



通航隧洞内消波设施试验研究

程弘宇¹, 张首元², 郭超², 何萌³, 涂凯洋⁴, 赵根生²

- (1. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650033;
2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 3. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038;
4. 江西省港航设计院有限公司, 江西 南昌 330008)

摘要: 通航隧洞是一种常见的浅水航道, 属于典型的狭窄形航道, 船舶在此类受限航道中航行, 船舶两侧的不对称水域、船行波以及充泄水振荡波的反射叠加, 将对船体产生不对称的侧向力, 增加船体控制难度。针对船舶在隧洞航行时的波动问题, 本文提出了一种具有立柱和横板的消波设施, 采用物理模型开展船舶试验, 分析设施的消能效果, 经验证该设施可有效减小波动。

关键词: 通航隧洞; 大型船舶; 船行波; 消波设施

中图分类号: U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0146-05

Experimental study on wave absorber in navigable tunnels

CHENG Hongyu¹, ZHANG Shouyuan², GUO Chao², HE Meng³, TU Kaiyang⁴, ZHAO Gensheng²

- (1. Kunming Engineering Co., Ltd., Kunming 650033, China;
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
4. Jiangxi Provincial Port and Waterway Consultants Co., Ltd., Nanchang 330008, China)

Abstract: Navigable tunnel is a typical narrow channel with shallow water depth. When a ship sails in such channels, the asymmetric water areas on both sides of the ship, as well as the reflection superposition of the traveling wave and shockwave caused by the filling and emptying system, will cause asymmetrical lateral forces on the hull and increase the difficulty of controlling the hull. In order to solve the wave effect when the ship sails in the tunnel, this paper proposes a wave absorber with columns and transverse plates and adopts a physical model to carry out ship model tests, so as to analyze the energy-absorbing effect of the absorber. It has been verified that the absorber can reduce the wave amplitude effectively.

Keywords: navigable tunnel; large ship; traveling wave; wave absorber

通航隧洞作为一种具有特殊性质和约束条件的限制性航道, 了解其船行波波动特性, 确保船舶航行安全, 是工程设计和运行管理的主要问题^[1]。通航隧洞适用于高山或峡谷等复杂地形, 普适性较强, 具有充分利用地形条件的优势。但通航隧洞内相对于口门区等限制航道, 具有水浅、

水域范围小等特性, 在此类狭窄形航道中通航, 应注意船舶航行阻力的增加以及较低的船舶操控性。船体两侧不对称水域内船行波和振荡波的反射与叠加也将使船体受力不均, 进一步增加船体控制难度^[2]。船闸运行时若有部分水体通过中间渠道取水, 则非恒定水流将在渠道内形成涌浪及

收稿日期: 2022-09-21

作者简介: 程弘宇 (1997—), 男, 硕士, 从事水工设计、船闸水动力学研究工作。

往复流, 水流条件更为复杂。通航隧洞须满足通航净空、水深及通过能力等要求, 基本尺度远大于陆地交通隧洞, 工程造价影响较大, 目前对于其设计和通航运行尚无规范标准。因此, 针对万吨级船舶, 须开展通航隧洞内水流波动特性、消波设施等研究工作, 确保通航隧洞内船舶安全、高效航行。

在航速与船行波关系方面, Sorensen^[3]对不同航速引起船行波的特征值进行统计与测量, 指出航速是决定波高的关键因素。船舶在浅水水域航行有触底等危险情况, 蒋宗燕等^[4]开展实船试验对快速双体船、慢速单船/船队的船行波进行分析, 通过分析波在触壁后的反射及波系叠加过程, 较好地拟合了慢速单船/船队以及快速双体船的波动特性。Dam 等^[5]基于观测数据和二维模型计算结果, 探讨了受垂直壁限制的狭窄航道中船舶波浪的运动特性。在数值模型中, 通过求解二维深度积分 Boussinesq 方程来模拟船移动所产生波的传播过程, 模型计算的结果与实测数据基本吻合。但二维数值模拟未有效体现船舶侧面过水、船舶类型和断面系数对水面波动特性的影响。徐星璐等^[6]分别对深水和浅水条件下的船行波波动要素的计算公式进行总结, 提出了合理的经验公式。对于船行波在限制性航道中的波动情况, 王孟飞等^[7]通过数学模型记录受限航道内船行波的演化,

