

· 港口 ·



直立堤前 stem 波的分布规律及对工程的影响*

陈志乐, 杨静思

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 当波浪沿直立堤以小于某临界角度入射时, 将形成沿堤增长的 stem 波, 目前国内外对 stem 波的研究较少且停留在理论阶段。以某直立堤台风破坏复演的物模试验为例, 结合国内外研究成果, 对 stem 波的产生条件、特征以及对工程的影响进行探讨。结果表明: 1) stem 波的波高和波宽均在沿堤传播中逐渐增大, 沿堤比波高的增长呈现前快后慢的特点; 2) 不同入射波高和波向对于 stem 波的特征影响较大, 详细的规律仍待进一步研究; 3) stem 波可对工程中直立堤造成蛇行破坏或对端部斜坡衔接段造成破坏, 工程规划和结构选型应避免类似布置, 宜采用三维物理模型试验验证 stem 波作用下结构的安全性。目前行业规范未涉及 stem 波相关内容, 本研究成果可为工程设计提供参考。

关键词: stem 波; 直立堤; 斜向浪; 比波高

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0037-06

Stem wave distribution along vertical breakwater and related engineering influence

CHEN Zhile, YANG Jingsi

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Under a certain condition where in the incident angle of waves is smaller than a critical angle, there appears a stem wave propagation along the wall. There are few researches on stem waves and they remain in the theoretical research stage at present. Based on the physical model test results of vertical breakwater typhoon damage restimulations and combined with existing domestic and foreign research results, the generation, characteristic and engineering impact of stem waves are analyzed initially. The results show that: 1) The wave height and width of stem waves increase gradually along the wall, and the wave-height ratio increases fast and then slower. 2) Different incident wave heights and directions have great impact on stem wave characteristics, and detailed rules need further study. 3) Serpentine damage to vertical breakwater or damage to sloping breakwater that connected with vertical breakwater could be caused by stem waves. Similar arrangement should be avoided in project planning and design, and three-dimensional physical model tests should be used to verify the structure safety under stem waves. Related items for stem waves are not included in present specifications, and the research results can be used as reference for engineering design.

Keywords: stem wave; vertical breakwater; oblique wave; wave-height ratio

在一定条件下, 当波浪以小于特定角度入射至直立建筑物前, 波浪不发生常规线性反射, 除入射波和反射波外, 另外形成一列沿直墙传播的波, 称为 stem 波, 见图 1。这种反射模式也称作

马赫反射, 最早于 1957 年由 Perroud^[1] 在实验室中研究孤立波入射直墙发现。Mase 等^[2] 采用物模试验和数值模拟对比研究规则波和不规则波、线性波和非线性波以及波浪破碎对于 stem 波演化的

收稿日期: 2023-02-20

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFE0104500)

作者简介: 陈志乐 (1982—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计和研究工作。

影响。Lee 等^[3-5]采用物模试验和数值模拟相结合对各种类型斜向入射波产生的 stem 波分布规律进行研究,发现 stem 波在沿直立式建筑物传播时波高和波浪宽度都随传播距离的增加而逐渐增大,某些情况下 stem 波的波高可达最初入射波高的 2 倍以上,理论上最大接近入射波高的 4 倍。张永刚等^[6]用数理方程对非线性 stem 波进行了数值研究。张慈珩等^[7]对 stem 波作用下斜坡式结构护面块体稳定性进行了物模试验研究,分析失稳原因并提出加强稳定性的措施。耿宝磊等^[8]采用物模试验研究斜向浪沿直立堤传播过程中的能量变化。目前国内外对 stem 波的研究较少,大部分只停留在理论研究阶段。

随着港口建设向深水发展,在复杂海洋环境下建设直立堤或者复合堤越来越多,stem 波在工程中频繁出现,沿堤增长的 stem 波可对工程中直墙造成蛇行破坏(图 2)或对直墙端部的斜坡衔接

