



# 生态型立体网状护坡结构稳定性试验研究

潘美元<sup>1,2</sup>, 董利瑾<sup>1,2</sup>

(1. 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430040;

2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 针对常规生态护坡结构消能减速功能差、生态效果不佳等问题, 基于三维立体透空消能思想和生态环境保全的孔隙理论, 研发了一种新型生态型护坡结构——立体网状护坡结构, 提出该结构的生态设计理念。通过概化水槽试验, 研究陶粒混凝土和素混凝土两种材料结构在波流耦合作用下的稳定性, 提出了增强结构稳定性的相关措施。生态型立体网状护坡结构可用于长江中下游及潮汐河段航道整治护坡工程中, 为航道整治理论生态工程提供了新素材, 有利于推动航道治理技术创新和生态技术进步。

**关键词:** 立体网状; 水槽试验; 波浪稳定性

**中图分类号:** U 617.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)01-0119-06

## Experimental study on stability of ecotype three-dimensional reticulation slope protection structure

PAN Mei-yuan<sup>1,2</sup>, DONG Li-jin<sup>1,2</sup>

(1. Changjiang Waterway Survey Design and Research Institute (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Wuhan 430040, China)

**Abstract:** To solve poor deceleration function and poor ecological effect of conventional ecological slope protection structure, based on the three-dimensional energy dissipation thought and pore theory of ecological environment preservation, a new ecological slope protection structure, three-dimensional reticulation slope protection structure, are developed. Through generalized flume experiment, the stability of ceramsite concrete and plain concrete under action of wave current coupling are studied, and relevant measures to enhance the structure stability are proposed. The new slope protection structure could be used in the channel regulation and slope protection engineering in the middle and lower Yangtze River and tidal reach, which provides new materials for the channel regulation theory, and would promote the technological innovation and ecological technological progress of channel regulation.

**Keywords:** three-dimensional reticulate; flume experiment; wave stability

近年来,随着国家生态文明航道建设的大力推进,生态护坡结构和相关河流生态学技术理论在长江干线航道整治中的护岸措施中得到了迅速发展。工程实践表明,现有的生态护坡结构主要通过覆盖层隔离水流,避免水流冲蚀营养土,从而起保土作用,结构基本无消能减速功能。工程完工后,经过一个洪水期,水位变动区中下部坡面营养土和植被种子大部分被冲蚀,生态效果

不佳。

立体网状护坡结构基于三维立体透空消能思想,通过结构影响因素的水槽试验研究提出新型生态型护坡结构<sup>[1]</sup>。本文在此基础上,利用波流耦合作用概化水槽试验,研究立体网状护坡结构的稳定性,针对性地提出增强结构稳定性的相关措施,为立体网状护坡结构的推广应用提供技术支持。

**收稿日期:** 2021-02-18

**作者简介:** 潘美元(1982—),男,硕士,高级工程师,从事港口、航道工程结构及水沙运动规律研究。

1 结构设计及机理

1.1 结构设计

通过结构影响因素水槽试验研究<sup>[2]</sup>提出的新型生态型护坡结构高 250 mm，由外框格栅面板和内十字格栅面板两部分组成，外框格栅面板平面为正方形，内十字格栅面板包含 4 块翼板，并在格栅面板上开孔(图 1)。

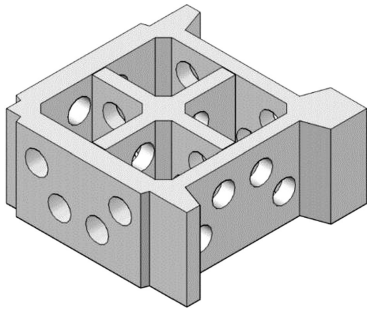
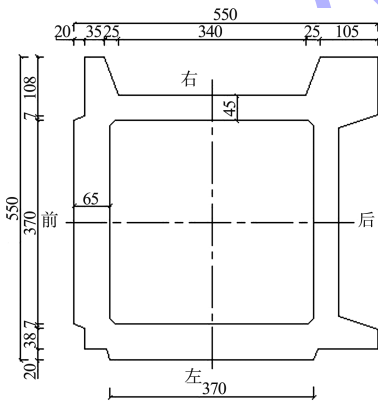