在回归分析的基础上, 建立了最大波高与船舶吃水、Froude 数之间的经验关系。

综上所述船行波具有复杂性, 国内外学者对船行波进行了大量研究, 其中对宽阔水域、深水水域、浅水水域研究较多, 对狭窄限制性航道大多进行数值模拟研究, 物理模型试验及万吨级船舶的研究较少。

1 概化模型及试验

1.1 概化模型

为探究船舶在通航隧洞航行的水力特性, 本文构建了几何比尺为 1:32 的长距离隧洞正态物理模型, 结合牵引船模试验对隧道内船行波进行测量, 对比增设消波设施前后水面波动的情况。模型依据重力相似准则设计, 几何比尺为 1:32、流速比尺为 1:5.66、力的比尺为 1:32 768。试验船舶为 1 万吨级单船, 几何比尺与物理模型一致。

通航隧洞物理模型的范围包括停泊段、通航隧洞段和部分库区水域等。通航隧洞总长约 75 m, 其中停泊段长约 20 m, 隧洞段约 40 m。即原型中停泊段长约 640 m, 底高程为 138 m, 隧洞段长约 1 280 m, 底高程为 134 m, 停泊段与隧洞段以 1:10 斜坡段相衔接, 隧洞及渠道后对长约 400 m 的部分库区水域进行模拟。模型总体布置见图 1。

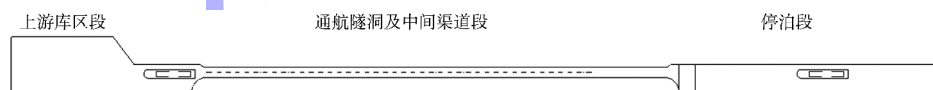


图1 通航隧洞水工物理模型总体布置

1.2 试验方法及方案

试验对通航隧洞内的水位波动特性进行量测, 使用多普勒流速仪测量控制水流流速, 通过隧洞沿程布设 12 个 0~40 cm 电容液位传感器量测隧洞内的水位波动, 间距为 1.25 m, 测量结果采用多通道数据采集系统将数据导出并处理分析。试验在隧洞宽度为 33.6 m, 航速为 1.5 m/s, 8、9 及 10 m 3 种不同水深下, 对增设消波措施前后通航隧洞内的水位波动特性进行分析。

2 消波效果分析

2.1 未设置消波设施水面波动特性

船行波的产生改变了船体表面的压力分布以及船体附近的水面线。船首由于阻水作用出现了水面壅高, 而船身处由于船体在通航隧洞的阻塞作用导致过流断面变小, 船边流速增加, 压力降低导致水面下降; 船尾后部由于过流断面突然增大, 流速减小, 使船尾后部出现水面壅高^[8-9]。通航隧道水深为 8 m 的工况下, 最高水位在测点位

置 40 m 附近为 8.52 m，最低水位在测点位置 240 m 附近为 7.36 m，水位变幅为 1.16 m；水深为 9 m 的工况下，水位极大值在测点位置 160 m 处为 9.00 m，水位极小值在测点位置 240 m 处为 8.10 m，水位变幅为 0.90 m；水深为 10 m 的工况下，最高水位在测点位置 400 m 处为 10.27 m，最低水位在测点位置 200 m 处为 9.65 m，水位变幅为 0.62 m。在 3 种工况下，最低水位均出现在测点位置 200~240 m 处。船舶航行未设置消波设施时，船体旁沿程水位曲线见图 2，水面高程、水位壅高和降低值见表 1。

