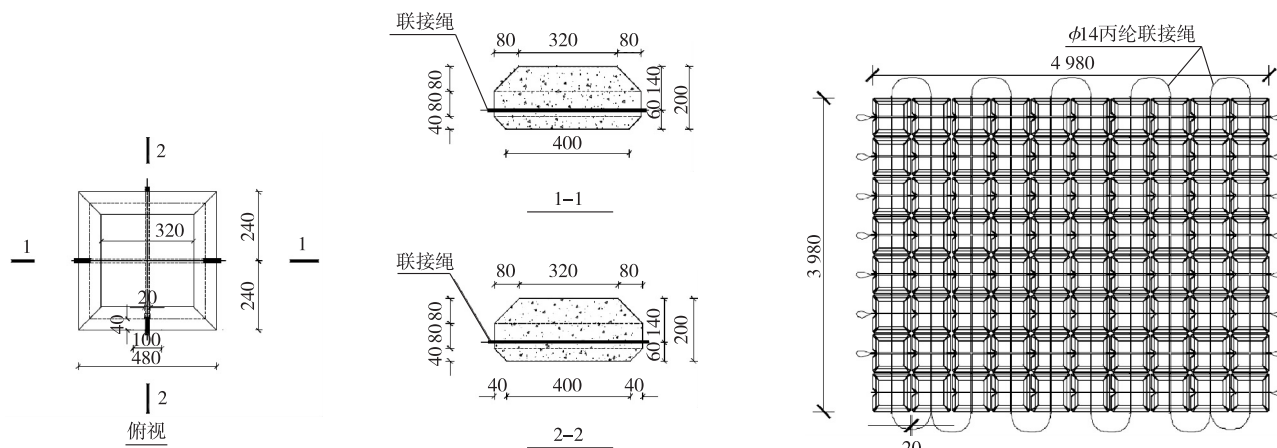


图 3 连锁块(III型)形状及尺寸(单位: mm)

Fig. 3 Shape and geometric size of concrete interlocking block (III-type) (unit: mm)

模拟软体排时,如果比尺可取 1:10 以内进行研究,则选择与原型混凝土密度($2\,400\text{ kg/m}^3$)一致的材料按几何相似进行压载块体的缩尺模拟,即保证压载块体的几何、质量相似。如果比尺选取要求 1:10 以上,制作小于 1 cm 的混凝土块较为困难,则只能采取下文提出的小比尺防护结构模拟技术。

排垫采用棉布进行模拟,块体之间的间距按几何相似控制。对于 1:10 以内的小比尺模型,加筋及系结条可按比尺缩小进行模拟;对于 1:10 以上的小比尺模型,无法严格按照原型排体构造进行模拟加工,可将压载块体与排体之间的系结方式模拟简化为将块体用特定胶水直接粘贴于棉布上。

2.3 框架结构模拟

工程中常用的透水框架为四面六边透水框架(图 4),由 6 根等长度的预制钢筋混凝土框杆相互连接组成,杆件之间采用焊接,且焊接点进行防锈处理。在南京以下 12.5 m 深水航道建设工程中提出了扭双工字型透水框架^[14](图 4),该结构为开敞式构件,杆件基本尺寸为 0.1 m×0.1 m×0.8 m,材料为钢筋混凝土,平均密度 $2\,400\text{ kg/m}^3$,单个透水框架质量 106.8 kg。

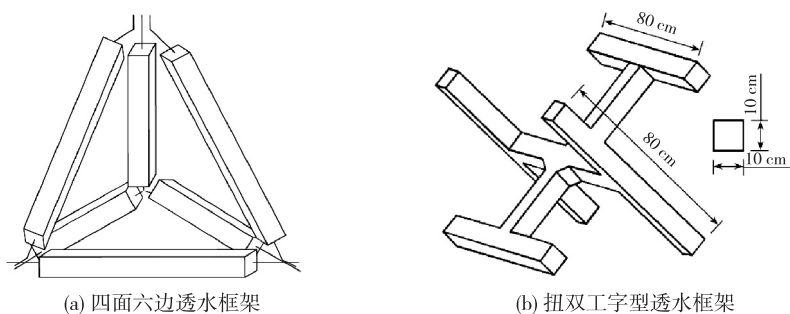


图 4 框架结构形状及尺寸

Fig. 4 Shape and geometric size of frame structures

模拟框架结构时,如果比尺可取 1:5 以内进行研究,则选择与原型混凝土密度($2\,400\text{ kg/m}^3$)一致的材料按几何相似进行杆件缩尺模拟,即保证框架的几何、质量相似。如果选取比尺要求 1:5 以上,模型杆件制作较为困难,则只能采取下文提出的小比尺防护结构模拟技术。

