

二维砂质海滩的堤前冲刷试验研究

童朝锋, 盛祖荫, 郑金海

(河海大学海岸及海洋工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 从波浪及泥沙运动的相似律出发, 得到海滩模型的基本相似准则, 并采用天然沙的正态模型进行海堤前砂质海滩的冲刷试验, 试验结果可为海滩剖面的维护及海堤布置提供设计依据。

关键词 砂质海滩 相似准则 冲刷试验

中图分类号 P737

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2002)04-0066-05

我国漫长的海岸线时常受到波浪的侵蚀, 沿海经济较发达地区的防护, 特别是可以供旅游开发的砂质海滩的维护就显得十分重要, 为此, 在波浪作用下滩面泥沙冲刷及海堤的安全是一个现实的工程技术问题。

目前, 砂质海滩冲刷试验相似律的确定尚不成熟^[1~4], 海滩建有海堤工程后, 其堤前冲刷演变的模型试验开展也甚少。本文将波浪对堤前砂质海滩剖面冲刷演变的有关相似准则进行探讨, 并进行堤前海滩冲刷模型试验, 以便为海堤工程安全及合理的布置提供设计依据。

1 海滩模型相似准则

影响海滩剖面冲淤演变的主要因素是波浪动力及其作用下的泥沙运动, 因此, 要正确模拟海滩冲刷变化必须首先保证波浪以及泥沙运动的相似。

1.1 波浪运动相似

行近波浪在海滩上的第一次破碎标志着近岸海滩冲刷演变的开始, 而波浪在滩前的破波类型直接影响到泥沙输送强度以及岸滩冲淤状态, 国内外学者为此提出了判定波浪破碎形态的指标。Battjes(1974)提出了反映

破波特征的参数 $\zeta = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_0/L_0}}$, 其中 $\tan \theta$ 为海滩原始坡度, H_0/L_0 表示深水波陡, 并且用此特征参数给出定床条件下的波浪破碎标准。但是在动床条件下, 波浪作用下的

泥沙运动使海滩坡度会发生改变, 所以国内有学者建议采用类似的破波参数 $B_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}}$, 并给出了动床条件下的破波类型划分标准。其中 $\tan \beta$ 为动床特征坡度角, 即砂

滩剖面中立点 A 与剖面零水位点 B 连线坡度, 如图 1。

若要求海滩上破波形态相似, 即满足判定参数 $\lambda_\zeta = 1$ 。由此可以得到波浪的几何尺度相似要求:

$$\lambda_H = \lambda_L (\lambda_h / \lambda_l) \quad (1)$$

式中 λ_H, λ_L ——波高比尺及波长比尺; λ_h, λ_l ——模型的垂直比尺和水平比尺。

根据 Airy 波理论可以推导波周期和床面水质点最大轨迹速度的相似关系:

$$\lambda_T = \lambda_L^{1/2} \quad (2)$$

$$\lambda_{u_m} = \frac{\lambda_H}{\lambda_L^{1/2}} \quad (3)$$

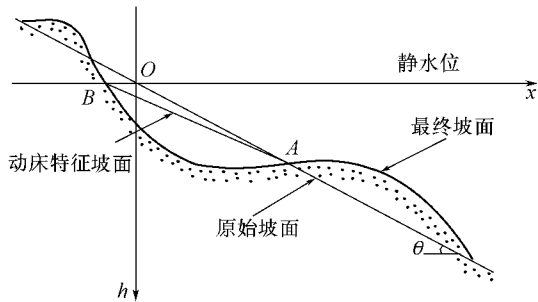


图 1 砂质海滩剖面简图

Fig.1 Sandy beach profile

式中 λ_T ——波周期比尺; λ_{u_m} ——水质点最大速度比尺.

1.2 滩面水流

滩面水流是指波浪上爬所形成的上爬流和回落流,其强度直接影响到岸滩泥沙的向、离岸运动.考虑滩面水流运动以重力和惯性力控制,佛罗德数 Fr 是重要的参数,根据此参数相等可以导得相似关系:

$$\lambda_u = \lambda_H^{1/2} \tag{4}$$

式中 λ_u 为水质点速度比尺.

