

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2022.04.011

船行波对通航隧道断面尺寸影响的数值模拟分析

王孟飞¹, 邓斌^{1,2,3}, 蒋昌波^{1,2,3}, 陈杰^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114; 3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114)

摘要:为探讨船行波对通航隧道断面尺寸的影响,基于完全非线性 Boussinesq 方程的开源程序包 FUNWAVE-TVD 建立了通航隧道内船行波传播的数值模型,重点分析了通航隧道内最大船行波波高及横向流速的时空分布规律,探讨了船舶吃水深度、弗劳德数、通航隧道水深和宽度以及船型对通航隧道内最大船行波波高和横向流速的影响;基于船行波波高历时分析,提出了计算通航隧道垂直断面高度的经验公式,并结合船行波破碎生成的横向流速和现行内河通航标准,给出了通航隧道内安全航行的水流条件及隧道横向断面尺寸的设计建议。结果表明:受隧道两侧直立壁反射影响,船尾波易受通航隧道岸壁影响叠加形成较大波高,越靠近隧道岸壁位置,最大横向流速越小;当船舶达到设计吃水深度时,产生的船行波不易破碎,最大横向流速较小。

关键词:船行波;通航隧道;断面尺寸;Boussinesq 方程;FUNWAVE-TVD

中图分类号:U612.33⁺⁴

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2022)04-0061-06

Numerical analysis of ship wave influence on cross-section size of a navigable tunnel//WANG Mengfei¹, DENG Bin^{1,2,3}, JIANG Changbo^{1,2,3}, CHEN Jie^{1,2,3}(1. School of Hydraulic and Environmental 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)

Abstract: To discuss the influence of ship waves on the cross-section size of a navigation tunnel, a numerical model of ship wave propagation in navigation tunnel was established based on the open source package FUNWAVE-TVD of completely nonlinear Boussinesq equation. The spatial and temporal distribution of maximum ship wave height and lateral velocity in navigation tunnel was emphatically analyzed, and the influences of ship draft, Froude number, water depth and width of navigation tunnel and ship type on the maximum ship wave height and lateral velocity in navigation tunnel were discussed. Based on the duration analysis of ship wave height, an empirical formula for calculating the vertical section size of navigable tunnel was proposed. Combined with the transverse velocity generated by ship wave breaking and the current inland navigation standards, the reference of water flow conditions for safe navigation in navigable tunnel and the construction requirements of tunnel transverse section size were given. The results show that, due to the reflection of the vertical walls on both sides of the tunnel, the coda wave is easily affected by the navigation tunnel bank wall to form a large wave height, and the closer it is to the bank wall of the tunnel, the lower the maximum transverse velocity is. When the ship reaches the design draft, the ship wave is not easy to break, and the maximum transverse velocity is low.

Key words: ship wave; navigation tunnel; cross-section size; Boussinesq equation; FUNWAVE-TVD

通航隧道为典型的浅水狭窄型限制性航道,因隧道的特殊性,通航隧道具有不同于现有通航规范中限制性航道的特点^[1-3],而目前对通航隧道建设和管理还没有相关规范和标准,以限制性航道标准为参考建设通航隧道,使得通航隧道的断面尺寸富裕量较大,存在一定优化空间^[4]。干伟东等^[5]以乌江

构皮滩通航隧洞为例,针对通航隧道内船舶通航风险影响因素的复杂性、多层次性和不确定性特点,采用鱼骨图分析法,给出了影响隧道通航风险的系列因素。吴德兴等^[3]以富春江七里泷通航隧道为例,从通航隧道水下断面形式方面探讨了隧道通航安全措施等相关问题。李焱等^[6]采用水工物理模型和

基金项目:湖南省教育厅资助科研项目(20A007);湖南省科技创新计划(2020RC3037,20hmkj019)

