

承受长周期船行波越顶荷载的抛石丁坝设计方法

罗明辉

湖南大学土木工程学院, 长沙 410012, 湖南, 中国

摘要: 近年来, 随着船队结构逐步向大型船舶演变, 德国河口地区的船行荷载持续增大。其中丁坝尤易受长周期初级船行波荷载的影响: 波浪越顶丁坝的现象在部分河段已造成严重破坏。近年来的研究多集中于水动力过程本身, 而针对这一特殊荷载工况的抛石粒径设计方法迄今仍属空白。为建立设计方法并深入认识导致丁坝冲刷的过程, 本文对既有的两座丁坝原型试验数据进行了分析。该原型试验历时数年, 配套开展了包括波浪与流速观测以及激光扫描测量在内的综合监测。文中考察了初级波高、越顶水流条件与石块运动之间的关系, 并利用其与堰流及抛石护坡越流问题的相似性, 将既有解析公式与经验公式应用于本问题并加以评价, 同时讨论了周围水位等重要影响因素。最终, 采用 Thornton 等提出的稳定性函数可正确预测绝大多数实测冲刷事件, 且误判事件极少。在此基础上, 本文提出了承受长周期船行波荷载的抛石丁坝粒径设计流程。

关键词: 船行波; 抛石丁坝; 长周期波越顶; 经验与解析公式; 石块粒径预测; 现场观测

A Design Method for Rock Groynes Exposed to Overtopping from Long-period Ship Wave Loads

MingHui Luo

School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410012, Hunan, China

Abstract: In German estuaries ship-induced loads have increased in recent years due to the gradual change of the fleet structure towards bigger vessels. Groynes in particular are vulnerable to long-period primary ship wave loading due to an overtopping phenomenon which at some localities leads to severe damages. While in recent years the hydraulic processes have been the focus of investigations, currently no rock sizing method exists for this special load case. To develop a design method and to better understand the processes leading to groyne erosion, the data from a previously conducted prototype experiment with two groynes is analysed in this paper. The prototype experiment was carried out over several years and was accompanied by a comprehensive monitoring, consisting of wave and current measurements as well as laser scan surveys. Relationships of primary wave heights, overtopping flow conditions and rock movements are investigated. Making use of similarities to weir flow and overtopped riprap embankments, existing analytical and empirical formulae are applied to this problem and evaluated. Important influencing factors like the ambient water level are discussed. Ultimately, using the Thornton et al. (2014) stability function the majority of observed erosion events could be predicted correctly with only a small number of false detects. On this basis, a

workflow for the stone sizing of rock groynes exposed to long-period ship waves is formulated.

Keywords: Ship waves; Rock groynes; Long-period wave overtopping; Empirical and analytical equations; Stone size prediction; Field survey

一、引言

船舶生成波对水道岸坡的作用，长期以来主要针对断面狭窄且沿程恒定的内河水道开展研究，并形成公认的技术准则[1-2]。相比之下，海岸水道与河口等地形较为复杂的水域中，船舶引起的波浪与水流荷载受到的关注较少，原因在于以往这些水域中自然荷载往往占据主导。然而，随着海船尺度不断增大，船舶引起的水动力荷载持续增强，在海岸水道中已具有高度的工程相关性。

船舶生成的波浪可分为两大波系：低频的初级波与高频的次级波[3]。次级波系由船首与船尾处的压力扰动所产生，包含高频的横波与散波[4]。初级波系则是由船体排水体积的移动所强迫产生的长周期下降波系[5]，其组成还包括先行的船首波与随后的船尾波[6]。由下降波（亦称水位跌落）波谷至船尾波波峰的高差有时称为涌浪[7]；但本文遵循梅林等的用法，将其称为初级波高[8]。在船舶尺度大、水道狭窄受限的水域，长周期波分量对浅滩地貌与岸线地貌的影响尤为显著。在航道两侧存在大片浅滩的水域，初级波系会发生特定的变形：原本呈 V 形的下降波变为不对称形态，并形成陡立的涌波状初级波。不过，这一形态与本文所讨论的横向丁坝处所观测到的初级波变形有显著差异。

初级波与丁坝的相互作用以能量转换为特征：初级波在结构物处速度降低，动能转化为势能，使波高最大可增至坝头处初始波高的 2.5 倍。同样的机制也见于涌波状海啸波越过海岸结构物的情形。波浪聚焦与反射过程亦有影响，使坝根处波高更大。正是这些效应造成了丁坝处具有潜在破坏性的波—结构相互作用：越顶涌流在坝顶与背浪侧坝坡上形成高流速的紊动水流。这也正是丁坝特别容易被长周期初级船行波荷载破坏的原因[8]。图 1 展示了德国下易北河 Juelssand 河段的这一相互作用过程。首先出现水位跌落，形成水面下降并产生绕坝与越坝的回流（图 1 a—c）；水位跌落充分发展后水流转向，初级波随之展开，最终形成对丁坝的强烈越流（图 1 d—f）。由时间标记可见，在这一典型算例中越顶水流持续约 20 s。由此形成的典型破坏形态始于背浪侧坝坡的初始冲刷，随后发展为坝顶与坝根段的破坏（图 1 右）。

