

· 港口 ·



不同形式护面块 对斜坡式防波堤波浪爬高的影响*

孙天霆, 王登婷

(南京水利科学研究所, 江苏南京 210098)

摘要: 我国现行的几种规范关于波浪爬高的计算存在着诸多不足, 特别是在长波条件下, 提供的经验公式的适用条件比较局限, 甚至未考虑长波因素, 故其计算值与实际结果偏差很大, 造成安全隐患。通过系列断面物理模型试验, 研究斜坡堤上不同护面形式对不规则波浪爬高的影响规律, 提出相关系数和经验计算公式, 为水面开阔地区迎水面护面设计提供理论参考。

关键词: 斜坡堤; 波浪爬高; 护面块

中图分类号: TV 139.2⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0056-06

Wave run-up influenced by protective facings of sloping breakwater

SUN Tian-ting, WANG Deng-ting

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China)

Abstract: Some calculation methods of wave run-up stipulated in Chinese codes have some defects, especially under the long wave condition. The formulas of relatively limited applicability even do not take long wave into account. So there is a huge deviation between the calculated value and the actual result, which may cause some potential danger. This paper mainly studies the influences of different types of protective facings of sloping breakwater on the irregular wave run-up through a series of sectional physical model tests and proposes the correlation coefficient and empirical formula to provide theory reference for the design of protective facing on the river side slope which is on open water areas.

Keywords: sloping breakwater; wave run-up; protective facing

在港口及海岸工程中, 斜坡堤是一种传统的、广为采用的结构形式, 是保护沿海地区免受波浪袭击的重要工程设施。由于波浪容易在斜坡堤面上发生剧烈破碎, 当水深较大时所需的天然块石很大, 因而近 30 年来已经发展了近百种形状各异、稳定性较高的混凝土人工块体, 其中使用较多的有立方体、四角锥体、扭工字块体及四脚空心方块等。随着海洋经济的迅速发展和人类对海

洋能源的需求, 越来越多的海岸、海洋工程正在或即将实施, 工程建设日益向深海发展, 施工条件及波况日趋恶劣。因此, 护面块形式的确定在斜坡堤研究、设计和安全性标准确定等领域占有极其重要的地位。

1 概述

波浪爬高对海岸的侵蚀、冲刷淤积、输沙和

收稿日期: 2014-11-20

*基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目 (201401004); 南京水利科学研究所院基金重大项目 (Y214009)

作者简介: 孙天霆 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为波浪及其与建筑物的相互作用。

海堤安全等都有很大的影响。影响斜坡堤上波浪爬高的因素比较复杂, 主要包括入射波要素(入射波波高、波长、波陡、波周期等); 入射波的作用方向; 风速及风向; 复坡的平台特性(平台宽度、平台超高、堤顶超高等); 坡面糙率和渗水性能; 斜坡堤坡度; 堤前条件(堤前相对水深、滩地等)。由于斜坡堤具有多种断面形式(如单坡式、带平台的复式断面等), 因此得到适用条件各不相同的研究结果。从现有的研究成果看, 尚未发现针对不同形式护坡对波浪爬高的影响进行过系统的研究。

2002年5月, 荷兰防洪咨询委员会(TAW)发布了“堤防波浪爬高和越浪”技术报告^[1], 总结了近期关于波浪爬高和越浪的大量试验与理论分析成果, 给出了边坡糙率、边坡坡度、平台、波浪入射角、竖墙等因素对波浪爬高影响的计算公式。卢永金等^[2]对国家堤防设计规范和欧美最广泛认可的 van der Meer 提出的波浪爬高计算方法进行对比, 提出了对后者的修改和使用意见。陈健健等^[3]利用风速资料间接推算和莆田试验站法推求设计波要素, 计算了风速重现期为 50 a, 累积频率 2%、1%、0.1% 的波浪爬高。濮勋等^[4]利用《堤防工程设计规范》和《海港水文规范》中介绍的波浪爬高计算方法对实际工程海堤断面进行波浪爬高计算, 分析了堤前滩地高程对波浪爬高的影响。祁国军等^[5]以海堤工程中常用的栅栏板护面为例, 采用源函数造波法研究栅栏板糙率对波浪爬高的影响。波浪爬高计算的常用方法有莆田试验站公式、鹤地公式、官厅公式、安得烈扬诺夫公式和《堤防设计规范》推荐公式等。平原地区水库设计通常参照 SL 274—2001《碾压式土石坝设计规范》进行波浪计算, 波浪的平均波高和平均波周期宜采用莆田试验站公式计算^[6-8]。

