

· 综 合 ·



潜堤透浪系数的试验研究

冯卫兵, 王明明, 崔川川

(河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098)

摘要: 通过物理模型的试验模拟, 研究并分析了影响透射系数的各个因素(包括相对淹没水深、相对堤顶宽度、波陡), 给出了各种因素组合下透射系数的变化规律。将试验值与前人公式计算值进行比较, 并分析数据的差异及原因; 分别拟合了规则波及不规则波情况下潜堤透射系数公式。

关键词: 潜堤; 透射系数; 物理模型

中图分类号: TV 149.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0001-06

Experimental study of wave transmission coefficient over a submerged breakwater

FENG Wei-bing, WANG Ming-ming, CUI Chuan-chuan

(College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper analyzes various factors affecting the transmission coefficient through experimental simulation, and presents the variation law of transmission coefficient under various combinations of factors. Comparing the experimental results with those of predecessors, this paper analyzes the differences between the results of the experiment and the predecessors. Moreover, the submerged dike transmission coefficient formula is fitted under either regular wave or irregular wave.

Key words: submerged dike; transmission coefficient; experimental model

潜堤的透射系数是衡量潜堤削减波浪能力的主要指标, 对潜堤透射系数的分析是研究潜堤阻挡和减弱外海波浪作用、防止海岸侵蚀的关键。波浪越过潜堤时, 一部分能量被反射, 另一部分能量由于堤顶水深限制而破碎损耗。越过潜堤的能量即为透射波能量, 透射波高与入射波能量及波浪破碎损耗能量有关。波浪破碎损耗能量越大, 透射波高越小, 即透射系数 K_t 越小, 潜堤的消浪效果越好, 防止海岸被侵蚀的效果也就越好。

国内外学者对透射系数的研究大多是采用物理模型试验的方法, 在大量试验数据的基础上总结出潜堤透射的经验公式。

Van der Meer^[1]利用前人以及本身试验量测结果, 提出一简单经验公式, 认为透射系数仅为堤顶淹没水深与入射波有效波高的比值的函数;

Daemen^[2]延续Van der Meer的研究, 指出透射系数与相对堤顶高度呈线性关系, 其系数随着结构物形态、波高、波陡的不同而改变。Stuart^[3]进行一系列试验, 研究抛石潜堤的波浪透射系数, 其中包含13种潜堤形式, 5种不同水位以及多种入射波浪条件(以不规则波为主), 印证前人提出“淹没水深与入射波高比值为影响透射系数最重要的参数”的论点, 以试验资料回归出一波浪透射系数的经验公式。

国内方面, 关于潜堤的消浪方面, 南京水利科学研究院对立壁和矩形潜堤断面进行的模型试验研究^[4], 提出了立壁和矩形潜堤的堤后相对波高计算公式; 杨正己等^[5]对工程实践中广泛采用的透水抛石堤, 通过大量的物理模型试验和单个因素对比分析方法, 比较系统地研究了规则波作用下

收稿日期: 2012-03-06

作者简介: 冯卫兵(1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事近海研究。

抛石堤的消浪特性。

实际工程中,潜堤断面形式多为梯形。目前,对潜堤断面形式的研究还不是很多,张日向等^[6]针对胜利油田某保滩促淤工程,进行了多种方案不同潜堤结构形式的优选,比较了其中4种结构形式,分别为矩形结构、拱形结构、梯形结构和槽型结构,并对这4种结构形式的潜堤分别进行了波浪水槽试验,测试其透射系数。试验结果表明:反射波大小与堤顶水深、潜堤高度及结构形式有关,而波浪的破碎耗能更与堤顶水深直接相关,因而影响透射系数最重要的因素是堤顶水深。

1 试验设备及试验布置

1.1 试验设备

1) 试验水槽。

试验是在河海大学港航动力实验室的波浪水槽内进行的。水槽长80 m,宽1.0 m,高1.2 m。有效试验宽度为0.5 m。有效试验段用以铺设断面,另外一部分用以减少二次反射对试验的影响。潜堤布置在离造波机36 m处,水槽两端均铺设消浪缓坡,以减少波浪的反射。波浪水槽一端安装有南京水利水电科学研究院研制的不规则波造波机,通过电机系统控制推波机运动行程和频率,可产生试验所需要的规则波和不规则波。