作者简介:王孟飞(1995—),男,硕士,主要从事水动力学数值模拟研究。E-mail:wmf@stu.csust.edu.cn

通信作者:邓斌(1985—),男,副教授,博士,主要从事水动力学数值模拟研究。E-mail:dengbin07@csust.edu.cn

船模试验方法研究了构皮滩水电站单线通航隧道内船舶航行的船舶阻力、下沉量及水面波动特性。汤建宏等^[7]以溪洛渡枢纽的通航隧道为例,结合现有通航规范中船舶通航临界航速的计算公式,提出了最经济的隧道断面尺寸系数。郭洪雨^[8]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,已有研究均未从水动力条件的角度探讨通航隧道的断面设计尺寸问题。

近年来,关于船舶诱导生成的船行波等相关研究越来越多,Wu 等^[9]对船行波形式进行了分类研究,将船行波分为首波系、尾波系、散波和横波等不同形式,不同类型船行波随弗劳德数 Fr 不同呈现不同的特性;邓斌等^[10]指出通航隧道内船行波的尾波系易受固壁反射影响,易叠加形成较大波高,从而对船体产生不利影响。Ji 等^[11]通过求解 Navier-Stokes 方程和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。王孟飞等^[12]通过求解 Boussinesq 方程对限制性航道内船首孤立波及水动力特性进行了详细的研究。Du 等^[13]通过构建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^[14]研究了浅水条件下船舶以超临界航速运动时船舶的尾流流态,并提出了用于预测船行波破碎临界条件的理论模型。Shi 等^[15]基于 FUNWAVE-TVD 开源程序包模拟了船行波引起的紊动破碎,研究了不同船速船行波在不同弗劳德数下的传播过程。然而,上述研究大多为针对船舶航行与船行波关系的相关研究,未能从船行波传播及水动力特性方面对通航隧道等水工建筑物的建设标准进行研究。

本文基于完全非线性 Boussinesq 方程的开源程序包 FUNWAVE-TVD,以压力源项表示船舶模型,对不同通航隧道内不同船型条件下船行波的波高以及隧道内横向流速进行模拟计算分析,以期得到通航隧道内船行波传播变化规律和横向流速分布规律,为通航隧道的设计和建设提供参考。

1 数值模型

1.1 控制方程

Kirby^[16]基于完全非线性 Boussinesq 方程开发了 FUNWAVE-TVD 开源程序包,在此基础上很多学者对 FUNWAVE-TVD 开源程序包进行了改进^[17]。目前,FUNWAVE-TVD 开源程序包在求解波浪破碎项和处理干湿界面等方面取得了较好的计算效果,且考虑了波浪的折射、绕射、反射和浅化效应等影响,在预测波浪变形方面具有较好的稳定性和可靠性^[18]。FUNWAVE-TVD 开源程序包控制方程包括

质量守恒方程和动量守恒方程:

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

$$\mathbf{M}_t + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{M}\mathbf{M}}{H} \right) + \nabla \left[\frac{1}{2}g(\eta^2 + 2h\eta) \right] =$$

$$\mathbf{V}_{\text{dis}} + g\eta \nabla h - gH \nabla p_a - \mathbf{S}_{\text{brk}} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{M} = H(\mathbf{u}_\alpha + \bar{\mathbf{u}}_2)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_2 = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} \mathbf{u}_2(z) dz = \left[\frac{z_\alpha^2}{2} - \frac{1}{6}(h^2 -$$

$$h\eta + \eta^2) \right] \nabla E + \left[z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta) \right] \nabla A$$

$$A = \nabla \cdot (h\mathbf{u}_\alpha)$$

$$E = \nabla \cdot \mathbf{u}_\alpha$$

式中: η 为船行波高; η_t 为 η 对时间 t 的偏导数; \mathbf{M} 为水平体积通量; \mathbf{M}_t 为流体体积通量对时间 t 的导数; h 为静水深; H 为当地水深, $H = h + \eta$; \mathbf{u}_α 为参考位置 $z = z_\alpha$ 处水质点的水平速度矢量; \mathbf{u}_2 为水流流速; $\bar{\mathbf{u}}_2$ 为深度平均流速; g 为重力加速度; ∇ 为那勃勒算子; \mathbf{V}_{dis} 为色散项; p_a 为施加在水体表面的扰动压强; \mathbf{S}_{brk} 为与人工涡流黏度相关的耗散项。