关于波浪爬高的研究, 工程界大多采用物理模型试验的方法。作为最早使用的一种模型, 从 1885 年 Reynolds 创建的 Mensey 河口模型算起, 物

理模型至今已有百余年的历史。物理模型现象直观, 流态逼真, 同时可为波浪数值模拟提供验证资料。

Saville^[9]进行了二维规则波在斜坡堤上的波浪爬高试验。De Waal 等^[10]通过系列波浪爬高试验, 在缩比模型试验的基础上得到了估计波浪最大爬高的经验公式, 但只适用于一些特定的断面形式, 具有一定的局限性。陈国平等^[11, 13-14]通过物理模型试验, 研究了不同护面和复坡平台对不规则波爬高的影响, 确定爬高的概率分布, 提出了相关计算方法。贺朝教等^[12]通过平台宽度 B 、平台超高 H_r 、堤顶超高 H_c 、波陡 H/L 、坡比 m 和相对水深 d/H 等因素影响下的斜坡堤波浪爬高物理模型试验, 总结了一些斜坡堤波浪爬高的规律。

基于斜坡堤面上波浪水流现象的复杂性, 工程上多采用理论计算初步设计再由物理模型试验加以验证的方法进行相关研究, 其中波浪爬高一直是各国学者研究的热点。综上所述, 研究不同形式护面块对斜坡式防波堤波浪爬高的影响具有重要的工程意义和学术价值。

2 模型试验

试验遵照《波浪模型试验规程》相关规定, 采用正态模型, 按照 Froude 数相似律设计。根据设计水位、波浪要素、试验断面及试验设备条件等因素, 模型几何比尺取为 1:15。波浪试验在长波浪水槽中进行, 水槽长 175 m、宽 1.2 m、深 1.8 m, 可同时产生波浪、水流和风。水槽的工作段分割成 0.6 m 和 0.6 m 两部分, 0.6 m 宽的部分用来安放模型断面和进行模型试验, 另一部分用于扩散造波板的二次反射波。水槽的一端配有消浪缓坡, 另一端配有推板式不规则波造波机, 由计算机自动控制产生所要求模拟的波浪要素。本试验采用不规则波进行, 不规则波的波谱采用 JONSWAP 谱。波浪要素采用电阻式波高仪测量, 由计算机自动采集和处理。

试验前先进行波浪要素率定, 然后构建试验

断面，试验时先用小波作用，以使堤身密实，然后按设计波要素造波，进行各项内容的试验。观察波浪在斜坡堤上的爬高时，对于不同的护面形式，为保证试验结果的可靠性，每组试验至少重复 3 次。当 3 次重复试验的试验结果差别较大时，则增加重复次数。每次试验均重新铺放断面。

试验时在水槽内放置断面模型（图 1），设计断面为坡度 $m=3$ 的单坡斜坡堤。底高程为 9.0 m，堤顶高程为 14.8 m，堤前设置防浪墙，其高程为 15.1 m。试验波要素根据《碾压式土石坝设计规范》、《堤防工程设计规范》和《海港水文规范》，计算结果如表 1 所示。

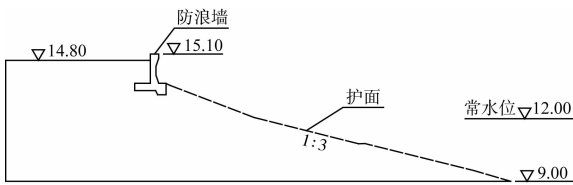


图 1 试验模型断面 (单位: m)

表 1 1.5 倍及 2.0 倍多年平均年最大风速计算波浪要素 (常水位)

平均水深/m	风距/km	风速/(m·s ⁻¹)	H _{1%} /m	H _{5%} /m	H _{13%} /m	\bar{H} /m	\bar{T} /s	L/m
3.0	11.4	19.7	1.14	0.96	0.82	0.54	3.26	14.32
3.0	11.4	26.2	1.36	1.15	0.99	0.66	3.61	16.56