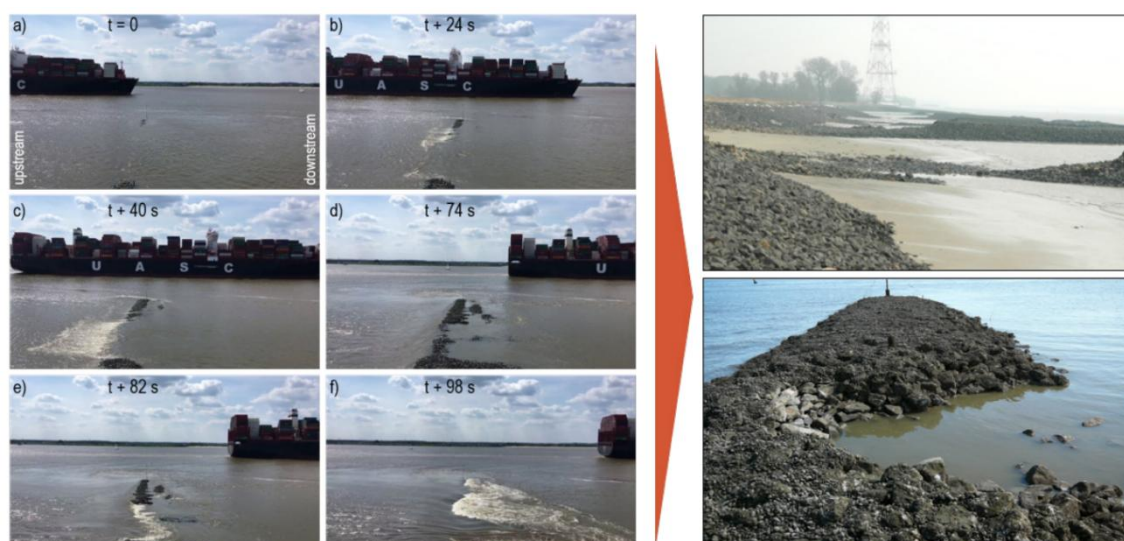


Figure 1 Left: Example of Ship Wave Interacting with the Groyne at Juelssand; A) Ship Approaching, Bow Wave B) Return Current and Drawdown Emerges with Slight Overtopping over the Groyne C) Full Return Current with

Upstream Overtopping over the Groyne D) Maximum Drawdown E) Stern Wave Arrives F) Stern Wave-Induced Overflowing. Right: Typical Damage Associated with Primary Wave Overtopping

图 1 左: Juelssand 河段船行波与丁坝相互作用实例; a) 船舶驶近, 船首波; b) 回流与水位跌落形成, 丁坝出现轻微越顶; c) 回流充分发展, 迎浪侧越顶; d) 水位跌落达到最大; e) 船尾波到达; f) 船尾波引起的越流。右: 初级波越顶所致的典型破坏

关于初级船行波对海岸水域抛石结构稳定性影响的研究成果十分有限。已有针对次级波作用以及次级波与河道水流联合作用的石块粒径公式, 也有内河水道岸坡防护的设计准则[1-2]。但船舶在丁坝处造成的荷载, 与沿岸坡传播的典型初级波或次级波荷载存在本质区别; 出于同样的原因, 常用的抗风浪抛石护面设计方法(如范德梅尔)也不适用。

由于丁坝的典型破坏发生在背浪侧坝坡, 可以判断初级波的越流过程是造成冲刷的原因。关于抛石或堆石体在越流荷载下稳定性的预测已有大量研究。Abt 等在文献综述中梳理出 21 个针对通用或特定用途建立的关系式, 可分为经验公式与解析公式两类。经验公式的不足在于仅在其试验参数范围内可靠; 解析公式则被认为把握了现象背后的本质物理过程, 因而在试验边界之外亦能给出较好的预测。不过 Khan 与 Ahmad 指出, 均匀流与拖曳剪应力方法无法适用于大粗糙元上的浅水流动, 因此标准的解析水流与泥沙输移公式在此类条件下不可用。在数据量足够大的前提下, Khan 与 Ahmad 建议采用完全经验型公式来处理该问题。

迄今为止, 当地水道管理部门与咨询工程师在设计与评估受初级波越顶作用的丁坝时, 主要依靠工程经验。鉴于缺乏相应的指导性文件, 德国联邦水道工程与研究所与地方水道管理部门联合启动了一项重大研究计划: 开发了两种优化的丁坝型式, 并通过原型现场试验加以评价, 其特征分别为坝根内凹与坝根加强。该现场试验的记录见梅林等[8], 其中描述了波-结构相互作用与实测数据。但目前仍缺少深入的数据分析, 以理解破坏机理的定量关系并据此预测丁坝的稳定性。这正决定了本文的主要目标: (1) 认识实测冲刷与初级船行波之间的关系, 识别并量化影响因素; (2) 建立承受长周期船行波作用的丁坝石块粒径设计流程。

为实现上述目标, 本文对 Juelssand 丁坝群现场试验数据进行了分析, 并借助水利工程中同类问题的既有经验公式与解析公式, 识别并量化越流现象与抛石稳定性的关键参数。

本文结构如下: 第二部分(一)简要介绍现场试验与数据, 第二部分(二)(三)回顾有关堰流、粗糙床面流与抛石稳定性的既有公式; 第三部分给出实际分析, 将波浪特征与越流量、周围水位及实测冲刷相关联; 第四部分讨论分析结果、基本假定与不确定性, 并提出石块粒径设计流程, 讨论其适用性与局限; 第五部分给出结论。

二、数据与方法

(一) 原型现场数据

本文对梅林等所记录的现场试验数据进行分析。为便于读者理解, 此处对试验与数据作简要说明。

为提高抛石丁坝抵抗初级船行波越流荷载的能力, 在下易北河口设计并按原型尺度建造了两种优化型式(图 2)。两座原型丁坝的侧坡均为 1:4, 坝头坡度 1:5, 纵向略有倾斜(1:77), 坝高约 2 m, 坝顶呈圆弧形。两者的差别在于坝根形态: 第一座丁坝(B29)的坝根为宽 25 m 的内凹段, 用以让波浪能量绕过结构物; 第二座丁坝(B31)的坝根经加强处理, 向岸坡护面以 25 m 半径加宽并圆顺过渡, 用以削弱波浪聚焦、增强坝根。



Figure 2 Groyne Geometries Used in the Prototype Experiment. Left: B29 with Recessed Root Area. Right: B31 with Reinforced Root by Broadened and Rounded Transition Area to the Bank Revetment

图 2 原型试验采用的丁坝几何型式。左：坝根内凹的 B29。右：向岸坡护面加宽并圆顺过渡、坝根加强的 B31

试验初期，两座丁坝均采用与该河段既有常规丁坝相同的 CP90/250 标准石料级配，石料为密度约 3.7 t/m^3 的高密度铁硅酸盐石块。此后，在对丁坝状况进行中期评估之后，B29 采用更粗的 LMB5/40 级配重建，该型式下文称为 B29 V2。各型式的抛石层厚度均取为 2 倍 D50。丁坝坝体的芯部由旧丁坝残体构成，视为不透水。

