

· 航道及通航建筑物 ·

新型生态护坡结构物理模型动床试验研究^{*}



李健^{1,2}, 王平义^{1,2}, 付中敏³, 韩林峰^{1,2}, 王梅力^{1,2}

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430000)

摘要:近年来长江中下游实施了一系列生态护坡工程项目, 具有很强的生态功能。基于保护长江中下游岸坡稳定性及为水生动植物提供良好生存环境的目标, 提出新型生态护坡结构。通过物理模型动床试验观察新型生态护坡结构对不同类型岸坡的保护效果, 分析不同类型岸坡冲淤变化机理。观察不同水流入射角度对弯曲河道岸坡稳定性影响, 针对不同类型岸坡提出合理的岸坡防护措施。结果表明: 1) 同等条件下弯曲河道岸坡防护效果较顺直河道差; 2) 弯曲河道岸坡冲刷范围和水流入射角度正相关; 3) 针对不同类型岸坡提出不同的护坡优化方案, 效果明显。

关键词: 新型生态护坡结构; 动床物理模型试验; 岸坡稳定性; 顺直河道; 弯曲河道

中图分类号: U 617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0087-08

Dynamic physical model trials of new ecological slope protection structure

LI Jian^{1,2}, WANG Ping-yi^{1,2}, FU Zhong-min³, HAN Lin-feng^{1,2}, WANG Mei-li^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education of Water Resources and Water Transportation Engineering,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 43000, China)

Abstract: In recent years, a series of ecological slope protection projects have been implemented in the middle and lower reaches of the Yangtze River, which have strong ecological functions. In order to protect the stability of the bank slope in the middle and lower reaches of the Yangtze River and provide a good living environment for aquatic animals and plants, a new type of ecological slope protection structure is proposed. Through physical model test, the protection effect of the new ecological slope protection structure on different types of bank slopes is observed, and the change mechanism of erosion and deposition of different types of bank slopes is analyzed. The influence of different flow incidence angles on the stability of curved river bank slopes is observed, thus reasonable bank slope protection measures are put forward for different types of bank slopes. The results show that: 1) Under the same conditions, the slope protection effect of the curved river is worse than that of the straight river. 2) The erosion range of the curved river slope is positively correlated with the flow incidence angle. 3) Different slope protection optimization schemes are proposed for different types of bank slopes, and the effect is obvious.

Keywords: new ecological slope protection structure; dynamic physical model trials; bank slope stability; straight channel; curved channel

收稿日期: 2021-05-08

***基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1600400); 国家重点研发计划课题(2016YFC0402106); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN-201900745)

作者简介: 李健(1993—), 男, 博士研究生, 从事港口及航道工程研究。

通讯作者: 王平义(1964—), 男, 博士, 教授, 从事港口及航道工程等研究。E-mail: 429582608@qq.com

传统护坡工程主要是在岸坡上铺设一层硬质混凝土，使岸坡和水流隔绝，防止岸坡发生崩岸^[1-2]，确保岸坡稳定性。生态护坡结构得到越来越广泛的应用，范玉洁等^[3]基于长江中下游航道整治实施一系列钢丝网石笼生态护坡工程对汛期前后植被和基质调查，得出护坡范围内生态恢复效果良好的结论；张桂荣等^[4]总结河流岸坡和生态护坡的特点及河岸生态护坡技术，通过对石笼网结构的深入研究，对其进行优化设计；王远明等^[5]进行水槽模型试验，分析石笼网垫护坡结构在不同水流冲刷作用下变形过程与破坏规律；刘丰阳等^[6]对荆江河段不同类型的植被生态护坡进行水流试验，分析植被根部对水流冲刷影响；赵航^[7]分析不同护坡技术特点与它的适用性和局限性，总结出不同生态护坡技术的适用环境；关春曼等^[8]针对中小河流生态护岸技术发展趋势提出了生态护岸建设中需要解决的共性难题，并展望了未来主要研究方向。生态护坡结构不仅维持岸坡稳定性、防止岸坡发生河道崩岸，还保证水河流-岸坡-生物之间能够进行物质、信息和能量交换，为河流生态系统稳定提供保障^[9]。

生态护坡的应用也存在诸多问题：1) 全生态护坡的结构强度和整体稳定性较差；2) 结构单一，仅考虑平面网络结构、无法形成消能效果好的三维空间体；3) 保土效果差，洪水期水位变动区营养土和植被种子被冲蚀。