1.3 泥沙运动

波浪作用引起的海滩泥沙运动包括两个部分,即破波区内的波浪掀沙与破波区外的横向输沙运动.在破波区内,破波掀沙作用引起泥沙悬浮,泥沙运动的条件为^[5]

$$u/\omega = x/y \tag{5}$$

式中 x, y ——泥沙颗粒水平及垂直位移; ω ——泥沙沉速.相似关系为

$$\lambda_\omega = \lambda_u (\lambda_h/\lambda_l) \tag{6}$$

根据 Sunamura 的研究,破波区外横向输沙可表示为^[6]

$$\left. \begin{aligned} F > 0.28 U_r^{1/4} & \quad \text{泥沙净离岸运动} \\ F < 0.28 U_r^{1/4} & \quad \text{泥沙净向岸运动} \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

式中 $F = \frac{\rho u_m^2}{(\rho_s - \rho) g D} \left(\frac{D}{a_m}\right)^{1/2}$, $U_r = \frac{H L^2}{h^3}$, a_m 为床面处波浪最大振幅.则粒径相似关系式为

$$\lambda_D = (\lambda_{(\rho_s - \rho)/\rho})^{-2} \lambda_H^{5/2} \lambda_h^{3/2} \tag{8}$$

式中 D ——泥沙的粒径; ρ, ρ_s ——水及泥沙的密度.

泥沙在波浪作用下的起动相似也是海滩演变相似的重要条件,但是在波浪作用下的泥沙起动较水流作用下的泥沙起动复杂,目前国内应用较多的公式为^[7]

$$H_* = 0.1 \left(\frac{L_0}{D}\right)^{1/3} \left\{ \frac{L_0 \operatorname{sh}(2kh)}{\pi g} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D + \frac{0.486}{D}\right) \right\}^{1/2} \tag{9}$$

式中 H_* 为泥沙起动波高, $0.486/D$ 表示泥沙的粘着力作用(对砂质海滩此值可以略去),于是相似关系为

$$\lambda_D = (\lambda_{(\rho_s - \rho)/\rho})^{-3} (\lambda_H)^6 (\lambda_h)^{-5} \tag{10}$$

2 模型比尺关系的确定和模型沙的选择

综上所述,本文采用了以下模型比尺关系:

$$\lambda_H = \lambda_L = \lambda_h = \lambda_l \tag{11}$$

$$\lambda_\omega = \lambda_u = \lambda_T = \lambda_h^{1/2} \tag{12}$$

利用式(11)来确定海滩模型的比尺和波浪模型的比尺,利用式(12)来确定模型沙的沉降速度.

在平衡海滩相似律的研究中,采用正态还是变态模型,模型沙采用轻质沙还是天然沙,至今仍在试验研究中.

对于中粗型砂质海滩,其床面阻力耗散为主要因素.若对于坡度较平缓的粉沙质海滩,则波浪作用较为重要,需要考虑变态导致的波浪变化.而本文所考虑的砂质海滩为中粗沙的情况.为此,采用正态模型是较为合理的.

选择正态模型,正态波浪可以满足波浪水质运动相似、破波相似,可以保证二维海滩平衡剖面的演变相似.

使用天然沙作为模型沙还是轻质沙作为模型沙,目前还有争论.使用轻质沙固然有它的一定合理性,特别是着重研究破波区外的泥沙运动,合适的轻质沙可以保证比尺(8)或(10)的成立,若依此式来计算天然模型沙的粒径,往往计算出的模型沙过细而不可行.本文研究的是海堤前的泥沙运动情况,泥沙为中粗沙,堤在破波带内,悬浮是泥沙的主要运动形式,而且轻质沙与天然沙毕竟有本质的不同,例如它们的休止角 Φ 、渗透性等,如果采用轻质沙将使破波区内的泥沙运动和海滩侵蚀趋势相似条件得不到满足,将导致堤前破波区

内泥沙运动模拟的失真. 因此必须满足式(6)以保证试验能正确模拟现场的实际情况.

泥沙粒径可以由泥沙的沉降速度确定,常用的有式(13),并由式(9)来验证,以保证试验中模型沙在试验波浪条件下能满足泥沙起动条件.

$$\omega = -4 \frac{K_2}{K_1} \frac{\nu}{D} + \sqrt{\left(4 \frac{K_2}{K_1} \frac{\nu}{D}\right)^2 + \frac{4}{3 K_1} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D}$$

(13)

式中: ν ——运动粘滞系数; γ_s, γ ——泥沙和水体的容重; K_1, K_2 ——系数, $K_1 = 1.22, K_2 = 4.27$.

