

海啸波作用下植被区海堤局部冲刷试验

蒋昌波^{1,2,3}, 郑睿¹, 陈杰^{1,2,3}, 邓斌^{1,2,3}, 冯璐¹

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3. 洞庭湖水环境治理与水生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:近年来频发的海啸造成了沿岸建筑物周围剧烈的冲刷,而植物具有很好的减小海啸灾害的作用。采用 PVC 圆管概化模拟刚性植物,选取孤立波模拟海啸波,通过改变入射波高、植物带长度和密度、堤顶出水高度,研究植物对海啸波作用下海堤局部冲刷的影响,建立了海堤提前冲刷坑、淤积沙坝、冲淤平衡点相对水平位置的尺度与植物带的长度和密度、波高、堤顶出水高度、泥沙比重以及岸滩坡度之间的关系式。试验结果表明:植物对海堤局部冲淤变化产生显著影响,植物带使得堤后近岸侧相对最大冲刷深度显著减小,堤前离岸侧冲刷位置由原堤脚处前移至植物带所在位置,冲刷范围大幅增加;提前冲淤面积受入射波高和植物因素的共同影响,在同一植物模型下,冲刷坑面积和淤积沙坝面积都随入射波高的增大而增加;适当增大植物带密度,优化植物分布方式,可有效减弱海啸波对海堤的冲刷危害。

关键词:海啸波;植物;海堤;冲淤面积比;冲淤平衡点

中图分类号:TV139.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2019)06-0024-07

Experimental study on local scour of a seawall in vegetation area under tsunami waves//JIANG Changbo^{1, 2, 3}, ZHENG Rui¹, CHEN Jie^{1, 2, 3}, DENG Bin^{1, 2, 3}, FENG Lu¹(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: In recent years, severe scour occurs near costal structures due to frequent tsunami waves and tsunami disasters can be alleviated by vegetation. PVC tubes were chosen to simulate generalized rigid plants, and solitary waves were selected to model tsunami waves. By changing the incident wave height, the length and density of the vegetation belt and the height of the seawall, the effects of vegetation on the morphological change of a coastal zone around seawall were investigated. Empirical relations were derived to describe the relationships between the area of erosion, the area of bar as well as the balanced points of scouring and silting and the length and density of the vegetation belt, wave height, the height of water surface above the seawall, specific weight and beach slope. The results show that vegetation has a powerful impact on the evolution of beach profiles. The existence of vegetation can significantly reduce the maximum relative scouring depth inshore the seawall and the scouring location moves from the dyke toe to the vegetation belt with increasing scouring range offshore the seawall. Erosion and deposition area is affected by both the incident wave height and vegetation factors, and for the same plant model, the area of scour hole and deposit sand bar increases with higher incident wave height. The hazards of tsunami wave on seawalls can be significantly weakened with an increasing density and optimum distribution of plants.

Key words: tsunami wave; vegetation; seawall; area ratio between erosion and deposition; balanced point of scouring and silting

海啸是一种极具破坏力的海浪,不仅会引起岸滩的侵蚀和淤积变化^[1-3],而且在建筑物周围产生剧烈的淘刷^[4-6],严重影响其稳定性^[7-9]。海堤作为一种常见的海岸防护建筑物,能有效抵挡海啸灾害,因此如何减小海啸引起的海堤局部冲刷问题已成为海岸工程的研究热点。

近年来,国内外学者针对近岸海堤局部冲刷问题开展了大量的研究工作。陈杰等^[10-11]对海啸波作用下直立堤、潜堤局部冲刷规律进行了研究;Sumer等^[12]对防波堤、潜堤周围的冲刷过程进行了归纳总结,得出了冲刷深度计算经验公式;高学平等^[13-14]探讨了堤前滩地的冲淤形态和冲刷机理;庞

启秀等^[15]研究了潜堤高度对局部冲刷的影响。这些研究主要分析了波浪与海堤的相互作用。王俊等^[16-22]研究发现植物的消浪缓流特性会改变波浪的破碎和爬高,对岸滩冲淤变化产生较大影响。而现阶段综合考虑植被因素影响下海堤局部冲淤问题的研究较为少见,目前蒋昌波等^[23]已开展了植物对孤立波作用下直立堤局部冲刷的试验研究,发现植物带对海堤局部冲刷形态的影响较大,但尚未对冲淤面积和冲淤平衡点的变化进行深入探讨和分析。

为弥补现有研究不足,本文拟在已有的研究基础上,开展植被区海啸波作用下海堤附近床面冲淤变化试验,探讨植物因素对冲淤面积、最大冲淤高度以及冲淤平衡点的影响。

1 试验方案

试验在长沙理工大学水利实验中心波浪水槽内进行,水槽长 40 m、宽 0.5 m、高 0.8 m,配有造波系统,两侧为透明玻璃,且两端设有良好的消波设施。试验布置如图 1 所示,沿水槽长度方向为 x 轴,宽度方向为 y 轴,高度方向为 z 轴,坐标原点位于斜坡起点。参考蒋昌波等^[23]试验,将海岸地形简化为 1:10 和 1:20 的组合斜坡,并在水深 0.35 m 处变坡。参考众多海啸泥沙试验^[1,4,5,17],模型用沙不考虑比尺效应,斜坡采用粒径 d 为 0.293 mm 的细颗粒均匀沙,以保证波浪作用下泥沙的起动符合实际情况中泥沙起动的条件。