2) 数据采集。

波浪要素的量测采用中国水利水电科学研究院生产的DJ800型多功能监测系统,它是由监测仪和各种传感器组成的数据采集和数据处理系统。数据采集是巡回式的,取得一个测点的数据大约需要400 μ s的时间(包括选中通道号、模数转换和数据传送时间等)。因此,采样的频率随着测点数量的增加而降低。

试验采用间隙式的造波方式,以消除波浪的多次反射的影响,每组合造波3次。不规则波每组合波的持续时间为360 s,波数约为120~150个,待水面平静后进行下一组的试验,总计试验组次为288组。

1.2 试验布置

潜堤堤心石采用沙石铺设,本试验中护面采用混凝土板,不考虑其他护面块石的影响。波高

数据采用电容式浪高仪测量,堤两侧一共布置了12个浪高仪。所有测量信号均通过计算机采集、记录,采样时间间隔为0.05 s。模型试验浪高仪布置见图1,入射波高与图中2#浪高仪所测波高一一致,对堤后浪高仪采用等间距布置的方法,间距为入射波波长的一半。

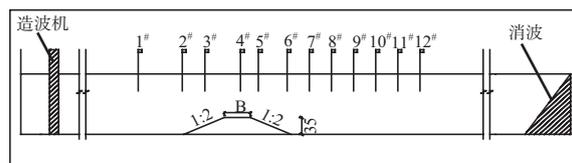


图1 波浪水槽及波高仪布置(单位:cm)

1.3 试验参数

堤身高度 d 不变,通过改变堤趾水深 h 来实现淹没水深 R_c 的改变。模型试验分别采用规则波与不规则波作为入射波,其中不规则波的谱型选用JONSWAP谱, $\gamma=3.3$,采用上跨零点法,通过调节阈值将由于破碎和反射而生成的消波去掉,取10个波的平均波高作为规则波的波高,取大于1/3大波的值作为不规则波的特征波高值。波要素见表1。本文采用潜堤堤身高度为35cm,且潜堤的前后坡坡度相等的形式,潜堤的几何尺寸见表2。

2 试验结果与讨论

本文的物理模型试验的潜堤是建立在平底上,而不是斜坡上,所以不必考虑波浪在斜坡上传播时,由于水深变浅而产生的非线性作用。潜堤的透射系数可定义为:堤后有效波高,即透射有效波高(H_t)与入射有效波高(H_i)的比值。因此,分析潜堤透射系数,主要是分析相对淹没水深(a/H),相对堤顶宽度(B/H),波陡(H/L)等无因次量对 K_t 的影响。

由本次试验得出的结果可知,在潜堤作用下,规则波与不规则沿程的波高变化符合同一规律,因此本文以下比较均以不规则波为例。

2.1 相对淹没水深对透射系数的影响

相对淹没水深 a/H 的变化对透射系数的影响见图2。

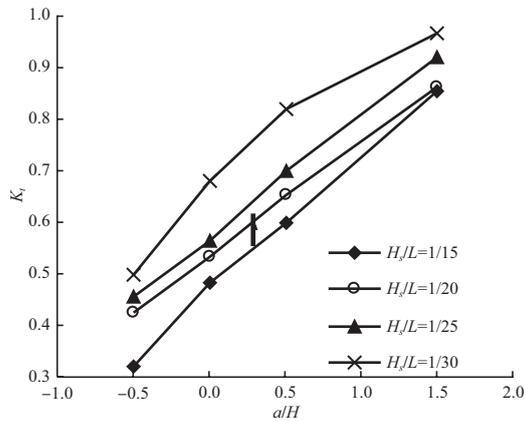
由图2可以看出, K_t 与 a/H 基本呈线性关系, K_t 随 a/H 的增大而增大。但是,当 a/H 增大到某一程