1.2 压力源方程

船舶模型的实现由压力源项(式(2)右侧第三项)确定,即在完全非线性 Boussinesq 方程中加入压力源项,其中,在矩形区域 $-L/2 \leq \tilde{x} - x^*(t) \leq L/2$ 和 $-b/2 \leq \tilde{y} - y^*(t) \leq b/2$ 中船舶中心点 (x^*, y^*) 的压力分布可由下式给出:

$$p_a(\tilde{x}, \tilde{y}, t) = pf(\tilde{x}, t)q(\tilde{y}, t) \quad (3)$$

其中

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

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

式中: L, b 分别为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 为船舶中心点处压强, $p = \rho g P$,其中 ρ 为水的密度, P 为船舶吃水深度; α, β 为吃水区域的形状参数, $0 \leq (\alpha, \beta) \leq 1$,参照文献[14-15]中船舶模型的形状和设置, α, β 均取值为 0.5。

由式(3)可知,船舶中心点 (x^*, y^*) 处的吃水

深度为 P , 几何中心两侧的吃水深度分别沿 x 和 y 方向按照余弦规律逐渐减小, 船首和船尾处吃水深度为零, 扰动压强形状类似纺锤形, 每一点的扰动压强值近似为该点的船底静水压强, 整个区域的位置与速度变化近似船舶航行, 具体船舶压力源分布如图 1 所示(图中 x 方向为船长方向, y 为船宽方向)。

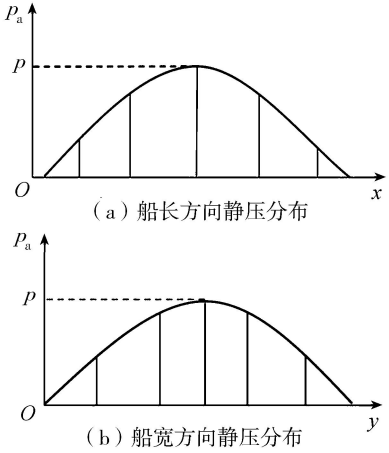


图 1 船舶压力源分布示意图

此外, 基于二维 Boussinesq 方程, 采用人工涡黏波浪破碎模型模拟计算船行波的传播变形, 其中波浪破碎方法见文献[15], 模型参数及边界条件的相关设置见文献[10]。

1.3 模型设置

通航隧道数值模型采用矩形结构化网格, 其 xOy 二维坐标系以隧道左边角点为原点建立, 且船舶位于隧道中央。具体的平面布置以及船行波定义参考文献[10]以及图 2, 模型断面参数见图 3(图中 h_s 为断面垂向高度, h_e 为富裕高度, Δy 为测点至船体距离的增量, B 为通航隧道宽度), 分别从物理模型试验和网格收敛性两方面验证数值模型计算通航隧道内船行波的可靠性及稳定性, 具体见文献[10]。

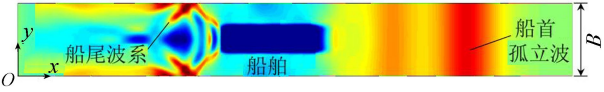


图 2 通航隧道平面布置及船行波分类示意图

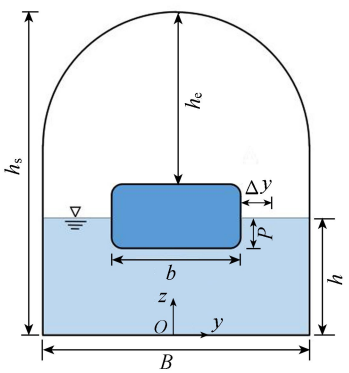


图 3 通航隧道横断面示意图

参考现有通航隧道的建设实例和 GB 50139—2014《内河通航标准》的要求, 比较 3 种不同内河通航标准船型在 4 种不同吃水深度条件下船行波传播变化, 船型设置见表 1(表中 P_d 为设计吃水深度, P_c 为计算吃水深度)。工况设置如表 2 所示, 拟定 3 种通航隧道宽度、3 种静水深和 5 种船速。

