

离岸堤在海岸防护中的应用探讨

季小强, 陆培东, 喻国华

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 由于海岸侵蚀问题日益严重, 海岸防护已成为海岸工程研究的重要内容. 通过对目前常用的几种海岸防护形式的综述, 提出离岸堤是一种有效且应用广泛的护岸结构物. 根据国内外的研究成果, 从水动力过程、泥沙运动机制以及岸滩响应等方面, 阐述了出水离岸堤的防护机理, 并总结归纳了堤后岸滩响应的预报经验公式和稳定岸线形态模型. 最后, 回顾了近年来离岸潜堤在海岸防护中的研究概况, 对其防护机理进行了初步分析, 并在此基础上就离岸潜堤防护的进一步研究提出了建议.

关键词: 离岸堤; 海岸防护; 岸滩响应

中图分类号: P753

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)01-0035-09

目前, 受海平面上升、陆源泥沙供给减少以及人类活动等因素影响, 海岸侵蚀已经成为一个全球性的问题. 当前世界沙质海岸约有 70% 处于侵蚀后退状态, 我国自上世纪 50 年代末期以来, 许多淤泥质、沙质及珊瑚礁海岸也由原先的淤进或稳定逐渐转变为蚀退^[1]. 因此, 侵蚀性海岸的防护已成为海岸工程研究的重要内容. 在众多海岸防护形式中, 离岸堤因其在削减近岸波能、减弱纵向及横向输沙等方面的优势, 在海岸防护中受到越来越多的重视; 近年来离岸潜堤的研究, 也为离岸堤在海岸防护中的应用注入了新的活力.

1 海岸防护的基本形式

海岸防护可分为“软”防护和“硬”防护两种类型^[2-3]. “软”防护主要利用海岸自然保护的原理, 不干涉海岸原有的水动力和输沙机制, 如人工养滩, 就是典型的“软”防护方法; 而“硬”防护则是通过改变近岸波浪、水流以及泥沙运动状态, 以达到保护海岸的目的, 这类海岸防护方法主要包括建造海堤与护岸、丁坝以及离岸堤等.

1.1 人工养滩

人工养滩通过从海中或陆上采集合适的沙料填入被侵蚀的海滩, 从而保护已蚀退的滩面. 该方法主要适用于附近有大量合适可利用沙源的侵蚀性海岸, 其优越性在于不会对环境和周围海岸造成危害. 然而此防护方法也存在较大的局限性, 首先, 在缺乏合适沙源的侵蚀性海岸, 此法难以实施; 其次, 人工养滩不能获得永久的防护效果, 必须长期、周期性地补充被海浪冲刷带走的泥沙, 这也必将带来庞大的防护费用, 因此该方法在发展中国家极少采用.

1.2 海堤与护岸

海堤和护岸是人类传统的海岸防护形式^[4], 通过加固岸线将海洋动力与陆地隔离, 使岸线不再后退. 这种防护形式适用于各种类型的侵蚀性海岸, 但同时也存在难以弥补的缺陷. 首先, 此方法只能用于保护岸线, 而不能用于保滩, 相反, 波浪在海堤前因反射作用而增强, 使滩面加速侵蚀后退, 最终将导致堤岸、坡脚的基底被掏空, 造成工程破坏; 其次, 从海岸环境的角度而言, 该防护形式将导致岸线硬化, 从而破坏原本和谐的

收稿日期: 2010-03-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41006048); 南京水利科学研究院青年基金资助项目(Y209004)

作者简介: 季小强(1982-), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 主要从事波浪计算与海岸防护研究. E-mail: guyuesk@163.com

海岸生态环境.

1.3 丁坝

丁坝一般与岸线垂直布置,通过拦截上游来沙,使泥沙在坝格内淤积,从而达到拓宽滩面、保护海岸的目的,适用于常年具有较强单向沿岸输沙或斜向入射波浪为主的侵蚀性海岸.然而,由于丁坝拦截了大部分甚至全部上游来沙,使得下游海岸因缺乏泥沙来源而造成严重冲刷;并且由于丁坝本身几乎无防浪效果,完全依靠坝格内淤积的泥沙进行防浪消浪,若上游来沙不足,则丁坝防护往往会失败;另外波浪的传质水流和破波壅水引起的沿堤流,使部分泥沙被带往外海,导致原先的沿岸输沙无法得到恢复,从而造成下游海岸永久性侵蚀.

1.4 离岸堤

相对而言,离岸式防波堤(简称离岸堤)是目前较为有效且应用广泛的海岸防护结构物.离岸堤一般于滩外近海海域平行于岸线建造,主要适用于以波浪侵蚀为主的海岸.不同于单纯的固定岸线(海堤与护岸)或纯粹的截留泥沙(丁坝),离岸堤通过阻挡外海波浪、消减近岸波能,使泥沙在堤后落淤,从而促成滩面拓宽.一些研究表明,离岸堤不仅可以阻挡泥沙的横向运动,其后形成的沙嘴(或连岛坝)对沿岸输沙也有一定的拦截能力.由于上述优点,离岸堤在缺乏沿岸输沙的侵蚀性海岸依然能够发挥较强的保滩促淤功效.