Table 1 Specific Parameters of Rock Grading Classes Which Were Used in the Prototype Experiment

表 1 原型试验采用的石料级配类别的特征参数

石料级配	D50 [cm]	Cu [-]	ρ_s [t/m^3]
CP90/250	15	1.5	3.7
LMB5/40	20	1.5	3.7
LMB10/60	24	1.3	3.7

注：数值为制造商提供的多份检验报告的平均值。D50 为中值筛分粒径，Cu 为由报告级配算得的不均匀系数， ρ_s 为石料密度。

该试验配套开展了以下监测：采用压力式波高仪进行波浪观测，每座丁坝布设 5 个测点（P1—P6）；采用声学多普勒流速仪（ADV）观测流速，仅布设于内凹型丁坝 B29 V2；采用桩基式地面激光扫描仪测量护面层表面；并由 AIS 数据提供每一次波浪事件对应的船舶与航行参数。

压力式波高仪沿设定的横断面布设。对 B29 而言，中部横断面最为关键，因为坝根断面位于内凹段内，不会受到越顶的不利影响。测点位置针对出港船舶的波浪事件进行了优化——出港船舶在该河段航行时距丁坝更近，因而生成的初级波更大。据此，P4 与 P5 布设于坝根断面的迎浪侧。相应地，对于出港船舶事件，在观测断面的背浪侧没有获得任何数据。

除冬季数月较长的停测期外，压力传感器与激光扫描仪在表 2 所列时段内大部分时间连续工作。B29 V2 的 ADV 沿中部横断面布设于坝顶，记录坝顶以上约 20 cm 处的流速分量。抛石层时空变形的定量测量采用激光扫描。为尽可能完整地记录坝面，每次低潮时自动扫描一次。然而，在毗邻繁忙航道的偏远海岸环境中以低入射角扫描粗糙潮湿的石面，对设备、采集与后处理均构成挑战，因此不得不舍弃大量扫描成果，导致相邻两次有效扫描之间有时存在较大的时间间隔。

Table 2 Measurement Periods, Present Rock Grading and Available Data

表 2 观测时段、现有石料级配与可用数据

丁坝编号	观测横断面	观测时段	石料级配	压力传感器	激光扫描	ADV
B31	中部、坝根	2015—2017	CP90/250	有	有	无
B29 V1	中部	2015—2016	CP90/250	有	有	无
B29 V2	中部	2017—2019	LMB5/40	有	有	8 个月

给出了 B29 V1 观测期内船舶相关参数及坝头处对应的波浪信息。该时段共记录 7231 次波浪事件。由于初级波周期未从原始数据中提取，图中以水位跌落至船尾波的历时作为其替代量，中位数约 60 s，表明初级波十分平缓而漫长；历时的巨大离散与极值系自动处理出错所致。据此推算的平均初级波周期约为 120 s。两座丁坝数据的进一步描述与图示见梅林等[8]。

（二）描述丁坝水力荷载的公式

由波—结构相互作用观测归纳出的丁坝越流事件概念模型，后续分析所用的相关变量已在图中标出，并在下文说明。

丁坝前的水头以 h 表示，坝顶水深为 h_{crest} ，单宽越流量为 q ，坝顶流速为 v_{crest} ，行近流速为 v_0 ，背浪侧自由出流坡长为 LS 。背浪侧坡面上充分发展的粗糙床面流的水深与流速分别记为 h_d 与 v_d ， L_d 为粗糙床面流边界层充分发展所需的流程长度。初级波与水位跌落对应的水位分别记为 z_{Hp} 与 z_{dd} ，坝高记为 w 。

首先可以看出，该现象与堰流具有明显的相似性。因此，下文简要介绍堰流理论及相关公式。堰流的最早描述由 Poleni 于 1717 年提出。

$$Q = \frac{2}{3}\mu_P \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}} \tag{1}$$

式中， b 为堰宽， h 为上游水头， μ_P 为经验流量系数。在该模型中，所有物理偏差与未知过程都被归并到这一经验系数之中。

已有大量研究针对不同的堰体几何形态与水力条件确定了经验系数 μ_P ，其中综合的影响因素包括结构几何形状、下游水位、斜向行近水流、糙率以及桩体的存在。然而这一简单模型可能导致 μ_P 本身依赖于水头。 $du\ Buat$ 提出的改进式还计入了行近流速 v_0 所贡献的动能，但该参数在第二部分（一）所述监测中并未观测，因而无法使用。故本文后续分析选用 Poleni 公式。Poleni 公式描述的是自由出流条件下的流量。自由堰流对应于水流由缓流经堰体转为急流的流态变化，可用水深弗劳德数表征。上述方法适用于堰体处的恒定流条件，而初级船行波的越流过程是随时间变化的非恒定过程，因此该公式对丁坝条件的适用性必须借助原型数据加以检验与评价。

如第二部分（一）所述，对出港船舶工况而言，丁坝背浪侧坡面的水深与流速均未观测，因而该侧的水流过程未知；但正是这些过程决定了丁坝抛石所受的最大作用，必须予以考虑。为估算流速与水深，本文采用曼宁公式（式 2）并配以适用于抛石的谢才—斯特里克勒系数（式 3）。

$$v_d = k_s \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

式中， v_d 为充分发展水流的平均流速；水力半径 R_h 在本例中取为水深 h_d ； S 为坡面坡度， k_s 为斯特里克勒系数。

$$k_s = \frac{b_1}{k^{b_2}} \tag{3}$$

按照 Abt 等对破碎抛填石料的取值，斯特里克勒系数中 $k = S \cdot d_{50}$ ， $b_1 = 12.21$ ， $b_2 = 0.159$ 。水深及相

应流速由给定流量迭代求解。

对越顶的丁坝而言,背浪侧受作用的坡长 LS 受背浪侧坝田水位的制约。为估计水流在背浪坡上的加速程度,必须考察粗糙床面流的发展程度。Platzer 在关于抛石陡槽的研究中给出了紊流边界层厚度 δ 、流程长度 x 、糙率高度 k 与坡角 α 之间的关系:

$$\frac{\delta}{k} = 1.65 + 0.4 \cdot \tan \alpha \cdot \frac{x}{k} \pm 0.4 \quad (4)$$