笔者提出一种新型生态护坡结构，除具有传统守护功能外，还兼顾对河岸生态景观的良性作用，尽可能恢复和重建因航道开发导致退化的河岸带生态系统。在河岸景观、生态修复和提高沿岸带生物多样性等方面，都取得了一定的创新性成果。以长江中下游河段为研究背景，通过模拟不同河道岸坡类型，采用物理模型动床试验分析新型护坡结构下顺直河道和弯曲河道岸坡的冲淤变化；分析不同水流入射角度对弯曲河道岸坡稳定性影响；针对不同类型岸坡提出合理的岸坡防护优化方案。为今后生态护坡工程建设提供合理性建议和思路。

1 物理模型试验

1.1 试验水槽

物理模型动床试验分为直道水槽和弯道水槽试验，分别模拟顺直河道和弯曲河道。

直道水槽物理模型试验在长 30 m、宽 2 m、高 1 m 的玻璃水槽内进行，弯道水槽物理模型试验在长 30 m、高 2 m、底部宽度 2 m 的滑坡涌浪弯道水槽内进行试验，均由进水口、试验水槽和出水口组成。1) 进水口布置流量控制系统，由流量控制进行调控，对变频器发送指令控制抽水水泵功率，实现对流量的控制。2) 出水口设置尾门，通过调节尾门高度改变试验水槽水深，流量控制系统和尾门协同作用改变试验水力参数。3) 试验水槽分为上、下游过渡段，试验段。上游过渡段作用为调节进水口来流量、满足进入试验段的水流为充分发展水流，下游过渡段作用为调节试验段水流、减小下游尾门对试验段影响。上下游各 12.5 m，直道水槽试验段位于中线位置，长度 5 m；弯道水槽试验段位于弯道处中线位置处，长度 5 m。见图 1。

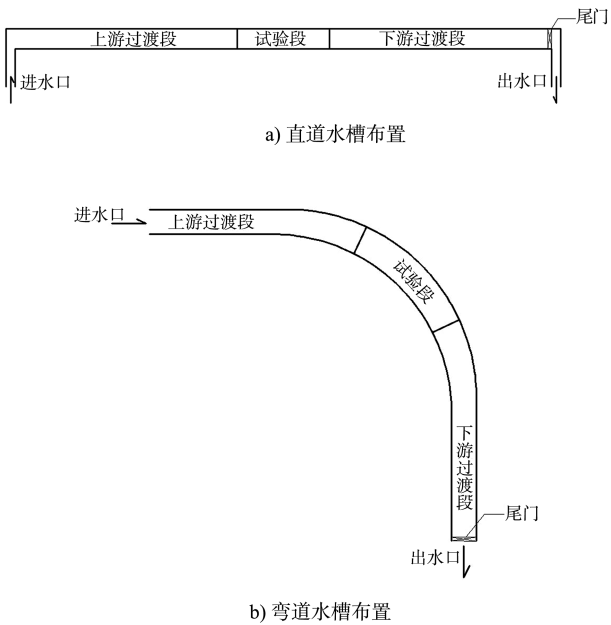


图 1 水槽布置

模型试验在重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心航道整治试验大厅进行。物理模型试验场地见图 2。



a) 直道水槽



b) 弯道水槽

图 2 物理模型试验场地

1.2 生态护坡结构设计

新型生态护坡结构块体由长江勘察设计院设计,块体底部为边长 23 cm 的正方形、顶部为边长 15 cm 的正方形、高度 20 cm,收口式设计,目的是减少岸坡被高速水流淘刷;四周采用圆弧面连接上下底的形式,目的是保证水流平顺经过;块体内部为空腔设计,给鱼类和岸坡水生植物提供一个良好的生存环境。见图 3。单个的生态护坡块体在岸坡上紧密排列铺设,达到对岸坡整体防护的目的。