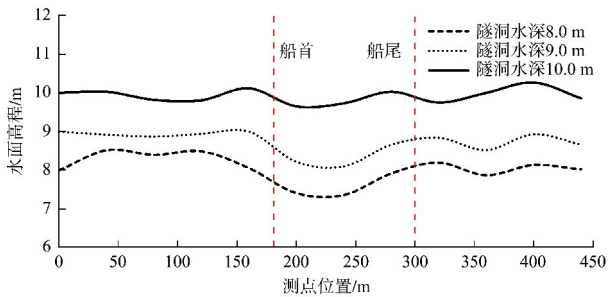


图 2 未设置消波设施船舶航行时，船体附近水面高程

表 1 设置消波设施前后船边水面高程

测点位置/m	船边水面高程/m					
	隧洞水深 8.0 m		隧洞水深 9.0 m		隧洞水深 10.0 m	
	未消波	已消波	未消波	已消波	未消波	已消波
0	8.00	8.00	9.00	9.00	10.00	10.00
40	8.52	8.64	8.92	9.04	10.03	10.14
80	8.40	8.61	8.87	8.95	9.82	9.87
120	8.49	8.71	8.94	8.98	9.81	9.88
160	8.06	8.05	9.00	9.01	10.12	10.14
200	7.41	7.73	8.22	8.30	9.65	9.73
240	7.36	7.64	8.10	8.13	9.73	9.69
280	7.92	7.68	8.66	8.23	10.03	9.80
320	8.20	8.05	8.84	8.83	9.75	9.63
360	7.87	7.73	8.52	8.39	10.00	9.79
400	8.14	8.10	8.93	8.79	10.27	10.09
440	8.02	7.84	8.66	8.27	9.86	9.69
水位最低值	7.36	7.64	8.10	8.13	9.65	9.63
水位最高值	8.52	8.71	9.00	9.04	10.27	10.14
船体波动幅值	0.84	0.41	0.74	0.70	0.38	0.20
船体波幅降低率/%	51.19		5.40		47.37	

2.2 设置消波设施水面波动特性

2.2.1 消波系统结构形式

根据通航隧洞及船行波传播特点，提出一种通航隧洞高效消波系统的结构形式：通过充分利用人行道下船舶不能通航的水域减少波浪，采用混凝土梁板结构路面，下方布置等间隔的承重立柱，在承重立柱和隧道墙之间放置与承重立柱垂直的消波横板。消波横板采用抗腐蚀的混凝土或钢板结构，高度不小于隧洞内水面波动范围。消波板与承重立柱共同组成隧洞消波系统。

船行波形态及行波要素与航道的深度 Froude 数关系密切，通航隧洞内船舶航行基本处于亚临界航速区，产生的船行波属于深水船行波波态 (Kelvin 波态)，即 $Fr < 0.84$ 。船行波在船体，特别是船首周边产生散波和横波，散波沿航线对称分布 (扇形区域)，并斜向航线两侧传播。横波沿航线方向传播，散波与横波交点的连线与航线夹角 δ 约为 $19^\circ 28'$ (Kelvin 角)，最大波高出现在该交点处。因受隧洞两侧边壁限制，隧洞内船行波通常无法形成完整的扇形传播区域，船行波波浪传播角 θ 可近似计算。深度 Froude 数计算公式为：

$$Fr = v / \sqrt{gh} \quad (1)$$

式中： v 为船舶航速，m/s； g 为重力加速度， m/s^2 ； h 为隧洞内渠道水深，m。

$$\theta = 35.27(1 - e^{-12(Fr-1)}) \quad (2)$$

根据上述分析，初步确定船行波波动影响区域。假定船体位于渠道中部，引入隧洞宽度 B ，船宽 b ，可推导出船舶航行某一瞬时形成的船行波，沿隧洞方向的影响范围长度 L 为：

$$L = \left(\frac{B-b}{2} \right) \left(\frac{1}{\tan\theta} + \frac{1}{\tan\delta} \right) \quad (3)$$

当船行波传播至渠道两侧边壁时，对其波能进行充分消减，在每个波动影响范围区域内，最少布置 1 套消波系统 (由立柱、消波横板组成)，通航隧洞尺寸为 30 m 及以上，消波系统最大间隔

初步按 16 m 布置。通航隧洞尺寸确定后, 消波系统最大间隔可根据式(3)进行核算。

根据以往水工模型试验经验, 消波措施的主要作用是通过碰撞、摩擦等破碎水波波浪, 耗散能量、减弱波幅、消减反射波浪。因此在船行波影响区域的消波横板高度需大于船行波波动幅值, 并以航行水位为界上下对称布置(即放置时保证水面上下消波横板高度一致)。在通航隧洞中, 船体周边船行波主要表现为船首水体壅高及船尾水体下沉扰动^[10], 试验资料显示^[11-12], 船尾水体下沉对时间和范围的影响有限, 因此在确定消波板高度时, 以最大壅高为主要参考指标。综合分析波浪的壁面上涌、波峰波谷交替振荡等现象, 结合以往试验数据资料, 提出消波横板最小高度由式(4)估算, 实际工程布置时, 根据计算结果并结合实际运行水位资料确定。