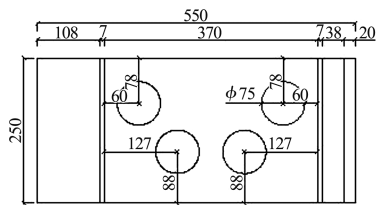
图 1 立体网状护坡结构

1.1.1 外框格栅面板

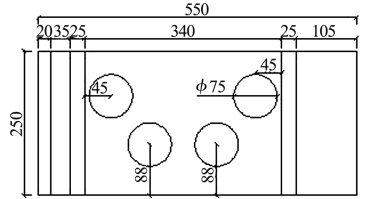
外框格栅面板外轮廓尺寸 550 mm×550 mm，内轮廓尺寸 370 mm×370 mm，内轮廓 4 个角形成 10 mm×10 mm 的消角；凸侧壁面厚 65 mm、凹侧壁面厚 45 mm，在面板上对称开圆孔，孔径 75 mm，上圆孔距离顶边 78 mm，下圆孔距离底边 88 mm(图 2)。



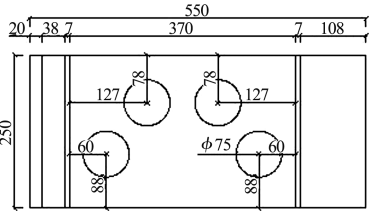
a) 俯视图



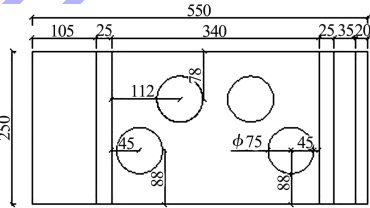
b) 前视图



c) 后视图



d) 左视图

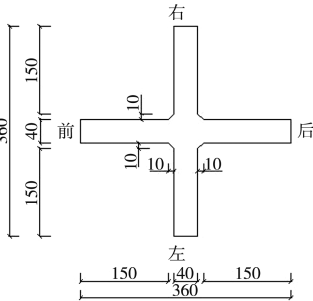


e) 右视图

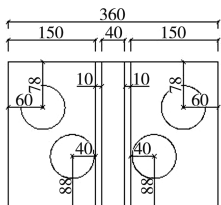
图 2 外框构件 (单位: mm)

1.1.2 内十字格栅面板

内十字格栅面板由 4 块长 160 mm、壁厚 40 mm 的翼板组成，翼板对称开圆孔，孔径 75 mm，上圆孔距离顶边 78 mm，下圆孔距离底边 88 mm，内十字构件中心形成 10 mm×10 mm 的消角(图 3)。



a) 俯视图



b) 前/后视图

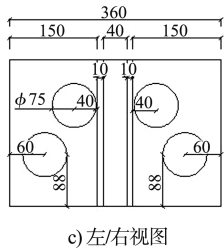


图 3 内十字构件 (单位: mm)

1.2 设计理念

立体网状护坡结构利用生态环境保全的孔隙理论, 通过相互之间两个方向凹凸镶嵌形成一个三维空间。结构通过格栅面板阻挡水流, 面板开孔从而利于坡面水体交换和介质流通, 同时结构通过消减格栅内涡流能量等来消减波能、水流流速和紊动强度快速衰减, 直至趋于稳定, 在格栅内部营造一种缓和的水动力环境, 促进泥沙落淤, 提高对坡面底部营养土的防护, 为植被提供良好生长环境。结构平面的大空隙为植物留出生长空间, 面板开孔有利于植被根系往四周扩延, 从而

形成一个“加筋”的固土护坡, 实现生态保护功能。

对于长时间淹没的区域, 结构能为水生生物营造适宜的水动力环境, 为沉积物组成和底栖动物群落的稳定构建良好的条件<sup>[3]</sup>。

2 波流共同作用下稳定性试验

2.1 模型设计

模型正态几何比尺为 1:3, 将立体网状结构分别布置在 1:24(口岸直水道鳊鱼沙右槽右岸现场岸坡坡比) 和 1:5 坡比的边坡上进行波浪稳定性试验。波浪稳定性试验在南京水利科学研究院大波浪水槽中进行, 波浪水槽长 60 m、宽 1.8 m、高 1.8 m。水槽分为 0.8 m 和 1.0 m 两个工作区, 0.8 m 宽工作区用来安放模型断面和进行模型试验, 1.0 m 宽工作区用于扩散造波板的二次反射波。水槽一端为消浪缓坡, 另一端为推板式不规则波造波机和二次反射波浪吸收装置(图 4)。