现场观测表明,海啸波的首波与孤立波非常接近,因此目前学术界多采用孤立波来近似模拟海啸波。为了更好地研究各因素对孤立波作用下海堤局

部冲刷的影响,引入孤立波波长因素,理论上讲,孤立波波长为无限长,但由于孤立波的波面曲线显示,在离波峰 $x = \pm \infty$ 处,曲线均无限地接近于静水表面,且输送的水体中,绝大部分都集中在波峰附近,因此定义孤立波波长 $L = 2\pi/k = 4\pi\sqrt{h^3/(3H)}$,其中 H 为孤立波入射波高, h 为水深, k 为相对系数。考虑海堤尺寸与植物尺寸的差别以及造波机的性能,难以统一比尺。本文旨在对植物对海啸波作用下海堤局部冲刷的影响作机理性探究,因此将试验模型进行概化处理,海堤与波浪要素的比尺采用 1:100,植物模型比尺选取 1:20。海堤模型由混凝土制成, x 轴方向长 10 cm, y 轴方向宽 50 cm, z 轴方向的海堤出水高度 δ 随着试验工况的不同而改变,选用 0.10 m、0.05 m、0 m 3 种海堤出水高度,从斜坡坡脚处起位于 $x = 3.0$ m 处。刚性植物模型采用直径为 1.0 cm 的 PVC 圆管,高度 $h_v = 45$ cm 以保证均处于非淹没的状态,植物模型放置在 $x = 2.0 \sim 2.5$ m 处。根据植物的常见种植分布方式,选取了 3 种分布方案(图 2),其中间距 $l = 2.5$ cm。根据实际情况,结合本试验模型比尺以及实际底板尺寸,植物模型为矩形布置形式。试验采用下式计算植物带密度 φ :

$$\varphi = \frac{V_s}{V} = \frac{nS_i}{S} \tag{1}$$

式中: V_s 为植物分布区域的体积; V 为整个区域的体积; n 为植物根数; S_i 为单株植物横截面面积; S 为所有植物分布的区域面积。

试验工况如表 1 所示,选用 4 种不同的孤立波入射波高 H , 3 种不同的植物带密度 φ 和植物带长度 B , 5 种不同的植物模型,其中模型 M1、M2、M3 按照图 2 中

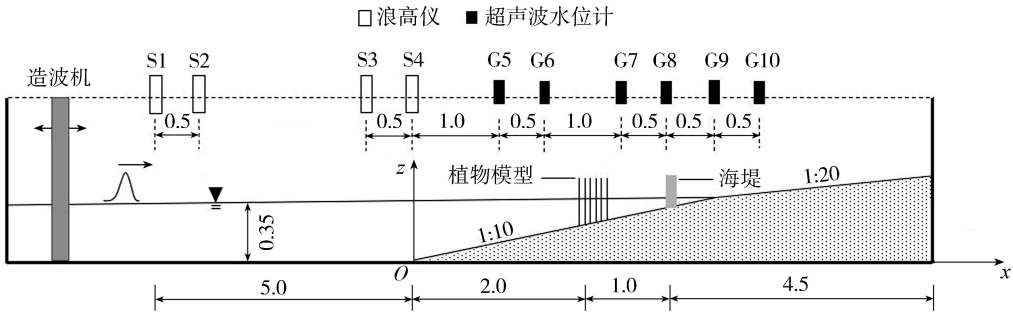


图 1 试验布置(单位:m)

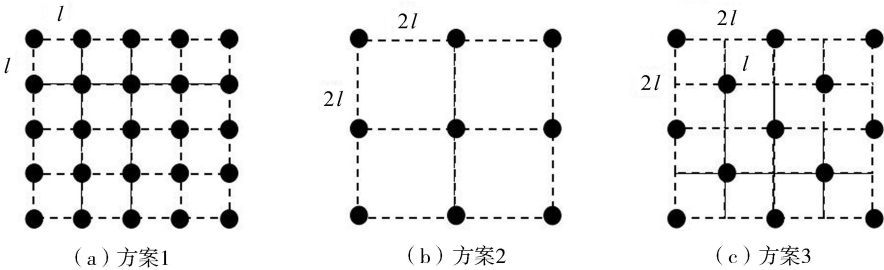


图 2 植物分布方案

方案 1 分布,模型 M4 按照方案 3 分布,模型 M5 按照方案 2 分布。考虑到海啸波一般是多次侵袭,因此试验进行多个波逐个作用,当一个波作用过后,15 ~ 20 min 后待水面平静再进行下一个波浪作用。通过前期预备试验发现,作用 15 个波后冲刷基本达到平衡状态,因此每组试验开始前测量初始地形,并在冲刷 15 个波之后测量最终地形。试验开始前对造波机的可靠性和重复性、地形变化的重复性、仪器的可靠性进行了验证。确定各仪器性能良好后,进入正式试验阶段。