离岸堤在海岸防护应用中主要包括出水离岸堤和离岸潜堤两种形式,R. G. Dean 等^[3]从波浪作用的角度将防止越浪的离岸堤称为出水离岸堤,而将堤顶位于波浪波谷线以下的离岸堤称为离岸潜堤.然而,就海岸侵蚀的原因而言,控制海岸侵蚀的波浪往往是特定季节或特定时段的波浪,因此,出水离岸堤可表述为防止造成海岸侵蚀的控制性波浪发生越浪的离岸堤,而相应地将堤顶位于该控制性波浪波谷线以下的离岸堤称为离岸潜堤.

2 出水离岸堤

在过去的近 60 年里,离岸堤在海岸防护工程中得到了大量的应用,尤其在日本,据统计,1967 年日本离岸堤总数约为 265 座,而 1981 年则剧增至 2 500 座左右^[5],且其中大多数为出水离岸堤,而早期研究文献中所提之离岸堤也多是指出水离岸堤.在多年的研究与应用中,海岸研究学者就出水离岸堤后的水动力过程、泥沙运动机制、岸滩响应的影响因素以及稳定后的岸线形态等方面进行了深入研究.

2.1 水动力过程

在近岸区域,波浪是造成海岸泥沙运动的主要动力^[6-8],离岸堤主要通过减弱海岸与堤身之间的波浪能量,来达到其防护效果.在此,可将离岸堤后的水动力过程分为 3 个阶段.

(1)初始阶段.离岸堤建成之后,其附近的水动力随即发生改变,主要表现在波浪场和波生流场的改变.波浪传播进入离岸堤后,除发生折射、浅水变形和近岸破碎外,其绕射作用成为控制堤后波浪场分布的主要因素.由于绕射造成掩护区的波高减小,使堤后波浪场沿岸分布不均,因而在沿岸线方向产生由开敞域向掩护区的沿岸流,M. R. Gourlay^[9-10]就该沿岸流的形成机制进行了深入研究,认为离岸堤后非均匀波浪场的辐射应力梯度造成的平均海面侧向梯度是该沿岸流形成的内在原因.从两侧进入的沿岸流将于掩护区内相遇,从而改向并最终因防波堤的阻挡而形成两股对称的环流,一些试验研究^[11]和现场观测^[12]均证实了该环流的存在.

(2)过渡阶段.在这一阶段,水动力的变化主要表现为经重新塑造的海岸地形造成的波浪场和沿岸流的变化.首先,随着岸线向海淤进,绕射波向与岸线及水下等深线之间的夹角将逐渐增大并趋向于与岸线垂直,这一点是新岸线达到稳定状态的前提因素^[3];其次,随波向与岸线夹角的增大,波浪沿岸线方向的能量分量将逐渐减小,因此波生沿岸流也相应减小,并且其方向随岸线的向海突出发生改变;另外,J. C. Ingle^[13]通过现场观测发现,沙嘴在成长过程中其头部的泥沙粒径变得越来越小.这一现象说明,在沙嘴向海淤长的过程中,能够到达沙嘴头部的波浪和水流能量将越来越少,当沙嘴发展到一定程度时,在沙嘴头部和离岸堤之间

甚至会形成一块死水区^[14],这一现象对连岛坝的形成有较大影响。

(3)平衡阶段.当水动力和地形之间的相互作用发展到一定程度,离岸堤后重新塑造的海岸地形将达到稳定,而此时的水动力状态是学者们所关注的问题. R. Silvester^[8]在其研究中对此时的水动力状态作出假设:当岸线稳定时,在沿岸线方向不再有波浪的能量分量存在,因而也不产生沿岸流和沿岸输沙,且此时的海底等深线平行于绕射波浪的波前线.而 D. S. Rosen 等^[15]在试验中发现,岸线稳定时,海底等深线并不完全与波浪的波前线平行,且此时沿岸线方向仍有微小的沿岸流存在,因此他作出另一假设,即在平衡阶段,绕射波浪在沿岸线方向具有与辐射应力造成的平均水面梯度相反的动量分量,其认为以此假设来解释此时的水动力特征更具合理性。

2.2 泥沙运动机制

波浪绕射对离岸堤后泥沙运动的作用主要表现为两个方面:一是绕射波浪及其生成的沿岸流使泥沙向堤后掩护区输移;二是波浪的绕射作用将减弱堤后的波浪动力,使泥沙在掩护区易于沉积.根据水动力的变化过程,将离岸堤后的泥沙运动过程也分为3个阶段。

(1)初始阶段.离岸堤建成之初,受近岸波浪破碎和波生沿岸流的作用,在原有沿岸输沙的基础上,离岸堤后形成由开敞域向掩护区的沿岸输沙,其泥沙来源主要包括波浪由外海带入的泥沙、开敞区因波浪扰动而掀起的泥沙以及部分底沙。