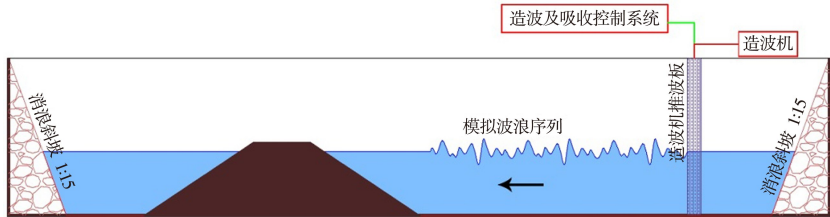


图 4 试验波浪水槽

2.2 试验条件

立体网状结构可采用陶粒混凝土和素混凝土材料预制, 陶粒混凝土质量小、便于人力搬运, 保水性相对较好, 但强度较低, 易折断<sup>[4]</sup>。素混凝土强度高、不易折断, 但质量大、人力搬运较为吃力。

立体网状结构模型材料密度分别为 1.8 g/cm<sup>3</sup>

(陶粒混凝土) 和 2.4 g/cm<sup>3</sup>(素混凝土), 分别选取平行于边坡的波流共同作用(顺水流方向)以及垂直于边坡(垂直水流方向)的单独波浪作用两种工况, 选择口岸直水道不同流量级对应不同水位进行波浪稳定性试验, 具体试验的水流条件和波浪要素见表 1。

表 1 波浪稳定性试验条件

水位	波浪方向	波高 $H/\text{m}$	周期 $T_m/\text{s}$	流速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
多年平均洪峰流量 $Q=57\,500\,\text{m}^3/\text{s}$ 对应水位 2.81 m	0°(顺水流方向)	1.4( $H_{13\%}$ )	4.4	1.14
	90°(垂直水流方向)	1.0( $H_{5\%}$ )	3.3	—
多年平均流量 $Q=28\,500\,\text{m}^3/\text{s}$ 对应水位 1.35 m	0°(顺水流方向)	1.4( $H_{13\%}$ )	4.4	0.94
	90°(垂直水流方向)	0.8( $H_{13\%}$ )	3.3	—
淹没水深 0.5 m	0°(顺水流方向)	1.4( $H_{13\%}$ )	4.4	0
	90°(垂直水流方向)	0.8( $H_{13\%}$ )	3.3	—

陶粒混凝土和素混凝土结构内摩擦角在 45°以上,土内摩擦角在 12°~45°。根据土力学基本原理,静水条件下边坡坡角小于土内摩擦角时<sup>[5]</sup>,立体网状结构在边坡上稳定。

结构纵向垂直水流方向布置,坡比为 1:5(坡角 11.3°),护坡段水深变化较大,考虑破碎水深不同的作用位置对护坡影响不同,因此选取破碎水深在护坡不同位置(护坡底部前缘、护坡底部、护坡中部、护坡顶部、护坡顶部后缘)处进行稳定性试验。

2.3 试验结果

2.3.1 顺水流方向

立体网状结构纵向顺水流方向布置见图 5。

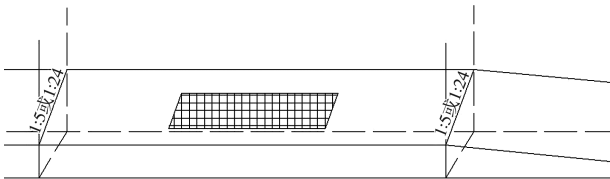


图 5 结构顺水流方向布置

在波浪和潮流共同作用下,立体网状结构在各工况下的稳定性试验结果见表 2。

表 2 顺水流方向结构稳定性试验结果

水位	波况	稳定性	
		1:24 坡比	1:5 坡比
2.81 m( $Q=57\,500\text{ m}^3/\text{s}$ )	$H_{13\%}$ 规则波+流	稳定	稳定
	不规则波+流	稳定	稳定
1.35 m( $Q=28\,500\text{ m}^3/\text{s}$ )	$H_{13\%}$ 规则波+流	稳定	陶粒混凝土结构的末端位移明显,素混凝土结构的末端位移较为明显
	不规则波+流	稳定	—
淹没水深 0.5 m	$H_{13\%}$ 规则波	陶粒混凝土结构末端位移失稳,素混凝土格栅稳定	陶粒混凝土结构的末端位移失稳,素混凝土结构稳定

多年洪峰流量( $Q=57\,500\text{ m}^3/\text{s}$ )对应水位(2.81 m),在规则波( $H_{13\%}=1.4\text{ m},T=4.4\text{ s}$ )叠加水流(流速  $v=1.14\text{ m/s}$ )作用下,以及不规则波( $H_{13\%}=1.4\text{ m},T_m=4.4\text{ s}$ )叠加水流(流速  $v=1.14\text{ m/s}$ )累计作用时间相当于原型 3 h 后,陶粒混凝土和素混凝土立体网状结构在坡比分别为 1:24 和 1:5 工况下,结构未发生位移,结构稳定。