3 试验组次安排

首先采用混凝土板护面作为基准（对照组），分别测量常水位 1.5 倍多年平均年最大风速（19.7 m/s）及 2.0 倍多年平均年最大风速（26.2 m/s）下斜坡堤波浪爬高，再对护面形式进行优化试验，分别测量并计算各护面形式在 1.5 倍及 2.0 倍多年平均年最大风速下的波浪爬高及其相对于混凝土板护面的减小幅度，从而评估各护面形式的消浪效果。

新的护面形式包括以下几种：1) 栅栏板护面；2) 四脚空心方块护面；3) 扭王字块体护面；4) 条状消浪墩护面，见图 2a)；5) 梅花状消浪墩护面，见图 2b)；6) 石笋状消浪墩护面，见图 2c) 和图 3。

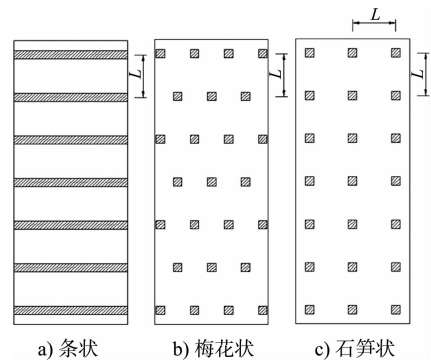


图 2 各种消浪墩护面 (俯视)

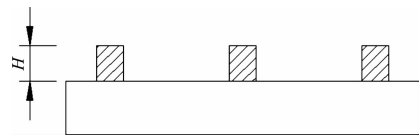


图 3 石笋状消浪墩护面 (正视)

对于条状消浪墩护面，单条消浪墩的宽度为 30 cm、厚度为 20 cm，相邻 2 条消浪墩中心之间的距离 L 分别按 1 m 和 2 m 考虑。对于梅花状消浪墩护面，单个消浪墩的长度和宽度均为 30 cm、厚度为 20 cm，水平方向相邻 2 个消浪墩边与边之间的距离均为 50 cm，相邻两排消浪墩中心之间的距离 L 同样分别按 1 m 和 2 m 考虑。对于石笋状消浪墩护面，单个消浪墩的长度和宽度均为 30 cm，厚度 H 分别为 30、60、90 cm，相邻两个消浪墩边与边之间的距离 L 为 75 cm。对于厚度 H 为 30 cm 的消浪墩，又增设相邻 2 个消浪墩边与边之间的距离 L 为 30 cm 和 120 cm 两组试验，以期发现消浪墩布置对波浪爬高的影响规律。

4 试验结果对比与分析

4.1 波浪爬高

在风的直接作用下，正向来波在单一斜坡上的波浪爬高可按《堤防工程设计规范》中给出的公式确定：

$$R_p = \frac{K_\Delta K_v K_p}{\sqrt{1+m^2}} \sqrt{HL} \quad (1)$$

表 2 给出了不同护面形式在 1.5 倍多年平均年最大风速及 2.0 倍多年平均年最大风速作用下的波浪爬高的试验值和常见护面的计算值、试验爬高所达高程及其与混凝土板爬高比值。具体的波浪爬高试验结果见表 2。