该式可用于计算紊流边界层与水面相交的坡面位置,即紊流充分发展、水流开始掺气的位置。本文假定该位置处粗糙床面流已充分发展。为使该式适用于本问题,将其改写并换用符号:按前述假定取 $Rh = hd = \delta$ 、 $Ld = x$,忽略 ± 0.4 的不确定项,并整理为关于 Ld 的形式,即式(5):

$$L_d = \frac{1}{8} \cdot \cot \alpha (20h_d - 33k) \quad (5)$$

将其与实测坡长 LS 相比较,即可判断粗糙床面流是否已充分发展。

(三) 抛石抗越流粒径计算公式

Abt 等评述了 21 个关于抛石抵抗越顶水流稳定性的公式,并利用包含多项室内试验成果的数据集对各式逐一检验,按不同石块粒径等级评价其表现。本文选用其中表现最佳的若干公式,用以评价承受越顶水流作用的抛石丁坝的冲刷。

Abt 等发现, Khan 与 Ahmad 的公式在全部粒径范围内表现最佳:

$$D_{50} = 0.66 t^{0.58} S^{0.22} C_u^{-0.45} q_c^{0.21} \quad (6)$$

该式为通用型公式,基于 Robinson 等与 Abt 和 Johnson 的 51 组数据、采用全回归模型建立。

中等粒径区间 ($5 \text{ cm} \leq D_{50} \leq 25 \text{ cm}$) 内表现最佳的公式尤其值得关注,因为该区间正对应原型丁坝所用的石料粒径(见表 1)。其中包括 Olivier 针对透水与越顶堆石坝水流所提出的公式,其基础是拖曳剪应力方程:

$$D_{50} = 1.749 \cdot q_c^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \right)^{-\frac{10}{9}} S^{\frac{7}{9}} \quad (7)$$

式中, q 为单宽流量 (ft^2/s), d_s 为等效石块粒径 (ft), S 为下游坡度。

Abt 与 Johnson 基于物理试验,建立了适用于废弃物围护体包覆层的回归型稳定性表达式:

$$D_{50} = 5.23 \cdot S^{0.43} q_{\text{design}}^{0.56} \quad \text{with } q_{\text{design}} = 1.35 q_c \quad (8)$$

式中, S 为坡度, q (ft^2/s) 为抛石失稳时的流量。

Chang 将起动阈值的解析方法与试验数据的再分析相结合,建立了如下关系式:

$$D_{50} = \frac{0.887 \cdot q_c^{\frac{5}{9}}}{S^{\frac{5}{18}} \cdot \left[\frac{1}{\tan(1+5S)\phi} \right]^{\frac{25}{27}}} \quad (9)$$

式中, q 与 S 分别为失稳单宽流量与坡度, ϕ 为抛石的休止角。

Khan 与 Ahmad 公式的良好表现启发 Thornton 等沿用全经验回归思路。Thornton 等的创新之处在于把石料的相对密度引入为预测参数,同时扩充了基础数据集,拓宽了适用范围:

$$D_{50} = 0.57 S^{0.20} C_u^{-0.28} q_c^{0.21} t^{0.62} \left(\frac{1.16}{(\rho_s - 1)^{0.30}} \right) \quad (10)$$

式中, S 为坡度, C_u 为不均匀系数, t 为以 nD_{50} 计的抛石层厚度, q_c 为失稳单宽流量。该模型基于 102 组数据建立。

上述公式均以流量作为水力输入参数,因而仅在粗糙床面流充分发展时成立。其优点是把水流阻力公式直接内置于稳定性方程之中,无需先行计算流速或剪应力,也无需对抛石层表面高程乃至水深作人为的定义。另

一方面，以流速为输入参数的公式的优点在于不要求水流充分发展，但需要借助水流阻力公式（如曼宁公式）由已知流量与坡面几何计算流速。下面介绍两个后一类公式。

Isbash 最早为堆石坝施工提出稳定性方程，其工作基于向流动水体中抛投石块的原型尺度试验：

$$D_{50} = \frac{v_c^2}{2g \cdot Y^2} \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_w} \right) \quad (11)$$

式中引入了经验常数 Y ，其取值随紊流状态而变化。

Hartung 与 Scheuerlein 在 Isbash 工作的基础上研究了水流掺气的影响，引入掺气系数 σ 并计入坡角的影响 $\cos \phi$ ：

$$D_{50} = 0.69 \frac{v_c^2}{2g \cdot \cos \phi} \left(\frac{\sigma \cdot \rho_s}{\rho_s - \rho_w} \right) \quad (12)$$

$$\sigma = 1 - 1.3 \sin \alpha + 0.08 \frac{y_m}{\theta_m}$$

式中， θ_m 为平均糙率高度， α 为坡角， y_m 为平均水深。

上述七个公式中有三个未包含石料相对密度项，它们是针对密度约 2.65 t/m^3 的采石石料建立的。然而由表 1 可见，现场石料的 ρ_s 约为 3.7 t/m^3 。为对这些公式给出的粒径作相应折算，采用式（13）——该式由初始密度石块与目标密度石块的浮重平衡导出。

$$\vartheta = \left(\frac{\rho_{\min} - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

式中， $\rho_{\min}$ 为初始石块密度（ 2.65 t/m^3 ）。将折减系数 ϑ 乘以初始粒径即得对应的高密度石块粒径。该式与 Thornton 等公式中由数据拟合得到的密度项高度相似，故认为是合理的。

基于 Abt 等的评述与检验，上述公式被认为适用于原型试验所观测到的条件，本文将用原型数据对其加以应用与评价。但所有被引研究与本问题存在一项重大差异，即所考察荷载工况的时间尺度：既有公式均基于恒定流试验，每组试验持续 $2 \sim 4 \text{ h}$ ，并逐级增大流量直至失稳；而初级船行波引起的越流通常仅持续 30 s 以内，峰值流量的历时更短。因此，这些稳定性关系式对本荷载工况的适用性必须借助原型观测加以检验。

