通航隧道内船行波传播特性及对船舶连续通航安全影响

邓斌^{1,2,3*}, 王孟飞¹, 蒋昌波^{1,2,3*}, 伍志元^{1,2,3}

1. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410114;

2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410114;

3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410114

* 联系人, E-mail: dengbin07@csust.edu.cn; jiangchb@csust.edu.cn

2020-02-11 收稿, 2020-07-22 修回, 2020-07-22 接受, 2020-07-24 网络版发表

国家自然科学基金(51979015, 51839002)、湖南省教育厅科学研究项目(20A007)和湖南省研究生科研创新项目(CX2018B553)资助

摘要 为填补通航隧道船舶通航安全关键技术研究的空白, 基于完全非线性 Boussinesq 方程的开源程序包 FUNWAVE-TVD 建立了直线运河中通航隧道内船行波运动的数值模型, 重点分析了船舶在通航隧道中诱导生成的船首孤立波波高以及波速的时空分布规律, 并讨论了船行波对船舶连续通航的安全影响. 研究得到了最大船首孤立波波高 $\eta_{\max}$ 与船舶吃水 P 、 Fr 、通航隧道的水深、宽度以及船型的多元非线性回归方程; 基于孤立波波面方程的理论假设, 对通航隧道内船首孤立波的波速进行分析, 发现船首孤立波的前波面与孤立波波面方程吻合较好, 以孤立波的理论波速作为船首孤立波的传播速度, 给出了通航隧道内船舶连续通航时安全航距应满足的关系式. 结果表明, 该模型能较好地捕捉船行波在通航隧道中的传播演变过程. 研究结果可为单线直线运河中通航隧道的设计提供参考和依据, 并可为通航隧道船舶通航安全关键技术标准或规范的制定奠定理论基础.

关键词 通航隧道, 船行波, 通航安全, FUNWAVE-TVD

我国是内河航运大国, 内河航运在我国国民经济的发展中发挥着至关重要的作用. 随着我国经济的迅速发展和对内河航运需求的不断增长, 低标准的船闸已不能满足水运发展的需求, 建设通航隧道成为解决这一通航瓶颈问题的可行方法^[1]. 与此同时, “一带一路”沿线的发展促进大量商品进出口, 而现有陆运和水运基本饱和, 难以满足货运的快速增长. 通航隧道作为一种航道等级提升方案新的水运里程增长方式, 在增加水资源调度、航运等方面发挥着积极作用.

目前, 我国已建成富春江、构皮滩以及溪洛渡等通航隧道, 这些通航隧道的建成有效地解决了当地通航瓶颈以及通航效率低下的问题. 可见, 通航隧道的建设逐渐成为未来航运事业发展的一个热点方向. 然而, 有关通航隧道的研究极其缺乏, 现有研究仅局限于依

据工程实例、参考内河通航相关规范以及实际设计经验给出通航隧道的相关建设尺度. 例如, 吴德兴等人^[1]以富春江七里泷通航隧道工程项目为依托, 探讨了隧道的水下断面、水上建筑物的界限要求以及隧道通航安全措施等. 李焱等人^[2]采用水工物理模型和船模实验的方法, 研究了构皮滩水电站单线通航隧道、渡槽、明渠中船舶航行的船舶阻力、下沉量及水面波动等情况. 刘圣凡和童中山^[3]依据重力相似准则, 采用水工模型研究了宽浅河道口门区的通航水流条件. 汤建宏和阚得静^[4]结合船舶通航临界航速的计算公式, 以溪洛渡枢纽的通航隧道为例, 提出了最经济的隧道断面尺寸系数等. 郭洪雨^[5]依托富春江通航隧道特点, 从结构方面开展了隧道结构验算以及施工方案的分析研究. 可见, 已有研究均未从通航尺寸、通航水流条件等方

引用格式: 邓斌, 王孟飞, 蒋昌波, 等. 通航隧道内船行波传播特性及对船舶连续通航安全影响. 科学通报, 2021, 66: 1101–1112

Deng B, Wang M F, Jiang C B, et al. Propagation characteristics of ship waves in navigation tunnel and its influence on continuous navigation safety of ship (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1101–1112, doi: 10.1360/TB-2020-0124

面开展通航隧道船舶通航关键技术研究,特别是尚未从船行波的影响方面给出通航隧道的通航条件。然而现有研究表明,通航隧道内船行波的传播特性不同于开阔的深水水域条件下船行波的运动,这类断面及通航条件非常有限的限制性航道中的船行波在设计时应予以重点关注^[6,7]。

目前,国内外很多学者通过现场调查^[8,9]、物理实验^[10,11]以及数值模拟^[12,13]等方法研究了船行波的物理特性^[14]、对船舶自身稳定性^[15]以及对周围护岸^[9]、水底^[16]和周围设施^[17]的影响。众所周知,船行波包括首波系、尾波系、散波和横波等不同的分类形式,通常随弗劳德数 Fr 的不同呈现不同的表现形式^[18]。其中,尾波系易受固壁反射影响,叠加形成较大波高,从而对船体产生不利影响。鉴于此,部分学者研究了尾波系中横波和散波的相关特性。例如, Ji等人^[13]通过求解Navier-Stokes方程并采用不同的湍流方法,分析了不同船型和航速下船尾波波高的传播规律。Du等人^[19]通过建立限制性航道内船舶操纵数学模型,对限制性航道内船舶尾流影响下的船舶操纵进行了模拟。Gourlay^[20]研究了浅水条件下船舶以超临界航速运动下船舶的尾流流态,并提出了用于预测船行波破碎临界条件的理论模型。然而,上述研究大多针对限制性水域条件下船行波尾波系,较少涉及船首孤立波。船首孤立波仅在跨临界航速的浅水条件下形成,且在开阔水域条件下危害较小^[21],但通航隧道的特殊性决定了船首孤立波具有较大的波高和传播速度,对隧道以及船舶航行安全产生的影响甚至大于尾波,而现有涉及船首孤立波的相关研究主要侧重于波阻力方面^[22]。因此,有必要开展通航隧道内船首孤立波传播与演化特性及其对连续通航船舶影响的研究。