段造成破坏。相关统计表明,日本受损直立堤中蛇行破坏在 1983—1991 年间占比 54.5%,在 1990—2000 年间日本沉箱直立堤中受损沉箱的蛇行破坏占比 78.3%^[9]。其中以日本六小河源港防波堤和长江口二期工程北导堤的损坏最为典型,分析主要原因为 stem 波高在直墙前呈现周期性变化。

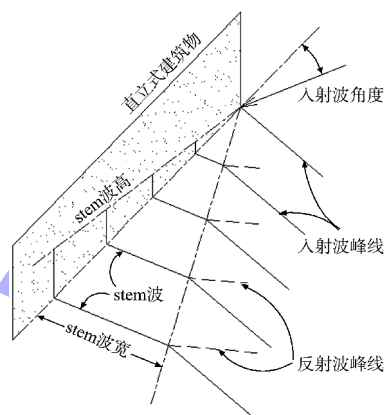


图 1 STEM 波

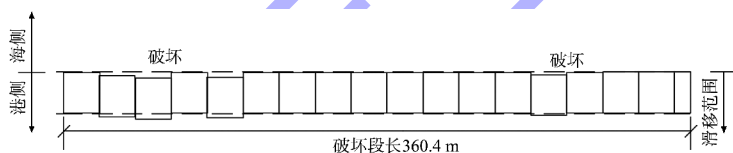


图 2 日本六小河源港防波堤的蛇行破坏

以某防波堤西堤北段台风破坏复演的物模试验结果为例^[10],结合现有国内外研究成果,初步总结分析直立堤前 stem 波产生条件、特征和工程影响,旨在为类似工程设计提供参考。

1 工程概况

某防波堤西堤北段总长 635 m,主体为沉箱直立式结构,直立段长 547 m,通过 88 m 长斜坡过渡段与海岛相接,平面布置见图 3。建成后于 2009 年受台风“凯萨娜”影响,在与直立堤相邻的斜坡堤外坡出现了破坏,修复后断面见图 4。2017 年受台风“杜苏芮”影响,直立堤端部的斜坡段再次出现了一定程度破坏。

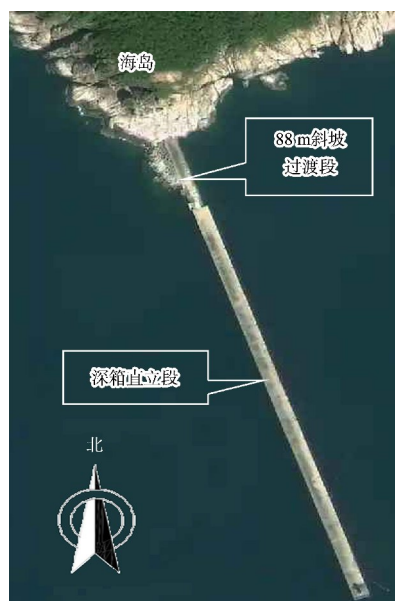


图 3 防波堤平面

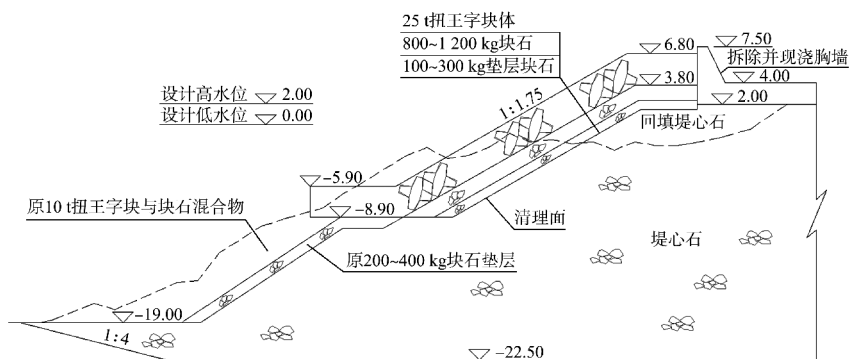


图 4 西堤北段斜坡衔接部分台损复演典型断面 (单位: m)