表1 规则波与不规则波透射试验波浪要素

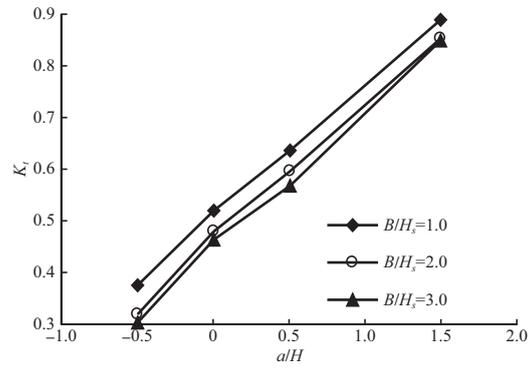
波浪种类	水深/cm	平均波高/cm	平均周期/s	平均波长/m
规则波	30	10	1.06	1.5
		10	1.32	2.0
		10	1.58	2.5
		10	1.86	3.0
	35	10	1.04	1.5
		10	1.27	2.0
		10	1.51	2.5
		10	1.76	3.0
	40	10	1.01	1.5
		10	1.23	2.0
		10	1.45	2.5
		10	1.68	3.0
50	10	1.00	1.5	
	10	1.18	2.0	
	10	1.37	2.5	
	10	1.57	3.0	
不规则波动	30	10	1.33	1.5
		10	1.65	2.0
		10	1.98	2.5
		10	2.33	3.0
	35	10	1.30	1.5
		10	1.59	2.0
		10	1.89	2.5
		10	2.20	3.0
	40	10	1.26	1.5
		10	1.54	2.0
		10	1.81	2.5
		10	2.10	3.0
50	10	1.25	1.5	
	10	1.48	2.0	
	10	1.17	2.5	
	10	1.96	3.0	

表2 潜堤的几何尺寸

堤高/cm	堤顶宽度/cm	前后坡度
35	10	$m_1=m_2=2.0$
35	20	$m_1=m_2=2.0$
35	30	$m_1=m_2=2.0$



a) 相对堤顶宽度 $B/H=2.0$



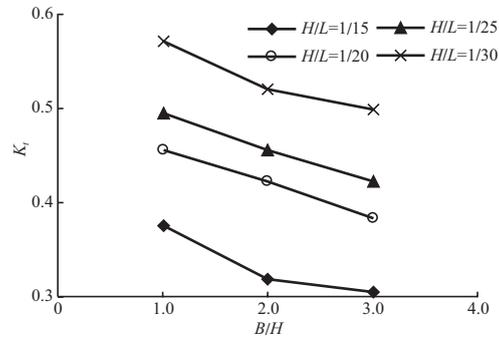
b) 波陡 $H/L=1/15$

图2 a/H 的变化对透射系数的影响

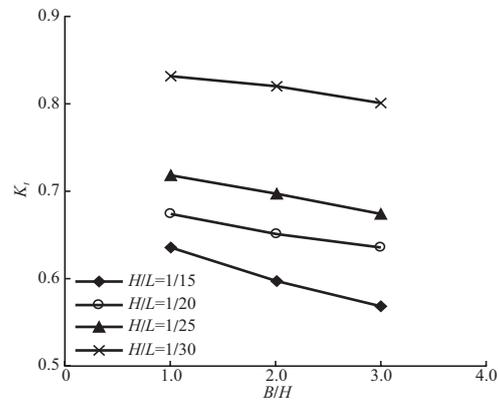
度时, 透射系数增大得比较缓慢, 且 K_t 基本稳定在 0.95 左右。此时, 透射率为 95%, 潜堤的消浪作用非常不明显。这是因为 a 增大到一定值后, 波浪越过潜堤时基本不发生破碎, 且波能集中在静水面附近, 此时潜堤的挡浪作用减小, 堤后波高和入射波高相差不大, 潜堤的消浪作用降低。

2.2 相对堤顶宽度对透射系数的影响

选取试验堤高 35 cm, 堤顶宽度分别为 10 cm, 20 cm, 30 cm 时的试验数据作为分析对象, 绘制透射系数 K_t 与相对堤顶宽度 B/H 的关系 (图 3)。