数值模拟船舶水动力学问题涉及扰动生波、波浪破碎等难题,采用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模型则需借助VOF(volume of fluid)或Level Set等界面捕捉技术来描述自由表面的变形,并需借助湍流模型模拟波浪的紊动破碎。如骆婉珍等人^[23]基于重叠网格求解Navier-Stokes方程的CFD技术模拟分析船行波叠加、反射等现象,但该类方法计算量大,难以适应大范围特别是大船速、浅水条件下船行波的传播演化^[24]。近年来,随着Boussinesq方程在消除浅水限制以及模拟波浪破碎等方面的不断改进,已被用于研究船舶水动力学以及波浪与各种结构物相互作用的问题之中,逐渐成为一种成熟、稳定的数值计算工

具^[6,25,26]。如Dam等人^[6]通过求解二维Boussinesq方程模拟了细长船体生成波浪的传播,并分析不同船速下波高变化规律。Shi等人^[25]基于完全非线性的Boussinesq模型FUNWAVE-TVD模拟了船行波引起的紊动破碎,并从黏性破碎准则和波高破碎准则两种不同的破碎准则比较研究了船行波在不同 Fr 下的传播过程。卓明泉等人^[26]基于COULWAVE模型实现浅水航道内船行波的数值模拟,再现了浅水条件下船首孤立波现象,但该研究未充分考虑船首孤立波受航道断面和船舶参数等影响。因此,考虑通航隧道的特点,并为提高计算效率,采用完全非线性Boussinesq模型可较好地模拟通航隧道内船首孤立波受隧道、船舶以及水深等影响因素的传播特性。

综上所述,由于通航隧道的特殊性,现有相关研究较少,其设计仅局限于内河通航规范的参考以及设计经验,未考虑通航水动力学环境的影响。因此,为填补此方面研究空白,开展通航隧道内船行波对船舶连续通航影响的研究十分必要。本研究基于完全非线性的Boussinesq模型FUNWAVE-TVD^[25],以压力源项表示船舶引起自由面的波动,采用Shi等人^[25]提出的破波准则,选取直线运河隧道作为研究对象,重点讨论了通航隧道内船首孤立波的传播规律及其对隧道内船舶连续通航安全间距的影响,可为通航隧道船舶通航关键技术的研究奠定基础。

1 数值模型

1.1 控制方程

Kirby^[27]基于完全非线性Boussinesq方程开发了FUNWAVE开源程序包,在此基础上很多学者对该模型进行了改进^[28,29]。目前,该模型在求解波浪破碎和处理干湿界面等方面取得了较好的计算效果,并由于考虑了波浪的折射、绕射、反射和浅化效应等影响,在预测波浪演化方面具有较好的稳定性和可靠性^[30]。模型具体控制方程如下。

质量守恒方程:

$$\eta_t + \nabla \cdot \mathbf{M} = 0, \quad (1)$$

其中, η 为波表面高度; η_t 为 η 对时间 t 的偏导数。 $\mathbf{M}$ 为水平体积通量:

$$\mathbf{M} = H(\mathbf{u}_a + \bar{\mathbf{u}}_2), \quad (2)$$

其中, $H=h+\eta$ 为当地水深, h 为静水深; $\mathbf{u}_a$ 表示参考位置

$z=z_a$ 处水质点的水平速度矢量; $\bar{\mathbf{u}}_2$ 为平均水深下的垂向速度, 其色散性精确到 $O(\mu^2)$, 其中, $\mu=kh$ 为表征频率色散的无量纲参数, k 为波数. $\bar{\mathbf{u}}_2$ 通过下式计算:

$$\bar{\mathbf{u}}_2 = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} \mathbf{u}_2(z) dz = \left(\frac{z_a^2}{2} - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla B + \left(z_a + \frac{1}{2}(h - \eta) \right) \nabla A. \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\mathbf{M}_t + \nabla g \cdot \left[\frac{\mathbf{M}\mathbf{M}}{H} \right] + \nabla \left[\frac{1}{2}g(\eta^2 + 2h\eta) \right] = V_{\text{dis}} + g\eta \nabla h - gH \nabla p_a - S_{\text{brk}}, \quad (4)$$

其中, $\mathbf{M}_t$ 为流体体积通量对时间 t 的导数, g 为重力加速度, $\nabla = ((\partial/\partial x), (\partial/\partial y))$ 为水平梯度算子, V_{dis} 表示色散项^[29]; 右侧第三项为船舶尾流生成的压力源项, 其中, p_a 表示施加在水体表面的扰动压强, S_{brk} 为与人工涡流黏度相关的耗散项, 详见Kennedy等人^[28]的描述, 其中, 涡流黏度如下所示:

$$\nu = B\delta^2(h + \eta)\eta_t, \quad (5)$$

其中, δ 是混合长度系数, 本研究取 $\delta=1$; B 为避免数值振荡的常数, 本研究取 $B=1$.