2 物模试验

2.1 试验条件及模型设计

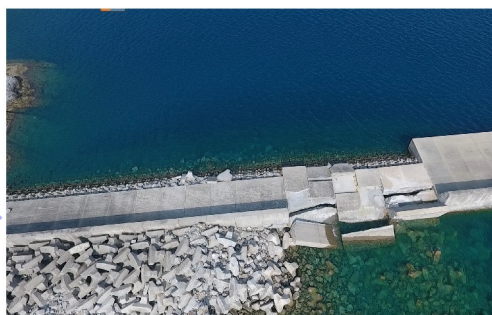
开展整体三维物理模型试验, 复演台风“杜苏芮”作用下西堤北段的破坏过程, 为修复方案提供科学支撑。三维正态模型几何比尺 1:69, 波浪按重力相似准则模拟, 采用不规则波 JONSWAP 谱。

复演试验采用 1719 号台风“杜苏芮”的波浪要素, 台风最大有效波高 $H_{1/3}$ 为 8.62 m, 周期 10.8 s, 波向 174°, 物理模型试验水位为 2.06 m。

2.2 台损复演试验结果

西堤北段破坏复演试验模型的布置按主浪向考虑。为复演防波堤在波浪作用下的破坏过程, 单一波况的累计试验持续时间为原型 3 h。试验发现, 设计波浪要素 ($H_{1/3} = 8.62$ m, 波向 174°, 与西堤轴线成 13°角) 作用时, 西防波堤北段的复演试验破坏方式和破坏位置与现场“杜苏芮”台风作用下的破坏情况整体相似。

如图 5 所示, 试验破坏情况与现场破坏情况极为相似: 1) 破坏主要发生在斜坡堤与直立堤相连接处, 斜坡堤与直立堤相连接处的外坡护面 25 t 扭王字块体被打乱滚落且发生破坏, 其下垫层和堤心石也部分被掏刷; 2) 斜坡堤靠近直立堤的 3 段胸墙失稳滑移, 胸墙前护面扭王字块体滚落, 胸墙基础石料被掏; 3) 西防波堤北段斜坡堤内坡护面 4 t 四脚空心方块基本无破坏。该波浪要素作用下的复演试验破坏方式与现场作用下的破坏情况整体相似。



a) 现场情况



b) 试验结果

图 5 台损复演试验结果与现场情况

2.3 入射波高对台损的影响

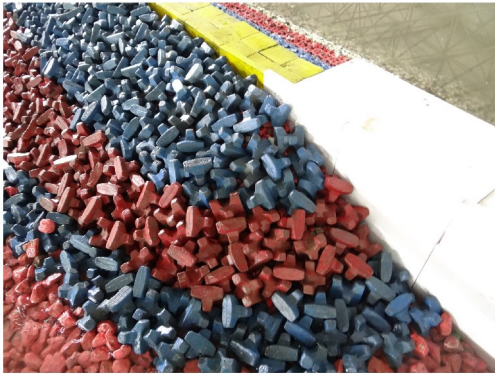
为分析不同入射波高情况下西堤北段斜坡衔接部分的破坏情况, 在台风最大波浪要素 ($H_{1/3} = 8.62$ m, 波向 174°, 与西堤轴线成 13°角) 的基础上, 增加两组不同入射波高情况下的稳定性试验 (波高在 $H_{1/3} = 8.62$ m 的基础上分别减小 20% 和 30%)。不同入射波高试验工况见表 1。

试验结果表明, 对于 174°向波浪, 在入射波高 $H_{1/3} = 6.00$ m (最大有效波高减小 30%) 波浪作用下, 外坡护面 25 t 扭王字块体处于临界稳定状态;

在入射波高 $H_{1/3} = 6.90\text{ m}$ (最大有效波高减小 20%) 波浪作用下, 斜坡堤在与直立堤相连接处外坡护面多个 25 t 扭王字块体发生滚落, 垫层暴露, 外坡破坏, 见图 6。