表 1 试验工况					
组次	植物模型	B/m	φ	δ/m	H/m
1	M1	0.2	0.150 5	0.10	0.06
2					0.09
3					0.12
4					0.15
5	M2	0.3	0.150 5	0.10	0.06
6					0.09
7					0.12
8					0.15
9	M3	0.5	0.150 5	0.10	0.06
10					0.09
11					0.12
12					0.15
13	M4	0.5	0.075 2	0.10	0.06
14					0.09
15					0.12
16					0.15
17	M5	0.5	0.039 6	0.10	0.06
18					0.09
19					0.12
20					0.15
21	M5	0.5	0.039 6	0.05	0.06
22					0.09
23					0.12
24					0.15
25	M5	0.5	0.039 6	0	0.06
26					0.09
27					0.12
28					0.15

2 试验结果与分析

2.1 植物对海堤附近冲淤变化的影响

图 3 给出了有植物(模型 M2)与无植物情况下,海堤附近岸滩冲淤形态变化的对比,其中 $\delta=0.10\text{ m}$, $H=0.15\text{ m}$ 。由图 3 可以发现,植物的存在使得堤后相对最大冲刷深度显著减小,堤前岸滩剖面冲刷面积大幅增大,冲刷位置由原堤脚处前移至植物带所在位置,表明植物的消浪作用对海堤的防护效果较明显。同时原始地形冲淤量不明显平衡是由于波浪上爬后回落水流将堤后泥沙挟带至堤前落淤所致。

表 2 给出了有、无植物带时海堤堤前和堤后相对最大淤积高度 d_{dmax} 、相对最大冲刷深度 d_{emax} 的对

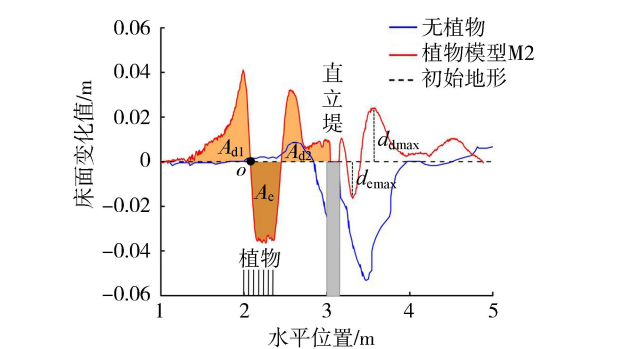


图 3 有、无植物情况下在海啸波作用下海堤局部冲淤的变化

比,其中, ω_1 、 ω_2 分别为植物带的存在对相对最大冲刷深度、相对最大淤积高度的影响百分比(百分比为正,表示增加;百分比为负,表示减小)。由表 2 可知,相比无植物情况,植物作用下堤后相对最大淤积高度增加超过 98%,海堤附近局部淤积效应增强。而植物带的存在减弱堤后局部冲刷效应,且减弱的显著程度随植物带分布方式的不同而不同。堤前相对最大冲刷深度则随植物带密度的不同而不同,在植物模型 M3 情况下,由于其沿水流向上长度最长、植物带密度最大,因而阻水性能更加显著,致使相对最大冲刷深度显著减小。而其他植物模型情况下反而导致堤前相对最大冲刷深度小幅增加(增加均小于 30%)。

表 2 有、无植物带时海堤相对最大冲淤高度								
植物模型	最大淤积高度				最大冲刷深度			
	堤前		堤后		堤前		堤后	
	d_{dmax}/m	$\omega_1/\%$	d_{dmax}/m	$\omega_1/\%$	d_{emax}/m	$\omega_2/\%$	d_{emax}/m	$\omega_2/\%$
M1	0.0145	41.38	0.0117	98.29	0.0373	28.95	0.0028	-94.6
M2	0.0402	78.85	0.0235	99.15	0.0356	25.56	0.0160	-69.2
M3	0.0291	70.79	0.0226	99.12	0.0068	-74.34	0.0069	-86.7
M4	0.0327	74.01	0.0118	98.31	0.0296	10.47	0.0318	-38.8
M5	0.0176	51.70	0.0169	98.82	0.0289	8.30	0.0136	-73.8
无植物	0.0085		0.0002		0.0265		0.0520	

2.2 植物对海堤堤前冲淤面积比的影响

如图 3 所示,采用无量纲参数冲淤面积比 λ 来表征植物因素对海堤堤前淤积沙坝面积与冲刷坑面积变化的影响,计算公式为

$$\lambda = \frac{A_d}{A_e} = \frac{A_{d1} + A_{d2}}{A_e} \tag{2}$$

式中: A_d 为海堤堤前淤积沙坝的总面积; A_{d1} 、 A_{d2} 分别为植物带前、后淤积沙坝的面积; A_e 为堤前冲刷坑的总面积。

图 4(a)和 4(b)分别给出了 B 、 φ 不同时堤前冲淤面积比 λ 随入射波高的变化对比,可以看出,同一植物模型情况下,随 H 的增大, λ 先增大后逐渐减小。这是因为随 H 的增大,波浪挟沙能力增强,经