1.2 压力源方程

船舶模型的实现由压力源确定, 即在完全非线性Boussinesq模型中加入压力源项. 其中, 船舶中心点 (x^*, y^*) 的压力分布可由式(6)~(8)给出:

$$p_a(\tilde{x}, \tilde{y}, t) = Pf(\tilde{x}, t)q(\tilde{y}, t), \quad (6)$$

$$f(\tilde{x}, t) = \begin{cases} \cos^2 \left[\frac{\pi \left(|\tilde{x} - x^*(t)| - \frac{1}{2}\alpha L \right)}{(1 - \alpha)L} \right], & \frac{1}{2}\alpha L < |\tilde{x} - x^*(t)| \leq \frac{1}{2}L, \\ 1, & |\tilde{x} - x^*(t)| \leq \frac{1}{2}\alpha L, \end{cases} \quad (7)$$

$$q(\tilde{y}, t) = \begin{cases} \cos^2 \left[\frac{\pi \left(|\tilde{y} - y^*(t)| - \frac{1}{2}\beta R \right)}{(1 - \beta)R} \right], & \frac{1}{2}\beta R < |\tilde{y} - y^*(t)| \leq \frac{1}{2}R, \\ 1, & |\tilde{y} - y^*(t)| \leq \frac{1}{2}\beta R, \end{cases} \quad (8)$$

其中, L 和 R 分别代表压力源的长度和宽度(即船长和船宽); $(\tilde{x}, \tilde{y})$ 表示相对于压力源的坐标系; $P=\rho gp$ 表示船舶中心点处压强, ρ 为水的密度, P 为船舶吃水; α 和 β 是表示吃水区域的形状参数 $0 \leq (\alpha, \beta) \leq 1$, 参考文献[25]中船舶形状的设置, α 、 β 取值均设为0.5.

1.3 模型参数及边界条件设置

模型采用基于三阶Runge-Kutta方法的自适应时间步长和MUSCL-TVD解法; 干湿边界网格的最小深度设置为0.001 m, CFL数取0.25, 并在通量计算中采用HLL(Harten Lax & van Leer)构造方法.

模型消波技术采用耗散型海绵层消波方法, 其源项为

$$C_{\text{sponge}} = C_{\text{max}} \left(1 - \tanh \frac{10(i-1)}{I_{\text{width}}-1} \right), \quad (9)$$

其中, C_{max} 表示消波层 C_{sponge} 的最大值, 本研究中 $C_{\text{sponge}}=0.1$; i 和 I_{width} 分别表示网格点数和消波层的宽度. 耗散型海绵层宽度通常为2~3倍的波长. 依据本研究工况以及前人研究中船行波波长特性, 选取消波层宽度 $I_{\text{width}}=5$ m.

计算模型中, 隧道两侧及底部设置为充分反射的固壁边界, 该边界上法向速度和切向速度的法向梯度为零.

2 工况设置及模型布置

2.1 工况设置

参考现有通航隧道的建设实例以及我国内河通航标准相关规范(GB50139-2014)的要求, 计算工况选取3种内河通航标准船型, 且每种船型从空载吃水至设计吃水分别选取4种计算吃水 P (表1); 拟定3种通航隧道尺寸 B 、水深 h 以及5种船速 V (表2). 由表2可知, 各工况下弗劳德数 $Fr = V/\sqrt{gh}$ 均小于1.

表1 船型设置

Table 1 Ship parameters

船型	船长 l (m)	船宽 b (m)	设计吃水(m)	计算吃水(m)
100 t	32.0	7.0	1.0	0.7、0.8、0.9、1.0
300 t	35.0	9.2	1.3	0.7、0.9、1.1、1.3
500 t	45.0	10.8	1.6	0.9、1.1、1.3、1.6

表2 工况设置

Table 2 Study cases

工况	$h(\text{m})$	$B(\text{m})$	船型	$V(\text{m/s})$	弗劳德数 Fr
A1	1.6	20	300 t	0.5、1.0、1.5、2.0、2.5	0.13、0.25、0.38、0.5、0.63
A2		27			
A3		35			
B4	2.5	20			0.1、0.2、0.3、0.4、0.5
B5		27			
B6		35			
C7	3.0	20	100 t		0.09、0.18、0.28、0.37、0.46
C8		27			
C9		35			
D10		20			
E11		20	500 t		

2.2 模型布置

为节省计算资源,依据船舶航速不同采用不同的通航隧道长度,船速0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 m/s下对应的计算长度分别取200、240、280、320、360 m. 船舶初始位置为 $x=60$ m,且位于隧道中央.模型采用矩形结构化网格,其 xoy 二维坐标系以隧道左端角点为原点建立,具体的平面布置如图S1所示.

3 数值模型验证

3.1 船行波波高验证

为验证数值模型计算通航隧道内船行波的可靠性及稳定性,分别从数值实例、网格收敛性验证、稳定性三方面进行详细说明.

(1) 数值实例.为验证数值模型参数设置的合理性,计算选用文献[20]中三种 Fr 下的算例,具体为计算水槽宽 D 为3.5 m,水深 h 为0.114 m;船舶 L 长为1.6 m,宽 B 为0.4 m,吃水 P 为0.1 m.其他参数设置均与文献[20]保持一致, $x=33.125$ m, $y=0.72$ m.图S2给出了三种工况下监测点($x=33.125$ m, $y=0.72$ m)波高的对比,结果显示,数值模型计算波面与文献[20]中船行波的变化趋势相吻合.采用Skill数验证模型精度要求:

$$\text{Skill} = 1 - \frac{\sum |X_{\text{num}} - X_{\text{obs}}|^2}{\sum (|X_{\text{num}} - \overline{X_{\text{obs}}}| + |X_{\text{obs}} - \overline{X_{\text{obs}}}|)^2}, \quad (10)$$

其中, X_{num} 和 X_{obs} 分别表示计算结果和实验结果,上画线表示取平均值. Skill数越接近1,表明模型精度越高;越

接近0,则精度越低.计算结果表明,各工况下Skill数均大于0.90,均方根误差均小于0.038,反映模型能较好地模拟船行波的传播.此外,从图S2中也可以看到明显的船首孤立波,属于典型浅水航道内船行波的重要特征.

(2) 网格收敛性验证.为探究网格大小对计算结果的影响,选取工况C8,采用6种空间步长分别进行船行波的计算.如图S3所示,不同大小网格下船行波的波高历时曲线基本吻合,能够较准确地模拟通航隧道内船行波波高的变化趋势.为更好地观察不同网格间的计算差异,从图S3局部细节图中可以看出,各网格下波高变化最大约为0.001 m,且随着网格减小,船首孤立波波高逐渐收敛.其中,以网格步长为0.08 m作为参考,网格步长对应为0.09、0.10、0.11、0.12、0.13 m的船行波均方根误差分别为0.008、0.008、0.009、0.013、0.018,说明模型在网格步长设为0.10 m下已达到计算精度要求.模型最终选用的计算网格大小为0.10 m.

