

静态平衡岬湾海岸理论中抛物线方程在海滩养护中的应用

潘瑞伟,曹立华*,庄振业

(中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100)

摘要:岬湾海岸是全球重要的海岸地形,约占全球岸线的 51%。岬间海滩又是岬湾海岸地形中最重要的组成部分。20 世纪 40 年代以来,海洋地质学家和海岸工程师们对岬湾海岸做了大量的研究。尤其在 20 世纪 80 年代,有关抛物线形状海湾方程的成果发表和后来相关计算机软件的开发,都对判断岬湾岸线稳定性和预测岬头下游海岸的静态平衡起到至关重要的作用。详细介绍了静态平衡岬湾的概念,并且通过在由动态平衡向静态平衡转化、以岸外坝群保护平直沙岸、提高单岬或丁坝下游的稳定性等方面的具体应用,验证了方程的有效性。通过适当的人工构筑物,配合人工养滩,创造静态平衡的海滩,对海岸带的开发和保护具有重要意义。

关键词:岬湾海滩;静态平衡;抛物线方程;人工养滩

中图分类号:P737.1

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.06009

海岸带是人类活动最多的地区之一,同时也是大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互作用的地带^[1]。海岸带的研究越来越受到人们的重视。砂质海岸在当地优势波浪长期作用下,在岬头下游或者两岬之间形成岬湾海滩。岬湾海滩也是全世界诸多沿海国家海岸最突出的地形特征之一。对于这些岬湾海滩,静态平衡理论中的抛物线方程具有重要工程意义。

1 静态平衡岬湾理论

岬角常定义为高地伸入到水中的点或者陆地(或岩石)伸入到水中的高点^[2]。砂质海岸被自然

岬角分隔后,凸出的岬角可以使其背浪处、海岬之间以及海岬下游的海滩保持稳定状态,形成了岬湾海滩^[3]。关于岬湾海滩的描述或者其相同意义的描述在许多文献中都可以见到,如:ζ形海湾、半心形海湾、细齿形海湾、螺旋形海滩、袋状海滩、岬湾海滩等。虽然岬湾海滩这种特殊地形单元在各地大小不一,形状各异,其尺度从几十米到几千米,但是其特征有相似性^[4]。

Silvester^[5]首次提出了稳定海湾海滩的概念。对一个平衡稳定的湾岸而言,若减少其上游输沙,则在当地优势波浪作用下,岸线会逐渐后退。当上述输沙完全被拦截时,岸线最终会向陆侧退缩而达到一个相对稳定的“静态平衡”。人工岬湾所达到的最终岸线是海岸线在达静态平衡(没有上游输沙和湾内无河流影响)下的位置。对于已经达到静态稳定的岬湾,在“零输沙”的情况下,其岸线也可保持不变。同时值得注意的是,不论海滩的稳定性如何,短短的几个小时的暴风浪都会对海滩造成侵蚀。当暴风浪过后,静态平衡岬湾内大部分沙粒都可能逐渐返回到湾岸内,这

收稿日期:2016-03-22

基金项目:国家海洋局公益性项目“海岛旅游海滩管理技术研究与应用示范”(201405037)

作者简介:潘瑞伟(1989—),男,在读硕士,主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail:panruiwei@foxmail.com

* 通讯作者:曹立华(1964—),男,教授,主要从事海洋地质、地质工程的教学与科研工作。E-mail:hardyqd@ouc.edu.cn

种海滩的侵蚀与回返是大自然循环的过程,也是岬湾海岸自保的天然机制。

根据海滩稳定性的特征^[4],岬湾海滩又可以分为:①静态平衡海滩;②动态平衡海滩;③不稳定海滩。海滩处于静态平衡是相对稳定的,科学家们尝试采用各种经验函数去拟合海滩形状。岬湾海滩平衡形态模型主要有:对数螺线模型、双曲正切模型、抛物线模型。本文主要介绍抛物线模型,Hsu 和 Evans^[6]通过对处于静态平衡状态下的 27 个海湾平面拟合,提出抛物线海湾形状方程。模型公式为:

$$R/R_0 = C_1 + C_2 \cdot (\beta/\theta) + C_3((\beta/\theta)^2)$$

式中: R 为任意一条极半径;