a) $a/H=-0.5$



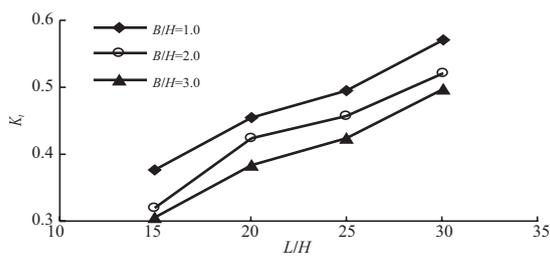
b) $a/H=0.5$

图3 B/H 的变化对透射系数的影响

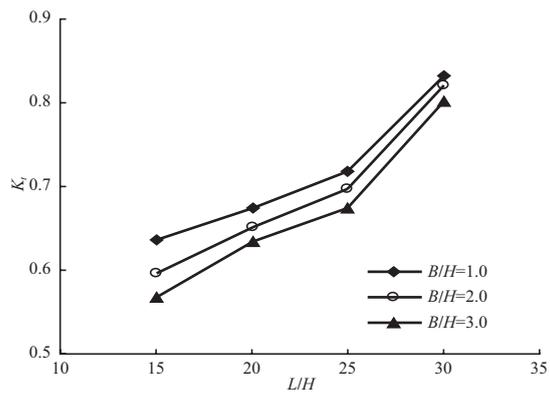
由图3可以看出，透射系数 K_t 随 B/H 的变化规律良好。基本规律为：堤顶宽度越大，堤后稳定波高越小，消浪效果越好，这是因为堤宽加大时，波浪与堤顶的作用时间加长，波浪损耗的能量变多，于是越过堤顶的波能减小。从破碎角度来看，堤顶宽度加大后，与堤顶宽度较小时比较，波浪更容易发生完全破碎，而不是不完全破碎，这样波能也会减少，最终使得堤后的稳定波高也减小，起到很好的消浪效果。

2.3 波陡对透射系数的影响

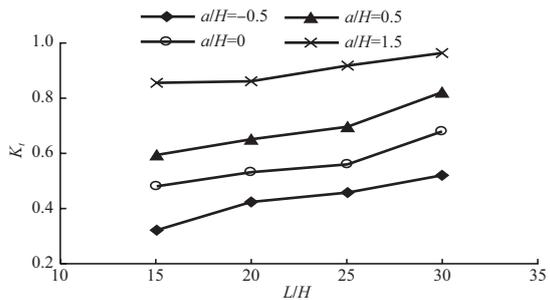
波陡(H/L)是影响波浪破碎形态的重要因素，坦波作用时，会有大量的水体越过堤顶，且坦波较陡波更不容易发生破碎，因此坦波波能损失较小，消浪效果不如陡波。图4直观地说明了波陡的变化对透射系数的影响。



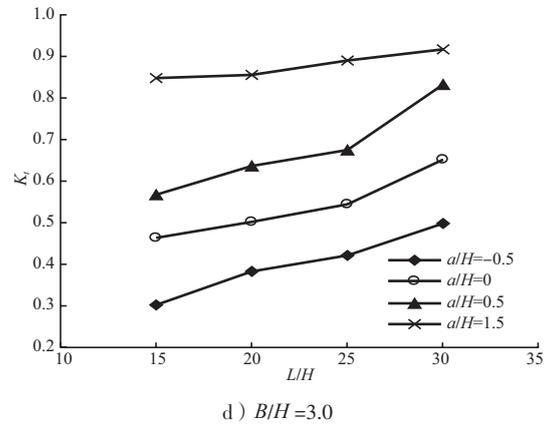
a) $a/H=-0.5$



b) $a/H=0.5$



c) $B/H=2.0$



d) $B/H=3.0$

图4 L/H 的变化对透射系数的影响

由图4可以看出，波坦对出水堤的影响比对没水堤的影响大，对低水位的影响比对高水位的影响大。从能量角度来分析，入射波陡越大，波浪于潜堤斜坡上越容易破碎，波浪与堤顶的相互作用更强烈，能量越容易损耗，那么越过潜堤的能量就减少，透射系数随之减小。

3 试验值与公式计算值比较

南京水利科学研究院杨正己等^[5]曾对潜堤上波浪传播的各种情况进行试验研究，得出公式中的影响因子包括相对淹没水深(a/H)、波陡(H/L)、相对堤顶宽度(B/H)和相对水深(d/H)。图5为本次物理模型试验值与潘少华、杨正己公式(潘杨公式)计算值的比较结果。

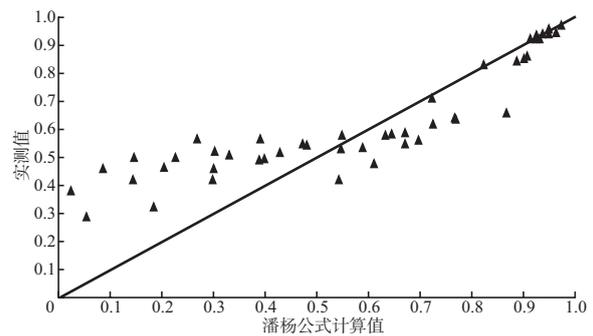


图5 试验值与潘杨公式计算值比较

由图5可以看出，以0.5为分界点，小于0.5时，试验值比潘杨公式计算值偏大；大于0.5时，试验值比潘杨公式计算值偏小；在0.9~1.0之间，二者基本相等。原因主要是潘杨公式是通过透水抛石堤的试验得出，而本文的潜堤外层为混凝土板。