过植物带时由于其消浪作用,导致部分泥沙沉积,淤积面积增大,故 λ 相应增加。但当 H 增大至0.12 m后,水质点运动速度增大,波能急剧增强,大量泥沙启动,冲刷明显加剧,故 λ 减小。当 $H=0.09$ m时,与其他模型相比,植物模型M4的 λ 明显偏大,其值与 $H=0.06$ m时相比增大82%,此情况下堤前淤积最为严重。图4(c)给出了植物模型M5在4种入射波高情况下,不同 δ 对 λ 变化的影响。由图4(c)可见,同一 δ 下,随 H 的增大, λ 先增加约85%后逐渐减小。在较大 H 情况下, $\delta=0.10$ m时,其 λ 明显小于 $\delta=0.05$ m、0 m时的值,且随着 δ 的减小而增大,可见波高较大时 δ 对堤前床面的冲淤变化影响显著。

图4(d)和4(e)分别给出了4种波高情况下,不同 B (φ 相同)和不同 φ (B 相同)的植物模型对 λ 变化的影响对比。由图4(d)和4(e)可知,当波高较小时($H=0.06$ m、0.09 m),随 B (或 φ)的增大, λ 先增大后减小,而较大波高情况下($H=0.12$ m、0.15 m), λ 随 B (或 φ)的增大而增大,可见植物因素对 λ 的影响受到 H 制约。图4(f)给出了无海堤情况下 H 不同时 λ 随 φ 的变化对比,在 $H=0.06$ m、0.12 m时,随 φ 的增大, λ 呈现先增大后减小现象,而当 $H=0.09$ m时, λ 呈相反的变化趋势,可见无海堤时 λ 的变化并不依赖于 H 。

2.3 植物对海堤堤前冲淤平衡点移动的影响

如图3所示,定义植物带附近床面由淤积向冲刷过渡的临界位置点为冲淤平衡点 o ,其位置变化可综合反映植物因素对堤前冲淤动态平衡的影响。

图5(a)和5(b)分别给出了 B 和 φ 不同时冲淤平衡点 o 位置随波高 H 的变化对比,可以看出,冲淤平衡点 o 移动距离的范围为0~0.06 m。同一植物模型情况下,随 H 增大,点 o 先右移后左移。当 $H=0.15$ m时,相较于模型M2、M3、M4,模型M1和M5对应的点 o 的位置明显往左移动,冲淤动态平衡位置前移。图5(c)给出了模型M5在4种波高情况下,不同 δ 对冲淤平衡点 o 的影响对比,相同 δ 情况下,随 H 增大,点 o 均先右移后左移。当 H 增大至0.12 m后, δ 对点 o 位置的影响不明显。当 $\delta=0$ m时,由于越堤水体显著增加,对后续波浪对地形的冲刷起保护作用,离岸侧地形提前达到冲淤平衡,故其点 o 位置相较于 $\delta=0.1$ m、0.05 m明显右移,且 $H=0.09$ m时,右移量最大为0.45 m。

图5(d)和5(e)分别给出了4种 H 情况下,不同 B (φ 相同)和不同 φ (B 相同)的模型对点 o 位置变化的影响对比。由图5(d)可知, H 相同时,随 B 的增大,点 o 先右移后左移。当 $H=0.15$ m时,随 B 的增大,点 o 逐渐右移,且偏移量逐渐增大至0.02 m。由图5(e)可见,当 $H=0.06$ m、0.09 m时,随 φ 的增大,点 o 逐渐左移,且偏移量逐渐减小。而当 $H=0.12$ m、0.15 m时,随 φ 的增大,点 o 先左移后右移。可见,点 o 位置的变化受 H 和植物因素的综合影响。图5(f)给出了无海堤情况下 H 不同时点 o 位置随 φ 的变化对比。当 $H=0.06$ m时,随 φ 增大,点 o 逐渐右移0.01 m;当 H 增大至0.09 m后,点 o 先左移后右移。可知无海堤存在时冲淤平衡点 o 的