(2)过渡阶段.由于绕射作用造成离岸堤后波浪动力的减弱,泥沙在掩护区内逐渐沉积,并重新塑造堤后的海岸地形. M. G. Sauvage de St Marc 等^[11]通过试验发现,正向波浪作用下,在掩护区的中心线位置泥沙最容易沉积,其解释为从掩护区两侧进入的沿岸流在此处相汇,且该位置波浪的扰动掀沙能力因波高减小而降低.而 K. Shinohara 等^[14]以及 K. Suh 等^[16]均在试验中发现,沙嘴在成长初期通常会形成双峰形态,而随泥沙运动的继续,才逐渐发展成为单峰沙嘴. J. R. C. Hsu 等^[17]对正向波浪作用下沙嘴的形成过程作如下描述:波浪绕射进入离岸堤后,以相对原始岸线成一定角度破碎,在近岸流的协助下将泥沙向掩护区输移,由于波浪能量的衰减,泥沙在掩护区落淤,最初形成双峰沙嘴形态,在足够的波浪作用时间以及泥沙供给条件下,将汇合形成单个沙嘴.若离岸堤布置满足一定条件,沙嘴将最终发展成为连岛坝。

(3)平衡阶段.在水动力和地形相互作用的平衡下,离岸堤后沿岸线方向的局部纵向输沙将停止,在波浪作用下,泥沙运动仅表现为横向的振荡运动.但在自然海岸,由于波浪的季节性变化,离岸堤后的岸线平衡一般为动态平衡^[15],即大风浪天气将造成较强的海向横向输沙,使岸线侵蚀后退,而在大风浪过后,海况多为涌浪性质,泥沙又逐渐被推回至海岸,岸线恢复到原先的平衡状态。

2.3 岸滩响应的影响因素

离岸堤后的岸滩响应主要受制于三大要素:离岸堤的几何特性(堤长、离岸距离、开口宽度等),海岸泥沙特性(密度、泥沙组成等)和海域环境(波浪、水流、海底坡度等).然而,由于问题的复杂性,多数研究都以离岸堤的几何特性为主要参量。

对于单道离岸堤,堤长(B)和离岸距离(S)是影响岸滩响应的主要因素. Y. Nir 等^[18-21]均通过研究给出了这2个因素与岸滩响应之间的经验关系(见表1). K. Suh 等^[16]则指出破波线位置(S_b)对堤后岸线变形有较大影响,并给出其具体关系. J. R. C. Hsu 等^[17]在分析了诸多文献的数据后,指出以沙嘴头部距防波堤的距离(X)作为自变参量,较之沙嘴头部至初始岸线的距离(Y),与堤长(B)及离岸距离(S)之间有更好的相关关系.黎维祥等^[7]通过对离岸堤后淤积特性的显著参数分析,并结合试验数据,提出了离岸堤后连岛坝和沙嘴形成条件. M. E. McCormick^[22]则通过研究提出深水波陡(H_0/L_0)和底坡坡度(m)对堤后的稳定岸线形态有一定影响。

在实际海岸防护中,多会采用分段式离岸堤,即离岸堤群.因此,除了堤长与离岸距离外,分段之间的开口宽度(G)也是影响堤后岸滩响应的重要因素. J. Pope 等^[23]通过原型数据分析得出分段式离岸堤后的岸滩响应为 B/G 和 $S/(hB)$ 的函数,并给出了相关图示, J. P. Ahrens 等^[24]在此基础上得出岸滩响应指标的具体表达式. M. Seiji 等^[5]根据日本 1 552 座已建离岸堤的统计结果,分析得出了分段式离岸堤开口宽度与其后

方岸线侵蚀与否的经验关系. 而 K. Suh 等^[16] 以及 M. M. Harris 等^[20] 则采用物理模型试验分析了口门宽度对堤后岸线变形的影响. 将以上学者研究所得的经验关系式进行汇总, 见表 1 和表 2.

表 1 单道离岸堤岸滩响应经验关系式

Tab. 1 Summary of the empirical formulas of beach response for single breakwater

文献出处	经验关系表达式
Y. Nir ^[18] (1982)	$d_t = 1.786 - 0.809S/B$
M. M. Harris 等 ^[20] (1986)	$Q/BSh_B = \exp(0.315 - 1.922S/B)$
W. R. Dally 等 ^[19] (1986)	$\begin{cases} \text{连岛坝} & B/S > 1.5 \sim 2 \\ \text{沙嘴} & B/S = 0.5 \sim 0.67 \end{cases}$
K. Suh 等 ^[16] (1987)	$\begin{cases} Y/S = 0.156(B/S) & S_b/S < 0.5 \\ Y/S = 0.317(B/S) & 0.5 < S_b/S < 1.0 \\ Y/S = 0.377(B/S) & S_b/S > 1.0 \end{cases}$
J. R. C. Hsu 等 ^[17] (1990)	$X/B = -0.1626 + 0.8439(S/B) + 0.0274(S/B)^2$
黎维祥等 ^[7] (1991)	$\begin{cases} \text{连岛坝} & S/B \leq 0.42(H_0/(\omega T_0))^{0.0918} \\ \text{沙嘴} & 0.42(H_0/(\omega T_0))^{0.0918} \leq S/B < 6 \\ \text{无响应} & S/B > 6 \end{cases}$
D. H. Ming 等 ^[21] (2000)	$A/S^2 = -0.384 + 0.043S/B + 0.711B/S$

注: 表中 d_t 为连岛坝的厚度, ω 为泥沙沉速, T_0 为深水波周期, h_B 为离岸堤所处水深.