(3) 稳定性验证.由于初始时刻假定通航隧道内为平静水域,因此,为判定船舶航行过程中船行波是否达到由生成阶段到稳定传播阶段的过程,给出工况C7中船舶最大航速 $V=2.5$ m/s和最小航速 $V=0.5$ m/s条件下波高的历时曲线图.图S4(a)中三条垂直虚线将 $x=80$ m处的船行波历时曲线分为四个阶段:船首孤立波段、船长过渡段、船尾波系上升段及下降段.从图S4两种不同航速下的波高历时曲线可以看出,船首孤立波在各测点处达到稳定传播状态(水平虚线),而在 $x=80$ m处船尾波系在各测点处的波高先增加至较大波高(图S4(a): $t=16$ s;图S4(b): $t=42$ s),然后逐渐减小至0.3 m左右

($t=50$ s), 表明船尾波系在 $0<x<80$ m范围内已由稳定传播阶段转为逐渐耗散阶段. 因此, 下文采用总计算时间50 s可确保船行波已达到稳定传播状态.

4 结果与讨论

4.1 通航隧道内船行波传播特性分析

图S5~S7分别为工况 D10、C7、E11下通航隧道内船行波波高的演化过程. 在船舶航行的开始阶段($t=5$ s), 船首位置出现船首孤立波, 具有典型浅水条件下船舶航行的生波特征^[7]; 船尾处形成船尾波, 此时船尾波最大波高略小于船首孤立波波高. 随着船首孤立波不断向前传播($t=15$ s), 船首孤立波的传播速度明显大于船舶航行速度, 船首孤立波逐渐远离船舶, 但船尾散波不断向两侧传播, 在通航隧道两侧近岸处, 受波浪叠加影响形成较大尾波波高. 随着船首孤立波继续向前传播($25\text{ s}<t<45$ s), 船首孤立波波高变化不大, 且船首波系的形态不同于开阔水域内船行波的形态. 与此同时, 受两侧固壁的影响, 船尾波在通航隧道内不断传播叠加, 在隧道两侧以及中间各点处易形成较大波峰及波谷. 比较图S5~S7发现, 不同船舶尾流的范围均不超过50 m, 且在通航隧道宽度不变条件下, 尽管船型不同, 但通航隧道内船行波的传播规律大致相同; 然而, 不同船型产生的船首孤立波的传播速度不同, 船型越大, 传播速度越小, 越易出现次孤立波现象.

4.2 船首孤立波波高变化规律

影响通航隧道内船行波波高 $\eta_{\max}$ 的因素众多, 主要考虑以下变量:

$$\eta_{\max} = f(V, B, P, h, b, \rho, g, \Delta x, \Delta y), \quad (11)$$

其中, V 表示船速, B 表示隧道宽度, P 表示船舶吃水, h 表示隧道水深, b 表示船舶宽度, ρ 表示水的密度, g 表示重力加速度, Δx 表示距离船舶的纵向距离, Δy 表示距离船舷的距离.

依据量纲分析以及 π 定理, 选取 V 、 h 、 ρ 三个基本物理量, 选用 L 、 T 、 M 作为基本量纲. 将基本物理量表示成基本量纲形式, 进行独立性检验, 具体如下:

$$\begin{cases} V = M^0 T^{-1} L^1, \\ h = M^0 T^0 L^1, \\ \rho = M^1 T^0 L^{-3}. \end{cases} \quad (12)$$

所选基本物理量的量纲指数行列式为

$$\begin{vmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -3 \end{vmatrix} = -1 \neq 0, \text{ 表明三个基本物理量是相互独立}$$

的, 可作为基本物理量表示式(13). 由 π 定理可得

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{\eta_{\max}}{h}, \pi_2 = \frac{B}{h}, \pi_3 = \frac{P}{h}, \pi_4 = \frac{b}{h}, \\ \pi_5 &= \frac{V}{\sqrt{gh}}, \pi_6 = \frac{\Delta x}{h}, \pi_7 = \frac{\Delta y}{h}. \end{aligned} \quad (13)$$

将各 π 之间整理变换得

$$\pi_1' = \frac{\eta_{\max}}{h}, \quad (14)$$

$$\pi_2' = \frac{\pi_3 \pi_4}{\pi_2} = \frac{bP}{Bh} = \frac{\Phi}{\Omega} = \frac{1}{n}, \quad (15)$$

$$\pi_3' = \frac{B}{h}, \quad (16)$$

$$\pi_4' = \frac{V}{\sqrt{gh}}, \quad (17)$$

$$\pi_5' = \pi_6 \cdot \pi_7 = \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{h^2}, \quad (18)$$

其中, Φ 表示船舶的横截面积, Ω 表示通航隧道过水面面积, n 表示隧道通航断面系数. 由此, 式(11)可变为式(19), 在后续的波高分析中将该式进行无量纲化:

$$\frac{\eta_{\max}}{h} = f\left(\frac{1}{n}, \frac{V}{\sqrt{gh}}, \frac{B}{h}, \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{h^2}\right). \quad (19)$$

图S8给出了工况A2、B5、C8下最大船首孤立波与 Fr 的变化规律. 从图S8(a)中可以看出, 最大船首孤立波与 Fr 呈良好的线性增长关系, 这是由于随着船舶航行速度的增加, 排开水体产生涌浪的时间较短, 水体未能及时向外传播, 导致船首处产生较大孤立波波高. 随着船舶吃水的增大, 船首孤立波的波高逐渐增加, 这是由于船舶吃水增大促进了船舶排开水体的体量增加, 导致船首处产生较大孤立波波高. 通过比较图S8发现, 随着通航隧道内水深的增加, 最大船首孤立波逐渐减小, 表明船舶排开水体的体量与时间一定时, 同一隧道断面内水深越大, 船首形成船首孤立波越小, 再次验证船首孤立波在浅水条件下的形成机制.