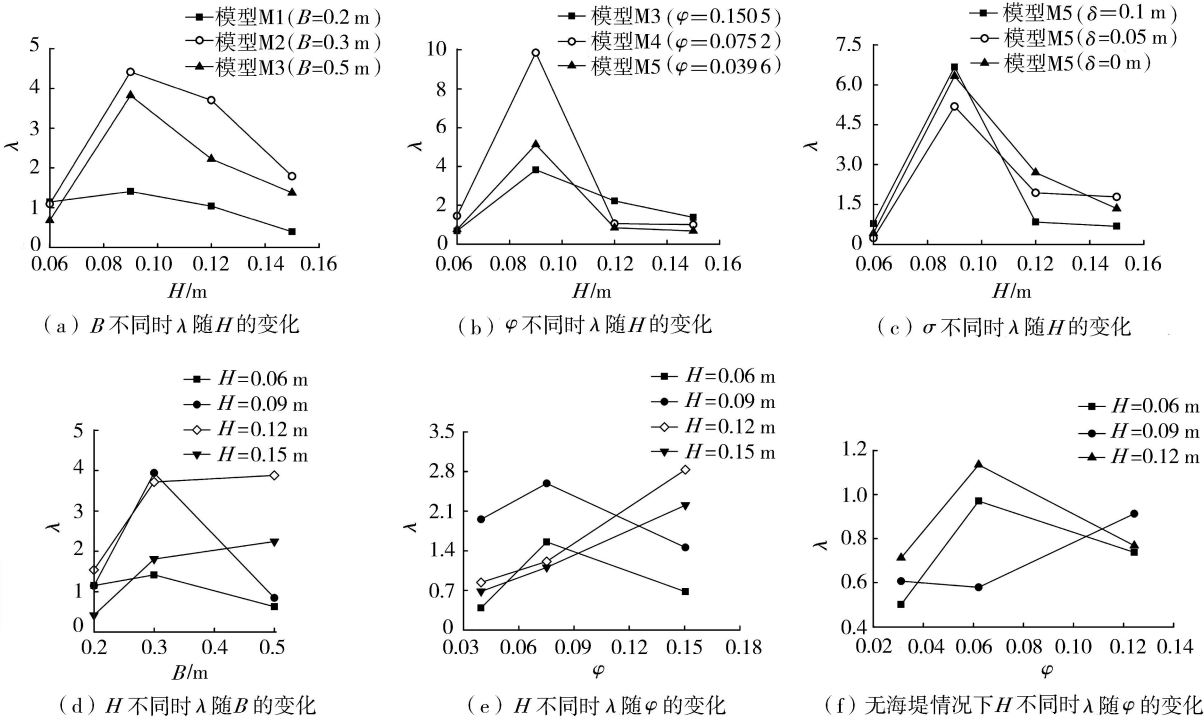


图4 植物存在对海啸波作用下堤前冲淤面积比的影响

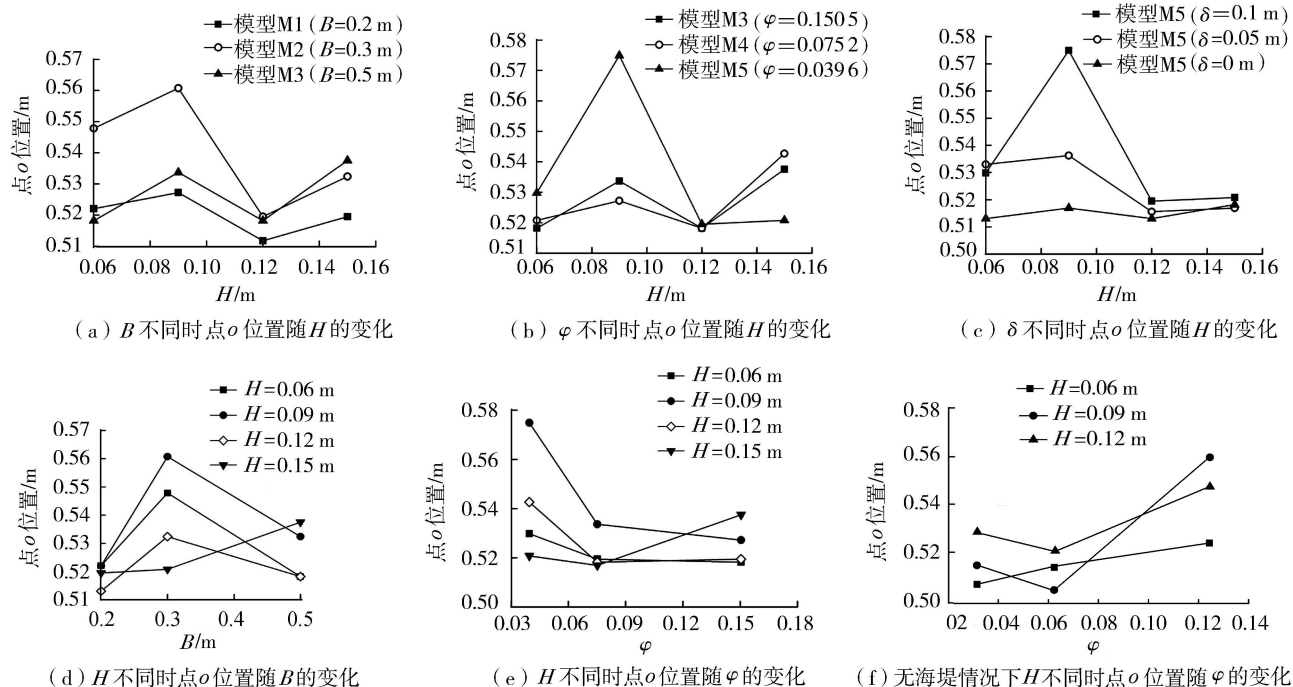


图5 植物存在对海啸波作用下堤前冲淤平衡点位置移动的影响

位置变化并不依赖于波高。

3 讨论

由于受海啸波、植物、泥沙和岸滩等因素的共同影响,植物影响下的海堤附近床面冲淤变化规律较为复杂。参考陈杰等^[17]的研究,发现其主要影响因素有海啸波波高、植物带密度、植物带长度、堤顶出水高度、泥沙粒径、泥沙比重、岸滩坡度等,因此刚性植物对海啸波作用下海堤局部冲淤规律可用下式表示:

$$f(A_e, A_d, \chi_o, H, L, B, \delta, \varphi, d_{50}, \gamma_s, \gamma_w, \tan\alpha) = 0 \quad (3)$$