表 2 不同护面形式的波浪爬高、消浪程度及与混凝土板爬高比值

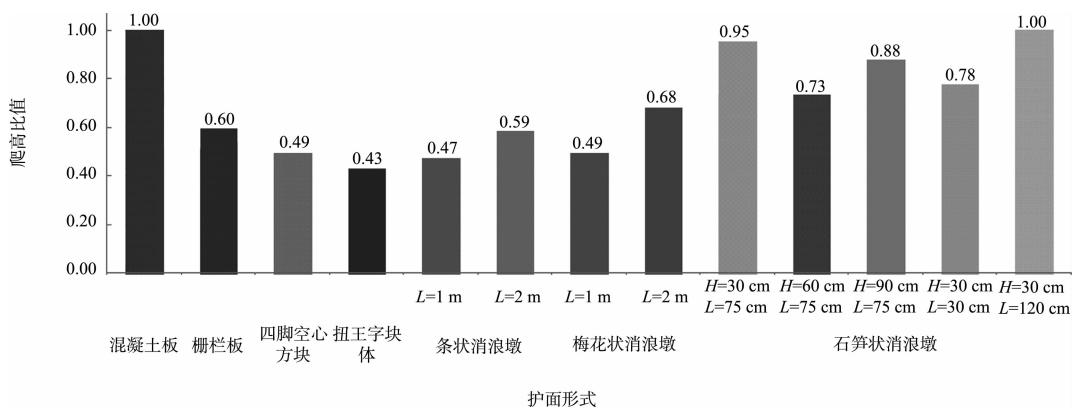
护面形式	1.5 倍多年平均最大风速				2.0 倍多年平均最大风速			
	波浪爬高/m		高程/m	与混凝土板爬高比值	波浪爬高/m		高程/m	与混凝土板爬高比值
	试验值	计算值			试验值	计算值		
混凝土板	2.26	2.19	12.71	1.00	2.73	2.68	13.18	1.00
栅栏板	1.35		11.80	0.60	1.54		11.99	0.56
四脚空心方块	1.11	1.27	11.56	0.49	1.40	1.41	11.85	0.51
扭王字块体	0.97	1.08	11.42	0.43	1.31	1.20	11.76	0.48
条状消浪墩	$L=1\text{ m}$	1.07	11.52	0.47	1.23		11.68	0.45
	$L=2\text{ m}$	1.33	11.78	0.59	1.52		11.97	0.56
梅花状消浪墩	$L=1\text{ m}$	1.11	11.56	0.49	1.49		11.94	0.55
	$L=2\text{ m}$	1.54	11.99	0.68	2.08		12.53	0.76
石笋状消浪墩	$H=30\text{ cm}$ $L=75\text{ cm}$	2.16	12.61	0.95	2.47		12.92	0.90
	$H=60\text{ cm}$ $L=75\text{ cm}$	1.66	12.11	0.73	2.11		12.56	0.77
	$H=90\text{ cm}$ $L=75\text{ cm}$	1.99	12.44	0.88	2.18		12.63	0.80
	$H=30\text{ cm}$ $L=30\text{ cm}$	1.76	12.21	0.78	2.25		12.70	0.82
	$H=30\text{ cm}$ $L=120\text{ cm}$	2.25	12.70	1.00	2.55		13.00	0.93

图 4 分别给出了在 1.5 倍多年平均年最大风速及 2.0 倍多年平均年最大风速作用下不同护面形式的波浪爬高与混凝土板爬高比值。

由图 4 可知, 在不同形式的护面块体中, 扭王字块体护面减小波浪爬高的幅度最大, 消浪效果最好, 条状消浪墩护面和四脚空心方块护面的消浪效果其次, 梅花状消浪墩护面和栅栏板护面的消浪效果略低于条状消浪墩护面和四脚空心方

块护面, 石笋状消浪墩护面减小波浪爬高的幅度最小, 消浪效果最差。

对于几种特殊消浪墩护面(条状、梅花状、石笋状), 随着消浪墩密度的增加(即随着 L 的减小), 波浪爬高减小的幅度更大, 消浪效果更为明显。特别是对于石笋状消浪墩护面, 随着消浪墩厚度的增加(即随着 H 的增加), 波浪爬高减小的幅度为非线性变化, 具体原因将随后分析说明。