θ 为相应极角;

R_0 为上下岬角间控制线长度;

β 为控制线与入射优势波波峰线间的夹角;

C_1 、 C_2 和 C_3 为通过对 27 个海湾回归分析所得的参数(图 1)。

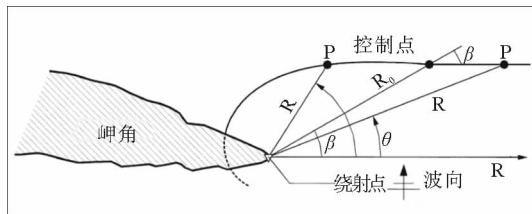


图 1 抛物线模型示意图(据文献[2])

Fig. 1 Diagram of the parabolic bay shape equation (from reference [2])

其模型公式为:

$$C_1 = 0.0707 - 0.0047\beta + 0.000349\beta^2 - 0.00000875\beta^3 + 0.0000004765\beta^4$$

$$C_2 = 0.9536 + 0.0078\beta - 0.0004879\beta^2 + 0.0000182\beta^3 - 0.000001281\beta^4$$

$$C_3 = 0.0214 - 0.0078\beta + 0.0003004\beta^2 - 0.00001183\beta^3 + 0.0000009343\beta^4$$

在抛物线模型中,抛物线的焦点既是波浪的入射点,控制曲线形状的 3 个参数是优势入射波和控制线之间夹角 β 的函数^[7,8],控制线的定义与对数螺线模型相似,下岬角点的下游被认为是平行于优势入射波浪的波峰线。

Moreno 和 Kraus^[9]对该模型的灵敏度做了相应的测试,分析了 β 和控制线 R_0 变化时曲线形

状的响应。由于在该模型中定义 θ 始终大于等于 β ,因此,随着 β 的增加,控制线长度 R_0 逐渐减小,总的来说, β 值控制着曲线的形状,而 R_0 则控制着曲线的大小。因为,控制线与海滩相交于岸线的曲线段和直线段过渡的点上,因此,曲线形状的灵敏度造成的误差由控制点的位置来决定,这由 R_0 和 β 共同变化来控制,唯一不变的是岬角点至直线段的距离。因此下夹角点很难定义,选择下夹角点的不确定性导致相应的 R_0 和 β 组合对最后模拟的结果产生一定的影响。Moreno 和 Kraus^[9]的研究结果表明,抛物线模型对单岬角海滩的适用性比较好,其因为包括可以很好地描述岬角影响的曲线段和直线段。

综合来看,抛物线模型因为采用了上游岬头和波浪绕射的工程意义,最具工程价值,也获得了广泛的认可^[10]。同时与 MEPBAY(Model of Equilibrium Planform of Bayed Beaches)软件配合使用^[9],可以直观的验证岬湾海滩的稳定性。

2 海滩养护工程中的应用

目前静态平衡理论在岬湾海滩养护中的应用主要体现在 3 个方面:①验证天然或人工岬湾海滩的稳定性,并可判断其所属类型;②预测海岸工程中未来岸线的变化;③规划静态平衡海岸,辅助海滩的综合管理^[6]。这里笔者将通过实例进行具体讨论。

2.1 静态平衡海湾与动态平衡海湾之间的转换

对于岬湾海滩而言,静态平衡的海滩波峰线平行逼近海岸线,波浪同时破碎,波能没有沿岸分量,沿岸输沙极少^[11]。在海滩处于“零输沙”条件下,海滩依旧处于稳定状态,则该海滩达到了静态平衡。反之,当海滩周围物源充足,沿岸输沙不断补充,在此情况下仍保持的稳定岸线称之为动态平衡状态。如果物源减少(或增加),输沙量减少(或增加),原海滩的平衡状态被打破,海滩处于侵蚀(或淤积)的状态,则称之为不平衡状态。