多年平均流量( $Q=28\,500\text{ m}^3/\text{s}$ )对应水位(1.35 m),陶粒混凝土和素混凝土立体网状结构在坡比为 1:24 时,在规则波( $H=1.4\text{ m};T=4.4\text{ s}$ )叠加水流(流速  $v=0.94\text{ m/s}$ )作用下,以及不规则波( $H_{13\%}=1.4\text{ m};T_m=4.4\text{ s}$ )叠加水流(流速  $v=0.94\text{ m/s}$ )累计作用时间相当于原型的 3 h 后,结构未发生位移,结构稳定。在坡比为 1:5 时,陶粒混凝土结构的下游末端发生明显向下游和坡底方向的位移,结构失稳;将排尾 3 排格栅更换为素混凝土结构后,则最下游末端结构仍有较为明显的位移,结构失稳(图 6)。



a) 陶粒混凝土



b) 素混凝土

图 6 坡比 1:5 时,多年平均流量结构末端失稳



淹没水深 0.5 m, 流速为 0 m/s, 在不规则波 ( $H_{13\%} = 1.4\text{ m}$ ,  $T_m = 4.4\text{ s}$ ) 对结构进行单独作用下, 累计作用时间相当于原型的 3 h 后, 陶粒混凝土立体网状结构在坡比分别为 1:24 和 1:5 工况下, 结构的下游末端在破碎波的作用下发生明显向下游和坡底方向的位移, 结构失稳(图 7); 将排尾 3 排格栅更换为素混凝土结构后, 结构保持稳定。

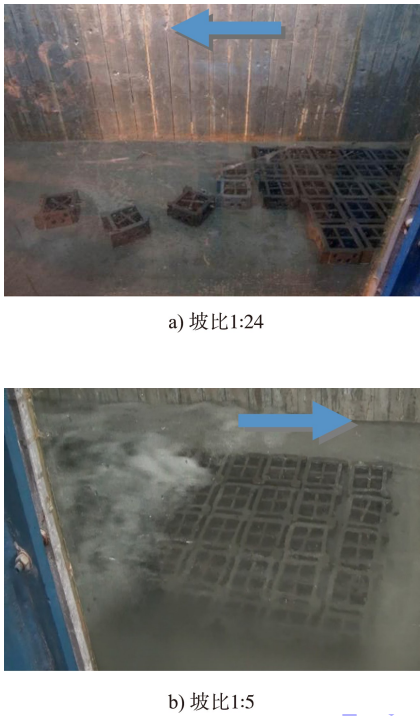


图 7 淹没水深 0.5 m 陶粒混凝土结构末端失稳

2.3.2 垂直水流方向

立体格栅结构纵向垂直水流方向布置(图 8), 仅考虑纯波浪作用, 沿坡面斜坡方向铺设 21 排结构。

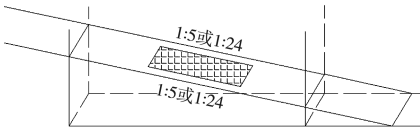


图 8 结构垂直水流方向布置

2.3.3 边坡比 1:24

坡比为 1:24 时, 在纯波浪作用下, 立体网状结构在不同流量级对应不同水位工况下的稳定性试验结果见表 3。

表 3 垂直水流方向结构在边坡比 1:24 稳定性试验结果

水位	波况	稳定性
		1:24
2.81 m ( $Q=57\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ )	$H_{5\%}$ 规则波	稳定
	$H_{13\%}$ 规则波	稳定
1.35 m ( $Q=28\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ )	不规则波	稳定
淹没水深 0.5 m	$H_{13\%}$ 规则波	陶粒混凝土结构的底部位移失稳, 素混凝土结构稳定

多年平均洪峰流量 ( $Q=57\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ ) 对应水位 (2.81 m), 在规则波 ( $H_{5\%} = 1.0\text{ m}$ ,  $T = 3.3\text{ s}$ ) 作用下, 陶粒混凝土和素混凝土立体网状结构未发生位移, 结构稳定。

多年平均流量 ( $Q = 28\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ ) 对应水位 (1.35 m), 在规则波 ( $H_{13\%} = 0.8\text{ m}$ ,  $T = 3.3\text{ s}$ ) 作用下, 以及不规则波 ( $H_{13\%} = 0.8\text{ m}$ ,  $T_m = 3.3\text{ s}$ ) 累计作用时间相当于原型 3 h 后, 陶粒混凝土和素混凝土立体网状结构未发生位移, 结构稳定。