a) 1.5倍风速

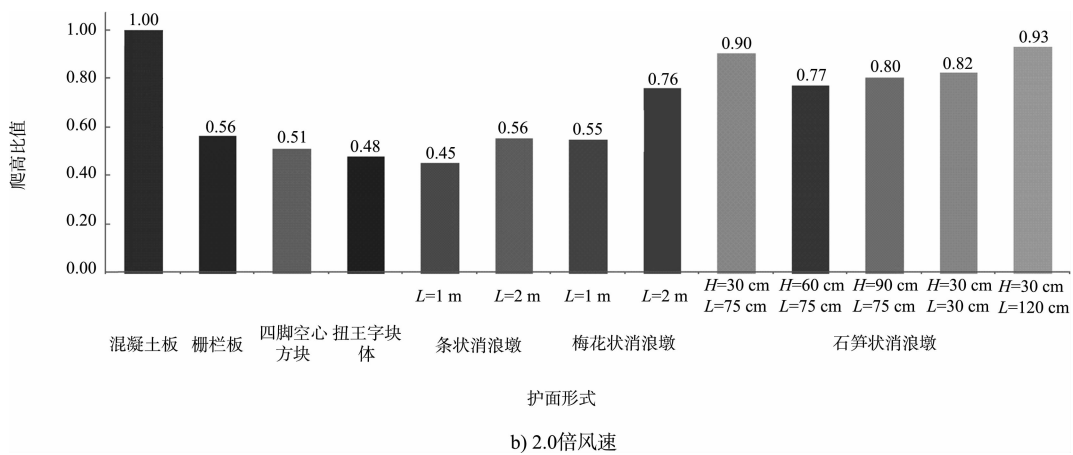


图4 多年平均年最大风速作用下不同护面形式的波浪爬高与混凝土板爬高比值

图5给出了具有不同消浪墩密度和厚度的石笋状消浪墩对应的波浪爬高。

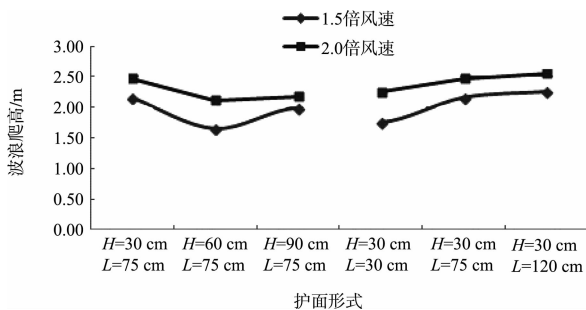


图5 石笋状消浪墩波浪爬高

由图5可知，对于石笋状消浪墩护面，随着消浪墩厚度的增加其消浪效果并非单调增加，超过一定厚度后其消浪效果明显衰退，即波浪爬高明显增大。这可能是由于消浪墩的消浪效果不仅与其布置疏密程度有关，即消浪墩两侧的消浪作用；更与其厚度有关，它直接决定了消浪墩顶部对波浪爬高消减程度的大小。在波浪平均波高一定时，只有消浪墩厚度在一定值以下，波浪爬高时才能越过消浪墩顶部。这相当于增大了底摩擦阻力，引起了波能损失，从而减小了波浪爬高。而当消浪墩厚度超过该定值时，波浪爬高时将不能越过消浪墩顶部，紧依靠消浪墩两侧的消浪作用减小波浪爬高，因此波浪爬高反而增大。

4.2 糙率及渗透性系数

由式(1)可知，在平均波高 \bar{H} ，波长 L ，经验系数 K_v ，爬高累积频率换算系数 K_p ，斜坡坡率 m

一定的情况下，不同的护面形式仅影响斜坡的糙率及渗透性系数 K_Δ 。因此，参照《堤防工程设计规范》和《海港水文规范》，假定混凝土板的糙率及渗透性系数 K_Δ 为0.95，根据试验数据，可对不同护面形式对应的糙率及渗透性系数 K_Δ 进行相对初步确定（表3）。

表3 不同护面形式的糙率及渗透性系数 K_Δ

护面形式	糙率及渗透性系数				
	1.5倍风速	2.0倍风速	均值	大致范围	
混凝土板	0.95	0.95	0.95	0.95	
栅栏板	0.57	0.54	0.55	0.54 ~ 0.57	
四脚空心方块	0.47	0.49	0.48	0.47 ~ 0.49	
扭王字块体	0.41	0.46	0.43	0.41 ~ 0.46	
条状消浪墩	L=1 m: 0.45 L=2 m: 0.56	L=1 m: 0.43 L=2 m: 0.53	L=1 m: 0.44 L=2 m: 0.54	L=1 m: 0.43 ~ 0.45 L=2 m: 0.53 ~ 0.56	
梅花状消浪墩	L=1 m: 0.47 L=2 m: 0.65	L=1 m: 0.52 L=2 m: 0.72	L=1 m: 0.49 L=2 m: 0.69	L=1 m: 0.47 ~ 0.52 L=2 m: 0.65 ~ 0.72	
石笋状消浪墩	H=30 cm, L=75 cm	0.91	0.86	0.88	0.86 ~ 0.91
	H=60 cm, L=75 cm	0.70	0.73	0.72	0.70 ~ 0.73
	H=90 cm, L=75 cm	0.84	0.76	0.80	0.76 ~ 0.84
	H=30 cm, L=30 cm	0.74	0.78	0.76	0.74 ~ 0.78
	H=30 cm, L=120 cm	0.95	0.89	0.92	0.89 ~ 0.95