表 1 不同入射波高试验工况

工况	水位	重现期	波向	设计波高 $H_{1/3}/\text{m}$	T_m/s
A ₁			174°	8.62	
H ₂	2.06 m	50 a	(与西堤轴线 成 13°角)	6.90	10.8
H ₃				6.00	



a) 入射波高 $H_{1/3}=6.00\text{ m}$



b) 入射波高 $H_{1/3}=6.90\text{ m}$

图 6 不同入射波高试验结果

2.4 入射波向对台损的影响

考虑到现场波浪方向的不确定性, 为分析不同入射波向下西防波堤北段的破坏情况, 在主浪向 174°基础上, 增加 S-11°和 S+11°两个不同入射波向条件进行稳定性试验(即 A₁、D₂、D₃)。不同入射波向试验工况见表 2。

表 2 不同入射波向试验工况

工况	水位/m	重现期/a	波向	设计波高 $H_{1/3}/\text{m}$	T_m/s
A ₁			174° (与西堤 轴线成 13°角)		
D ₂	2.06	50	S-11° (与西堤 轴线成 7°角)	8.62	10.8
D ₃			S+11° (与西堤 轴线成 30°角)		

如图 7a) 所示, 在 D₂ 波浪条件(与西堤轴线成 7°角)作用下, 波浪沿直立堤传播过程中的聚集不明显, 且在直立堤前沿波高未明显增大。西堤北段延长线上约 300 m 处建设有 2 km 长的西堤南段防波堤, 因此在该波向作用下西堤南段有一定的消浪作用。当该波浪累积作用相当于原型 3 h 后, 斜坡堤在与直立堤相连接处外坡护面 25 t 扭王字块体多处出现拉缝(无块体滚落), 最大拉缝宽度接近块体最大几何尺度的一半; 西防波堤北段斜坡堤在靠近直立堤的第 1 段胸墙略有位移; 内坡护面 4 t 四脚空心方块无破坏, 且小于现场实际破坏程度。

如图 7b) 所示, 在 D₃ 波浪条件(与西堤轴线成 30°角)作用下, 波浪沿直立堤传播过程中波能明显聚集、波高显著增大, 当该波浪累积作用相当于原型 3 h 后, 西防波堤北段斜坡堤发生显著破坏, 靠近直立堤约 50 m 长的斜坡堤外坡护面块体全部被打落, 垫层和堤心石大量被掏空、胸墙滑落折断、内坡护面块体也全被打落, 破坏情况明显大于现场实际破坏程度。因此, 在设计波高相同的情况下, 随着斜向浪入射角从 7°增大至 30°, stem 波的波能聚集作用逐渐增大, 对结构物的破坏性也逐渐增强。



a) 主入射波向减小 11°



b) 主入射波向增大11°

图 7 不同入射波向试验结果

2.5 沿程波高分布

为进一步研究西防波堤北段的破坏原因, 从堤头向堤根沿堤共布置 6 个测点, 每个测点的原型间距为 90 m, 对防波堤前 stem 波的波高分布规律进行监测。试验选取不同入射波高、不同入射波向 4 个工况, 见表 3。

表 3 沿程波高分布试验工况

工况	水位/ m	重现期/ a	波向	设计波高 $H_{1/3}/\text{m}$	T_m/s
A_1	2.06	50	174° (与西堤轴线成 13°角)	8.62	10.8
D_2			S-11° (与西堤轴线成 7°角)	8.62	
D_3			S+11° (与西堤轴线成 30°角)	8.62	
H_4			174° (与西堤轴线成 13°角)	4.44	

不同入射波高波浪作用下西堤北段直立堤沿程波高及比波高 (测点波高与入射波高的比值) 变化见图 8, 不同入射波向波浪作用下西堤北段直立堤沿程波高及比波高变化见图 9。由试验结果可知:

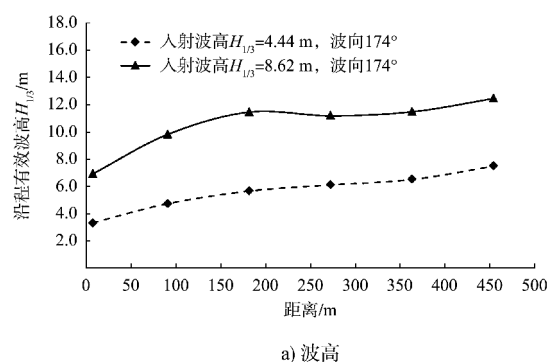
1) 在以上不同入射波高或波向的波浪作用下, 波浪沿直立堤传播过程中堤前波高均逐渐增大。这是由于当波浪与直立堤成较小夹角入射时, 形成沿直墙传播的 stem 波。随着波浪沿直立堤传播, stem 波存在明显的波能聚集, 波宽及波高均增大。

2) 在固定入射波向条件下 (波向 174°, 与西堤轴线均成 13°角), 当入射波高 $H_{1/3} = 4.44$ m 时,

沿程比波高由堤头的 0.74 逐渐增大至 1.69; 当入射波高 $H_{1/3} = 8.62$ m 时, 沿程比波高由堤头的 0.80 逐渐增大至 1.44。且沿堤传播的前半段 (堤头至堤中) 是大波形成的较大比波高, 而传播的后半段 (堤中至堤根) 则出现相反的结果, 最终在堤根处较小入射波高比较大入射波高形成的比波高大 17.4%。

3) 在固定入射波高条件下 (入射波高均为 $H_{1/3} = 8.62$ m), 不同入射波向波浪作用时, 波浪与西堤轴线夹角成 7°、13°、30°的条件下, 直立堤前沿波浪所测最大比波高分别为 1.14、1.44、1.80。因与西堤轴线夹角较小时 (7°、13°), 西堤南段斜坡堤有一定的消浪作用, 使得堤头部位的比波高均小于 1, 随着波浪的传播, 比波高不断增加。当夹角为 30°时, 直立堤前沿波浪比波高较大, 堤头部位的比波高为 1.20, 且传播约 100 m 后比波高即增大至 1.73, 接近比波高峰值的 96%。随着与西堤轴线夹角的增大, 斜坡堤的破坏严重程度显著增大。

4) 在西堤北段斜坡堤与直立堤相接处, 波浪对斜坡堤的冲击作用强烈, 在斜坡堤与直立堤连接段的扇形区护面块体失稳最为严重。分析其原因, 一是此处位于直立堤堤根处, 该处 stem 波传播后波能聚集, 比波高达到峰值, 台风复演工况下波高增大至堤头入射波高的 1.44 倍; 二是由于斜坡堤的扇形构造直面 stem 波的冲击, 且此处斜坡堤结构使水深突然变浅, 波浪发生破碎, 破碎波夹杂大量气泡对该区域形成强烈冲刷。斜坡堤与直立堤连接段的扇形区护面块体最先发生破坏, 继而垫层石、堤心石和胸墙接连破坏。