通过人工构筑物引导外部输沙,把海滩由动态平衡转化为静态平衡,可以提高海滩的稳定性。美国加利福尼亚州太平洋沿岸的波德加海滩就是这样的例子(图 2)。

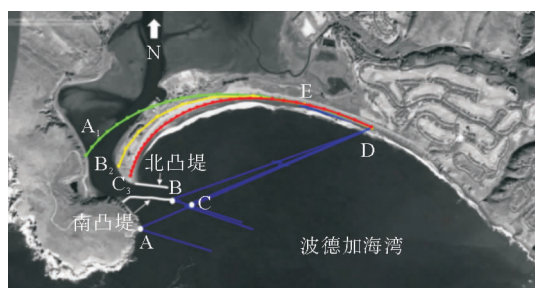


图2 美国波德加海滩现状及导流堤延伸的影响
(据文献[6])

Fig. 2 Present situation of Bodega Beach of USA and effect of repositioning the tip of an inlet jetty
(from reference [6])

此海湾有长达 3 km 的海滩,最初处于动态平衡状态。其主要物源是来自北部的波德加海港所处的潟湖区及附近沿岸流的输沙。海滩靠外部物源不断的补充而达平衡状态。若物源增多,海滩附近就淤宽,称“不平衡”。物源减少,海滩就侵蚀后退。为了杜绝海滩的不平衡状态,在潟湖的潮流通道口外修建了 2 条用于导流的凸堤,分别为长约 450 m 的南凸堤和长约 300 m 的北凸堤。现在,通过 MEPBAY 软件对谷歌地球提供的 2009 年 4 月卫星图片进行分析处理^[12]。

航道入海口建造凸堤之前,选择 A 为上游控制点,D 为下游控制点,DE 为下游岸线的切线,拟合得到静态平衡岸线为 DA_1 (绿色),如果有稳定物源补充时,海滩则可达到动态平衡状态。如果来自泻湖的输沙减少或者上游沿岸的输沙减少,则岸线将会受侵蚀而退到 DA_1 处。

该潮流通道入海口建造 B 凸堤之后,将南凸堤的端点作为岬头位置,设为上游控制点 B,其他 2 个控制点不变。由于来自潟湖的输沙将直接进入博德加海湾较深水区,岸线将蚀退到 DB_1 (黄色)后才能达到静态平衡。岸线 DB_1 (黄色)较岸线 DA_1 (绿色)更靠海一侧,说明凸堤的建造让物源供给不足时,海岸受到的侵蚀有所缓解。但是,依旧没有达到静态平衡的状态。延长凸堤至 C 点,并将上游控制点选择在 C (即将南凸堤向东延伸 100 m),其他 2 个控制点依旧不变。进行了上述改造后,由于凸堤的作用,将使来自潟湖的输沙几乎全部直接进入波德加海湾深水区。对于海滩而言,直接输沙几乎为零,此时波浪作用下形成的

岸线即达到了静态平衡状态。根据软件拟合的结果,曲线 HC_1 即为海滩达到静态平衡的岸线。如图 2 所示,与现在的岸线高度吻合。此种方案即可将此岬湾海滩转变为静态平衡的,并处于稳定状态。

可见,对于天然或者人工岬湾工程,为了摆脱输沙对海滩地貌的影响,通过修建人工构筑物(防波堤、凸堤、丁坝),可将处于动态平衡或者不平衡状态的海滩转化到静态平衡。同理,对于已经达到静态平衡海滩,也可能再次转换到动态平衡或者不平衡状态。