3 砂质海滩的堤前冲刷试验

本文确定上述相似律比尺关系,采用天然沙进行正态模型试验.

3.1 试验参数

本课题选用江苏北部供开发旅游的砂质海滩进行海堤前泥沙冲刷试验研究. 其滩面泥沙粒径为 1.20 mm,为中粗沙,滩前底标高为 -0.5 m,采用天然沙进行正态模型试验,其相似比尺关系及模型要数如表 1 和表 2. 试验设计了 3 套方案,见图 2.

表 1 模型比尺参数

Table 1 Parameters of model scale

比尺名称	比尺关系	计算值	采用值
波高比尺	λ_h	20	20
水平比尺	$\lambda_l = \lambda_h$	20	20
周期比尺	$\lambda_T = \lambda_h^{1/2}$	4.47	4.47
流速比尺	$\lambda_u = \lambda_h^{1/2}$	4.47	4.47
沉速比尺	$\lambda_w = \lambda_h^{1/2}$	4.47	4.56

表 2 模型各要素的选取

Table 2 Parameters of prototype and model

要素	原型	模型
波高/m	2.46	0.123
水深/m	5.10	0.255
周期/s	8.16	1.83
泥沙粒径/mm	1.20	0.25
滩面坡度	1:8	1:8

注 表中波要素均为 50 年一遇.

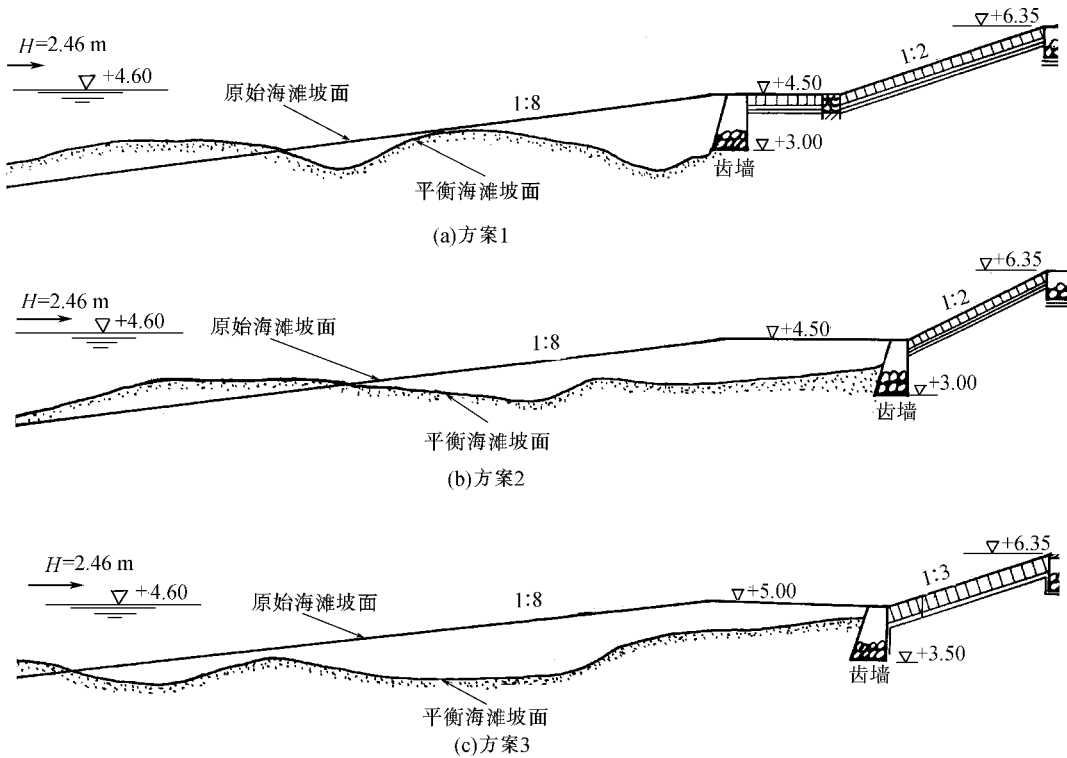


图 2 海滩剖面图

Fig.2 Beach profile

3.2 试验设备和量测方法

试验在河海大学 50 m × 0.5 m × 1.2 m 的波浪水槽中进行,采用规则波,水槽尾部安装消波装置.波高的

量测用北京水科院产 SG200 型水工数据采集仪,量测波高精度小于 0.1 mm,地形量测采用移动式测针地形量测装置,沿水槽中线的平行线三个横向剖面,取平均情况为地形变化数据. 试验水位由水槽中部安装测针控制,两端安装水位调节装置. 事先率定试验波高,试验过程中同时记录波击的次数和时间.