表 2 分段式离岸堤岸滩响应经验关系式

Tab. 2 Summary of the empirical formulas of beach response for segmented breakwater

文献出处	经验关系表达式
W. R. Dally 等 ^[19] (1986)	$\begin{cases} \text{连岛坝} & B/S > 1.5, L \leq G \leq B \\ \text{沙嘴} & B/S = 0.5 \sim 0.67 \end{cases}$
K. Suh 等 ^[16] (1987)	$\frac{Y}{S} = 14.8 \frac{G/S}{(B/S)^2} \exp \left[-2.83 \left(\frac{G/S}{(B/S)^2} \right)^{0.5} \right]$
M. Seiji 等 ^[5] (1987)	$\begin{cases} \text{无侵蚀} & G/S < 0.8 \\ \text{可能侵蚀} & 0.8 \leq G/S \leq 1.3 \\ \text{必然侵蚀} & G/S > 1.3 \end{cases}$ $I_s = \exp(1.72 - 0.41B/G)$ $I_s = 1 \quad \text{永久形成的连岛坝}$ $I_s = 2 \quad \text{周期性变化的连岛坝}$ $I_s = 3 \quad \text{发育良好的沙嘴}$ $I_s = 4 \quad \text{不明显的沙嘴}$ $I_s = 5 \quad \text{岸线无响应}$
J. P. Ahrens 等 ^[24] (1990)	

根据以上研究, 可将离岸堤后的岸线变形分为以下 3 种情况.

(1) 连岛坝. 在不考虑透浪的情况下, 当无因次量 S/B 小于某一限值时, 离岸堤后将会形成连岛坝, 在以往研究中, 这一限值常被认为是 1^[15-16, 25]. W. R. Dally 等^[19] 认为在单道离岸堤情况下, 这一限值应为 0.50 ~ 0.67, 而分段式离岸堤为 0.67. D. H. Ming 等^[21] 则提出该限值为 0.8. 黎维祥等^[7] 在其试验及前人试验的基础上提出: 当上游海岸有正常沿岸输沙来源时, 连岛坝的形成条件为 $S/B < 3$; 当上游海岸只有部分岸段提供泥沙来源时, 该条件为 $S/B < 0.42(H_0/(\omega T_0))^{0.0918}$; 当上游海岸无泥沙来源时, 连岛坝若要形成, 则条件应为 $S/B < 1/3$.

(2) 沙嘴. 在进行离岸堤防护时, 为减轻下游海岸的冲刷, 许多设计者都希望离岸堤后形成沙嘴而非连

岛坝.通常沙嘴的形成条件可以认为介于连岛坝和岸线无变化的形成条件之间,黎维祥等^[7]针对缺乏上游来沙的侵蚀性海岸提出沙嘴的形成条件为 $0.42(H_0/(\omega T_0))^{0.0918} < S/B < 6$.

(3)岸线无变化.这种情况是由于无因次量 S/B 过大,离岸堤的掩护效果无法对岸线产生影响. Y. Nir^[18]分析连岛坝厚度与 S/B 的关系得出,当 $S/B > 2$ 时,连岛坝的厚度将等于 0. J. R. C. Hsu 等^[17]提出当 $S/B = 4.94 \sim 5.55$ 时,沙嘴已几乎不再出现.黎维祥等^[7]则认为 $S/B > 6$ 是离岸堤不起防护作用的条件.

2.4 稳定岸线形态

离岸堤后的稳定岸线形态,也是海岸研究学者一直关注的问题. K. Shinohara 等^[14]曾通过试验观察认为最终形成的稳定岸线轮廓与绕射波浪的波峰线具有密切关系,而就目前而言,离岸堤后稳定岸线形态模型主要有以下 3 种:

(1) R. Silvester^[8]在 W. E. Yasso^[26]提出的对数螺线平衡海岸模型的基础上,提出离岸堤(或岬头)后的对数螺线稳定岸线模型,即在斜向波浪的作用下,两相邻防波堤(或岬头)之间形成的连岛坝的稳定水边线形状可分为 3 个部分:上游防波堤掩护区内形成的圆弧形部分;下游垂直于波向的切线部分;中间连接前两部分的对数螺线形部分.

(2) J. R. C. Hsu 等^[27]通过研究提出抛物线模型比对数螺线模型更为贴近于实际岸线,并在此基础上提出离岸堤后的稳定岸线应呈抛物线形态^[17],结合 W. R. Dally 等^[19]的 46 组原型和模型数据,拟合得出了离岸堤后稳定岸线的抛物线模型.

(3) M. E. McCormick^[22]根据已发表的文献数据,提出离岸堤后稳定岸线为椭圆形的假定,通过推导给出波浪以任意角度入射时的椭圆形稳定岸线模型. T. W. Hsu 等^[28]对此椭圆岸线模型的参数进行了改进,并表明改进后的模型更加符合实际情况.