三、结果

下文利用第二部分（二）（三）介绍的公式，对第二部分（一）所述的丁坝现场数据进行分析。

（一）波浪—越流量关系

为研究初级波与相应越顶水流之间的关系，本文分析了 B29 V2 时段（见表 2）的数据。该时段在中部横断面的坝顶布设有 ADV，可用以分析水流与流量条件。下文考虑一种准恒定荷载工况：迎浪侧水位恒定、越顶水流达到最大。

越流现象分析的第一步是从数据集中筛选可认为发生急流越顶的事件。急流的判别指标是坝顶处的水深弗劳德数，按下式计算：

$$Fr = \frac{v_{\text{crest}}}{\sqrt{g \cdot h_{\text{crest}}}} \quad (14)$$

弗劳德数大于 1 的事件视为急流。在 1600 次经分析的初级波事件中，最终有 61 次呈现急流状态。相应的实测单宽越流量按下式计算：

$$q = h_{\text{crest}} \cdot v_{\text{crest}} \quad (15)$$

为研究丁坝前水头 h 与越流量 q 以及坝顶流速 v_{crest} 之间的关系。由式（1）变换可得各次事件的流量系数 μ ：

$$\mu = \frac{q}{\sqrt[2]{2g \cdot h^3}} \quad (16)$$

由 61 次事件算得 μ 的平均值为 0.61, 代回 Poleni 公式 (式 1) 即得式 (17)。其与实测数据吻合良好 ($R^2 = 0.97$), 说明所研究丁坝坝体横断面上的越流过程与堰流具有足够的相似性, 可用修正的 Poleni 公式描述。

$$q_{\text{calc}} = 1.80 \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (17)$$

流量系数 μ 是堰体泄流能力的度量, 可表示为堰前水头 h 与坝顶水深 $h_{\text{crest,calc}}$ 之比。对上述 61 次事件, 该比值的平均值为 $h_{\text{crest,calc}}/h = 0.609$ 。对坝顶水流应用连续方程, 并以 h 表示 $h_{\text{crest,calc}}$ 、以式 (17) 表示流量, 即得式 (18)。该式可由水头近似求出坝顶流速, 与实测数据吻合良好 ($R^2 = 0.85$):

$$v_{\text{crest,calc}} = \frac{q_{\text{calc}}}{h_{\text{crest,calc}}} = \frac{1.80 \cdot h^{\frac{3}{2}}}{0.609 \cdot h} = 2.95 \cdot \sqrt{h} \quad (18)$$

由此, 越流量与流速均可表示为水头的函数, 而水头即代表船尾波的波峰。不过, 上述结果仅来自 B29 V2 观测期 (见表 2) 的数据。为把这些结论推广到未布设 ADV 的另一座丁坝与其他观测时段, 本文利用与流量系数 μ 相关的比值 $h_{\text{crest,calc}}/h$ 。对流量系数已知的 B29 V2 数据作线性回归, 并给出 95% 置信带。可见 B29 V1 与 B31 (中部与坝根两个断面) 的绝大多数数据点均落在该带内, 说明由 B29 分析得到的结论可推广到其他丁坝型式与时段。对 B31 的坝根断面, 当 $h > 0.78 \text{ m}$ 时坝顶水深有偏大的趋势。除这些偏差外, 分析表明各丁坝断面具有相近的水头—流量关系, 因而具有相近的流量系数。故后续分析采用 $\mu = 0.61$ 的 Poleni 公式 (式 17) 及相应的流速公式 (式 18)。

1. 背浪侧水位的影响

越流过程的一个重要方面是丁坝背浪侧的水位。如第二部分 (一) 所述, 对出港船舶工况, 背浪侧没有水位观测。出港船舶尤其值得关注, 因为其会遇距离较小, 荷载通常更大, 实测破坏也更频繁、更显著。在越顶事件中, 背浪侧水位起着关键作用: 它决定是否发生急流越顶, 也影响水流在背浪坡上加速并发展为粗糙床面流的坡长。为对出港船舶工况下的该水位作粗略估计, 本文考察了由进港船舶引起的急流越顶事件的背浪侧水位。但此类事件数量有限, 原因是进港船舶的初级波量级要小得多——其会遇距离更大, 且按德国海上航行水道交通规则关于吃水受限船舶进入汉堡港的潮汐窗口规定, 进港船舶通过丁坝时的水位较出港时更高。

在对 14 次进港事件的水位时程进行分析的基础上, 给出了背浪侧水位相对于迎浪侧水位的粗略估计: 在 B31 处, 当越流达到峰值时, 背浪侧的水位跌落约消减一半; 而在 B29 处, 水位跌落已完全消减、恢复至静水位。这一差异源于水流可经内凹坝根通过, 从而使两侧坝田水位更快趋于平衡。据此粗略估计, 即可计算各次事件相应的背浪侧坡长 LS ; 而充分发展粗糙床面流所需的坡长则由式 (5) 计算。如第二部分 (三) 所述, 既有抛石稳定性公式均假定粗糙床面流已充分发展; 但对实测坡长较短 ($LS < L_d$) 的事件而言这一条件并不成立, 水流尚未充分加速, 抛石所受作用相应较小。为使这些事件能与充分加速的事件 ($LS > L_d$) 相比较, 本文提出了对此类「短坡」事件进行修正的新方法, 说明如下。

坝顶流速 $v_{\text{crest,calc}}$ 可由式 (18) 估算, 坡面上充分发展的流速 v_d 可由式 (2) 计算。现假定水流在两者之间线性加速, 则修正流速 v^* 可按实测流程长度 LS 与充分发展所需长度 L_d 之比作线性插值求得:

$$v_{\text{calc}}^* = v_{\text{crest,calc}} + \frac{LS}{L_d} (v_d - v_{\text{crest,calc}}) \quad \text{for } LS < L_d \quad (19)$$