式中: χ_o 为冲淤平衡点相对水平距离; d_{50} 为泥沙中值粒径; γ_s 为泥沙容重; γ_w 为水的容重; $\tan\alpha$ 为斜坡坡度。将式(3)中参数作无量纲变换后可变为如下形式:

$$\Pi\left(\frac{A_e}{d^2}, \frac{A_d}{d^2}, \frac{\chi_o}{H}, \frac{H}{L}, \frac{B}{L}, \frac{\delta}{H}, \varphi, S_d, \tan\alpha\right) = 0 \quad (4)$$

式中: A_e/d^2 为堤前冲刷坑的尺度; A_d/d^2 为堤前淤积沙坝的尺度; χ_o/H 为冲淤平衡点相对水平位置尺

度,以上3个参数可用来表征海堤局部冲淤变化的影响; H/L 为海啸波波陡,可用来表征海啸波水动力的影响; B/L 为植物带相对长度,与植物带密度 φ 共同表征植物因素的影响; δ/H 为堤顶出水高度尺度,用于表征海堤堤顶出水高度的影响; $S_d = \gamma_s/\gamma_w$ 为泥沙比重,可用来表征泥沙的影响; $\tan\alpha$ 可用来表征岸滩的影响。

如图6所示,基于本文的试验数据,建立堤前冲刷坑、淤积沙坝以及冲淤平衡点相对水平位置的尺度分别与植物带长度和密度、海啸波波陡、堤顶出水高度尺度、泥沙比重和岸滩坡度之间的关系式(式(5)(6)(7)),趋势线拟合度分别为0.86、0.78和0.98。由于越浪水体上爬后回落,回落水流在海堤周围产生复杂的次生流,对岸滩局部的冲淤产生影响,导致考虑 δ 后拟合度较差。

$$\frac{A_e}{d^2} = 201.022 \left(\frac{H}{L}\right)^{-6.613} \left(\frac{B}{L}\right)^{12.505} \zeta^{0.408} \left(\frac{\delta}{H}\right)^{-6.211} \quad (5)$$

$$\frac{A_d}{d^2} = 219.303 \left(\frac{H}{L}\right)^{-6.819} \left(\frac{B}{L}\right)^{12.299} \zeta^{-0.07} \left(\frac{\delta}{H}\right)^{-5.359} \quad (6)$$

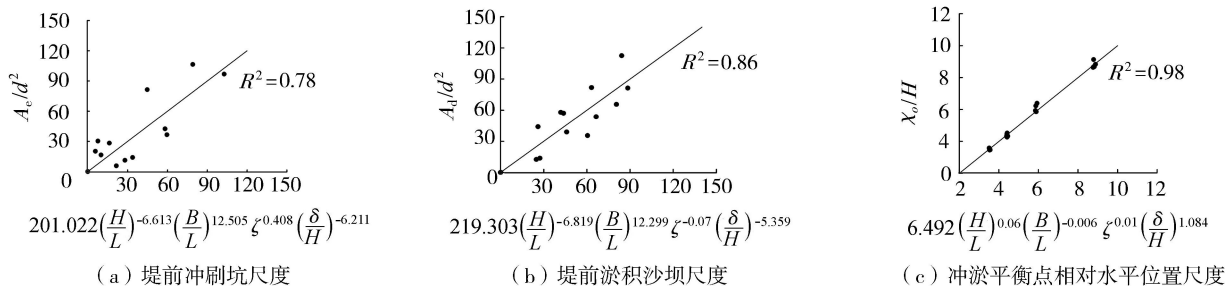
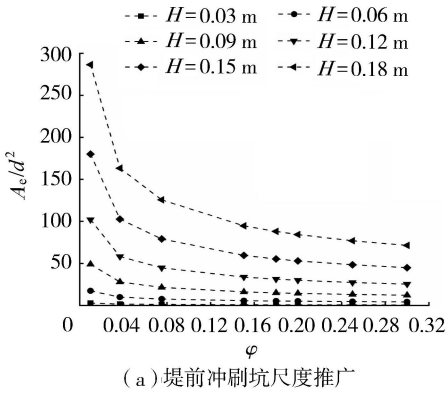


图6 堤前冲刷坑、淤积沙坝、冲淤平衡点相对水平位置的尺度与植物、波陡、泥沙和岸滩坡度之间的关系

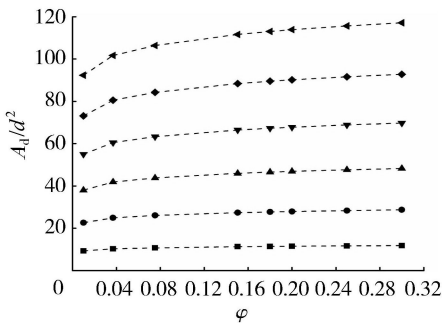
$$\frac{\chi_o}{H} = 6.492 \left(\frac{H}{L} \right)^{0.06} \left(\frac{B}{L} \right)^{-0.006} \zeta^{0.01} \left(\frac{\delta}{H} \right)^{1.084} \quad (7)$$