表 1 船型设置

船型/t	L/m	R/m	P_d /m	P_c /m
100	32.0	7.0	1.0	0.7, 0.8, 0.9
300	35.0	9.2	1.3	0.7, 0.9, 1.1
500	45.0	10.8	1.6	0.9, 1.1, 1.3

表 2 工况设置

工况	h /m	B /m	船型/t	$v/(m \cdot s^{-1})$	Fr
A1	1.6	20	300	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.13, 0.25, 0.38, 0.5, 0.63
A2	1.6	27	300	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.13, 0.25, 0.38, 0.5, 0.63
A3	1.6	35	300	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.13, 0.25, 0.38, 0.5, 0.63
B1	2.5	20	300	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
B2	2.5	27	300	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
B3	2.5	35	300	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
C1	3.0	20	300	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.09, 0.18, 0.28, 0.37, 0.46
C2	3.0	27	300	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.09, 0.18, 0.28, 0.37, 0.46
C3	3.0	35	300	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.09, 0.18, 0.28, 0.37, 0.46
D	3.0	20	100	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.09, 0.18, 0.28, 0.37, 0.46
E	3.0	20	500	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5	0.09, 0.18, 0.28, 0.37, 0.46

2 模拟结果与分析

2.1 通航隧道内最大船行波波高

图 4 为通航隧道内船舶航行产生的最大相对船行波波高(最大船行波波高与静水深的比值)与船舶相对吃水深度(船舶吃水深度与静水深的比值)的关系。从图 4(a)可以看出, 所有工况下最大船行波波高主要由船尾波形成, 且形成的波高远大于船首孤立波形成的最大波高, 这是由于船尾波易受通航隧道岸壁影响叠加形成较大波高, 该现象易影响通航隧道后续船舶的航行。从图 4 可以看出, 随着船舶吃水深度的增大, 无论是船尾波形成的最大波高还是船首孤立波形成的最大波高都是逐渐增大的, 且船首孤立波形成的最大波高与船舶吃水深度呈现明显的线性增长关系。

从图 4 虚线可以看出, 随着船舶吃水深度增加, 通航隧道内由船首孤立波形成的最大波高越来越明显, 船尾波形成的最大波高逐渐减小, 这是由于船首孤立波具有波长较长、波陡较小、不易破碎的特点; 当船尾波波高较大时, 发生波浪破碎, 波高减小, 船首孤立波未发生破碎成为最大波高。从图 4 还可以看出, 通航隧道内最大船行波波高随水深的增加整体减小, 表明通航隧道内船首孤立波与船尾波均受水深影响。另外, 图 4 中虚线斜率逐渐增大, 说明随着水深增加, 船舶吃水深度对波高影响增大。

□ 船首孤立波(工况1) ○ 船尾波(工况1) □ 船首孤立波(工况2) ○ 船尾波(工况2) □ 船首孤立波(工况3) ○ 船尾波(工况3)