然而, 部分稳定性公式以越流量 q 作为输入参数。为对流量作相应修正, 将修正流速 v^*_{calc} 代入曼宁公式 (式 2), 整理后求得修正水深 h^*_{calc} :

$$h_{\text{calc}}^* = \left(\frac{v_{\text{calc}}^*}{k_s \cdot S^2} \right)^{\frac{3}{2}} \tag{20}$$

修正后的越流量即可由式（21）算出。该方法使流量减小，对应护面所受作用的降低。

$$q_{\text{calc}}^* = h_{\text{calc}}^* \cdot v_{\text{calc}}^* \tag{21}$$

给出 B31 坝根断面的修正流速与修正流量。当修正值与未修正值相等时，表明该事件的水流已充分发展并充分加速。可见，越流量较大的事件（ $q_{\text{calc}} > 2.0 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ）发生在背浪侧水位较高时，其实测坡长 LS 较短，因而荷载参数被大幅削减，最大可降至初始流量的 30%。

在后续分析中，对粗糙床面流已充分发展的事件采用计算得到的 vd 与 q_{calc} 作为稳定性公式的输入参数；对未充分发展的事件则采用修正值 v^*_{calc} 与 q^*_{calc} 。

（二）石块粒径计算

1. 实测冲刷

为检验石块粒径计算结果，本文对全部激光扫描成果逐一考察，以识别出护面层发生变形的相邻扫描对。由于该测量数据处理难度较大，石块运动的判定采用差值图目视判读，结果分为「有冲刷」与「无冲刷」两类，其中「有冲刷」又细分为「明显冲刷」与「轻微或局部冲刷」。

2. 石块粒径计算方法的评价

给出采用第二部分（三）所列各粒径公式，对 B29 V2 时段全部实测越顶事件算得的石块粒径，同时标出表 1 各典型级配的中值粒径。各式预测的 $D50$ 离散很大，这与 Abt 等的结论一致。对实测最大的越流事件，Chang 公式预测 $D50$ 为 0.26 m；最不保守的是 Thornton 等公式，其估计值为 0.15 m，比前者小 42%。Chang、Olivier 与 Abt 和 Johnson 的公式均预测 LMB5/40 级配会发生冲刷；但在采用 LMB5/40 的 B29 V2 时段内并未观测到明显冲刷，因此这些公式不再纳入后续考虑。

为最终评价其余各式，本文将每一次越流事件与每一次冲刷事件逐一对应考察。以 Thornton 等稳定性公式为例，对各丁坝型式与断面演示了该方法。给出三个量：越流量、由稳定性公式算得的临界流量以及实测冲刷。当某次越流事件超过临界流量且对应实测冲刷（位于红色或绿色区域内）时，该冲刷事件视为预测正确；若存在实测冲刷事件但没有相应的越流事件，则视为漏判（假阴性）；若某次越流事件超过临界值但并无对应的实测冲刷，则视为误判（假阳性）。

表 3 汇总了采用不同稳定性函数的分析结果。各式对实测冲刷事件均有较高的预测成功率。就具有明显冲刷形态的事件而言，仅 Thornton 等公式在 B31 中部断面漏判了一次；该式对「轻微或局部冲刷」事件的漏判也最多，为 4 次，而其余各式在总计 12 次中各漏判 2 次。但各式的重大差异在于误判次数：Thornton 等公式共有 3 次误判，而 Isbash 公式为 20 次、Hartung 与 Scheuerlein 公式为 22 次、Khan 与 Ahmad 公式多达 28 次，表明若采用后几种方法可能会过高估计所需石块粒径。据此，本文推荐 Thornton 等公式作为最适合本原型数据的公式。

Table 3 Hindcast / Validation of the Erosion Events Prediction Using Different Rock Sizing Equations

表 3 采用不同石块粒径公式对冲刷事件预测结果的后报检验

抛石稳定性公式	冲刷事件类别	正确预测的冲刷事件	漏判的冲刷事件 (假阴性)	误判（假阳性）
Thornton 等	明显冲刷	15	1	3

Khan 与 Ahmad	轻微或局部冲刷	8	4	28
	明显冲刷	16	0	
Isbash, $Y = 1.20$	轻微或局部冲刷	10	2	20
	明显冲刷	16	0	
Hartung 与 Scheuerlein	轻微或局部冲刷	10	2	22
	明显冲刷	16	0	
	轻微或局部冲刷	10	2	

四、讨论

（一）影响荷载强度的因素

如前文所述，水头与下游水位共同决定越流量的大小；后者还决定背浪坡的受作用坡长，从而决定护面石料上的有效荷载长度。两者均取决于初级波高、水位跌落幅度以及周围水位。因此，对给定波高存在一个「最不利」水位，此时（修正后的）越流量最大：水位再高，则背浪坡长变短、流量被削减；水位再低，则水头及越流量随之减小。荷载最大时的水位对应于给定初级波高下的某一特定越流量，本文将其定义为极限越流量 q_{lim} 。极限流量线与各级配临界流量线的交点，即按本文结论该 D50 仍能保持稳定的最大波高。B29 与 B31 的 q_{lim} 斜率差异源于两者几何形态不同：由于部分初级波经 B29 的内凹段通过，背浪侧坝田水位较连续型丁坝上升更快，因而越流期间坡长总体较短，荷载强度较小。

上述波高均指中部与坝根横断面迎浪侧的波高，对应压力传感器 P5 与 P4，已属经过变形后的波高。而坝头处的 P1 测得的初级波信号受结构物、底部与岸坡影响更小，更接近原始波形。给出中部与坝根断面波高与坝头波高的关系，可见两者相关性良好，且在两座丁坝间一致：中部断面的波高约为坝头波高的 2.16 倍，这一比例对 B29 V1、V2 与 B31 均成立，说明坝根形态的差异对坝体中部的荷载影响甚微。但 B31 坝根处的波浪变形略强，为坝头初始波高的 2.8 倍，因此 B31 坝根段的荷载总体高于中部断面，这与实测流量与冲刷的量级相符——坝根段的冲刷确实快于中部断面。如梅林等所指出，初级波的变形与陡化会受结构劣化的影响，故 B31 仅采用建成后前 67 天的数据，因为此后坝顶发生了显著冲刷，改变了丁坝的越流水力特性。