3 离岸潜堤

迄今为止,出水离岸堤在海岸防护中取得了较为广泛的成功,其防护机理也逐渐为人们所认识.然而在一些沙质海岸,尤其是作为旅游度假圣地的沙滩海岸,出水堤的存在往往会对原本和谐的自然景观造成破坏.因此,离岸潜堤作为一种新型的海岸防护形式开始受到研究者的青睐.

与出水堤相比,潜堤在海岸景观与环境方面具有明显的优势:如潜堤通常淹没于水下,不会产生视觉障碍,因而不会影响海岸的自然景观;潜堤可以加强近岸波浪破碎,有利于水质交换和污染物扩散,防止水体污染;潜堤可作为一些鱼类的产卵栖息地,有利于近海生态保护和生物多样性.

然而,尽管潜堤具有以上诸多优点,在现有的海岸防护工程中,离岸潜堤防护工程的数量仍相对较少,其主要原因在于,潜堤防护发展相对较晚,对其防护机理在许多方面仍缺乏较为完善的认识.为此,近年来离岸潜堤的防护机理开始成为许多海岸研究学者关注的热点问题.

3.1 离岸潜堤防护的研究概况

自上世纪 80 年代末期以来,离岸潜堤防护机理的研究逐渐受到关注,许多学者采用现场观测、数学模型和物理模型等手段对此进行了大量的研究与探索.

3.1.1 现场观测研究 现场观测是研究离岸潜堤防护机理最为准确、直观的手段.然而,有部分现场观测结果^[29-32]表明,一些离岸潜堤工程并未起到保护海岸的作用,甚至加剧了海岸的侵蚀. R. Ranasinghe 等^[33]曾对 10 个离岸潜堤防护工程进行统计,结果显示仅其中 3 个防护工程取得了成功.为此,众多学者对离岸潜堤防护失败的原因展开了思考,其中 R. G. Dean 等^[31]结合物理模型试验提出,波浪越顶破碎引起的水体质量流(water mass flux)造成了离岸潜堤后水体的“蓄积”,其一部分返回流在潜堤后改向转为沿岸流,并带动泥沙向开敞区输移,最终从堤头两侧向外海流失,而潜堤对波浪的衰减幅度不足以抵消因水体质量流而增加的输沙能力,因而在掩护区造成冲刷,这一解释得到较多研究者的支持.

3.1.2 数学模型研究 随着波浪和沿岸流数值模拟技术的日益成熟,数学模型成为离岸潜堤防护机理研究

的一种重要手段. H. Nobuoka 等^[34]曾对离岸潜堤后的近岸流进行数值模拟,结果得出与 R. G. Dean 等的描述基本相近的近岸流场; J. A. Zyserman 等^[35]和 G. R. Lesser 等^[36]分别采用 MIKE21 软件和 DELFT3D 软件对离岸潜堤防护下的岸滩演变进行模拟,结果显示离岸潜堤后的岸线均得到不同程度的淤长; S. C. Van Der Biezen 等^[37]和 A. Sánchez-Arcilla 等^[38]分别利用 DELFT3D 软件和自主开发的 Q-3D 模型同样进行离岸潜堤后岸滩响应的数值模拟,却分别得出岸线蚀退加剧和岸线基本无淤长且部分区域侵蚀的结论. 可见,对于离岸潜堤的防护效果,数学模型研究有着两种不同的结论.

3.1.3 物理模型研究 物理模型研究可分为定床模型和动床模型研究 2 种. R. G. Dean 等^[39]采用定床模型试验研究了离岸潜堤后的水动力过程,并基于此对潜堤防护失败的原因进行解释; H. Nobuoka 等^[34]以及 J. Loveless 等^[40]也通过定床模型得出与 R. G. Dean 等类似的近岸流运动模式. 在动床模型研究方面, M. D. Groenewoud 等^[2]发现在分段式离岸潜堤的门口处会有较强的离岸流存在,且潜堤防护下的岸线蚀退幅度大于无潜堤存在的情况; L. Turner 等^[41]和 L. Martinelli 等^[42]则在其动床模型研究中得出岸线不同程度淤长的结论; R. S. Ranasinghe^[43]研究斜向波浪作用下离岸潜堤后的岸线变化时,同样在掩护区观测到沙嘴的形成. 由此可知,目前物理模型研究离岸潜堤的防护效果,所得出的结论仍不统一.

3.2 离岸潜堤防护机理的初步分析

从以上研究现状来看,无论采用哪一种研究手段,均发现在离岸潜堤防护下,其后岸滩可能产生淤积亦可能发生侵蚀,但从已有的成功实例以及一些天然潜礁后形成天然沙嘴的报道^[33]来看,离岸潜堤应是一种有前途的海岸防护形式,而其防护能否成功,关键在于对其防护机理的掌握. 在这方面,目前已有了一些认识.