$$H_{\min} = 0.35 \frac{v^2}{n \cdot s^{0.33}} \quad (4)$$

式中: H_{\min} 为消波横板最小高度; v 为船舶航速; n 为隧洞渠道断面系数; s 为船舷到航行区域边壁的距离。

根据上述消波系统布置间隔和消波横板最小高度布置原则, 确定了通航隧洞消波设施具体尺寸。其中承重立柱横断面为 0.8 m×0.8 m, 高度至水面以上 0.5 m, 消波板间隔 16 m, 承重立柱与隧洞边墙之间设置消波横板, 尺寸为 1.5 m×0.3 m×1.0 m(长×宽×高), 间距为 0.5 m。在通航隧洞模型中设置上述消能装置, 通过模型试验对消波减能效果进行验证。通航隧洞消波板模型见图 3, 布置见图 4。

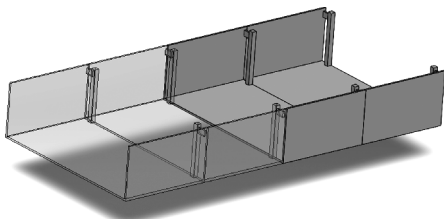


图 3 通航隧道消波板模型

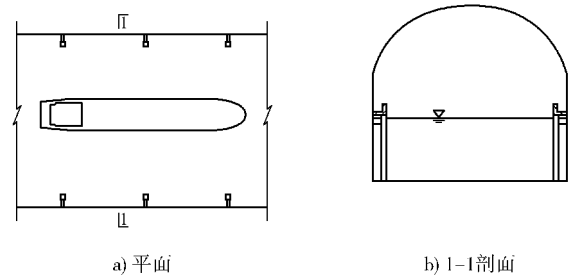


图 4 通航隧洞消波板布置

2.2.2 设置消波设施后水面波动特性

试验在隧洞宽度为 33.6 m, 航速为 1.5 m/s, 8、9 及 10 m 不同水深下, 根据上述消波系统布置间隔和消波横板最小高度布置原则, 对通航隧洞内的水位波动特性进行细致量测。

通航隧道水深为 8 m 的工况下, 最高水位在测点位置 120 m 附近为 8.71 m, 最低水位在测点位置 240 m 附近为 7.64 m, 水位变幅为 1.07 m; 水深为 9 m 的工况下, 水位极大值在测点位置 40 m 处为 9.04 m, 水位极小值在测点位置 240 m 处为 8.13, 水位变幅为 0.91 m; 水深为 10 m 的工况下, 最高水位在测点位置 40 m 及 160 m 处为 10.14 m, 最低水位在测点位置 320 m 处为 9.63 m, 水位变幅为 0.51 m。在 9 及 10 m 水深下, 最低水位的测点位置均后移。设置消波设施前后船边水面高程见表 1, 船舶航行时船体附近水面高程见图 5。