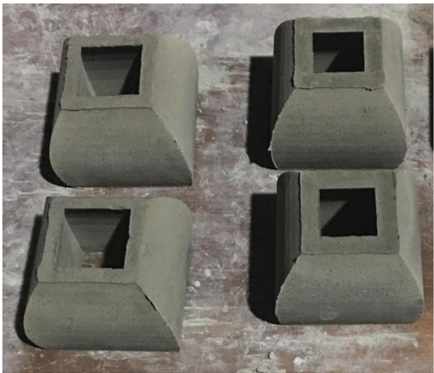


图 3 新型生态护坡块体模型

1.3 模型试验岸坡坡度选择

收集长江中游荆江河段典型岸坡破坏前的坡度范围,选取岸坡破坏的典型坡度,试验岸坡坡度选取为 1:3。

1.4 模型试验比尺选择

选用正态物理模型试验。根据物理试验水槽的实际尺寸,试验采用局部模拟的方法,仅模拟靠近河岸局部区域,采用 $\lambda_L=3$ 的平面比尺和垂直比尺、 $\lambda_v=1.732$ 的速度比尺进行物理模型试验研究。

1.5 模型试验流速、水深选择

长江中下游河道枯水河宽约 800 m、洪水河宽约 2 000 m,流量 5 000~50 000 m³/s,流速 0.50~3.00 m/s。模拟洪水条件下岸坡的防护效果,结合实验室情况,选取原型流速 2.00 m/s 作为试验流速。

物理模型动床试验共铺设 9 层生态护坡块体,见图 4。底部 2 层模拟枯水期水位能淹没的高度范围,顶部 2 层模拟洪水期水位能淹没的高度范围,中间 5 层模拟水位变动区的淹没范围。试验分析最不利情况下的河床冲淤变化情况,选择洪水水深作为物理试验水位,试验选取模型洪水淹没深度 22 cm。

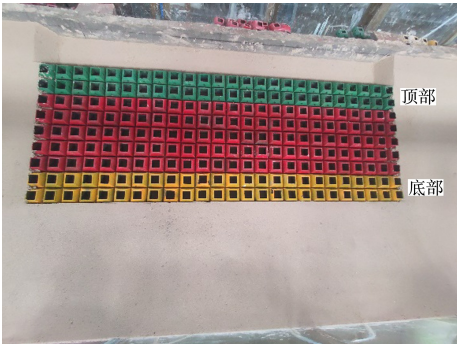


图 4 生态护坡结构布置

1.6 试验岸坡泥沙选择

路鼎^[10]根据相关资料收集、整理长江中下游泥沙中值粒径范围,见表 1。

根据上述资料,天然河道沙的中值粒径定为 $d_{50}=0.25$ mm。通过泥沙比尺计算,物理模型试验采用的模型沙中值粒径为 $d_{50}=0.15$ mm、密度为 2.7 t/m³,通过计算得出模型泥沙起动流速 $v=0.13$ m/s。

表 1 长江中下游泥沙中值粒径

位置	安徽段	九江段	潜洲段	上荆江段	下荆江段
中值粒径/mm	0.17~0.29	0.25	0.17~0.29	0.152~0.326	0.103~0.228

1.7 试验工况设计

模拟观测不同类型岸坡在护坡结构保护下的冲淤变化，结合实际情况提出适用于工程的合理优化方案。综上所述，试验工况设计见表 2。

表 2 试验工况设计

模拟 工况	水流入射 角度/°	岸坡 坡度	水深/ cm	流速/ m/s
顺直河道	0	1:3	22	1.15
	5			
弯曲河道	10			
	15			

注：水流入射角度为水流进入弯道时水流方向和护坡结构端头位置弯道切线的夹角。

2 试验现象分析

2.1 天然情况下岸坡的冲淤分析

图 5 为天然状态未冲刷试验段，岸坡冲刷情况见图 6。通过直道水槽试验可以看出：岸坡遭受严重破坏，试验段泥沙流失严重，大量泥沙在洪水作用下被挟带到下游，因此洪水情况下岸坡稳定性遭受到严重威胁。



图 5 试验前天然状态下岸坡



a) 整体



b) 端头



c) 中部



d) 尾部

图 6 冲刷后的试验段

2.2 新型生态护坡物理模型动床试验分析

通过天然情况岸坡直道水槽物理模型试验，观察得出岸坡泥沙冲刷现象明显。因此，结合实际工程中常用技术手段，在铺设新型生态护坡块体时，首先采用散抛石进行岸坡坡脚及护坡两侧防冲及护坡加固。

抛石抗冲粒径的选择，可按式确定：

$$D=0.017\ 3v^{2.78}h^{-0.39}$$
 (1)