首先,离岸潜堤对波浪的衰减能力远小于出水离岸堤, R. G. Dean 等^[31]近 1 年的现场监测结果表明,波浪通过潜堤时的透射系数约为 0.76~0.87,并且在分析中认为,由于测量的问题,该数值可能更大,而通常情况下,出水离岸堤掩护区的波浪透射系数要远小于这一数值. 其次,波浪越顶破碎产生的水体质量流是影响离岸潜堤后水动力的主要因素之一. R. G. Dean 等^[31,39]在研究报告中就水体质量流对离岸潜堤后水动力的影响进行了详细叙述,并指出其造成的沿岸流大小与潜堤的离岸距离成反比. A. Sánchez-Arcilla 等^[38]在其研究中提出,从堤头两侧进入的“绕射”波浪与越顶水体质量流是控制离岸潜堤后水动力特征的两大主要因素,潜堤的离岸距离和破波线位置之比 S/S_0 决定了这两大因素的主导地位:当 S/S_0 越小时,越顶水体质量流的影响将大于“绕射”波浪,从而导致泥沙向开敞区输移,并最终向海外流失;反之, S/S_0 越大,则“绕射”波浪的作用逐渐占主导地位,从而使泥沙在掩护区内淤积. 再次, J. A. Zyserman 等^[35]的数学模型与 L. Martinelli 等^[42]的物理模型结果均显示,在相同的堤长和离岸距离布置下,离岸潜堤后的泥沙淤积量要远小于出水离岸堤的情况,而且,由于上述越顶水体质量流的作用,离岸潜堤后可能出现由掩护区向开敞区的泥沙输移,并在堤头处产生较强的离岸输沙,在 R. G. Dean 等^[31]的现场监测和 M. D. Groenewoud 等^[2]的物理模型研究中均观察到这一现象. 最后,在岸滩响应方面,出水离岸堤现有的经验关系已不适用于离岸潜堤,如当离岸距离和堤长之比 $S/B < 0.5$ 时,出水离岸堤后应形成连岛坝,而 Martinelli 等^[42]在试验研究中发现,当离岸潜堤长度大于 2 倍的离岸距离时,水体质量流的影响将几乎正比于堤长的增加,当达到一定程度后,堤后沙嘴不再出现. 可见,离岸潜堤后的岸滩响应与各因素之间应有一个新的影响关系,而相比于出水离岸堤,这些因素还应包括堤顶高程和堤顶宽度.

综上所述,目前潜堤的防护机理仍处于研究探索阶段,现阶段研究已在定性上对潜堤后的水动力和泥沙运动有了一定的认识,但在定量上,各影响因素与岸滩响应的关系仍有待进一步研究.

4 结 语

半个多世纪以来,离岸堤在海岸防护中扮演了重要的角色,其研究工作也取得了丰富的成果,尤其是出水离岸堤,其防护机理已在很大程度上为人们所了解. 近年来,出于对海岸环境的考虑,国际上对离岸堤的研究已逐渐从出水离岸堤转变为离岸潜堤,一些发达国家已开始致力于以离岸潜堤工程逐步代替原先的出水

离岸堤工程,尽管有失败的例子发生,但依然取得了不错的成果.目前,我国在出水离岸堤的研究与应用方面已取得了一定的成果^[6-7,25,44],但离岸潜堤护岸的研究仍相对较少.文献[45-46]曾对飞雁滩油田的潜堤防护机理进行研究,但主要侧重点在于不同潜堤结构型式对消浪的影响,而国内其它涉及到离岸潜堤的研究工作也大多侧重于波浪动力方面.鉴于此,本文认为就离岸潜堤的防护机理研究可在以下几方面作进一步的探索:

(1) 基于潜堤在波浪数值模拟中的特殊性,应采用非线性波浪模式建立近岸波流统一模型,对离岸潜堤附近的波、流场进行计算模拟,并以此为基础,结合泥沙输移和地形演变模型建立海岸区域数学模型,以做到对离岸潜堤防护下岸滩响应的准确模拟.

(2) 在水槽波浪动力试验研究的基础上,采用港池物理模型试验对离岸潜堤造成的破波增水、波生近岸环流及岸滩地形演变进行试验研究.

(3) 结合数学模型和物理模型,系统地研究不同堤顶高程、不同堤顶宽度、不同堤长-离岸距离比以及不同破波线位置-离岸距离比情况下离岸潜堤后的泥沙淤积情况,分析可能发生侵蚀的临界指标,定量上掌握离岸潜堤的防护机理.

(4) 研究特殊潜堤结构形式或布置方式(如文献[34]提出的系列潜堤)对离岸潜堤后波浪以及近岸环流的改善,以促使泥沙在掩护区的淤积,使离岸潜堤在海岸防护中得到更为有效的应用.

(5) 对于一些由于泥沙来源阻断而遭受侵蚀的沙质海滩,如我国海南的三亚湾海滩,国际上多采用人工养滩加潜堤防护的形式,即形成所谓的栖息海滩(perched beach),注重这类海岸防护形式的研究,对我国沙质海滩旅游资源的恢复具有相当重要的意义.