图S9为船舶速度 $V=1.5$ m/s下最大船首孤立波波高受通航隧道宽度影响的变化规律. 从图S9(a)中可以看出, 船首孤立波波高的大小受通航隧道宽度的影响较小, 大致随通航隧道宽度的增加略有减小, 表明船首孤立波的波高主要受垂向方向如水深、吃水等影响. 与此同时, 比较图S9可以看出, 随着船舶吃水及水深的增

加, 船首孤立波波高的变化较大, 通航隧道水深越小, 船首孤立波波高越大。

图S10(a)和(b)分别给出了工况C1、D10、E11下船首吃水 $P=0.9$ m的最大船首孤立波波高与 Fr 、通航断面系数之间的关系。图S10(a)表明, 船舶吃水一定时, 船首孤立波波高随 Fr 的增加而增加。图S10(b)表明, 随通航断面系数的增加, 最大船首孤立波波高呈幂指数形式逐渐减小, 再次表明船首孤立波波高与船舶的纵向尺度有密切关系, 即船首孤立波与通航断面系数密切相关。

参照4.2中关于船行波波高的量纲分析, 基于多元非线性回归得到通航隧道内最大船首孤立波波高与通航隧道的宽度、水深、船舶通航断面系数以及船舶参数的幂函数型经验关系式(20), 拟合优度 $R^2=0.98$ 。方程各系数标准差见表3, 数值计算与拟合方程的对比如图1所示。从表3可以看出, 回归方程的指数项及系数项标准差均小于相应系数的0.1, 且接近0, 常数项标准差也接近0, 表明回归方程的各系数具有较高的准确性, 可以较好地预测不同影响因素下船首孤立波的波高。

$$\eta_{\max}/h = 0.49 \times (B/h)^{0.202} \times n^{-0.346} \times (P/h)^{0.444} \times Fr^{0.154} - 0.037. \quad (20)$$

4.3 船首孤立波波速变化规律

考虑到船首孤立波波速大于船舶航速, 且由于通航隧道内船首孤立波的传播难以消除, 并易对隧道内前一船舶的航行产生不利影响, 因此, 为保证通航隧道内船舶连续通航的安全性, 给出通航隧道的相关尺度参数以及隧道内连续通航船舶的安全间距具有重要意义。首先假设船首孤立波在传播过程中波形保持不变, 参考孤立波的理论波面方程(21):

表3 船首孤立波回归方程的参数

Table 3 Parameters of bow solitary wave regression equation

方程系数	标准差
0.49	0.023
0.202	0.02
-0.346	0.03
0.444	0.04
0.154	0.01
-0.037	0.01

图1 船首孤立波模型计算与回归方程(20)对比

Figure 1 Comparison between bow solitary wave model calculation and regression Eq. (20)

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x - Ct) \right], \quad (21)$$

其中, H 为船首孤立波波高, C 为孤立波波速, t 为时间。

基于上述理论公式假设, 选取通航隧道内稳定后的船首孤立波波形进行分析。图2~4表示通航隧道内船

图2 工况B2下 $V=1.0$ m/s、 $P=0.9$ m、 $y=4.5$ m船首孤立波计算值与理论值的比较。(a) $x=140$ m; (b) $x=160$ m; (c) $x=180$ m

Figure 2 Comparison of calculated value with theoretical value for bow solitary wave under case B2 with $V=1.0$ m/s, $P=0.9$ m, $y=4.5$ m. (a) $x=140$ m; (b) $x=160$ m; (c) $x=180$ m

图3 工况B2下 $V=1.5$ m/s、 $P=0.9$ m、 $y=4.5$ m船首孤立波计算值与理论值的比较。(a) $x=140$ m; (b) $x=160$ m; (c) $x=180$ m
Figure 3 Comparison of calculated value and theoretical value for bow solitary wave under case B2 with $V=1.5$ m/s, $P=0.9$ m, $y=4.5$ m. (a) $x=140$ m; (b) $x=160$ m; (c) $x=180$ m

图4 工况B2下 $V=2.0$ m/s、 $P=0.9$ m、 $y=4.5$ m船首孤立波计算值与理论值的比较。(a) $x=140$ m; (b) $x=160$ m; (c) $x=180$ m
Figure 4 Comparison of calculated value and theoretical value for bow solitary wave under case B2 with $V=2.0$ m/s, $P=0.9$ m, $y=4.5$ m. (a) $x=140$ m; (b) $x=160$ m; (c) $x=180$ m

行波稳定后船首孤立波与孤立波一阶波面方程^[21]的比较。从图2可以看出,当 $140\text{ m}<x<180\text{ m}$ 时,船首孤立波波高变化均小于波高的1%,满足理论公式假设中波高恒定传播的前提。从图2~4可知,稳定后的船首孤立波前波面与孤立波一阶波面方程吻合较好,其中前波面计算值与理论值的Skill数均大于0.95,均方根误差均小于0.02。后波面与理论值有一定差别,这是由于船首孤立波的产生导致孤立波后波面扰动,但整体船首孤立波波高与理论波高基本吻合。由于式(22)表明孤立波波速主要受波高及水深的影响,因此,以孤立波的理论波速作为相应的船首孤立波波速进行通航隧道内孤

立波波速的研究与分析是可行的。

基于椭圆余弦波极限情况下的孤立波理论公式得到孤立波波速二阶近似解式:

$$C = \sqrt{gh} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{H}{h} - \frac{3}{20} \left(\frac{H}{h} \right)^2 \right] \quad (22)$$

图5表示不同水深情况下船首孤立波稳定波速的变化规律。从图5(a)中可以看出,随 Fr 逐渐增加,船首孤立波波速 C 呈幂指数形式增加,且船首孤立波波速远大于船舶航行速度。此外,船首孤立波波速同样随船舶吃水的增大呈幂指数形式增加。横向比较图5(a)~(c)可以

图5 工况A2(a)、B2(b)和C2(c)下船首孤立波的稳定波速
Figure 5 Stable wave velocity of bow solitary wave under cases A2 (a), B2 (b) and C2 (c)

发现, 船首孤立波波速随水深的增加而增加. 因此, 从确保船舶通航间距较小以及通航效率提高的角度考虑, 水深不宜太大.