3 小比尺防护结构的模拟

从上述讨论可见,散抛坝体的实验室模拟较易实现,软体排与框架结构的大比尺(比尺为1:10~1:5)防护结构也可采用相同材质直接按几何相似(自然满足质量相似)进行模拟,但小比尺的软体排与框架等防护结构往往无法按几何相似制作模型构件,现有铝片、马赛克等软体排模拟材料均是在特定比尺下,且往往仅满足质量相似而放弃几何相似。要满足任意比尺的几何、质量同时相似,解决的途径只有探寻密度可调、尺寸、形状可重塑的复合材料作为模拟材料。

3.1 密度可调易成型材料研发

在对模拟材料、制作方法广泛调研及室内模拟的基础上,最终选择尼龙、氟塑料、玻璃纤维、密度调节剂等多种材料混合,添加适量的分子分散剂和耦合剂,经过混炼加工形成具有密度可调($1.1 \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$)、可融化制作不同尺寸不同形状的复合材料。

3.2 小比尺防护结构的模拟技术

因复合材料的密度可调($1.1 \sim 2.5 \text{ g/cm}^3$),完全可以按软体排压载块体或框架结构的相同密度进行调制模拟材料;同时因形状与尺寸易成型,可按几何比尺将需模拟的结构形状与尺寸开模注塑制作模型结构,经抽样检验,压载块体模型尺寸、重量的误差均小于3%。图5为比尺1:10条件下按几何、质量相似得到的D型系混凝土块软体排与混凝土联锁块软体排,其中压载块体与排垫之间的联接方式完全考虑与原型一致。图6为比尺1:20与1:40的扭双工字型透水框架。



图5 D型系块软体排与联锁块软体排(1:10)

Fig. 5 Flexible mattress of tied D-type and concrete interlocking blocks



图6 扭双工字型透水框架(1:20,1:40)

Fig. 6 Twist double H-type permeable frame

4 软体排联接方式与几何相似偏离对软体排模拟的影响

4.1 软体排压载块体与排垫联接方式对模拟效果的影响

工程中压载块体与排布之间的联接方式均为系结,块体底部与排布非粘结,而室内模拟时常简化为粘结,这种联接方式的差异是否对软体排模拟效果(排体稳定性与变形特征)产生影响,这是软体排概化模拟试验必须回答的问题。

选择长江中游应用的D型系混凝土块软体排和长江下游采用的混凝土联锁块软体排作为典型的软体排进行对比研究。这两种排体的系接方式具有代表性:D型系混凝土块软体排为每个压载块体与排布进行系接,混凝土联锁块软体排为多个压载块体之间串成单元后再与排布系接。采用正态(1:10)对两种压载块体(D型系混凝土块、混凝土联锁块)进行模拟,压载块体与排布的模拟分别考虑工程实际的系接方式与室内常用的粘结方式(图7)。通过水槽定床试验对比排体稳定性、通过水槽动床试验对比排体变形状态,最终综合分析粘结方式模拟的可行性。

4.1.1 压载块体与排垫联接方式对稳定性的影响 排体稳定性的相似,主要通过排体能抵抗的临界流速来间接反映。D型系混凝土块与混凝土联锁块几何比尺均为1:10,与排垫的连接方式分别为系接和粘结(图7)。

试验在 44 m×0.8 m×0.8 m(长×宽×高,下同)的变坡水槽中进行。试验模型水深 0.2 m,在保持水深不变的基础上,通过流量和尾门水位的联动控制,逐渐增大水流流速,观测排体失稳临界状态,并量测排体失稳时的垂向流速分布(尤其是作用于块体的近底流速),共开展 4 组试验(试验组次如表 1)。为消除观察误差,每组试验重复 3 次以上,取平均值作为软体排失稳临界水流条件。

试验中观测到无论是系结还是粘结方式,排体失稳的形式一致,均为排头掀起后的卷边失稳(图 8)。D 型软体排在系结和粘结方式下的临界失稳底流速(模型数据,下同)分别为 0.27 和 0.28 m/s,混凝土联锁块软体排在系结和粘结方式下的临界失稳底流速分别为 0.35 和 0.36 m/s(表 2)。可见室内试验中排体在系结和粘结方式下的软体排稳定性基本一致,通过粘结来代替系结的方式可行。