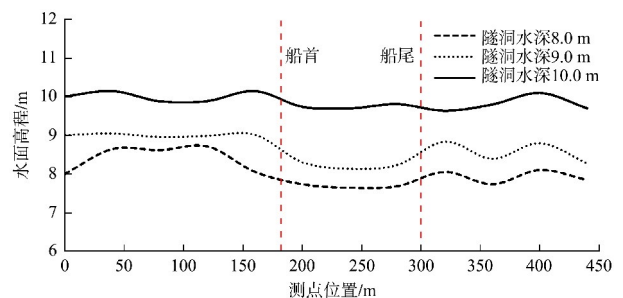


图 5 设置消波设施船舶航行时, 船体附近水面高程

2.2.3 安装消波措施前后水面波动变化规律

增设消波板前后船舶航行时, 船舶附近水面高程对比见图 6。

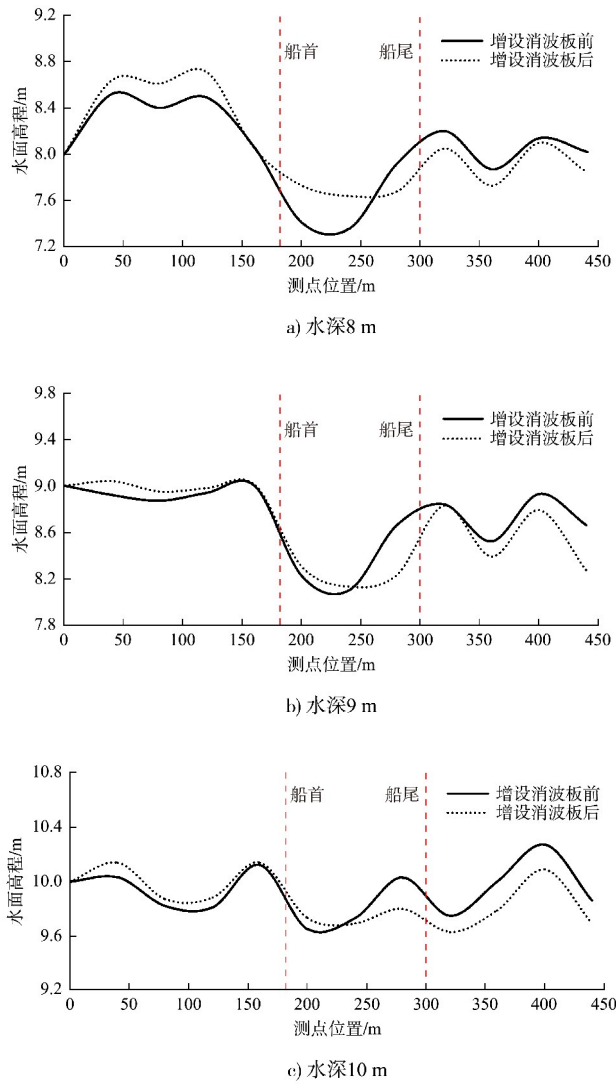


图6 增设消波板前后船舶航行时船舶附近水面高程对比

试验结果表明：隧洞水深 8 m，在设置消波设施前，船体范围局部水面降低 0.64 m，船尾后部水面壅高 0.52 m，船体处水位波动幅值 0.84 m，船体水位最低点位于距船首 55 m 处，最高点位于船尾后部，距船尾 20 m；设置消波设施后，局部水面降低了 0.36 m，船尾后部水面壅高了 0.71 m，波幅降低 0.43 m，船体水位最低点向船尾偏移，位于距船首 90 m 处，水位最高点位置基本无变化，位于距船尾 26 m。

隧洞水深 9 m，未设置消波设施时，船体处水位波动幅值 0.74 m，水位最低点位于距船首 60 m 处，最高点距船尾 25 m；设置消波设施后，船体

局部水面降低 0.87 m，船尾后部水面壅高 0.04 m，船体水位最低点向船尾偏移，位于距船首 100 m 处，水位最高点位置无变化。

隧洞水深 10 m，在设置消波设施前，船体范围局部水面降低 0.35 m，船尾后部水面壅高 0.27 m，船体处波幅 0.38 m，船体水位最低点位于距船首 30 m 处，最高点位于船体范围内，距船尾 100 m；设置消波设施后，船体局部水面降低至 0.37 m，船尾后部水面壅高减小了 0.13 m，船体处波幅降低为 0.20 m，船体水位最低点向船尾偏移，位于距船首 55 m 处，水位最高点位置无变化。

综上所述，安装消波设施后，船体附近水位最低点的位置向船尾偏移，但水位最高点所在位置无明显变化。隧洞水深为 8 m 的工况下，消波设施的消波效果最为明显，水面最低值减小了 0.28 m，水面最高值减小了 0.18 m，船体波幅降低 51.19%。设置承重立柱及消波横板后，对船边速度无影响，因此水面降低值基本相同，并无明显改善。由于承重立柱和消波横板对波动的减能作用，船尾后部的水面壅高值略有降低，因此承重立柱及消波横板对波动的减弱有一定作用。

3 结论

1) 针对船舶在通航隧洞常见的狭窄形浅水限制航道航行，引起的水面波动的现象，经船舶模型试验对比，提出具有承重立柱和消波横板的消波设施可有效降低船体附近的波幅，减小水面波动。

2) 通过对比增设消波设施前后水面波动的情况可知，安装消波设施后船体附近的水位最低点的位置向船尾偏移，但水位最高点的位置无明显变化。

3) 通航隧洞消波设施在隧洞水深为 8 m 的情况下，消波效果最为明显。水面最低值减小 0.28 m，水面最高值减小 0.18 m，船体波幅降低 51.19%，立柱和消波横板对减弱波动具有一定作用。

(下转第 156 页)