透射系数 <0.5 时，波浪在越过潜堤的过程

中, 部分波能因波浪与空隙介质的相互作用而被消耗掉, 堤后的能量自然减少, 消浪效果好, 使得堤后的波高变小; 而本文所采用混凝土板护面的摩擦力较小, 波能在堤前的损耗变得很小, 故堤后波能减少量小, 透射系数较大。透射系数在0.9~1.0时, 波浪传播基本不受潜堤影响, 试验值与计算值相近也是合理的。

透射系数在0.5~0.9之间, 波浪在越过潜堤的过程中与潜堤的相互作用减少, 透水潜堤的摩擦系数对波能的衰减作用不明显, 而波浪在通过不透水潜堤时, 由于潜堤斜坡的波浪反射作用波能衰减反而较多, 因此造成了透射系数的试验值比潘杨公式计算值要小。

4 潜堤透射系数公式拟合

影响透射系数的因子为相对淹没水深(a/H)、相对堤顶宽度(B/H)和波陡(H/L)。要建立潜堤透射系数的预测公式, 可从无因次参数中选择对透射系数影响较为显著的因子, 然后假定这些因子与透射系数的相关关系, 利用MATLAB进行非线性回归, 求出待定系数。

4.1 规则波作用下潜堤透射系数公式拟合

对规则波作用下潜堤透射系数公式的拟合, 本文中 choice 对透射系数影响较大的3个因子淹没水深(a/H)、相对堤顶宽度(B/H)和波陡(H/L)来建立预测方程式。假定规则波作用下潜堤透射系数的计算公式形式为:

$$K_t = 1 - \tanh\left[k_1 \frac{a}{H} + k_2 \frac{H}{L}\right] + k_3 e^{\frac{B}{H}} \quad (1)$$

式中: k_1, k_2, k_3 为待定系数。

根据试验数据拟合可以得出: $k_1=0.05$, $k_2=-1.18$, $k_3=-0.88$ 。

即规则波作用下潜堤的透射系数计算公式为:

$$K_t = 1 - \tanh\left[0.05 \frac{a}{H} - 1.18 \frac{H}{L}\right] - 0.88 e^{\frac{B}{H}} \quad (2)$$

由图6可见, 此公式的拟合情况比较好, 相关系数为0.97, 残差平方和为0.147。该公式可以应用于规则波作用下潜堤的透射系数的估算。

4.2 不规则波作用下潜堤透射系数公式拟合

对不规则波作用下潜堤透射系数公式的拟合, 采用的方法与规则波类似。首先假定规则波

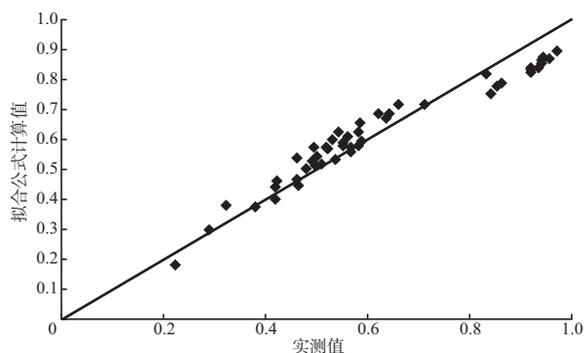


图6 规则波作用下潜堤透射系数计算值与实测值比较

作用下潜堤透射系数的计算公式形式为:

$$K_t = 1 - \tanh\left[k_1 \frac{a}{H_s} + k_2 \frac{H_s}{L}\right] + k_3 e^{\frac{B}{H_s}} \quad (3)$$

根据试验数据拟合可以得出: $k_1=0.04$, $k_2=-1.22$, $k_3=-0.90$ 。

即规则波作用下潜堤的透射系数计算公式为:

$$K_t = 1 - \tanh\left[0.04 \frac{a}{H_s} - 1.22 \frac{H_s}{L}\right] - 0.90 e^{\frac{B}{H_s}} \quad (4)$$