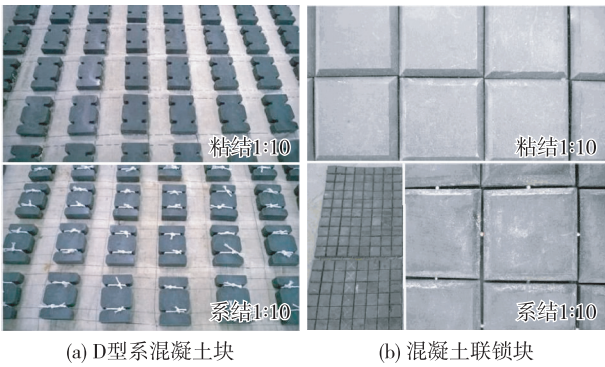


图 7 系接和粘结的 D 型系块与联锁块软体排
Fig. 7 Flexible mattress of tied & glued D-type and concrete interlocking blocks

表 1 软体排压载块体参数及稳定性试验组次

Tab. 1 Parameters of flexible mattress and experiment cases of stability

试验序号	压载块体形状	原型压载块体尺寸	块体个数及联接方式
1,2	D 型	0.40 m×0.26 m×0.10 m	9×20,系结;9×20,粘结
3,4	混凝土联锁块	0.48 m×0.48 m×0.12 m	8×20,系结;8×20,粘结
5,6	I 型混凝土联锁块	0.48 m×0.48 m×0.12 m	8×20,粘结
	方形联锁块	0.48 m×0.48 m×0.20 m	8×20,粘结

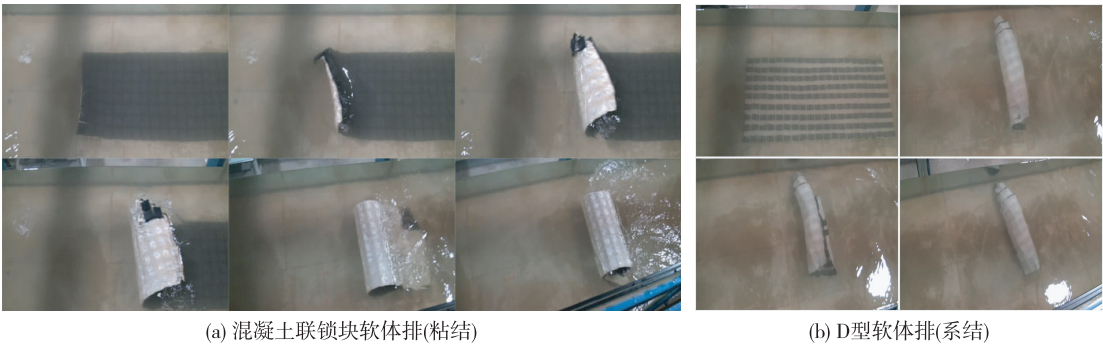


图 8 试验中软体排失稳过程
Fig. 8 Instable process of flexible mattress during testing

表 2 实测软体排失稳临界流速

Tab. 2 Measured critical velocities of flexible mattress instability

块体形状	模型比尺	联接方式	模型			原型		
			水深/ cm	垂线平均流速/ (m·s ⁻¹)	近底流速/ (m·s ⁻¹)	水深/ m	垂线平均流速/ (m·s ⁻¹)	近底流速/ (m·s ⁻¹)
D 型	1:10	系结	20.08	0.42	0.27	2.01	1.33	0.85
		粘结	19.91	0.43	0.28	1.99	1.37	0.89
联锁块	1:10	系结	20.03	0.50	0.35	2.00	1.58	1.11
		粘结	19.95	0.51	0.36	2.00	1.61	1.14
I 型联锁块	1:10	粘结	19.95	0.51	0.36	2.00	1.61	1.14
方形联锁块	1:10	粘结	20.09	0.44	0.32	2.01	1.39	1.01

注:近底流速指压载块体厚度中心处的流速。

4.1.2 压载块体与排布联接方式对排体变形的影响 系结与粘结方式的差异对排体变形的影响,主要通过水槽动床清水冲刷变形试验进行对比研究。试验在 $55\text{ m}\times 2\text{ m}\times 0.8\text{ m}$,底坡 1‰ 的宽水槽中进行,水槽中部 10 m 为动床段,深度 0.2 m 。选择比尺 $1:10$ 的系结与粘结混凝土联锁块,试验水深 0.063 m ,试验流速 0.08 和 0.12 m/s ,冲刷时间以试验中监测断面的床面地形基本不变为依据,一般进行 4 h 左右。