参 考 文 献:

- [1] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 468-476. (XIA Dong-xing, WANG Wen-hai, WU Gui-qiu, et al. Coastal erosion in China[J]. Acta Geographica Sinica, 1993, 48(5): 468-476. (in Chinese))
- [2] GROENEWOUD M D, VAN DE GRAAFF J, CLAESSEN E W M, et al. Effect of submerged breakwater on profile development [C]//EDGE B L. Proc 25th Int Conf on Coastal Eng, Orlando, USA: ASCE, 1996: 2428-2441.
- [3] DEAN R G, DALRYMPLE R A. Coastal processes with engineering applications[M]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2004: 343-411.
- [4] 夏益民. 海岸稳定工程措施研究[J]. 海洋工程, 1991, 9(4): 45-58. (XIA Yi-min. Study on engineering means of coastal stability[J]. The Ocean Eng, 1991, 9(4): 45-58. (in Chinese))
- [5] SEIJI M, UDA T, TANAKA S. Statistical study on the effect and stability of detached breakwater[J]. Coastal Engineering in Japan, 1987, 30(1): 131-141.
- [6] 刘家驹, 喻国华. 海岸工程泥沙的研究和应用[J]. 水利水运科学研究, 1995(3): 221-233. (LIU Jia-ju, YU Guo-hua. Study and application on sediment of coastal engineering[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1995(3): 221-233. (in Chinese))
- [7] 黎维祥, 刘家驹. 沙质海岸突式建筑物下离岸堤防护的试验研究[J]. 水利水运科学研究, 1991(3): 227-232. (LI Wei-xiang, LIU Jia-ju. An experimental study of shore protection on sandy coast using offshore breakwaters at the downdrift of a pile structure[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1991(3): 227-232. (in Chinese))
- [8] SILVESTER R. Growth of crenulate shaped bays equilibrium[J]. J Waterways and Harbors Div, 1970, 96(WW2): 275-287.
- [9] GOURLAY M R. Wave set-up and wave generated currents on the lee of a breakwater or headland[C]//ASCE. Proc 14th Int Conf on Coastal Eng. Japan: ASCE, 1974: 1976-1995.
- [10] GOURLAY M R. Non-uniform alongshore currents[C]//ASCE. Proc 15th Int Conf on Coastal Eng. Hawaii: ASCE, 1976: 701-720.
- [11] SAUVAGE DE ST MARC M G, VINCENT M G. Transport littoral formation de fleches et de tombolo[C]//JOHNSON J W. Proc 5th Int Conf on Coastal Eng. France: ASCE, 1954: 296-327.
- [12] NAKASHIMA L D, POPE J, MOSSA J, et al. Initial response of a segmented breakwater system Holly Beach, Louisiana[C]//KRAUS N C. Coastal Sediments '87. New Orleans: ASCE, 1987: 1399-1414.

- [13] INGLE J C. The movement of beach sand: developments in sedimentology[M]. 5th ed. New York: Elsevier Publ, 1966: 221.
- [14] SHINAHARA K, TSUBAKI T. Model study on the change of shoreline of sandy beach by the offshore breakwater[C]//JONNSON J W. Proc 10th Int Conf on Coastal Eng. Tokyo: ASCE, 1966: 550-563.
- [15] ROSEN D S, VAJDA M. Sedimentological influence of detached breakwater[C]//EDGE B L. Proc 18th Int Conf on Coastal Eng. Cape Town: ASCE, 1982: 1930-1949.
- [16] SUH K, DALRYPLE R A. Offshore breakwater in laboratory and field[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1987, 113(2): 105-121.
- [17] HSU J R C, SILVESTER R. Accretion behind single offshore breakwater[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1990, 116(3): 362-379.
- [18] NIR Y. Offshore artificial structure and their influence on the Israel and Sinai Mediterranean beach[C]//EDGE B L. Proc 18th Int Conf on Coastal Eng. Cape Town: ASCE, 1982: 1837-1856.
- [19] DALLY W R, POPE J. Detached breakwater for shore protection[R]. Vicksburg: Army Engineers Waterways Experiment Station, 1986.
- [20] HARRIS M M, HERBICH J B. Effects of breakwater spacing on sand entrapment[J]. J Hydraulic Res, 1986, 24(5): 347-357.
- [21] MING D H, CHIEW Y M. Shoreline changes behind detached breakwater[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2000, 126(2): 63-70.
- [22] MCCORMICK M E. Equilibrium shoreline response to breakwaters[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1993, 119(6): 657-670.
- [23] POPE J, DEAN J L. Development of design criteria for segmented breakwater[C]//EDGE B L. Proc 20th Int Conf on Coastal Eng. Taipei: ASCE, 1986: 2144-2158.
- [24] AHRENS J P, COX J. Design and performance of reef breakwaters[J]. Journal of Coastal Research, 1990, SI7: 61-75.
- [25] 谢世楞. 离岸堤在海岸工程中的应用[J]. 海洋技术, 1999, 18(4): 39-45. (XIE Shi-leng. The application of offshore breakwater in coastal engineering[J]. Ocean Technology, 1999, 18(4): 39-45. (in Chinese))
- [26] YASSO W E. Plan geometry of headland bay beaches[J]. Journal of Geology, 1965, 73: 702-714.
- [27] HSU J R C, SILVESTER R, XIA Y M. Static equilibrium bays: new relationships[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1989, 115(3): 285-298.
- [28] HSU T W, JAN C D, WEN C C. Modified McCormicks model for equilibrium shoreline behind a detached breakwater[J]. Ocean Engineering, 2003, 30: 1887-1897.
- [29] DEGUCHI I, SEWARAGI T. Beach fill at two coasts of different configuration[C]//EDGE B L. Proc 20th Int Conf on Coastal Eng. Taipei: ASCE, 1986: 1032-1046.
- [30] DOUGLASS L, WEGGEL J R. Performance of a perched Beach-Slaughter Beach, Delaware[C]//KRAUS N C. Coastal Sediments '87. New Orleans: ASCE, 1987: 1385-1398.
- [31] DEAN R G, CHEN R, BROWDER A E. Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA [J]. Coastal Engineering, 1997, 29: 291-315.
- [32] TOMASSICCHIO U. Submerged breakwaters for the defence of the shoreline at Ostia field experiences, comparison[C]//EDGE B L. Proc 25th Int Conf on Coastal Eng. Orlando: ASCE, 1996: 2404-2417.
- [33] RANASINGHE R, TURNER I L. Shoreline response to submerged structure: a review[J]. Coastal Engineering, 2006, 53: 65-79.
- [34] NOBUOKA H, IRIE I, KATO H, et al. Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection[C]//EDGE B L. Proc 25th Int Conf on Coastal Eng. Orlando: ASCE, 1996: 2391-2403.
- [35] ZYSERMAN J A, JORGENSEN K, CHRISTENSEN E D. Sediment transport and morphology in the vicinity of shore-parallel breakwaters[C]//LOSADA I J. Coastal Structures '99. Netherlands: Balkema, 2000: 857-863.
- [36] LESSER G R, DE VROEG J H, ROELVINK J A, et al. Modelling the morphological impact of submerged offshore breakwater [C]//Coastal Sediments '03. Florida: World Scientific, 2003.
- [37] VAN DE BIEZEN S C, ROELVINK J A, VAN DE GRAAFF J, et al. 2DH morphological modelling of submerged breakwater [C]//EDGE B L. Proc 26th Int Conf on Coastal Eng. Denmark: ASCE, 1998: 2028-2041.
- [38] SANCHEZ-ARCILLA A, AISINA J M, CACERES I, et al. Morphodynamics on a beach with a submerged detached breakwater [C]//SMITH J M. Proc 29th Int Conf on Coastal Eng. Singapore: World Scientific, 2004: 2836-2848.