其中 $\zeta = \tan\alpha / (S_d \varphi)$

由于植物影响下的海啸波作用下海堤局部冲淤变化非常复杂,造成部分数据点与拟合线偏离较大,但从整体上看成幂函数关系。从式(6)可以看出, A_d/d^2 随 H/L 、 δ/H 和 ζ 的增大而减小,随 B/L 的增大而增大;而 A_e/d^2 则随 H/L 和 δ/H 的增大而减小,随 B/L 和 ζ 的增大而增大。海啸波引起的岸滩冲刷对海堤的危害巨大,海堤附近冲淤面积的大小是值得关注的指标,因而此处重点讨论。由式(5)(6)可以推求出组次 20 情况下产生的淤积沙坝面积为 6.91 cm^2 ,冲刷坑面积为 8.82 cm^2 。试验测量得到的淤积沙坝面积为 5.63 cm^2 ,冲刷坑面积为 8.32 cm^2 ,可见计算值与实测值吻合度较高。因此可由式(5)(6)推测出本试验没有开展的部分工况结果。图 7 给出了 $B=0.5 \text{ m}$ 、 $\delta=0.1 \text{ m}$, H 从 3 cm 增大至 18 cm 以及 φ 分别为 0.01 、 0.0396 、 0.0752 、 0.1505 、 0.18 、 0.2 、 0.25 、 0.3 时海堤离岸侧冲刷坑尺度和淤积沙坝尺度的计算结果。由图 7 可以看出随 H 增大, A_d/d^2 和 A_e/d^2 都增大。 φ 从 0.01 增大至 0.1505 , A_e/d^2 迅速减小 65% , A_d/d^2 增加 16% ,植物带的防护效果明显;当 φ 继续增大至 0.3 时, A_d/d^2 和 A_e/d^2 的变化趋于平缓,可见植物带的防护效果有限。



(a) 堤前冲刷坑尺度推广



(b) 堤前淤积沙坝尺度推广

图 7 堤前冲刷坑、淤积沙坝面积计算值与入射波高、植物密度的关系

4 结 论

a. 基于试验数据的分析,分别建立了岸滩冲刷坑、淤积沙坝以及冲淤平衡点相对水平位置的尺度与植物带长度和密度、海啸波波陡、堤顶出水高度尺度、泥沙比重和岸滩坡度之间的关系式,揭示了海堤局部冲淤变化与植物因素、水动力因素、泥沙因素以及岸滩因素之间的内在联系,可为海堤防护提供一定的有效依据。

b. 植物带使得堤后近岸侧相对最大冲刷深度显著减小,堤前离岸侧冲刷位置由原堤脚处前移至植物带所在位置,冲刷范围大幅增大。堤前冲淤面积受入射波高和植物因素的共同影响,同一植物模型下,冲刷坑面积和淤积沙坝面积都随入射波高 H 的增大而增加。当 H 较小时,随植物带密度 φ (或植物带长度 B) 增大,冲淤面积比 λ 先增大后减小。而 H 较大时, λ 则随 φ (或 B) 的增大逐渐增大,海堤使得岸滩的局部冲淤变化依赖于波高。

c. 堤前冲淤平衡点 o 位置移动范围为 $0 \sim 0.06 \text{ m}$,合理优化植物带宽度和密度使冲淤平衡点前移,可有效减小堤脚冲刷,增强海堤稳定性。

参考文献:

- [1] 蒋昌波,陈杰,程永舟,等. 海啸波作用下泥沙运动 (I): 岸滩剖面变化分析[J]. 水科学进展,2012,23(5): 665-672. (JIANG Changbo, CHEN Jie, CHENG Yongzhou, et al. Study of sediment transport by tsunami waves (I): beach profile evolution [J]. Advances in Water Science,2012,23(5): 665-672. (in Chinese))
- [2] 蒋昌波,陈杰,程永舟,等. 海啸波作用下泥沙运动 (II): 床沙组成变化分析[J]. 水科学进展,2012,23(6): 802-807. (JIANG Changbo, CHEN Jie, CHENG Yongzhou, et al. Study of sediment transport by tsunami waves (II): sorting of sand grains on seabed [J]. Advances in Water Science,2012,23(6): 802-807. (in Chinese))
- [3] 蒋昌波,陈杰,程永舟,等. 海啸波作用下泥沙运动 (III): 数学模型的建立与验证[J]. 水科学进展,2013,24(1): 91-97. (JIANG Changbo, CHEN Jie, CHENG Yongzhou, et al. Study of sediment transport by tsunami waves (III): numerical model development and verification [J]. Advances in Water Science,2013,24(1):91-97. (in Chinese))
- [4] 陈杰,蒋昌波,邓斌,等. 海啸作用下岸滩演变与床沙组成变化研究综述[J]. 水科学进展,2013,24(5): 750-758. (CHEN Jie, JIANG Changbo, DENG Bin, et al. Review of beach profile changes and sorting of sand grains by tsunami waves [J]. Advances in Water Science,2013,