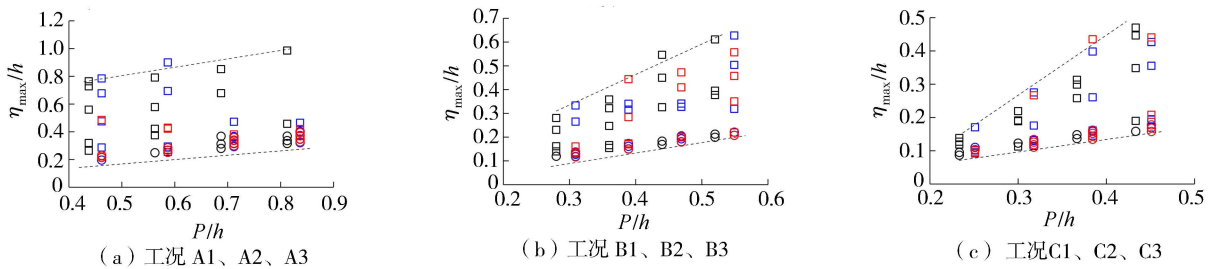


图4 通航隧道内最大相对船行波波高与船舶相对吃水深度的关系

图5为通航隧道内最大船行波波高的空间分布,可以看出,随着船行波沿 x 方向的传播,最大船行波波高逐渐减小至稳定状态,且离隧道两侧越近最大船行波波高越大。基于此,后文以船舶两侧的水位判定船舶的上浮高度以及相应通航隧道的净空尺寸。

2.2 通航隧道内横向流速

图6为通航隧道内最大横向流速与弗劳德数的关系。图6(a)表明,当 $Fr < 0.4$ ($v < 2.0$ m/s)时,最大横向流速随着弗劳德数增大逐渐增大,而当 $Fr > 0.4$ ($v > 2.0$ m/s)后,隧道内最大横向流速反而减小,这可能是由于随船速增大引起船行波波高变大,受船行波破碎影响,破碎后的水体流速复杂混乱,造成横向流速减小。另外,从图6可以看出,通航隧道内最大横向流速随船舶吃水深度增加逐渐增大,这是由于船舶吃水越深,挤压水体形成的波高越大,破碎后造成的横向流速越大。而当船舶吃水深度达到设计吃水深度时,形成的船行波波陡相对较小,船行波不易破碎,横向流速反而较小。图6表明,随着通航隧道宽度的增大,最大横向流速逐渐减小,这是因为

船行波传播耗散、船行波叠加反射以及船行波破碎等现象会影响隧道内横向流速的传播。因此,适宜的通航隧道宽度可降低横向流速对水域条件及周围设施的影响。

图7为通航隧道内最大横向流速的空间分布。从图7(a)可以看出,当 $x < 160$ m时,通航隧道内最大横向流速呈类指数形式递减,即随着船行波在 x 方向的传播最大横向流速逐渐减小,这是由于船行波传播逐渐耗散导致最大横向流速逐渐减小。另外,从图7可以看出,受隧道两侧岸壁水流反射影响,越靠近隧道岸壁位置最大横向流速越小,越靠近隧道中央最大横向流速越大,这一现象也将对后续船舶的航行造成影响。

2.3 通航隧道垂向高度

现有内河通航标准及规范往往仅适用于开阔露天水域,难以适合通航隧道建设要求。根据上文相关分析,提取通航隧道内近船处($\Delta y = 0.5$ m)水位,以此判定船舶垂向上浮高度。通航隧道净空尺寸中由船行波引起的垂向上浮高度 $\Delta\eta$ 的回归方程如下:

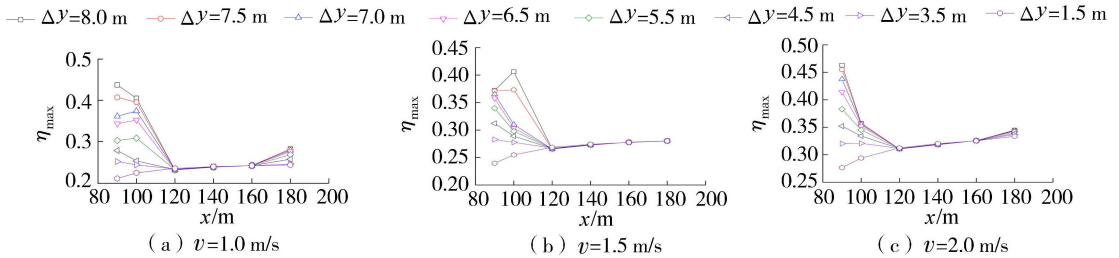


图5 工况B2 通航隧道内最大船行波波高的空间分布($P=1.1$ m)