图6表示不同通航隧道宽度下船首孤立波波速的变化规律. 从图6(a)可以看出, 船首孤立波波速随 Fr 呈幂指数形式增加, 且随船舶吃水的增大逐渐增加, 与上文分析类似. 通过图6(a)~(c)可以发现, 船首孤立波波速随通航隧道宽度的增加逐渐减小. 因此, 较大的通航隧道宽度有利于连续通航船舶的航行安全.

4.4 通航隧道内船舶安全航距

由于船首孤立波波速的大小影响连续通航船舶的航行间距, 依据上述船首孤立波波速的规律, 给出不同通航隧道水深、隧道宽度、船型、航速以及船舶吃水的多元非线性回归方程:

$$\frac{C}{Fr_c} = 0.386 \times \left(\frac{B}{h}\right)^{0.21} \times n^{-1.1} \times \left(\frac{P}{h}\right)^{-0.11} \times Fr^{0.43} + 1.0, \quad (23)$$

其中, C 表示孤立波波速(由式(22)获得), Fr_c 为 $\sqrt{gh}$.

为验证船首孤立波波速回归方程的准确性, 给出波速模型的计算值与回归方程的对比(图7)以及回归方程各系数标准差(表4). 可见, 回归方程的计算值能很好地反映模型的计算结果, 拟合优度 $R^2=0.97$. 从表4可以看出, 回归方程的各项标准差均小于0.1, 且接近0, 表明回归方程的各系数具有较高的准确性. 综上表明, 式(23)可以较好地预测不同影响因素下船首孤立波的波速.

为探讨船首孤立波对船舶连续通航安全的影响, 图8给出了船首孤立波与前一通航船舶之间的追击简图. 可以看出, 当船首孤立波与前一船舶1处于同一位置处时应满足式(24):

$$\frac{\Delta w + \Delta w1}{C} = \frac{\Delta w1}{V_{前}}, \quad (24)$$

其中, Δw 表示通航隧道内船舶间距; $\Delta w1$ 表示船首孤立波与前一通航船舶的追击位置; $V_{前}$ 表示前一通航船舶的航行速度.

经移项化简可以得到式(25):

$$\Delta w = \frac{\Delta w1}{V_{前}} C - \Delta w1. \quad (25)$$

为使船首孤立波不影响前一船舶的航行, 通航隧道的长度及船舶的安全间距应尽量满足关系 $\Delta w + \Delta w1 > w$ (w 为满足连续通航安全的隧道长度), 以确保船首孤立波在未达到其追上前一船舶航行的位置处时, 前一通航船舶便已经驶离通航隧道.

基于前文图S5~S7的相关分析, 船舶的航行间距应尽量大于 $(50+l)$ m, 结合式(23)和(25)得到式(26):

$$\Delta w = \frac{\Delta w1}{V_{前}} \left(0.386 Fr_c \times \left(\frac{B}{h}\right)^{0.21} \times n^{-1.1} \times \left(\frac{P}{h}\right)^{-0.11} \times Fr^{0.43} + Fr_c \right) - \Delta w1, \quad (26)$$

再结合连续通航安全的隧道长度关系式及式(26)得到通航隧道内连续通航船舶的航行间距应满足的最低要求关系式(27), 该式适用于直线运河隧道内单线通航船舶的航行间距的计算.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta w1}{V_{前}} \left(0.386 Fr_c \times \left(\frac{B}{h}\right)^{0.21} \times n^{-1.1} \times \left(\frac{P}{h}\right)^{-0.11} \times Fr^{0.43} + Fr_c \right) \\ \Delta w > (50+l)m, \end{array} \right\} > w. \quad (27)$$

依据现有富春江通航隧道(1~3)^[1]以及构皮滩通航隧道(4~6)^[2]的资料, 表5给出了两个通航隧道在不同船

图6 工况B1(a)、B2(b)和B3(c)下船首孤立波的稳定波速

Figure 6 Stable wave velocity of bow solitary wave under cases B1 (a), B2 (b) and B3 (c)

图7 船首孤立波波速模型计算与回归方程(23)对比
Figure 7 Comparison between model calculation and regression Eq. (23) for bow solitary wave velocity

型对应满载设计吃水、设计最大航速以及设计通航水深条件下船舶安全航行距离的建议值。其中,富春江通航隧道(1~3)直线段1000 m条件下建议的安全航距约为总长度的65%,构皮滩通航隧道(4~6)直线段335 m条件下建议的安全航距约为总长度的75%,该结果可为富春

表4 船首孤立波波速回归方程的参数

Table 4 Parameters of regression equation of bow solitary wave velocity

方程系数	标准差
0.386	0.031
0.21	0.036
-1.1	0.06
0.11	0.068
0.43	0.02
1.0	0.002

江以及构皮滩通航隧道内连续通航船舶的航行间距提供理论参考。

5 结论

基于FUNWAVE-TVD建立了通航隧道内船行波运动模拟数值模型,重点研究了直线运河内通航隧道下航行波传播及演化特征,分析了通航隧道的水深、宽度以及船舶的吃水、船型等各个因素对船行波首波系的影响规律。在此基础上,首次基于船首孤立波的传播特征探讨了通航隧道内船舶连续通航安全航行间距问题,填补了现有研究空白。具体结论如下:

图8 (网络版彩色)船首孤立波与船舶简图
Figure 8 (Color online) Diagram for bow solitary wave and ship

表5 安全航距的建议

Table 5 Suggestions on ship safe distance

实例	隧道长度(m)	宽度 B (m)	通航水深 h (m)	设计航速 V (m/s)	最大船型	建议安全航距 Δw (m)
1	1000	20	3.5	2.0	500 t	660
2	1000	20	3.5	2.0	300 t	650
3	1000	20	3.5	2.0	100 t	640
4	335	16	3.0	1.2	500 t	260
5	335	16	3.0	1.2	300 t	260
6	335	16	3.0	1.2	100 t	260

(1) 基于现有通航隧道的建设实例以及我国内河通航标准相关规范(GB50139-2014)的要求, 采用FUN-WAVE-TVD模型建立了精确描述通航隧道船行波传播及演化的数值模型. 研究表明, 该模型能很好地模拟通航隧道这种特殊浅窄型限制性航道条件下船首孤立波的产生及其传播特征.