a) 波高

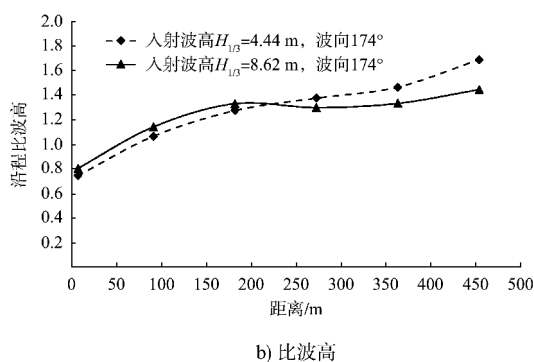


图8 不同入射波高波浪作用下西堤北段
直立堤沿程波高变化

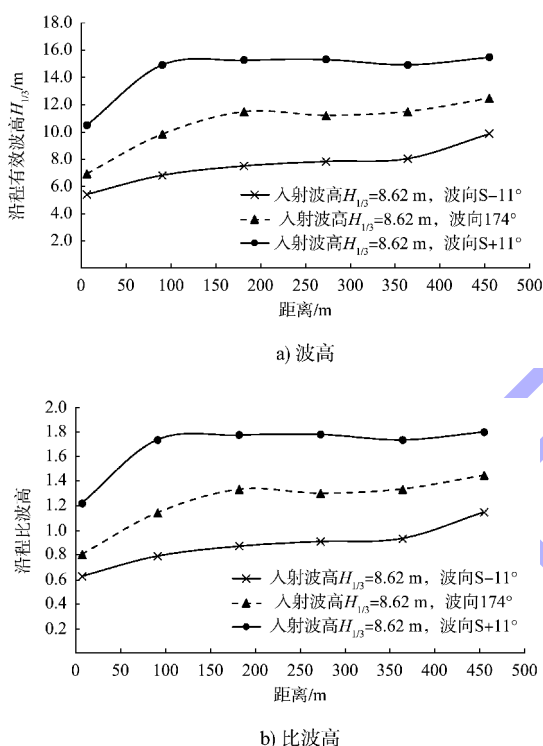


图9 不同入射波向波浪作用下西堤北段
直立堤沿程波高变化

3 结语

1) 当波浪沿直墙以小于某临界角度入射时,将在直墙前形成沿堤增长的 stem 波, stem 波存在明显波能聚集,波高和波宽均在沿堤传播中逐渐增大,沿堤比波高的增长呈现前快后慢的特点,直至最终稳定。

2) 不同入射波高和波向对于 stem 波的特性影响较大,详细的规律仍待进一步研究。案例中较小入射波高比较大入射波高获得更大的比波高,在一定范围内入射角度越大比波高越大。

3) 随着港口建设向深水发展,直立堤或复合堤越来越多,工程中遇到 stem 波将更加频繁,而沿堤增长的 stem 波会对结构安全带来较大的不确定性,易造成直立堤的蛇形破坏和端部斜坡段扇形面破坏,工程规划和结构选型应尽量避免类似布置。

4) 目前行业规范未涉及 stem 波相关内容,类似工程设计中应重点关注 stem 波的影响,建议采用三维物理模型试验验证结构的安全性。

参考文献:

- [1] PERROUD P H. The solitary wave reflection along a straight vertical wall at oblique incidence [D]. Berkeley: University of California, 1957.
- [2] MASE H, MEMITA T, YUHI M, et al. Stem waves along vertical wall due to random wave incidence [J]. Coastal Engineering, 2002, 44(4): 339-350.
- [3] LEE J I, CHOI J W, TOON S B. Hydraulic experiments of stem waves along a vertical wall due to unidirectional random waves [J]. HOHODK, 2008, 20: 49-61.
- [4] LEE J I, KIM Y T. Laboratory Experiments of Stem Waves along a Vertical Structure under Overtopping Conditions [J]. JKWRA, 2012, 45(12): 1275-1292.
- [5] YOON S B, LEE J I, KIM Y T, et al. Laboratory and numerical experiments on stem waves due to monochromatic waves along a vertical wall [J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2018(25): 521-535.
- [6] 张永刚, 李玉成, 王永学. 应用 Boussinesq 方程对非线性 Stem 波的数值研究 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 1997, 12(4): 393-400.
- [7] 张慈珩, 陈汉宝, 耿宝磊, 等. STEM 波作用下斜坡式结构护面块体稳定性的物理模型研究 [J]. 水道港口, 2013, 34(6): 488-492.
- [8] 耿宝磊, 刘二利, 张慈珩, 等. 斜向浪沿直立结构传播时能量变化的试验研究 [J]. 水道港口, 2020, 41(6): 635-642.
- [9] 李炎保, 蒋学炼, 刘任. 防波堤损坏特点与其成因的关系 [J]. 海洋工程, 2006, 24(2): 130-138.
- [10] 南京水利科学研究院. 某防波堤西堤北段 1719 号台风(杜苏芮)破坏复演物理模型试验报告 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.

(本文编辑 赵娟)