当试验流速 0.08 m/s 时,冲刷坑深度较小,变形不明显,两种联接方式排体的变形基本相似。从局部来看,系结方式的软体排边受冲刷侵蚀后,排边处于悬空状态;而粘结方式的软体排与底部床沙贴合更为紧密。

进一步加大水流速度至 0.12 m/s ,试验中观测到,系结方式的联锁块软体排受联接绳的影响,排边自由度较低,软体排未能下垂继续保护排体下部床沙,水流可继续淘刷排边下面的床沙(见图9);而粘结方式的联锁块软体排,当排边受到冲刷侵蚀后能够自由下垂与贴合床面,而排边外侧更易继续冲刷下切,排边冲刷偏大。进一步监测排边变形状态可知,随着排边冲刷坑的发展,无论排体悬挂接触点位于排边时(压载块下垂7个,长度为 3.5 m),还是排体悬挂接触点位于块体中心时(压载块下垂4.5个,长度为 2.25 m),采用粘结的简化方式均可较好反映系结方式的排体变形特征。

4.2 几何相似偏离对软体排模拟效果的影响

模拟现有软体排时受模拟材料限制,选择的材料密度与混凝土块密度不同,为保证质量相似,往往只能改变模型压载块的厚度,引起几何相似的偏离。如在比尺 $1:60$ 时,通常选用铝片(密度 $2.7\times 10^3\text{ kg/m}^3$)作为模拟材料^[6]模拟密度 $2.4\times 10^3\text{ kg/m}^3$ 的原体混凝土块压载块体,往往保证平面尺寸相似,减小块体厚度,以保证压载块体重量的相似。同时受制作方式的限制,通常不能考虑块体的特殊形状,只能简化为长方体形状。块体几何相似偏离较大时,可能引起软体排模拟效果的差异,这也是软体排概化模拟试验必须回答的问题。

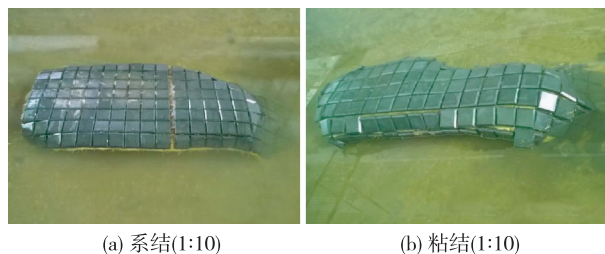
在满足质量相似条件下,通过 $44\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 变坡水槽研究几何相似偏离对软体排稳定性的影响。试验中选取 I 型混凝土联锁块($0.48\text{ m}\times 0.48\text{ m}\times 0.12\text{ m}$ 、块体上下面削角)与方形联锁块($0.48\text{ m}\times 0.48\text{ m}\times 0.196\text{ m}$),按比尺 $1:10$,密度为 2.4×10^3 与 $1.317\times 10^3\text{ kg/m}^3$ 的复合材料分别注塑制作(表1与图10)。据前文研究,系结与粘结方式对排体稳定性影响较小,因而,均采用粘结方式进行对比试验。

保持水深 0.063 m 不变的基础上,逐渐增大水流流速,观测排体失稳临界状态,并量测排体失稳时的垂向流速分布(尤其是作用于块体和框架结构的近底流速),共进行两组试验(表2),且每组试验重复3次以上,取平均值作为软体排失稳临界水流条件。试验表明:I型混凝土联锁块临界失稳底流速为 0.36 m/s ,而方形混凝土联锁块则为 0.32 m/s 。究其原因,两种压载块体质量虽然一致,但因几何相似偏离、密度小的块体较厚,排边块体迎流面受水流推力较大,更易失稳。从两块体软体排失稳模式来看:I型混凝土联锁块软体排为排头掀起后的卷边失稳,而方形联锁块软体排为排头掀起后,排体整体上浮漂移失稳。可见,在保证压载块质量相似而放弃几何相似时,将影响排体的稳定性,包括临界失稳底流速、失稳模式。

5 结 语

航道整治建筑物及防护结构模型试验中,往往采取一些简化方式模拟软体排结构与框架结构等,由此对试验结果的影响程度目前没有定论,试验规程也没有相应的技术要求指导试验中防护结构物的模拟。

(1) 整治建筑物局部冲刷及防护结构试验,应满足床面冲淤变形相似(包括水流运动相似与泥沙运动相



(a) 系结(1:10) (b) 粘结(1:10)