- 24(5): 750-758. (in Chinese))
- [5] 陈杰,蒋昌波,隆院男,等.海啸波作用下泥沙运动(Ⅳ):建筑物局部冲刷[J].水科学进展,2013,24(6): 832-837. (CHEN Jie, JIANG Changbo, LONG Yuannan, et al. Study of sediment transport by tsunami waves(Ⅳ): local scour around structure[J]. Advances in Water Science,2013,24(6): 832-837. (in Chinese))
- [6] 陈杰,段自豪,蒋昌波,等.海啸波引起的近岸房屋局部冲刷试验[J].水利水电科技进展,2017,37(1): 33-37. (CHEN Jie, DUAN Zihao, JIANG Changbo, et al. Experimental study of local scour around seaside houses by tsunami waves [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2017,37(1): 33-37. (in Chinese))
- [7] MAHESHWARI B K, SHARMA M L, NARAYAN J P. Geotechnical and structural damage in Tamil Nadu, India, from the December 2004 Indian Ocean Tsunami [J]. Earthquake Spectra, 2006, 22: 475-493.
- [8] LUKKUNAPRASIT P, RUANGRASSAMEE A. Building damage in Thailand in the 2004 Indian Ocean tsunami and clues for tsunami-resistant design [J]. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 2008, 1:17-30.
- [9] PARIS R, WASSMER P, SARTOHADI J, et al. Tsunamis as geomorphic crises: Lessons from the December 26, 2004 tsunami in Lhok Nga, West Banda Aceh (Sumatra, Indonesia) [J]. Geomorphology, 2009, 104: 59-72.
- [10] 陈杰,杨武,蒋昌波,等.海啸波作用下直立堤局部冲刷实验研究[J].海洋通报,2015,34(6): 616-622. (CHEN Jie, YANG Wu, JIANG Changbo, et al. Experimental study of local scour around vertical breakwater by tsunami waves [J]. Marine Science Bulletin,2015,34(6):616-622. (in Chinese))
- [11] 陈杰,肖桂振,蒋昌波,等.潜堤对海啸波作用下岸滩剖面变化影响试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2014,11(3): 58-64. (CHEN Jie, XIAO Guizhen, JIANG Changbo, et al. Experimental study on sandy beach profile waves under effect of submerged changes by tsunami breakwater[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science),2014,11(3): 58-64. (in Chinese))
- [12] SUMER B M, WHITEHOUSE R J S, TØRUM A. Scour around coastal structures: a summary of recent research [J]. Coastal Engineering, 2001, 44(2): 153-190.
- [13] 高学平,李昌良,张尚华.堤前远破波运动与冲淤形态[J].海洋通报,2006,25(1): 24-29. (GAO Xueping, LI Changliang, ZHANG Shanghua. Wave motions and scouring and deposition patterns in front of breakwaters by broken waves[J]. Marine Science Bulletin,2006,25(1): 24-29. (in Chinese))
- [14] 高学平,张亚.波浪作用下堤前沙质海床冲淤形态[J].天津大学学报,2004,37(5): 459-465. (GAO Xueping, ZHANG Ya. Scouring patterns in front of breakwaters under the action of different waves [J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(5): 459-465. (in Chinese))
- [15] 庞启秀,张瑞波,杨华.不同高度潜堤减淤效果水槽实验研究[J].海洋工程,2012,30(2): 66-71. (PANG Qixiu, ZHANG Ruibo, YANG Hua. Flume experimental study on the heights of submerged dike to diminish siltation[J]. The Ocean Engineering, 2012, 30(2): 66-71. (in Chinese))
- [16] 王俊.海岸红树林与海啸波相互作用的实验研究[J].广东水利电力职业技术学院学报,2011,9(3): 1-4. (WANG Jun. Experimental study on interactions of tsunami wave with coastal mangrove forest[J]. Journal of Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, 2011, 9(3): 1-4 (in Chinese))
- [17] 陈杰,管喆,蒋昌波,等.海啸波作用下泥沙运动(V):红树林影响下的岸滩变化[J].水科学进展,2016,27(2): 206-213. (CHEN Jie, GUAN Zhe, JIANG Changbo, et al. Study of sediment transport by tsunami waves(V): influence of mangrove [J]. Advances in Water Science,2016,27(2):206-213. (in Chinese))
- [18] 蒋昌波,管喆,陈杰,等.红树林对规则波作用下岸滩剖面变化影响实验研究[J].热带海洋学报,2017,36(1): 95-105. (JIANG Changbo, GUAN Zhe, CHEN Jie. Experimental study on changes of cross-shore beach profile by regular waves under the influence of mangroves [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2017, 36(1): 95-105. (in Chinese))
- [19] 彭浩,陈杰,蒋昌波,等.单株和簇状植物分布方式对消波的影响试验[J].水利水电科技进展,2019,39(4): 27-34. (PENG Hao, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental study on wave attenuation effects by single and patchy rigid vegetation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(4): 27-34. (in Chinese))
- [20] 王建婷,董增川,徐伟,等.嫩江干流防浪林消浪影响因素分析[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(1): 30-36. (WANG Jianting, DONG Zengchuan, XU Wei, et al. Influencing factors analysis of wave dissipation of the wavebreak forest in mainstream of Nenjiang River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 30-36. (in Chinese))
- [21] 何飞,陈杰,蒋昌波,等.植物带影响下孤立波沿程波高衰减特性试验[J].水利水电科技进展,2018,37(6): 75-82. (HE Fei, CHEN Jie, JIANG Changbo, et al. Experimental study on the characteristics of solitary wave height attenuation under the effects of a vegetation belt [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 37(6): 75-82. (in Chinese))

(下转第74页)