由图7可见, 该公式对试验数据拟合较好, 相关系数为0.97, 残差平方和为0.118。所以此公式可以应用于不规则波作用下潜堤透射系数的估算。

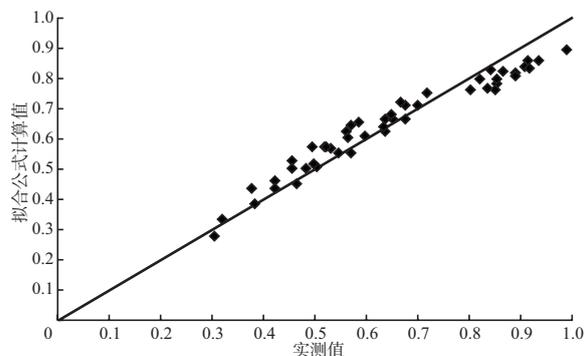


图7 不规则波作用下潜堤透射系数计算值与实测值比较

5 结语

本文以规则波和不规则波在潜堤上的传播为研究对象, 展开了物理模型试验, 对潜堤的透射系数做了研究, 利用已有的公式计算值和试验值进行了对比。分析影响透射系数各个因子, 并拟合了在规则波和不规则作用下潜堤透射系数的计算公式。这两个公式对实测数据的拟合情况比较好, 相关系数达0.97。试验条件范围内, 本文拟合的公式可以应用于潜堤透射系数的估算。

但是由于时间和条件所限，此次试验护面为混凝土板，未考虑坡度和护面块体对透射系数的影响，尤其是透水潜堤与不透水潜堤的差异，今后的工作中可同时比较混凝土板、抛石、扭王字块体等不同形式的块体做护面时对潜堤透射系数的影响；在实际工程中，流场和波浪场通常是同时存在的，试验也未考虑波流共同作用下透射系数的变化规律，所以研究潜堤在波流共同作用下的透浪系数更具实际的应用价值。

参考文献：

[1] Van der Meer J W. Data on wave transmission due to overtopping[R]. Marknesse, The Netherlands: Delft

Hydraulics,1990.

[2] Van der Meer J W. Stability and Transmission at Low-Crested Structures[R]. The Netherlands: Delft Hydraulics, 1991.

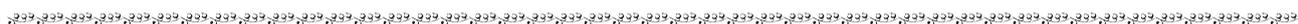
[3] Stuart R Seabrook, Kevin R Hall. Wave transmission at submerged rubble mound breakwater[C]. Proc 26th Int Conf on Coastal Engineering: ASCE, 1998: 2 000-2 013.

[4] 南京水利科学研究院. 潜水防波堤消浪作用试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1954.

[5] 杨正己, 贺辉华. 抛石潜堤的消浪特性[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1980.

[6] 张日向, 刘圆, 蒲高军. 潜堤结构形式及其透射系数研究[J]. 海洋工程, 2003, 21(4): 80-85.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

湘江综合枢纽优先安排外贸集装箱班轮过闸

长沙湘江综合枢纽9月29日正式通航的日子一天天临近。日前，湖南省船东协会牵头，联合湘江四家航运和一家港口企业，呼吁船闸对集装箱班轮过闸优先安排，为湖南对外贸易开辟一条“绿色通道”。

外贸集装箱运输在湖南省对外贸易中具有重要性和特殊性。长沙港口承担着湖南60%以上的外贸进出口运输任务，是该省外贸运输的主要通道。长沙港是该省集装箱运输最大的集散地，2012年预计由长沙港进出口的集装箱运量达10万TEU。湖南远洋运输公司、长沙捷安航运有限责任公司、长沙畅通物流有限公司和上港集团长江物流有限公司湖南分公司等四家航运企业，目前投入近40艘集装箱运输船舶，每日有10至12班外贸集装箱班轮从长沙新港往返上海。

由于外贸集装箱班轮对班期准点要求高，因此需要船闸优先安排。外贸集装箱班轮不同于普通货运船舶，它同火车、飞机一样对航班的准点率要求很高。如外贸进出口货物不能按期交货，将引起国际贸易纷争和巨额索赔。为了保障湖南对外贸易渠道的畅通无阻，根据省、市政府及省口岸办、市口岸办的安排，长沙至上海的国际集装箱“五定”班轮（定装卸港口、定运输线路、定班轮船期、定航班时间、定全程运价）于2011年12月正式开通，为湖南外贸搭建了一条快速通道，特别是为长沙保税物流园区的进出口业务提供了有力的物流保障。开通近一年来，对促进全省外贸进出口业务的发展起到了非常重要的作用。

这次船东呼吁船闸优先安排过闸，还有一个重要原因就是洞庭湖夜间航行的困难和复杂性。

据悉，为确保航运安全，集装箱班轮必须清晨从长沙开出，在白天穿过洞庭湖。否则需在洞庭湖抛锚过夜，将延误12~24 h，将影响到整个国际集装箱运输过程，耽误进出口货物的交接。因此，这就要求集装箱班轮从长沙码头开出后要及时过闸。

摘编自《中国交通报》