杨燕雄等^[12]提供的河北秦皇岛西沙滩航片,如图 3 所示,该区域建造有长约 150 m 的栈桥一座。通过 MEPBAY 软件评估,以 A 为控制点,曲线 PA_1 (绿)与 2000 年岸线高度吻合,说明此处已经达到静态平衡状态。栈桥拆除后,以 B 为控制点,之前已经形成的静态平衡状态被打破。通过 MEPBAY 软件评估,得到曲线 PB_1 (红)。2006 年 7 月实际测量所得岸线 PC_1 (黄)与 PB_1 在下游部分重合。侵蚀严重的地方已经侵蚀超过 50 m。若此处海滩由附近河口继续补充物源,则可能达到动态平衡状态;如果没有物源补充,则将继续发生侵蚀,直到实际岸线后退到 PB_1 ,再次达到静态平衡。

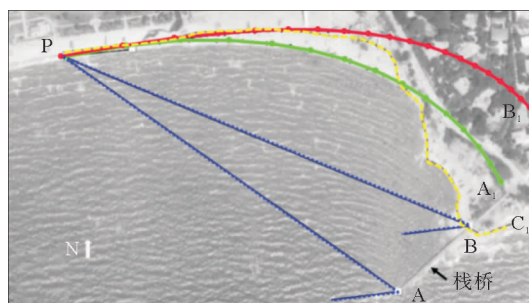


图3 北戴河西沙滩某处栈桥拆除前后 MEPBAY 曲线变化趋势(据文献[11])

Fig. 3 MEPBAY shoreline change of a beach in the Beidaihe Western Beach (from reference [11])

随着经济的发展,人工修建的港口、码头等设施都可能打破原来岬湾海滩的输沙平衡,造成海滩的侵蚀或者淤积。根据波浪状况,对海岸进行提前预测和规划,可以有效预防侵蚀对设施的影响^[13]。

2.2 以岸外坝群保护平直沙岸

根据 Slivester 和 Hsu^[7] 提出的静态平衡海湾(SEB)模型,设计多个连续防波堤岸外坝单元保护平直沙岸,可以有效解决平直海岸的侵蚀问题,并且有效降低长期的海岸防护的成本^[9]。

设计这样的岬角—防波堤系统^[14],首先对海滩进行评估,根据波候条件确定防波堤长度(L_b),防波堤之间的距离(G_b)和防波堤与海岸间的距离(M_b)等。

台湾旗津岛位于高雄市西南侧,呈现 NW—SE 走向,长约 8.5 km(图 4)。1967 年高雄港开辟第 2 港口后将旗津半岛截断变为一个离岸岛。高雄港第 2 港口辟建完成后,南防波堤阻拦来自高屏溪口往北的沿岸输沙,再加上最北端有第 1 港口的防波堤,已将旗津区隔成半封闭的海域。据相关资料,1976—2011 年间,海岸线平均后退了 39 m,即平均每年海岸线侵蚀 1.2 m。侵蚀最严重的区域海岸线最大侵蚀幅度达 145 m。

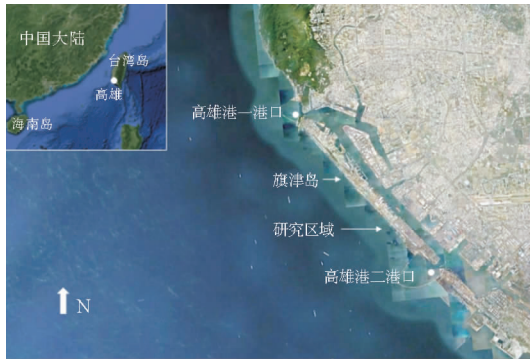


图 4 台湾高雄旗津岛位置及研究区示意图
(底图:谷歌地球,编辑)

Fig. 4 Location of research area and Chichin Island off Kaohsiung, Taiwan (courtesy of Google Earth imagery)

为了应对海岸严重的侵蚀问题,高雄市政府实施了海岸保护工程,以保障海水浴场的安全,同时降低海岸侵蚀对海岸景观的冲击。此外,高雄港务分公司对旗津中洲段以南海岸区域以海岸防灾安全为原则,对该区域实施海岸保护工程。现在在沿岸建造了 8 座离岸潜堤、1 座离岸堤等海岸设施以及约补沙 110 万 m^3 以改善旗津海岸受侵蚀的现状。上述工程于 2013 年 4 月完成。在本文讨论的示范区内,海岸防护工程设置方式如图 5 所示。