图9 不同联接方式的软体排冲刷结果对比

Fig. 9 Comparison of scour around flexible mattress under different connection modes

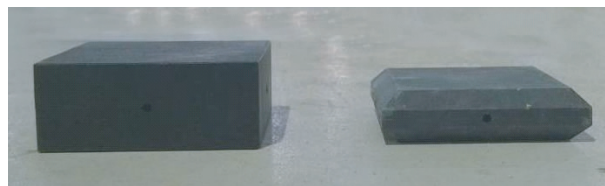


图10 试验联锁块压载块体

Fig. 10 Concrete interlocking block during testing

似)的条件,再满足建筑物结构的几何、质量、稳定性及形态变形相似条件。

(2)航道整治建筑物及防护结构的模拟,在保证几何、质量相似的前提下宜优先选用与原型密度相同的材料。抛石坝体可采用满足几何相似的等效粒径级配块石模拟;大比尺(1:5以内)的软体排与框架结构可选择与原型混凝土密度一致的材料按几何相似进行压载块体和框架结构的缩尺模拟;小比尺的软体排与框架需采用密度可调、尺寸、形状可重塑的复合材料作为模拟材料。

(3)试验结果表明,D型软体排的压载块与排布系结简化为粘结方式时,对排体的稳定性与变形特征没有影响;混凝土联锁块软体排采用粘结方式对排体的稳定性无影响,对变形相似有一定影响。将混凝土联锁块软体排简化为粘结方式,在冲刷初期或冲刷坑深度较小时,粘结方式的变形能力强于系结方式、排边冲刷偏大;当冲刷坑深度发展至3.5 m以上时,粘结的简化方式对排体变形影响不明显。

(4)在保证压载块质量相似而放弃几何相似时,将影响排体的临界失稳底流速与失稳模式。

参 考 文 献:

- [1] 刘晓菲,王平义,杨成渝. X型系混凝土块软体排模拟技术[J]. 水运工程, 2011(2): 102-107. (LIU Xiao-fei, WANG Ping-yi, YANG Cheng-yu. Simulation technique about X-type flexible mattress[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(2): 102-107. (in Chinese))
- [2] 刘怀汉,付中敏,闫军,等. 长江中游航道整治建筑物护滩带稳定性研究[C]//国际航运协会2008年会暨国际航运技术研讨会论文集, 2008: 166-170. (LIU Huai-han, FU Zhong-min, YAN Jun, et al. Stability of beach protection zone in waterway regulation project at midstream of Yangtze River[C]//The world association for waterborne transport infrastructure, 2008: 166-170. (in Chinese))
- [3] 赵凤亚,李彪,李长铃. 不同河床泥沙条件下的整治建筑物软体排护底技术研究[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(9): 157-158. (ZHAO Feng-ya, LI Biao, LI Chang-ling. Bottom protection technique of flexible mattress in waterway regulation under different riverbed sediment[J]. China Water Transport, 2012, 12(9): 157-158. (in Chinese))
- [4] 曹民雄,蔡国正,王秀红,等. 边滩水沙运动特点及护滩建筑物破坏机理研究[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2008. (CAO Min-xiong, CAI Guo-zheng, WANG Xiu-hong, et al. Characteristics of water and sediment transport around point bar and failure mechanism of beach protection structures[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [5] 马爱兴,曹民雄,王秀红,等. 长江中下游航道整治护滩带损毁机理分析及应对措施[J]. 水利水运工程学报, 2011(2): 32-38. (MA Ai-xing, CAO Min-xiong, WANG Xiu-hong, et al. Failure mechanism and relevant measures for beach protection band in lower-middle reaches of Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011(2): 32-38. (in Chinese))
- [6] 曹民雄,李青云,蔡国正,等. 长江口岸直水道鳗鱼沙心滩头部守护工程局部冲刷水槽概化试验研究——I:水槽概化与护滩建筑物模拟设计[J]. 水运工程, 2011(7): 106-112. (CAO Min-xiong, LI Qing-yun, CAI Guo-zheng, et al. Study on local scour deformation flume generalization experiment of Manyusha shoal head protection engineering in straight reach of Yangtze River estuary: I. Design of flume generalized and protection engineering building simulation[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(7): 106-112. (in Chinese))
- [7] 马爱兴,王秀红,蔡国正,等. 潮汐河段护底软体排结构稳定性及余排宽度计算试验研究[R]. 南京:南京水利科学研究院, 2014. (MA Ai-xing, WANG Xiu-hong, CAI Guo-zheng, et al. Experimental study on structure stability of beach protection flexible mattress and mattress width calculation in tidal reach[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [8] TANG H W, DING B, CHIEW Y M. Protection of bridge piers against scouring with tetrahedral frames[J]. International Journal of Sediment Research, 2009(4): 385-399.
- [9] LU J Y, CHANG T F, CHIEW Y M. Turbulence characteristics of flows passing through a tetrahedron frame in a smooth open-channel[J]. Advances in Water Resources, 2011(34): 718-730.
- [10] 吴龙华,周春天,严忠民,等. 架空率、杆件长宽比对四面六边透水框架群减速促淤效果的影响[J]. 水利水运工程学报, 2003(3): 74-77. (WU Long-hua, ZHOU Chun-tian, YAN Zhong-min, et al. Effects of overhead ratio and poles length-width ratio on deceleration and accretion promotion of tetrahedron-like penetrating frames[J]. Hydro-Science and Engineering, 2003(3): 74-77. (in Chinese))
- [11] 周根娣,顾正华,高柱,等. 四面六边透水框架尾流场水力特性[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 9-12. (ZHOU Gen-di, GU Zheng-hua, GAO Zhu, et al. Hydraulic characteristics of tail flow field of tetrahedron-like permeable frame[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(3): 9-12. (in Chinese))