- [39] DEAN R G, BROWDER A E, GOODRICH M S, et al. Model tests of the proposed P E P reef installation at Vero Beach, Florida[R]. USA: Dept of Coastal and Oceanographic Engineering, University of Florida, 1994.
- [40] LOVELESS J, MECLEOD B. The influence of set-up currents on sediment movement behind detached breakwater[C]//KRAUS N C, MCDUGAL W G. Coastal Sediments '99. New York: ASCE, 1999: 2026-2041.
- [41] TURNER I L, LEYDEN V M, COX R J, et al. Physical model study of the gold coast artificial reef[J]. Journal of Coastal Research, 2001, SI29: 131-146.
- [42] MARTINELLI L, ZANUTTIGH B, LAMBERTI A. Hydrodynamic and morphodynamic response of isolated and multiple low crested structure: experiments and simulations[J]. Coastal Engineering, 2006, 53: 363-379.
- [43] RANASINGHE R S, SATO S. Beach morphology behind single impermeable submerged breakwater under obliquely incident waves[J]. Coastal Engineering Journal, 2007, 49(1): 1-24.
- [44] 喻国华, 鲍曙东. 吕泗海滩防蚀促淤的试验研究[J]. 海洋工程, 1992, 10(1): 65-74. (YU Guo-hua, BAO Shu-dong. Experimental study of erosion prevention on siltation acceleration on Lusi beach[J]. The Ocean Eng, 1992, 10(1): 65-74. (in Chinese))
- [45] 蒲高军, 张日向, 廖绍华. 开敞式滩海油田保滩促淤工程研究[J]. 海岸工程, 2005, 24(2): 20-29. (PU Gao-jun, ZHANG Ri-xiang, LIAO Shao-hua. Study of beach protection and siltation promotion works for open shallow water oil field[J]. Coastal Eng, 2005, 24(2): 20-29. (in Chinese))
- [46] 陈兆林. 不同结构离岸式潜堤消浪效果试验研究[J]. 海岸工程, 2005, 24(2): 1-6. (CHEN Zhao-lin. Experimental study of wave dissipating effect of offshore submerged dikes with different structures[J]. Coastal Eng, 2005, 24(2): 1-6. (in Chinese))

Application and discussion of detached breakwater in coastal protection

Ji Xiao-qiang, Lu Pei-dong, Yu Guo-hua

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Coastal protection has become an important aspect of coastal engineering since coastal erosion is getting more and more serious. By reviewing some commonly used coastal protection methods, it is proposed that detached breakwater is an effective and widely applied approach. According to the research results at home and abroad, the protective mechanisms of emerged offshore breakwater are described in hydrodynamic processes, sediment transports and beach response. The empirical prediction formulas of beach response and the stable shoreline morphology models are summarized in the following part. Finally, the present studies of detached submerged breakwater are reviewed, and the protective mechanisms of submerged breakwater are preliminarily analyzed. Based on these analyses, some suggestions are given for the further researches of submerged breakwater in coastal protection.

Key words: detached breakwater; coastal protection; shoreline response