(2) 通航隧道内最大船首孤立波波高与 Fr 呈良好的线性增长关系. 研究发现, 船首孤立波主要受垂向方向的水深、吃水等影响, 具体为随通航隧道的水深增加逐渐减小、随通航隧道宽度的变化并不明显、随通航断面系数的减小而增加以及受横向通航隧道宽度的影响较小. 此外, 基于上述规律与量纲分析提出了最大

船首孤立波波高的多元非线性回归方程.

(3) 基于孤立波波面方程以及波速公式, 得到了船首孤立波波速随 Fr 呈幂指数形式增加的规律, 结合通航隧道内船尾波系的演化过程与孤立波波速, 提出了适用于单线通航隧道内船舶连续直线通航的安全间距应满足的关系式.

本研究为进一步开展通航隧道船舶通航关键技术提供了理论基础, 但仅考虑了一定船型、隧道断面尺寸、静水条件下船行波的演变规律, 未考虑水流运动与更多连续船舶通航影响因素. 因此, 更复杂的通航隧道条件、船舶运动以及水动力特性之间的内在关系还有待进一步研究.

参考文献

- 1 Wu D X, Zhou H S, Guo H Y, et al. Study on design of cross-section of Fuchunjiang waterway tunnel (in Chinese). *Tunnel Constr*, 2015, 35: 1182–1188 [吴德兴, 周红升, 郭洪雨, 等. 富春江通航隧道建筑限界及内轮廓设计研究. *隧道建设*, 2015, 35: 1182–1188]
- 2 Li Y, Zheng B Y, Zhou H X. Test on scale of navigation tunnel and canal bridge in the intermediate channel between ship lifts of Goupitan Power Station (in Chinese). *J Waterw Harbor*, 2012, 33: 45–51 [李焱, 郑宝友, 周华兴. 构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究. *水道港口*, 2012, 33: 45–51]
- 3 Liu S F, Tong Z S. Navigable flow condition in gate area of low water head hydropower project in wide shallow riverway (in Chinese). *Port Waterw Eng*, 2018, 9: 130–135 [刘圣凡, 童中山. 宽浅河道低水头水电枢纽口门区通航水流条件研究. *水运工程*, 2018, 9: 130–135]
- 4 Tang J H, Kan D J. Economic analysis of navigable tunnel section of high dam (in Chinese). *Port Waterw Eng*, 2017, 7: 142–146 [汤建宏, 阚得静. 高坝通航建筑物通航隧洞断面经济性分析. *水运工程*, 2017, 7: 142–146]
- 5 Guo H Y. Key technologies in design and construction of waterway tunnel (in Chinese). Master Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 [郭洪宇. 通航隧道设计与施工关键技术研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2014]
- 6 Dam K T, Tanimoto K, Fatimah E. Investigation of ship waves in a narrow channel. *J Mar Sci Technol*, 2008, 13: 223–230
- 7 Parnell K E, Soomere T, Zaggia L, et al. Ship-induced solitary Riemann waves of depression in Venice Lagoon. *Phys Lett A*, 2015, 379: 555–559
- 8 Luznik L, Brownell C J, Snyder M R, et al. Influence of the atmospheric surface layer on a turbulent flow downstream of a ship superstructure. *J Atmos Ocean Technol*, 2013, 30: 1803–1819
- 9 De Roo S, Troch P. Field monitoring of ship wave action on environmentally friendly bank protection in a confined waterway. *J Waterw Port Coast Ocean Eng*, 2013, 139: 527–534
- 10 Lee S J, Yates G T, Wu T Y. Experiments and analyses of upstream-advancing solitary waves generated by moving disturbances. *J Fluid Mech*, 2006, 199: 569–593
- 11 Caplier C, Rousseaux G, Callaud D, et al. Energy distribution in shallow water ship wakes from a spectral analysis of the wave field. *Phys Fluids*, 2016, 28: 1070–1086
- 12 Dam K T, Tanimoto K, Nguyen B T, et al. Numerical study of propagation of ship waves on a sloping coast. *Ocean Eng*, 2006, 33: 350–364
- 13 Ji S C, Ouahsine A, Smaoui H, et al. 3-D numerical simulation of convoy-generated waves in a restricted waterway. *J Hydrodyn*, 2012, 24: 420–429
- 14 Wu H, He J, Zhu Y, et al. The Kelvin–Havelock–Peters farfield approximation to ship waves. *Eur J Mech B-Fluids*, 2018, 70: 93–101
- 15 Song S, Demirel Y K, Atlar M. An investigation into the effect of biofouling on the ship hydrodynamic characteristics using CFD. *Ocean Eng*, 2019, 175: 122–137
- 16 Ji S, Ouahsine A, Smaoui H, et al. 3D Modeling of sediment movement by ships-generated wakes in confined shipping channel. *Int J Sediment Res*, 2014, 29: 49–58
- 17 Yaakob O B, Nasirudin A, Abdul Ghani M P, et al. Parametric study of a low wake-wash inland waterways catamaran. *Sci Iran*, 2012, 19: 463–471
- 18 Wu H, He J, Liang H, et al. Influence of Froude number and submergence depth on wave patterns. *Eur J Mech B-Fluids*, 2019, 75: 258–270
- 19 Du P, Ouahsine A, Toan K T, et al. Simulation of ship maneuvering in a confined waterway using a nonlinear model based on optimization techniques. *Ocean Eng*, 2017, 142: 194–203