考虑到试验数据的离散性，建议取1.5倍多年平均年最大风速及2.0倍多年平均年最大风速作用下分别对应的护面糙率及渗透性系数 K_Δ 的均值作为分析处理对象。

5 结论

对于几种常规护面形式: 混凝土板护面、栅栏板护面、四脚空心方块护面以及扭王字块体护面, 其对应的糙率及渗透性系数 K_d 与《堤防工程设计规范》和《海港水文规范》中的对应系数对比后发现: 四脚空心方块护面的糙率及渗透性系数的试验值约为 0.48, 《海港水文规范》中的建议值是 0.55, 相比规范而言试验值小了 12.7%; 扭王字块体护面的糙率及渗透性系数的试验值约为 0.43, 《海港水文规范》中的建议值是 0.47, 相比规范而言试验值小了 8.5%。考虑到规范的偏安全性, 其建议值相对较大, 因此试验值可以接受。

对于几种特殊形式的消浪墩护面: 条状消浪墩护面、梅花状消浪墩护面以及石笋状消浪墩护面, 其对应的糙率及渗透性系数 K_d 在相关规范中并无涉及, 在此提出, 可供实际工程参考。

本文通过系列物理模型试验, 研究不同护面形式对斜坡堤波浪爬高的影响, 讨论糙率及渗透性系数与波浪爬高的关系, 给出不同护面形式对应的糙率及渗透性系数 K_d 的范围, 对《堤防工程设计规范》中波浪爬高的计算公式进行补充完善。

参考文献:

- [1] Technical Advisory Committee on Water Defense. Wave run-up and wave overtopping at dikes[R]. Delft Netherlands: Technical Advisory Committee on Water Defense, 2002.
- [2] 卢永金, 何友声, 刘桦. 海堤波浪爬高计算分析与越浪设计准则探讨[J]. 水利水电技术, 2007, 38(4): 30-34.
- [3] 陈健健, 胡纲. 堤防浪爬高分析[J]. 科技风, 2011(23): 9.
- [4] 濮勋, 朱力. 海堤波浪爬高计算分析[J]. 上海水务, 2011, 27(2): 17-18.
- [5] 祁国军, 袁新明. 斜坡堤栅栏板护面波浪爬高数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(5): 16-19.
- [6] 郑殿祥, 周荣星, 金瑞清, 等. 平原水库波浪爬高计算方法探讨[J]. 人民黄河, 2009, 31(3): 86-87.
- [7] 陈革强, 吴信龙, 王贤军, 等. 嵊泗小关岙水库工程堤前波浪爬高的分析与计算[J]. 浙江水利科技, 2002(5): 19-21.
- [8] 许遐祯, 陶蓉茵, 赵巧华, 等. 大型浅水湖泊太湖波浪特征及其对风场的敏感性分析[J]. 湖泊科学, 2013, 25(1): 55-64.
- [9] T Saville. Laboratory data on wave run-up and overtopping[M]. Washington D. C. Lake Okeechobee levee sections, U S Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board, 1955.
- [10] Waal J P, Meer J W. Wave run-up and overtopping on coastal structures[C]. Venice: Proc Coastal Engineering Conference, 1992.
- [11] 陈国平, 余广明. 平台高程与宽度对不规则波爬高的影响[J]. 海洋工程, 1992, 10(4): 61-69.
- [12] 贺朝敖, 任佐皋. 带胸墙斜坡堤越浪量的实验研究[J]. 海洋工程, 1995, 13(2): 62-71.
- [13] 陈国平, 周益人, 据烈红. 海堤护面形式对波浪爬高和越浪的影响[J]. 水运工程, 2005(10): 28-30.
- [14] 陈国平, 王铮, 袁文喜, 等. 不规则波作用下波浪爬高计算方法[J]. 水运工程, 2010(2): 23-30.

(本文编辑 郭雪珍)

著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。