式中：D 为块石粒径(m)；v 为垂线平均流速(m/s)；h 为垂线水深(m)。

根据长江中下游平顺抛石护岸工程的实践经验,块石粒径的范围,中游一般取 0.15 ~ 0.45 m、下游取 0.10 ~ 0.40 m。本文结合计算值和经验值,从偏安全的角度选取抛石粒径约为 0.1 m,对应抛石模型粒径为 2 ~ 3 cm。由于护坡端头和底部位置破坏较为严重,从安全角度出发,防止沙床裸露,散抛石的铺设厚度在 3~5 cm、铺设 2~3 层。铺设完成情况见图 7。



图 7 护坡结构试验段效果

2.2.1 不同试验条件下新型生态护坡效果分析

根据生态护坡结构试验观察得出:直道水槽护坡结构未发生明显形变,见图 8;从岸坡泥沙冲淤效果观测得出:直道水槽护坡结构对沙床保护效果明显,且单独的护坡结构块体内部沙床输移变化相似,见图 9。

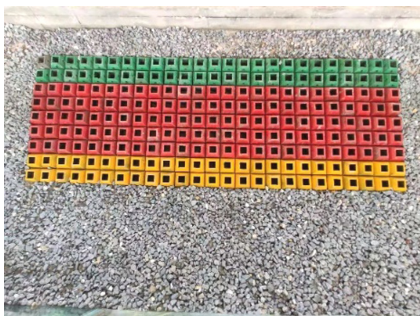


图 8 直道水槽试验后护坡结构效果



图 9 直道水槽试验后岸坡冲淤效果

观测护坡结构不同铺设位置(前部、中部和尾部)冲刷坑深度,分析不同位置处水流对护坡块体内部泥沙冲淤的影响。护坡块体布置是 25(列)×9(排),选择前部第 3 列、中部第 13 列和尾部第 23 列(3~7 排)进行分析。分析得出:不同位置处冲刷规律相似、冲刷深度也相似,不同位置处在中部冲刷深度最小,大致呈抛物线分布,见图 10。

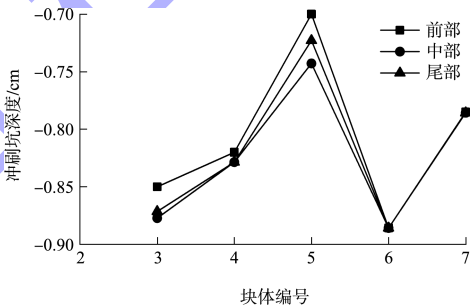


图 10 直道水槽不同水深位置新型生态护坡结构内部泥沙冲淤

选择不同水深位置块体内部泥沙冲淤进行对比分析,以位于中间位置第 13 列(3~7 排)块体为研究对象。相比原始地形,冲刷后的地形呈现前淤后冲的现象,且不同位置护坡结构内部冲淤效果相似。冲刷深度最大为 1 cm,淤积高度 1.5 cm。见图 11。

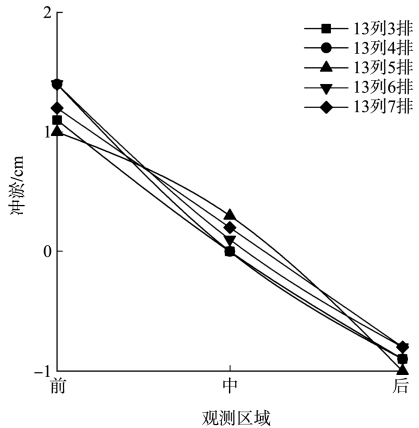


图 11 直道水槽新型生态护坡结构内部泥沙冲淤

弯道水槽护坡稳定性发生明显变化，护坡端头位置发生明显沉降、滑移，块体沉降范围延伸至护坡中部，岸坡冲刷严重，端头和中部沙床遭到破坏，见图 12、13。

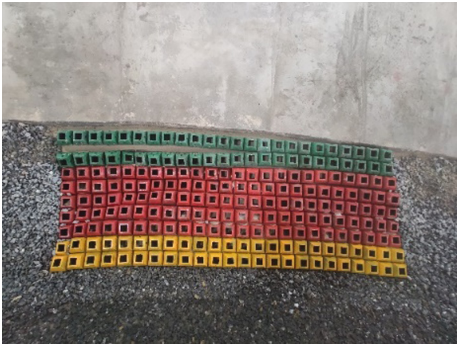


图 12 弯道水槽试验后护坡结构效果



图 13 弯道水槽试验后岸坡冲刷效果

观察试验过程，得到弯道水槽护坡失稳机理为：水流在弯道处的顶冲效应和水流进入护坡块体空腔内后涡流紊动共同作用，导致水流挟带大量护坡内部泥沙流向下流，造成护坡块体失稳沉降。标识处表示在试验过程中生态护坡块体内部泥沙正在被淘刷，见图 14。