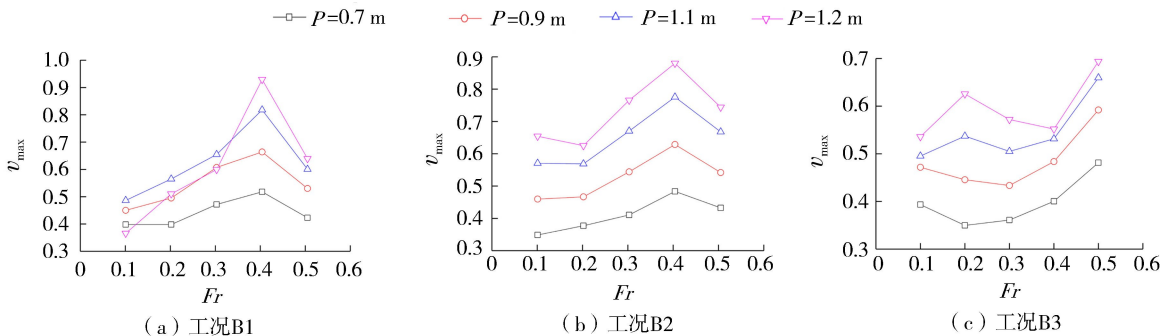


图6 通航隧道内最大横向流速与弗劳德数的关系

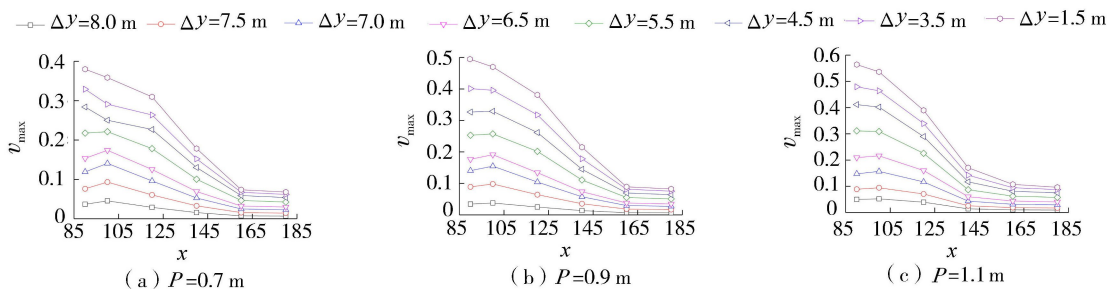


图7 工况 B2 通航隧道内最大横向流速的空间分布 ($v = 1.5 \text{ m/s}$)

$$\frac{\Delta\eta}{h} = 1.06 \left(\frac{B}{h}\right)^{0.23} n^{-1.26} \left(\frac{P}{h}\right)^{-0.142} Fr^{0.63} + 0.02666 \quad (4)$$

式中 n 为通航隧道断面系数, $n = Bk/bP$ 。

式(4)为关于水深、隧道宽度、船舶吃水深度、船速以及船型的多元非线性回归方程,图8给出了该回归方程计算值与数值模型计算值的对比,回归方程拟合优度 $R^2 = 0.95$,且回归方程指数项和系数项标准差均小于 0.1 且接近 0,仅 B/h 的系数项标准差较大,表明回归方程指数项和系数项具有较高的准确性,可以较好地预测不同影响因素下通航隧道内船舶航行所引起的垂向上浮高度。

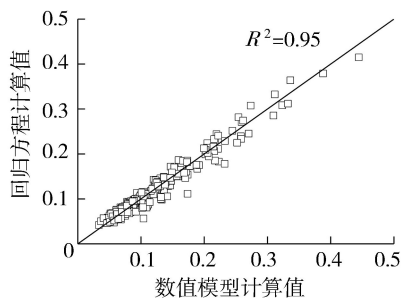


图8 回归方程和数值模型 $\Delta\eta/h$ 计算结果对比

通过上述分析,可得出通航隧道的断面垂向高度 h_s 的经验公式:

$$h_s = h_{\max} + h_v - P_n + \Delta\eta_{\max} + h_e \quad (5)$$

式中: h_{\max} 为隧道内最大水深; h_v 为船舶本身的垂向高度; P_n 为船舶空载吃水深度; $\Delta\eta_{\max}$ 为船舶最大平均上浮高度,由式(4)求得。