3.3 模型验证

验证试验根据 9711 号台风过境前后的海滩剖面变化,当时的波浪要素以及水位与上述 50 年一遇的波要素和水位相近,本文验证就取以上各要素. 通过模型试验研究可以看出,当时测量的断面与试验模拟的断面基本相符(如图 3,图中 1:8 为原始坡度),只是在沙坝部分尚不能很好满足. 笔者认为这与当地存在沿岸纵向输沙有关.

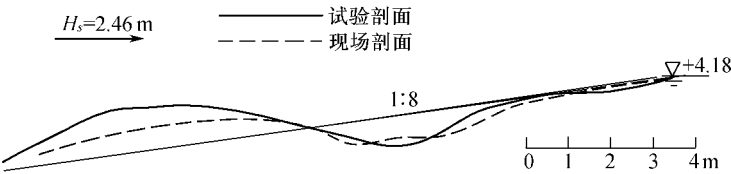


图 3 海滩冲刷试验验证情况
Fig.3 Verification of beach erosion

3.4 试验结果和分析

对 3 种不同的布置方案进行试验,经过相当于原型 24 h 波浪作用以后得到各情况下的平衡剖面,如图 2.

方案 1(图 2(a)) 堤前滩面试验结果在齿墙形成一宽 5 m、深 1.5 m、最大深可达 1.9 m 的冲刷坑,说明波浪冲刷下会导致齿墙失稳. 原因为波浪在齿墙前发生卷破,冲击力很强的上爬水流把部分泥沙带上齿墙平台,而大部分泥沙在强烈的波浪紊动水流作用下被带到齿墙外海一侧,在齿墙前形成明显的冲刷坑,而冲刷坑的形成又使齿墙墙面的反射作用增大,即齿墙陡壁对破波产生的阻碍作用明显加剧,随着波浪的继续打击,波浪破碎后的三维紊动水流使墙前冲刷坑逐渐加大加深. 当冲刷坑增大到一定程度,波浪动力无法再卷走泥沙时,海滩剖面达到平衡.

方案 2(图 2(b)) 本方案为齿墙后移 4.25 m. 试验结果在沙滩斜坡上存在两个明显的冲刷坑,第 1 个坑为波浪卷破后强烈的紊动水流所造成,此时带至外海的泥沙形成水下沙坝. 由于水下沙坝的形成和发展,使波浪卷破点向前移动,则破碎的上爬水流和回落又造成第 2 个冲刷坑. 由于后移的齿墙离上爬水流冲击点较远,冲刷平衡形成的剖面,虽然齿墙顶坎出露,但冲刷主体没有发展到齿墙前沿. 齿墙墙前的冲刷深度为 0.8 m 左右,冲刷坑主体横宽达 12 m,均深 1 m.

方案 3(图 2(c)) 本方案齿墙增高至 +5.00 m,堤前斜坡为 1:3. 滩肩高程的提高,使静水面与沙滩斜坡的交点距离齿墙前沿达 8 m,当波浪在斜坡上行近破碎的位置距齿墙前沿也更远,而堤面的回落水流强度由于堤面坡度的减缓也大为减小,从而避免了堤根的冲刷. 试验结果表明,冲刷坑主体距齿墙前沿达 10 m,主体冲刷坑横宽达 12 m,均深 1.0 m,齿墙前坎实际冲刷深度为 0.4 m.

4 结 语

- a. 影响砂质海滩堤前剖面演变的主要因素是波浪动力与泥沙及海堤相互作用,特别是破波形态至关重要,要正确模拟堤前海滩冲刷必须保证这些影响因素的相似.
- b. 对于中粗型砂质海滩的物理模拟采用了正态模型,模型沙采用了天然沙. 试验证明这种模型比尺和模型沙的选择是正确的,特别是水流泥沙运动比较剧烈的破波地带,用式(11)和式(12)作为模型设计的依据,可以较好地满足破波带的水流泥沙运动特征.
- c. 海堤前为近破波,则会加剧滩面水流和泥沙运动的剧烈程度,从而增加堤前滩面的冲刷,影响堤的稳定性,因此堤的位置应该避开波浪破碎区. 而对于堤的坡度也有所讲究,应尽量减缓堤的坡度以减小回落流的强度,从而减小对堤根的冲刷.
- d. 本文只涉及到二维沙滩剖面的情况,若存在沿岸输沙,最好同时考虑沿岸流的影响,以保证海堤的稳定安全.