淹没水深的临界条件下, 在规则波 ( $H_{13\%} = 0.8\text{ m}$ ,  $T = 3.3\text{ s}$ ) 作用下, 波浪沿坡面爬高并破碎, 破碎波浪冲击到结构底部的立体网状结构。陶粒混凝土结构的底部立体网状结构发生位移(图 9), 结构失稳; 将结构底部 3 排换为素混凝土结构后, 结构稳定。



图 9 陶粒混凝土结构护坡(边坡比 1:24)失稳

2.3.4 边坡比 1:5

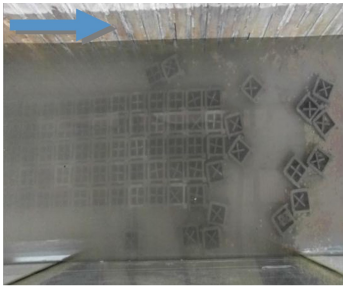
在规则波 ( $H_{5\%} = 1.0\text{ m}$ ,  $T = 3.3\text{ s}$ ) 破碎水深 0.6~0.8 m 情况下, 分别进行破碎水深在护坡不同位置(护坡底部前缘、护坡底部、护坡中部、护坡顶部、护坡顶部后缘)处的稳定性试验, 结构护坡(边坡比 1:5)失稳情况见图 10。

1) 当波浪破碎发生在护坡顶部时, 波浪破碎对护坡顶部上方结构冲击明显。陶粒混凝土结构护坡顶部上方结构发生明显的位移, 将结构更换

为素混凝土结构后，护坡顶部上方结构仍发生一定位移，结构失稳。

2) 当波浪破碎发生在护坡中部时，波浪破碎前在护坡底部的结构发生变形触底作用，护坡底部结构开始失稳，同时受到波浪破碎作用力以及破碎后的回流水流力，护坡底部结构卷向深水，护坡底部大面积结构出现明显的位移，结构失稳较为严重。

3) 当波浪破碎发生在护坡底部时，受波浪力作用，陶粒混凝土结构护坡底部结构整体向下滑动，将结构更换为素混凝土结构后，护坡底部少量结构仍存在较为明显的位移，结构失稳。



a) 破波带靠近护坡顶部(陶粒混凝土)



b) 破波带位于护坡中部(陶粒混凝土)



c) 破波带位于护坡底部(素混凝土)

图 10 结构护坡(边坡比 1:5)失稳

3 结语

1) 立体网状结构在波流作用下的稳定性与材料密度有关，素混凝土结构的稳定性高于陶粒混凝土结构。

2) 立体网状结构在波流作用下的稳定性与护坡的坡度有关。素混凝土结构在 1:24 坡比时，结构稳定；坡比为 1:5、多年平均流量  $Q=28\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ ，在顺水流方向规则波 ( $H_{13\%}=1.4\ \text{m}$ ； $T_m=4.4\ \text{s}$ ) 叠加水流(流速  $v=1.14\ \text{m/s}$ ) 作用下，以及顺水流方向不规则波 ( $H_{13\%}=1.4\ \text{m}$ ； $T_m=4.4\ \text{s}$ ) 下，素混凝土立体网状结构末端发生位移，结构失稳。

3) 坡比为 1:5、规则波 ( $H_{5\%}=1.0\ \text{m}$ ； $T=3.3\ \text{s}$ )、破碎水深 0.6~0.8 m 情况下，立体网状素混凝土结构在波浪破碎位置均发生位移，结构失稳，其中破碎波位于坡面中部时结构失稳较为严重。

4) 结合稳定性试验结果，建议加强立体网状护坡结构下游末端及护坡底部等部位，采用铺石马道、开挖铺石基槽或锚固等措施确保结构整体稳定。

参考文献：

[1] 潘美元, 马爱兴. 南京以下 12.5 米深水航道二期工程生态护坡结构研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2018.

[2] 董利瑾, 张素雅, 潘美元. 立体网状生态护坡结构水流特性和影响因素研究[J]. 中国水运(航道科技), 2020(5): 38-45.

[3] 长江南京以下深水航道建设工程指挥部. 南京以下 12.5 米深水航道工程实践与创新[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.

[4] 李辛庚, 闫风洁, 岳雪涛, 等. 陶粒混凝土的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11): 3407-3418.

[5] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

( 本文编辑 武亚庆)