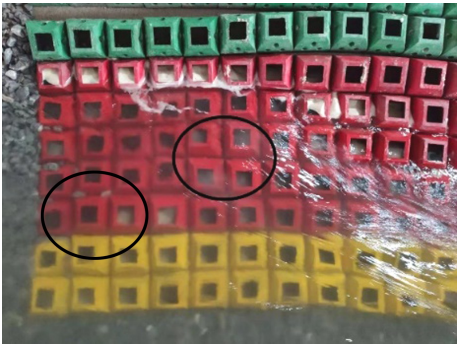


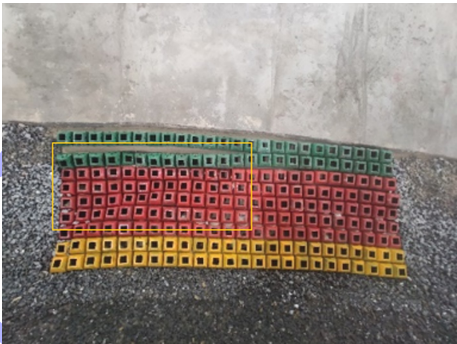
图 14 弯道水槽试验端头水流特性

2.2.2 不同水流入射角度对弯曲河道护坡结构防护效果分析

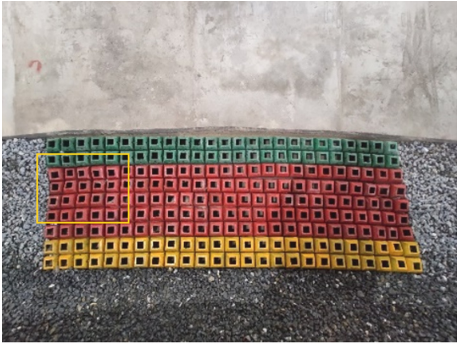
通过新型生态护坡物理模型试验得出，弯曲

河道岸坡护坡结构效果较差、端头及中部位置岸坡泥沙淘刷严重。因此分析弯曲河道不同水流入射角度对护坡结构防护的影响，对比 5°、10° 和 15° 不同水流入射角度时弯道水槽岸坡的冲淤变化。

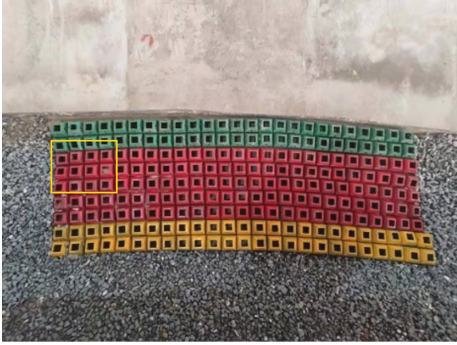
观察弯道水槽试验，护坡块体的失稳沉降范围和水流入射角呈正相关性。如图 15 所示，方框区域代表护坡结构发生沉降、滑移等不规则形变的区域，随着水流入射角度的增大，护坡结构的失稳范围也在增大。



a) 水流入射角15°



b) 水流入射角10°



c) 水流入射角5°

图 15 不同水流入射试验后护坡结构

岸坡在 15° 的水流入射角度下，泥沙流失最严重，测量得到岸坡泥沙流失长度范围约 1.5 m，约

占护坡总长度的 2/3。在水流入射角度 10°和 5°的工况下,岸坡冲刷长度分别约为 1.0 m 和 0.5 m。标识处表示沉降范围,见图 16。说明岸坡泥沙冲刷长度和水流入射角度正相关,弯道河段冲刷位置主要在护坡端头位置处,护坡结构形变位置发生在端头。



a) 水流入射角15°



b) 水流入射角10°



c) 水流入射角5°

图 16 不同水流入射试验后岸坡冲刷效果

2.2.3 岸坡冲刷机理分析

岸坡冲刷机理:水流入射角度越大,水流在弯道处对凹岸的顶冲作用效果越明显、水流进入护坡结构块体空腔的几率越大、对岸坡泥沙的冲刷效果越明显。

2.2.4 弯曲河段新型生态护坡优化效果分析

弯曲河道岸坡失稳的主要原因是护坡块体空腔内部泥沙淘刷。针对弯曲河道提出弯曲河道护坡优化方案,即在原有的护坡基础上,底部铺设土工织物,目的是隔绝岸坡和水流的直接接触。见图 17。