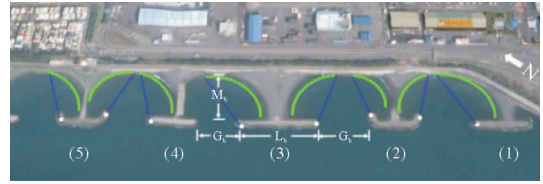


图 5 旗津静态海湾现状(底图:谷歌地球,编辑)
Fig. 5 Present situation of the beach in Chichin Island
(courtesy of Google Earth imagery)

在图 5 中,以(3)防波堤为例,防波堤长度(L_b)为 160 m,防波堤之间的距离(G_b)为 70~100 m,防波堤与平均高潮线之间的距离(M_b)为 100 m。

在此岬湾—防波堤体系中,附近河流的物源补充被港口防波堤阻隔,自然补沙极其有限的情况下,防波堤的建立也会伴随着适当的人为补砂。之后,再以防波堤的一个顶点作为岬角的上控制点,通过 MEPBAY 软件验证可知所得曲线与实际岸线重合。此时,在一个防波堤单元下达到了静态平衡状态。

若无新的物源继续补沙,对于已经达到的静态平衡的单元,将继续保持海岸的现状;如果有物源继续补充,那么防波堤与平均高潮线之间的距离(M_b)会不断减小。Bodge^[15]对于两个防波堤之间的距离(G_b)与防波堤与平均高潮线之间的距离(M_b)的关系提出了 1/3 规则(1/3 规则是 $M_b : G_b = 1 : 3$)。随着时间的推移,来自人工或者自然物源的补充将会使 M_b 与 G_b 的比值逐渐接近 1/3。

通过建造连续的防波堤(或者鱼尾堤)群使海岸免遭侵蚀的成功案例在其他区域普遍存在。例如,西班牙南部的 Pedregalejo 海滩(图 6)原本受到强烈侵蚀,没有稳定的沙滩,后来人工设计建造了丁坝群,丁坝间距等于丁坝长度的 2~4 倍。通过丁坝群使海滩连续淤宽,最终达到静态平衡^[16]。

2.3 单岬(或防波堤)下游沙岸的稳定性

单岬(或者防波堤)的建立对近岸泥沙的输运必然产生影响。港口的防波堤建立后,在相应区域产生一个消波区。由于波浪的衍射和折射,在消波区内导致泥沙的堆积,形成凸起或连岛沙洲。

许多港口建立之初规模较小,只有较短的防波堤。随着经济的发展,港口规模扩大,建设的防



图6 西班牙 Pedregalejo 海滩鱼尾状丁坝群
(底图:谷歌地球,编辑)

Fig. 6 Fishbone mapping groins in Spain
(courtesy of Google Earth imagery)

波堤不断延长。较长的防波堤突出到海上拦截更多上游沿岸运输的泥沙,下游海滩侵蚀带来的沉积物也不断增加。在此情况下,就可能需要建立二次防波堤,以防止泥沙淤积或进入港池。

位于东京东北部约 100 km 的 Oarai 港口,自 1960 年开始作为一个渡轮港口使用,在 1976、1981、1983—1985 年和近期,分几个阶段扩建了防波堤(图 7)。主防波堤不断延伸向南扩展,与海岸之间形成一个岬湾海滩消波区,导致泥沙在 DE 附近堆积。在 1985 年,岬头位置为 A,以该点作为上游控制点的静态平衡岬湾曲线 CA₁(绿色)恰好与岸线重合,显示海岸线达到静态平衡状态。随着主防波堤扩建,岬头控制点向南延伸到了 B。此时海岸就从静态平衡状态转变为了不稳定状态。根据使用抛物线海湾形状方程和 MEP-BAY 软件拟合的结果,曲线 CB₁(红色)在岸线的向海一侧,且与海岸线相差较大。下游的侵蚀还将继续,而侵蚀带来的沉积物将沿岸搬运,在防波