随着丁坝结构劣化，坝顶形状与高程发生变化，越流量关系亦随之改变。这一点在波浪数据中有所体现：前文所用的水头 h 与坝顶水深 h_{crest} 之比在某一时刻之后发生显著变化，其后的数据不再符合前文所述的水力关系。

（二）抛石稳定性公式

冲刷事件后报的结果见第三部分（二）第 2 节，并汇总于表 3。所考察的各式均能预测出大多数冲刷事件，最大的差别在于误判次数。造成预测结果离散的原因，一方面被认为在于建立各模型所用试验的参数空间不同，另一方面在于对抛石失稳或石块运动的定义并不一致。差异巨大的另一个原因可能是各式是否含有安全储备。Najafzadeh 等指出 Thornton 等公式的预测误差很小，因而表现上几无保守性；但该文对 Khan 与 Ahmad 公式也有相同结论，而后者在本文数据中误判最多，说明该式并不适合本文所讨论的工况。由于汇集了多个来源与研究的数据，Thornton 等回归公式所用复合数据集的参数空间比单项研究更大、分布更广，这似乎使其在本问题中更为稳健，表现为与数据吻合最好。同时需要指出的是，Thornton 等公式漏判了一次「明显冲刷」事件；考虑到后文讨论的计算不确定性，可将其视为一个离群点。当然，更保守的公式提供了更高的安全水平，但也带来粒径偏大的弊端，会增加工程量与造价。

（三）丁坝型式的评价

由结果可见,流量超过临界值的幅度对冲刷量级有直接影响。在各考察时段内,B29 V1 的冲刷事件次数与 B31 相差无几,但实测累计冲刷量却低得多。这可由最强越流事件的流量值解释: B29 V1 仅有一次事件略微超过 $1 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,即超出 Thornton 等公式对 CP90/250 给出的临界流量 $q_c = 0.80 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 约 25%;而 B31 的最大流量达 $1.85 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,超出临界值 130%。此外,高强度事件出现更为频繁,导致护面石料迅速劣化,建成后仅 67 天坝顶即被冲穿。B31 还有若干事件超过了 LMB10/60 的临界荷载值,说明在当时的实测荷载条件下,即便采用这一更粗的级配也未必稳定。

内凹型丁坝 B29 荷载小于 B31 等连续型丁坝,原因有二:其一,内凹的坝根段允许波浪能量通过并耗散,使常规丁坝型式中波高最大的区域得以改造,从而降低荷载;其二,内凹段使相邻坝田的水位跌落更快平衡,背浪坡的受作用坡长因而更短。由此可见,相较于更常规的型式,内凹型丁坝在抵抗长周期初级船行波越流荷载方面具有更优的护面稳定性。

在 B29 V2 观测期内未观测到明显的冲刷事件,采用 Thornton 等公式的分析亦作出了正确预测。其原因有二:一是相较前一型式采用了更粗的 LMB5/40 级配;二是易北河实施了船舶限速,使极端初级波事件减小——坝头处波高最大的前 10 次事件,其波高较未限速时段约减小 10%。在此条件下,CP90/250 级配即被预测为稳定,说明该型式尚有进一步优化的空间。

(四) 建议的丁坝设计方法

本文的主要目标之一是建立并验证一套设计方法,用以预测承受初级波越流作用的护面层稳定性。基于前述结论,建议按以下流程对承受船行越流荷载的丁坝进行设计。

(1) 通过预测或实测确定结构物处具有设计意义的船行初级波高。对既有或拟建丁坝,宜在坝头附近确定该波高,以计入此前可能发生的由地形引起的波浪变形。

(2) 按方法计算内凹型丁坝中部断面或连续型丁坝坝根段的波高。对既有丁坝,宜直接在上述断面各点实测波高,此时可省略第(1)步。

(3) 采用极限流量 q_{lim} 关系,确定与该波高相对应的越流量。对既有丁坝,宜由结构物处的实测资料确定越流量;此时还应同时观测背浪侧水位,以估计水流在坡面上的发展程度。

(4) 采用 Thornton 等的稳定性公式计算石块粒径或临界越流量。

该流程可使设计者算出所需的石块粒径,从而据以确定相应的石料级配,或对既有结构物的稳定性作出定量评价。Thornton 等的粒径公式还允许改变不均匀系数、抛石层厚度、石料密度与坡角等抛石设计参数,以评价其对护面稳定性的影响。

但需指出,关于结构一波浪相互作用与越流量关系的结论均来自参数空间有限的原型数据,因此把本文结论推广到其他丁坝、其他几何型式与其他地点时必须审慎。就流量关系而言,可以忽略或估计断面几何变化可能带来的影响:关于流量系数的确定以及某些几何变化的影响已有大量算例;例如坝顶更宽时可取更小的流量系数,此时亦可直接采用式(17)以增加保守性。关于波高沿丁坝的变形,由于完全基于经验数据,其结论仅对本文的丁坝成立。两座丁坝的尺度、纵向坡度、丁坝间距与滩面地形相近,而这些参数会显著影响波—结构相互作用,因为它们决定了波浪聚焦、反射与地形引起的变形。例如,对 Juelssand 河段航空影像的分析表明,较长的丁坝比较短的丁坝更早出现劣化,说明波高变形关系在不同丁坝布置下可能有所不同,背浪侧水位亦会随之改变。尽管如此,本文成果对认识长周期船行波与丁坝结构的相互作用具有重要价值,所提出的设计方法也是估算承受初级船行波越顶作用的丁坝荷载与抗力的一种简便而实用的工具。为抵消外推(至其他丁坝/地点)带来的不确定性,可考虑引入安全系数或开展针对具体地点的观测。

（五）不确定性来源

现场试验的观测与本文的分析均含有一定的不确定性，而所有计算均按确定性方法进行、未计入这些不确定性，因此有必要加以讨论。观测本身的不确定性此处不再赘述，梅林等已有论述。