- di, GU Zheng-hua, GAO Zhu, et al. Hydraulic characteristics of tetrahedron-like penetrating frame wake[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(3): 9-12. (in Chinese))
- [12] 李若华, 王少东, 曾甄. 穿越四面六边透水框架群的水流阻力特性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(10): 64-66. (LI Ruo-hua, WANG Shao-dong, ZENG Zhen. Experimental study on the resistance characteristic of water flow through the permeable frames of tetrahedron with six sides[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(10): 64-66. (in Chinese))
- [13] 陆彦, 陆永军. 清水冲刷条件下长江航道整治建筑物适应性及水毁研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2013. (LU Yan, LU Yong-jun. A study of waterway regulation structures adaptability in Yangtze River under clear water scour and water damage[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2013. (in Chinese))
- [14] 马爱兴, 曹民雄, 谭伦武, 等. 扭双工字型透水框架防冲机理试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(1): 8-16. (MA Ai-xing, CAO Min-xiong, TAN Lun-wu, et al. Experiment studies of erosion protection mechanism of twist double H permeable frame group[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(1): 8-16. (in Chinese))
- [15] JTJ/T 232—1998 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程[S]. (JTJ/T 232—1998 Technical regulation of modelling for flow and sediment in inland waterway and harbor[S]. (in Chinese))
- [16] 肖庆华, 潘美元, 雷国平, 等. D型软体排沉排施工中缩撕断排机理[J]. 水运工程, 2015(1): 200-203. (XIAO Qing-hua, PAN Mei-yuan, LEI Guo-ping, et al. Mechanism of shrinkage tearing breakage of type D flexible mattress in mattress sinking construction[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(1): 200-203. (in Chinese))

Simulation technology of waterway regulation structures and protective structures

CAO Min-xiong¹, MA Ai-xing¹, HU Ying¹, DENG Ya²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In previous experiments on the local scour and protective structures around the navigable waterway regulation structures, several simple simulation methods were utilized for dikes, flexible mattress and frame structures. The influences of these methods on experiment results are not available, and there are not any relevant technical requirements on structure model experiments in the test regulations. In this paper, on the basis of similarity theory, similarity conditions and design methods are proposed for the studies of local scour and protective structures around the navigable waterway regulation structures; based on the composites with characteristics of adjustable density and easy forming, the simulation technology of small scale protective structures is developed; and the influences of joint pattern and geometric similarity deviation on the simulation of the flexible mattresses are studied through flume experiments. The analysis results mentioned above show that the small-scale flexible mattress and frame structures should be simulated by a kind of composites having adjustable density and variable formation. Simplifying a tied concrete interlocking block of the D-type flexible mattress as a glued concrete interlocking block has no influences on stability and variation characteristics of the mattress, and the glued concrete interlocking flexible mattress has no influences on the mattress, only having a slight influence on the initial deformation similarity and no great influence on the late. Keeping mass similarity and neglecting geometric similarity of the interlocking block will influence critical instability-induced bottom velocities and instable modes of the mattress. The research results could provide a technical reference for the simulation of the local scour and protective structures, and for the modification of the relevant test regulations and codes.

Key words: waterway engineering; simulation of regulation structures; flexible mattresses simulation; flume experiments