堤 DE 南侧继续堆积。图中港口出海口防波堤 DE 的长度有限,如果这种搬运的情况不改变,原有防波堤将无法阻挡泥沙进入港池。

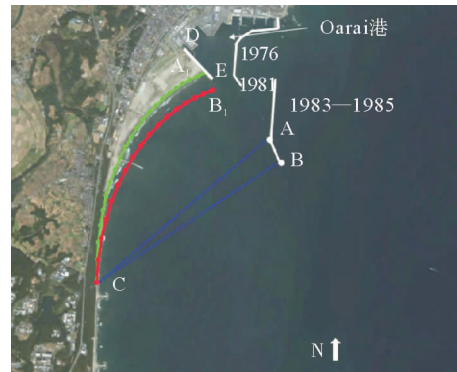


图7 日本茨城县 Oarai 港下游海岸稳定性变化
(据文献[6])

Fig. 7 The stability change of a beach at Oarai port, on Honshu, Japan (from reference [6])

2.4 岬间海滩的静态平衡

西子湾位于高雄港第 1 出海口,其海滩因中山大学选址后进行了大量填海造陆工程,使天然海岸逐渐消失。为了改善西子湾海滩景观,工程人员通过建造人工岬湾的方法进行设计,试图使海岸最终达到静态平衡^[6]。

先对 1976 年的西子湾的航片使用抛物线海湾形状方程和 MEPBAY 软件进行拟合,设置高雄港第 1 出海口(图 8)北防波堤为上游控制点,西子湾海滩的尽头为下游控制点,拟合的结果显

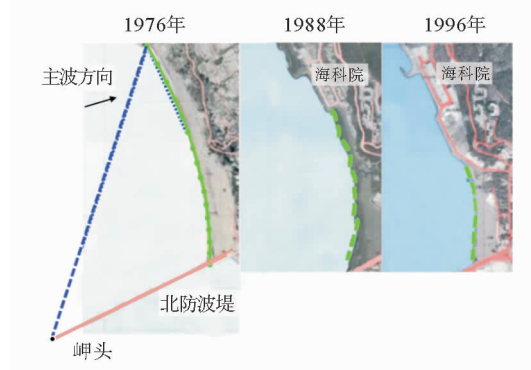


图8 高雄西子湾 1976、1988、1996 年航片对比
Fig. 8 Aerophotograph of Sizihwan Bay in Kaohsiung in 1976, 1988, 1996

示 1976 年海岸线与静态平衡曲线高度吻合,此海滩已经处于静态平衡状态。1988 年中山大学的填海造陆工程已经开始,新建海科院位于西子湾海滩北部,海滩形态发生变化,海滩长度显著缩短。1996 年中山大学填海造陆工程已经完成,由航片可见,海岸线变化巨大,西子湾海滩缩小一半,实际长度不足 500 m。

采用人造岬湾的方法进行修复,在西子湾两侧设置凸堤,南侧凸堤设置于高雄港北防波堤起点附近,北侧凸堤设置于中山大学海科院外侧(呈 L 型)。施工完成后(图 9),分别设 2 个凸堤的顶点 A 和 B 为上游控制点,C 和 D 为下游控制点,使用抛物线海湾形状方程和 MEPBAY 软件进行拟合,可知现在海岸线与静态平衡曲线较接近。2 座长约 160 m 的马刺型凸堤于 2008 年完工,虽然受制于人工抛沙量不足,未能实现南北两海滩连接到一起。但是,经过此修复工程,海岸景观明显改观。



图 9 高雄西子湾修复后人工岬湾现状
(底图:谷歌地球,编辑)

Fig. 9 Present situation of Siziwan Bay after headland control nourishment (courtesy of Google Earth imagery)