1. 水力荷载方面的假定

本文分析中的不确定性大多来自必需但未观测的量，以及为量化这些量而作的假定。式（15）中实测流量 q 的计算假定坝顶流速剖面均匀分布、压力呈静水分布，这是一种简化，因为丁坝的形状并非满足上述条件的宽顶堰；此外抛石的糙率还可能使流速剖面发生变形。但受制于流速与压力均为点测量，这两种效应都无法计入。

为确定实测水头 h ，必须先定义坝顶高程。正如 Hiller 等所指出，抛石层坝顶高程的定义带有一定的任意性。本文计算中将其定义为抛石层石块的外缘。对造成冲刷的越流事件，越顶水深较大（ $2.4 \leq h_{crest}/D50 \leq 5.2$ ），因此可认为紧邻抛石层的水流影响可以忽略。

此外，由于未观测行近流速 v_0 ，其对越流过程的影响亦无法计入。Aigner 的分析中，行近水流的能量由水头与堰高之比确定。据此，堰高无限大（ $h/w \rightarrow 0$ ）时的流量，与丁坝处造成冲刷的越流事件（ $0.3 \leq h/w \leq 0.5$ ）的流量相比，差值在 1.5%~3.0% 之间，故该影响可认为较小。

在初级波数据处理中，高频分量（ $> 0.1 \text{ Hz}$ ）已被滤除。但在越顶事件中，次级波可能与初级波发生干涉或叠加。估计次级波对越流量的影响较小，故予以忽略。这与 EurOtop 的观点一致——在堤防恒定越流的流量计算中，波高小于水头 3 倍者可视为可忽略。

不过，上述所有假定与不确定性都已被并入由实测事件按式（16）算得的流量系数之中。更深入的研究与更复杂的方法或可更清晰地揭示与该流量关系相关的各项物理效应，但本文所用方法与数据吻合良好，对本工况的水力条件是可靠的估计。

本文为计入背浪侧水位影响而提出的、用式（19）与式（21）修正背浪坡流速与越流量的方法带有推测性质。式（4）在计算边界层发展方面存在重大不确定性——其方差项即说明了这一点；式（19）所用的线性加速假定也未必符合实际情况。为评价这些事件而对流量所作的折减存在较大不确定性，但该方法的用意在于以流速的降低来体现抛石所受作用的减小。囿于现有数据，这一处理无法验证。如前所述，进行这些计算是为了评价背浪坡长相对较短的事件，从而使全部实测冲刷事件都能纳入评价。

抛石层内部渗流的影响未予考虑，原因是其相对于越流量所占比例甚小，且缺乏相应观测。

2. 恒定流假定

本文结论均建立在越流涌浪达到最大时水流准恒定的假定之上，因而未考虑波浪与越流过程的时间依赖性，这可能会对波浪—越流关系与冲刷过程产生影响。

给出由水位与流速观测所表示的一次越流事件实例，并同时给出按式（17）与式（18）计算的流速与越流量。可以看出，在整个波浪历时内，计算所得参数曲线的形态与量级均与观测吻合，说明上述假定及所提公式能够充分近似所观测到的时变过程。

第三部分（二）第 2 节的冲刷分析基于石块的起动，并与某一临界流量相关联，即仅考虑运动的起始，因而准恒定的信息已足以支撑该判断。若能获得时变信息，则可进一步计算冲刷率或冲刷量，但这不属于本文的研究范围。由于未观测到与初级波荷载相伴的岩土失稳机理，坝体芯部的动态孔压变化亦未予考虑。

五、结论

本文对丁坝原型试验数据进行了分析，以建立承受船行越流荷载的丁坝石块粒径设计流程。就引言中提出

的目标而言,可得出以下结论。

关于堰流、粗糙床面流以及抛石抗越顶的既有公式,能够恰当地描述初级波荷载、越流量与由此引起的抛石冲刷之间的相互关系。对连续型与内凹型两种丁坝,计算结果均可靠:16次明显冲刷事件中有15次得到正确预测,而误判仅3次。

(1) 除波高之外,相对于坝顶的水位也是急流越顶过程能否发生及其强度的决定性因素。本文提出了一种评价背浪坡长受限的越流事件的方法,但因缺乏相应观测而未能验证。

(2) 将水流视为准恒定的处理与数据吻合较好,但初级船行波动态特性的影响仍有待进一步考察。

(3) 基于本文结论,提出了承受长周期船行波作用的丁坝石块粒径设计流程。由于其建立在有限的经验数据之上,推广应用时须审慎。

建议进一步开展研究,以将结论推广到不同的丁坝几何型式与波浪条件。数值模拟或室内试验似乎最适合用于研究各种配置下的波—结构相互作用,同时也可用以验证本文的重要假定,特别是关于越流事件中背浪侧水位以及相应流速与流量修正的假定——这些方面仍存在重大不确定性,有待解决。

参考文献

- [1] Soomere T. Nonlinear components of ship wake waves. *Applied Mechanics Reviews*, 2007, 60(3): 120-138.
- [2] Bhowmik N G, Demissie M, Guo C Y. *Waves Generated by River Traffic and Wind on the Illinois and Mississippi Rivers*. Urbana: Illinois State Water Survey, 1982.
- [3] 毛礼磊, 陈一梅. 船行波作用下内河航道泥沙运动机理研究. *泥沙研究*, 2023(2): 22-29.
- [4] Houser C. Sediment resuspension by vessel-generated waves along the Savannah River, Georgia. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2011, 137(5): 246-257.
- [5] Melling G, Jansch H, Kondziella B, et al. Evaluation of optimised groyne designs in response to long-period ship wave loads at Juelssand in the Lower Elbe Estuary. *Die Küste*, 2021, 89: 29-56.
- [6] 周利兰, 高高. 变水深条件下船舶尾浪的数值研究. 中国造船工程学会船舶力学学术委员会第八次全体会议文集. 大连, 2014: 1-6.
- [7] 梁越, 左江瑞, 许彬, 韩林峰, 潘剑, YAR Mohsin. 船行波扰动下平陆运河岸坡侵蚀特性模型试验研究. *河海大学学报(自然科学版)*, 2025(5).
- [8] 王宗建, 周千驰, 付承玉, 等. 基于多因素耦合的内河航道船行波波高计算. *水利水运工程学报*, 2026(3): 32-43.