图 17 优化方案布置

弯道水槽按照优化方案进行试验后,护坡结构稳定性得到明显改善,岸坡泥沙也得到有效保护,岸坡无明显冲刷痕迹,见图 18。说明土工织物隔绝岸坡和水流接触效果明显。



a) 弯道水槽护坡结构



b) 弯道水槽岸坡

图 18 优化方案试验后

2.2.5 不同因素对生态护坡结构防护效果的影响

通过物理模型试验,分析不同因素生态护坡结构对岸坡稳定性防护效果。对于顺直河道,生态护坡结构防护效果较为明显,护坡结构稳定、结构内部泥沙冲淤效果相似;对于弯曲河道,由于弯道向心力和横向压力的共同作用,水流条件复杂,形成涡流,在相同的来流条件下防护效果较顺直河道差,护坡结构出现失稳现象,生态护坡结构的失稳程度与岸坡泥沙冲刷长度范围和水流入射角度正相关。

3 结论

- 1)新型生态护坡结构应用于顺直河道岸坡,防护效果明显,护坡结构稳定。
- 2)在弯曲河道,生态护坡结构的失稳程度和水流入射角度正相关,岸坡泥沙冲刷长度范围和水流入射角度正相关。冲刷位置主要位于护坡结构端头位置,并向下游逐渐延伸。
- 3)同等水流条件,弯曲河道生态护坡防护效果比顺直河道差。因为水流进入弯曲河道时,存在对凹岸的顶冲作用,同时涡流的形成导致护坡附近水力特性更加复杂,岸坡的冲刷效果更加明显。
- 4)优化方案保证弯曲河道岸坡得到有效防护,

护坡结构稳定,均未出现失稳现象。

参考文献:

[1] 王延贵.冲积河流岸滩崩塌机理的理论分析及试验研究[D].北京:中国水利水电科学研究院,2003.

[2] 周建银.弯曲河道水流结构及河道演变模拟方法的改进和应用[D].北京:清华大学,2015.

[3] 范玉洁,杨中华,邹明哲,等.长江中下游钢丝网石笼护坡生态恢复效果评价[J].水运工程,2021(1):129-135.

[4] 张桂荣,张家胜,王远明,等.河流冲刷作用下石笼网生态护坡技术研究[J].水利水运工程学报,2018(6):112-119.

[5] 王远明,张桂荣,李登华,等.石笼网垫护坡结构抗冲刷性能水槽模型试验[J].人民黄河,2020,42(4):94-98.

[6] 刘丰阳,刘林双,王家生,等.荆江河段不同植被生态护坡的水流试验及应用[J].水运工程,2018(9):9-14,37.

[7] 赵航,方佳敏,付旭辉,等.河道生态护坡技术综述[J].中国水运,2020(11):113-116.

[8] 关春曼,张桂荣,程大鹏,等.中小河流生态护岸技术发展趋势与热点问题[J].水利水运工程学报,2014(4):75-81.

[9] 赵广琦,崔心红,奉树成,等.植物护坡及其生态效应研究[J].水土保持学报,2007(6):60-64.

[10] 路鼎.新型生态护岸结构破坏机理研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 69 页)

参考文献:

[1] 房卓,张民辉,沈忱,等.我国沿海港口液化天然气码头建设运营现状研究[J].水运工程,2020(10):63-69.

[2] 商丹,张勇.液化天然气码头选址关键因素[J].水运工程,2014(2):96-99.

[3] 赵仓龙,龚少军.LNG 船进出深圳港对航路通过能力的影响[J].中国航海,2015,38(1):90-93,126.

[4] 房卓,姚海元,黄俊,等.多智能体仿真在 LNG 码头选址及港口规划中的应用[J].水运工程,2017(12):123-128.

[5] HU J Q, DONG S H, ZHANG L B, et al.Cyber-physical-social hazard analysis for LNG port terminal system based on interdependent network theory [J]. Safety science, 2021, 137: 105180.

(本文编辑 武亚庆)