2.4 通航隧道内水流条件的判别

现有航道横向尺寸依据 GB 50139—2014《内河通航标准》确定,但因通航隧道的特殊性,隧道断面横向尺寸不仅狭窄而且隧道两侧为直立墙面,易产生较大的波浪反射,造成通航隧道内水流条件复杂,对船舶的航行安全造成威胁。依据上文关于通航隧道内横向水流流速的分析,给出通航隧道内船舶近船处 ($\Delta y = 0.5 \text{ m}$) 的最大横向流速 v_{\max} 回归方程:

$$\frac{v_{\max}}{\sqrt{gh}} = 0.75 \left(\frac{B}{h}\right)^{0.55} n^{-0.685} \left(\frac{P}{h}\right)^{0.46} Fr^{0.67} + 0.056 \quad (6)$$

由图9可见,式(6)拟合优度 $R^2 = 0.82$,且回归方程的指数项和系数项标准差均小于 0.1 且接近 0,仅 P/h 的系数项标准差较大,表明回归方程的指数项和系数项具有较高的准确性,可以较好地预测不同影响因素下通航隧道内近船处的最大横向流速。

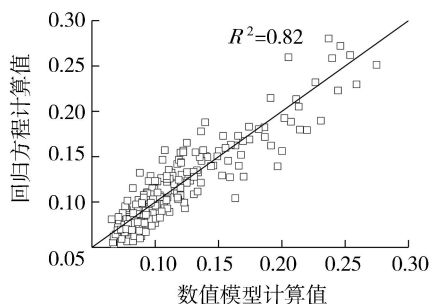


图9 回归方程和数值模型 V_{\max} / \sqrt{gh} 计算结果对比

GB 50139—2014《内河通航标准》中航道宽度为船舶航迹带宽度与富裕航道边缘安全距离之和,由于通航隧道的特殊性,其宽度一般小于内河通航标准宽度。基于上文关于最大横向流速的分析,依据 GB 50139—2014《内河通航标准》中关于通航水流条件的规定,可知船闸引航道口门区的水体表面最大水流流速限值应小于 0.25 m/s(垂直于航线的横向流速)。由于通航隧道内水流条件的对称性以及单线航行条件的特殊性,具体安全横向流速限值(式(6)中 v_{\max})还需通过模型试验确定。

3 结论

a. 基于现有通航隧道的建设实例和 GB 50139—2014《内河通航标准》的要求,采用 FUNWAVE-TVD 开源程序包建立了精确描述通航隧道船行波传播变形的数值模型。

b. 船尾波易受通航隧道岸壁影响叠加形成较大波高;船首孤立波具有波长较长、波陡较小、不易产生破碎的特点,随船舶吃水深度增加船首孤立波形成的最大波高越来越明显,而船尾波形成的最大波高反而减小;当船舶吃水深度达到设计吃水深度时,船行波波陡较小,船行波不易破碎,最大横向流

速减小;受隧道两侧直立壁反射影响,越靠近隧道岸壁位置,最大横向流速越小。

c. 基于船舶航行过程中近船处水位,给出了通航隧道内由船行波引起的垂向上浮高度回归方程,在此基础上给出了通航隧道垂向高度的经验公式;基于近船处最大横向流速的分析,给出了通航隧道内船舶航行时最大横向流速的数学回归方程,可为通航隧道内船舶航行水流条件的判别提供参考。拟合优度以及各指数项和系数项的标准差表明了回归方程具有较高的可靠性。

参考文献:

[1] 杨明远,余丹亚,覃益官. 湘粤运河大构想[J]. 中国水运,2020,4(1):55-57. (YANG Mingyuan, YU Danya, QIN Yiguan. The grand concept of Xiang-Yue Canal [J]. China Water Transport, 2020, 4(1): 55-57. (in Chinese))

[2] 高嵩,焦芳芳. 赣粤运河建设的必要性和可行性[J]. 中国水运,2020,4(3):27-29. (GAO Song, JIAO Fangfang. Necessity and feasibility of the construction of Jiangxi-Guangdong Canal [J]. China Water Transport, 2020, 4(3): 27-29. (in Chinese))

[3] 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[J]. 隧道建设,2015,35(11):1182-1187. (WU Dexing, ZHOU Hongsheng, GUO Hongyu, et al. Study on design of cross-section of Fuchunjiang waterway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(11): 1182-1187. (in Chinese))

[4] 钮新强,吴俊东,王小威. 基于目标优化的大型通航隧洞断面尺度研究[J]. 水利水运工程学报,2021(3):1-8. (NIU Xinqiang, WU Jundong, WANG Xiaowei. Study on section size of large navigation tunnel based on objective optimization [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(3):1-8. (in Chinese))

[5] 干伟东,李延伟,乔华倩. 隧洞通航风险评价指标体系构建[J]. 船海工程,2021,50(1):122-125. (GAN Weidong, LI Yanwei, QIAO Huaqian. Construction of risk assessment index system of ship in navigable tunnel [J]. Ship and Ocean Engineering, 2021, 50(1): 122-125. (in Chinese))

[6] 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[J]. 水道港口,2012,33(1):45-51. (LI Yan, ZHENG Baoyou, ZHOU Huaxing. Test on scale of navigation tunnel and canal bridge in the intermediate channel between ship lifts of Goupitan Power Station [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012, 33: 45-51. (in Chinese))

[7] 汤建宏,阚得静. 高坝通航建筑物通航隧洞断面经济性分析[J]. 水运工程,2017(7):142-146. (TANG

Jianhong, KAN Dejing. Economic analysis of navigable tunnel section of high dam [J]. Port & Waterway Engineering, 2017(7):142-146. (in Chinese))

[8] 郭洪雨. 通航隧道设计与施工关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.

[9] WU H Y, HE J Y, LIANG H, et al. Influence of Froude number and submergence depth on wave patterns [J]. European Journal of Mechanics: B/Fluids, 2019, 75: 258-270.

[10] 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[J]. 科学通报,2021,66(9):1101-1112. (DENG Bin, WANG Mengfei, JIANG Changbo, et al. Propagation characteristics of ship waves in navigation tunnel and its influence on continuous navigation safety of ship [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(9): 1101-1112. (in Chinese))

[11] JI S C, OUAHSINE A, SMAOUI H, et al. 3-D Numerical simulation of convoy-generated waves in a restricted waterway [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(3): 420-429.

[12] 王孟飞,邓斌,蒋昌波,等. 限制性航道中船行波传播特性的数值研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(5):157-163. (WANG Mengfei, DENG Bin, JIANG Changbo, et al. Numerical study on propagation characteristics of ship waves in a restricted channel [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(5): 157-163. (in Chinese))

[13] 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 [J]. Ocean Engineering, 2017, 142: 194-203.

[14] GOURLAY T P. The supercritical bore produced by a high-speed ship in a channel [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 434: 399-409.

[15] SHI F, MALEJ M, SMITH J M, et al. Breaking of ship bores in a Boussinesq-type-ship-wake model [J]. Coastal Engineering, 2018, 132: 1-12.

[16] KIRBY J T. Boussinesq models and their application to coastal processes across a wide range of scales [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2016, 142: 03116005.

[17] KENNEDY A B, KIRBY J T, CHEN Q, et al. Boussinesq-type equations with improved nonlinear performance [J]. Wave Motion, 2001, 33: 225-243.

[18] 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 [J]. Ocean Modelling, 2018, 131: 86-100.

(收稿日期:2021-08-04 编辑:熊水斌)