- 20 Gourlay T P. The supercritical bore produced by a high-speed ship in a channel. *J Fluid Mech*, 2001, 434: 399–409
- 21 Wu D M, Wu T Y. Three-dimensional nonlinear long waves due to moving surface pressure. In: Proceedings of 14th Symposium on Naval Hydrodynamics, Washington, DC, 1982. 103–129
- 22 Patel P K, Premchand M. Numerical investigation of the influence of water depth on ship resistance. *Int J Comput Vision*, 2015, 116: 10–18
- 23 Luo W Z, Zheng Q R, Wu T C. Numerical analysis of ship waves in narrow and shallow channel (in Chinese). *Ship Eng*, 2014, 36: 88–92 [骆婉珍, 郑青榕, 吴铁成. 船舶在狭窄、浅水航道船行波的数值模拟. *船舶工程*, 2014, 36: 88–92]
- 24 Ji S C, Ouahsine A, Smaoui H, et al. 3D numerical simulation of ship-induced waves and sediment transport in restricted waterways. *Houille Blanche*, 2014, 23: 68–73
- 25 Shi F, Malej M, Smith J M, et al. Breaking of ship bores in a Boussinesq-type ship-wake model. *Coast Eng*, 2018, 132: 1–12
- 26 Zhuo M Q, Xu J S, Zhu Z X. Numerical modeling of ship waves in shallow water channel (in Chinese). *Chin J Hydrodyn*, 2019, 34: 63–69 [卓明泉, 许劲松, 朱志夏. 浅水航道船行波数值模拟研究. *水动力学研究与进展*, 2019, 34: 63–69]
- 27 Kirby J T. Boussinesq models and their application to coastal processes across a wide range of scales. *J Waterw Port Coast*, 2016, 142: 03116005
- 28 Kennedy A B, Kirby J T, Chen Q, et al. Boussinesq-type equations with improved nonlinear performance. *Wave Motion*, 2001, 33: 225–243
- 29 Shi F, Kirby J T, Harris J C, et al. A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation. *Ocean Model*, 2012, 43–44: 36–51
- 30 Choi Y K, Shi F Y, Malej M, et al. Performance of various shock-capturing-type reconstruction schemes in the Boussinesq wave model, FUNWAVE-TVD. *Ocean Model*, 2018, 13: 86–100

补充材料

- 图S1 数值水槽的平面布置图(m)
- 图S2 船行波与实验数据的验证
- 图S3 网格收敛性验证图
- 图S4 船行波的稳定性验证
- 图S5 100 t级船行波的波高演化图(工况D10)
- 图S6 300 t级的船行波波高演化图(工况D8)
- 图S7 500 t级的船行波波高演化图(工况D11)
- 图S8 隧道宽度 $B=27$ m, 300 t级时, 不同水深条件下船首最大波高的变化规律
- 图S9 船首孤立波的最大波高与通航隧道宽度的变化
- 图S10 船型与最大船首孤立波的变化

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “通航隧道内船行波传播特性及对船舶连续通航安全影响”

Propagation characteristics of ship waves in navigation tunnel and its influence on continuous navigation safety of ship

Bin Deng^{1,2,3*}, Mengfei Wang¹, Changbo Jiang^{1,2,3*} & Zhiyuan Wu^{1,2,3}¹ School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;² Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China;³ Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China* Corresponding authors, E-mail: dengbin07@csust.edu.cn; jiangchb@csust.edu.cn

In parallel to the construction of navigable tunnels which is gradually put on the agenda in China, more and more navigable tunnels are bound to be built. However, the relevant technical support is still extremely lacking. The existing engineering design and construction only refer to the construction experience of various traffic tunnels or the inland waterway navigation regulations, which in turn creating a limitation that the influence of navigable hydrodynamic environment is not considered. Therefore, to fill in the gaps in the research on key technologies of ship navigation safety in navigable tunnels, the open-source package FUNWAVE-TVD based on completely nonlinear Boussinesq equation has been used to establish a numerical model, demonstrating ship travelling wave motion in navigable tunnels in linear canals. The model can help to determine the ship model by pressure source terms. The model size and research conditions are determined according to the inland river navigation code and existing engineering examples. The accuracy of the model is evaluated using numerical verification, grid convergence analysis and ship travelling wave stability. The temporal and spatial distributions of height and velocity of the solitary wave induced by ships in navigable tunnels are analyzed. The safety impact of ship travelling wave in navigable tunnels on continuous navigation is discussed. The results show that the model has a great ability to capture the propagation and evolution process of ship travelling wave in navigable tunnels. It is pointed out that large fluctuations are easily formed on both sides of the quay wall of the navigation tunnel and in the middle part. The multiple nonlinear regression equation containing the maximum solitary wave height $\eta_{\max}$, ship draught P , Fr , water depth, width of navigation tunnel and ship type is obtained. The equation shows that the maximum solitary wave height gradually increases with the increase of ship draught and Fr , but vice-versa with the increase of water depth, width and section coefficient of navigation tunnel. It is found that the wave velocity of the front solitary wave surface is in good agreement with the theoretical solitary wave surface equation. Taking the theoretical wave velocity of the solitary wave as the propagation velocity, the safe sailing distance of the ship during the continuous navigation, especially under the conditions of large speed and draught in existing navigation tunnels, is obtained. The novelty of this paper is serving as a reference and basis for the design of navigation tunnels in single-line straight canals and playing a role as a theoretical foundation for the formulation of any key technical standards or specifications for navigation safety of ships in navigation tunnels.

navigation tunnel, ship waves, navigation safety, FUNWAVE-TVDdoi: [10.1360/TB-2020-0124](https://doi.org/10.1360/TB-2020-0124)