参考文献：

[1] Noda E K. Equilibrium beach profile scale model relationship [J] . Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, 1972,(11) :511 ~ 528.

[2] Hsiang Wang,Takao Toue,Hans H Dette.Movable bed modeling criteria for beach profile response[A] . In :Billy L Edge,eds.Proc 22th CEC[C] .New York :ASCE,1990.2566 ~ 2579.

[3] Hideaki Nada. Scale relations of equilibrium beach profile[A] . In :Billy L Edge,eds. Proc 16th ICCE[C] .New York :ASCE,1978.1531 ~ 1541.

[4] Dean R G. Physical modeling of littoral processes[A] . In :Dalrymple R A,eds.Proc of Hydraulic Modeling '85 [C] . San Francissco : Netherlands Press,1985.1461 ~ 1478.

[5] 徐啸. 波流共同作用下浑水动床整体模型的比尺设计及模型沙选择[J] . 泥沙研究,1998(2) :17 ~ 25.

[6] Sunamura T. A Laboratory study of offshore transport of sediment and a model for eroding beaches[A] . In :Billy L Edge,eds.Proc 17th CEC[C] .1980.1051 ~ 1069.

[7] 刘家驹. 波浪作用下泥沙运动研究[A] . 见 :中国水利学会泥沙专业委员会编. 全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集 [C] .北京 :中国建材工业出版社,1992.145 ~ 177.

Experimental study on sandy beach erosion in front of seawalls

TONG Chao-feng, SHENG Zu-yin, ZHENG Jin-hai

(Research Institute of Coastal & Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract :Based on the similarity law of wave action and sediment motion, the similitude criterion for the sandy beach model is derived. A model test of sandy beach erosion in front of a seawall is performed by use of the normal model of natural sand. The result provides a basis for maintenance of beaches and disposal of seawalls.

Key words :sandy beach ; similitude criterion ; erosion test

+++++

·简讯·

当前世界上已建及在建的碾压混凝土拱坝

目前世界上只有南非和中国建有碾压混凝土拱坝,南非 3 座,中国 8 座.最早的碾压混凝土重力拱坝是南非的克勒尔波特坝,最早的碾压混凝土双曲拱坝是中国的溪柄坝.目前最高的碾压混凝土重力拱坝是中国的普定坝,最高的碾压混凝土双曲拱坝是中国的沙牌坝.见表 1.

表 1 世界碾压混凝土拱坝

坝 名	地 点	河 流	坝高 /m	坝顶 长/m	坝顶 宽/m	坝底 宽/m	厚高 比	坝身体积 /万 m ³	其中碾 压混凝 土/万 m ³	库容 /万 m ³	装机 /万 kW	建成 年份	坝型
克勒尔波特	南 非	九 河	50	200				5.9	4.5	13700		1989	重力拱坝
沃尔温丹	南 非	大布雷克河	70	268				21	18	2400		1990	重力拱坝
派克斯顿	南 非	特苏尔武河	17	70				0.3	0.3	100		1992	重力拱坝
普 定	中国贵州	三岔河	75	196	6.3	28.2	0.376	13.7	10.3	42000	7.5	1993	重力拱坝
温泉堡	中国河北	汤 河	48	170.5	5	13.8	0.288	6.25	5.5	700	0.04	1994	单 拱 坝
溪 柄	中国福建	溪柄溪	63.5	96	5	12	0.189	3.3	2.5	900	0.25	1996	双曲拱坝
红 波	中国云南	沙朗河	55.2	244	4.5	26.5	0.48	7.8	6.7			1999	重 力 坝
龙 首	中国甘肃	黑 河	80	140.8	5	13.5	0.169	21.7	19.5	1320	5.2	2001	双曲拱坝
石门子	中国新疆	塔西河	109	187	5	30	0.275	21.1	18.9	8000	0.3	2001	双曲拱坝
沙 牌	中国四川	草坡河	132	258	9.5	28	0.212	39.2	36.5	1800	3.6	在建中	双曲拱坝
蔺河口	中国陕西	岚 河	100	311	6	27.2	0.272	29.4	22.9	14700	7.2	在建中	双曲拱坝

(吴 高供稿)