采用双岬体系建立海滩平衡的例子还有很多,位于山东半岛北部的龙口市月亮湾海水浴场也是其中一例(图 10)。在月亮湾建造之前,该段海岸较为顺直,向西一直延伸至砮姆岛,因此该岸段属于龙口沙坝—潟湖体系的沙坝沿岸部分^[17]。

月亮湾海水浴场于 2005 年开始建设,先建设了东北一侧的岬角约 300m 突堤(图 11a),建成



图 10 月亮湾海水浴场位置

Fig. 10 Location of Yueliangwan sea resort

后,在东北浪的强烈作用下,经过一个冬天,A—P 点向岸一侧的岸段出现的严重的侵蚀,滩面受到严重的破坏,而点 P 以西的滩面稳定。



图 11 月亮湾海水浴场前后两期工程略图

Fig. 11 Two sessions of headland control nourishment in Yueliangwan

为保护人造沙滩不受破坏,在此基础上,又开始在西南侧建造一个 300 m 的岬角,最终对海滩形成一个环状岬湾,使两岬头所拟合的下游稳定点 P_1 和 P_2 相交叉(图 11b),则整个月亮湾内沙滩变稳定,岸线全部与波峰线平行。经过 8 年的调整,基本形成了静态平衡状态(图 10)。

龙口月亮湾海水浴场的双岬养滩工程,是根据天然两岬角之间存在稳定海滩的自然现象,总结岬角对于岬间湾水动力环境的影响机制,然后人工模仿大自然,通过构筑 2 个人工岬角,在平直的沙岸上进行养滩实践^[17]。通过使用 MEPBAY 软件进行岸线模拟发现月亮湾海水浴场海滩目前的形态与拟合出的平衡岸线基本一致,即基本达到静态平衡状态。

3 讨论

上述案例已经表现出抛物线海湾形状方程和软件 MEPBAY 的优势与重大意义^[18]。对下游

段控制点不进行任何额外的数值计算,是其受到海岸科学家和工程师们的欢迎。对海岸管理、海岸保护、休闲海滩设计、评估岬湾海滩稳定性是非常有用的工具。

抛物线方程源自使用回归分析的静态平衡平面图,基于静态平衡状态的27个独立岬湾海滩原型和比例缩小模型实验,具有明显的统计性。现在更多的用户对抛物线海湾形状方程的使用感兴趣,但在复杂的自然环境下使用存在一定的局限性和一定不确定性。原因如下:

本文的案例在地貌和工程方面没有进行数值模拟,并不意味着在缺乏二维平面或三维空间的数值模拟的前提下,这种简单的方法就可以确定因沉积物供给的变化而带来的海岸线侵蚀或者淤积。同时也必须建立在对当地水文、气象、环境状况掌握的前提下,结合潮汐、波浪的具体情况进行分析。本文使用MEPBAY软件对岬湾的形态进行模拟^[19]。但是计算机软件的使用往往也是一把双刃剑。使用MEPBAY验证岬湾海滩稳定性时,存在着诸多的不确定性^[19]。例如:①下游控制点(P点)的选择存在主观性;对于同一个海湾,不同人在下游控制点的选择上,可能受到人为主观因素的影响,这样带来的结果是拟合出来的静态平衡曲线并非唯一,存在不确定性;②在使用MEPBAY作为工程工作时,对图像处理依赖使研究中使用的照片质量至关重要,低分辨率的海湾图像可能使数据失真,使用的卫星图片和航空照片的时间,在实际工作中,不同季节不同时间波浪的变化以及潮汐的变化常常容易被忽略^[17,19]。

天然的海岬海湾常常是不规则形状的,这样的形状决定了其可能存在多个衍射点,而本文中的岬湾静态平衡方程使用时,只考虑了岬头一个衍射点。不确定因素并不一定与海滩修复或休闲设计有联系,除非不同的环境下进行自然湾海滩沙滩稳定性验证^[20]。

建议在使用抛物线方程时应记住:①方程被认为是静态平衡状态下;②有一个定义良好的上游波绕射点的位置;③相对较短和平直逐渐下降部分;④有不受水下浅滩或沙滩影响的均匀弯曲深度;⑤在小潮环境下;⑥受方向几乎不变的盛行波控制。

4 结论

总体来说,Hsu和Evans^[6]提出的静态海湾概念与软件MEPBAY的结合已经可以用于海岸管理和海岸线保护,不需要进行昂贵和耗时的工作,比如物理模拟。实践中,在静态平衡海湾与动态平衡海湾之间的转换、以岸外坝群保护平直砂岸、岬间海滩静态平衡的建立等多方面均得到有力的实践检验。在通过人造岬湾以最少的人工设施,配合人工养滩,就可创造出静态平衡的海滩,并且起到保护海岸的作用。在使用该模型和软件时,还应谨慎行事,注意其中的若干不确定因素和干扰。

参考文献:

- [1] Hsu J R C, Yu M J, Lee F C, et al. Static bay beach concept for scientists and engineers: a review[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(2): 76-91.
- [2] Maurich L. Schwartz. *Encyclopedia of Coastal Science* [M]. Heidelberg: Springer, 2005.
- [3] 李兵,曹立华,庄振业,等.平衡岬湾理论在莱州湾东岸砂质海滩的应用分析[J].*中国海洋大学学报:自然科学版*, 2012,42(12): 77-90.
- [4] Komar P D. Komar. *Beach Processes and Sedimentation (2nd Edition)* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998: 544.
- [5] Silvester R. Stabilization of Sedimentary Coastlines [J]. *Nature*, 1960, 188: 467-469. doi: 10.1038/188467a.
- [6] Hsu J R C, Evans C. Parabolic bay shapes and applications [C]// *ICE Proceedings*. Thomas Telford, 1989, 87(4): 557-570.
- [7] Silvester R, Hsu J R C. New and old ideas in coastal sedimentation [J]. *Reviews in aquatic Sciences*, 1991, 4(4): 375-410.
- [8] Silvester R, Hsu J R C. *Coastal Stabilization: Innovative Concepts* [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.
- [9] Moreno L J, Kraus N C. Equilibrium shape of headland-bay beaches for engineering design [R]. Spain: Coastal Defense Program Madrid, 1999.
- [10] Hsu J R C, Uda T, Silvester R. Shoreline protection methods—Japanese experience [M]// *Handbook of Coastal Engineering*. New York: McGraw-Hill Companies, 2000.
- [11] 杨燕雄,张甲波.静态平衡岬湾海岸理论及其在黄、渤海海岸的应用[J].*海岸工程*, 2007,26(2): 38-46.
- [12] Raabe A L A, Klein A H D F, González M, et al. MEPBAY and SMC: Software tools to support different opera-

- tional levels of headland-bay beach in coastal engineering projects[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(2): 213-226.
- [13] 杨燕雄, 张甲波. 治理海岸侵蚀的人工岬湾养滩综合法[J]. *海洋通报*, 2009, 28(3): 92-98.
- [14] Hardaway C S, Gunn J R. Design and performance of headland bays in Chesapeake Bay, USA[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(2): 203-212.
- [15] Bodge K R. Beach fill stabilization with tuned structures: Experience in the southeastern U. S. A. and Caribbean [M]. Thomas Telford, 1998: 82-93.
- [16] González M, Medina R, Losada M. On the design of beach nourishment projects using static equilibrium concepts: Application to the Spanish coast[J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(2): 227-240.
- [17] 陈文超, 庄振业, 曹立华, 等. 人工岬角对龙口市月亮湾浴场的影响机制[J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(3): 80-86.
- [18] Klein A H D F, Vargas A, André Luís Alice Raabe, et al. Visual assessment of bayed beach stability with computer software[J]. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(29): 1249-1257.
- [19] Lausman R, Klein A H F, Stive M J F. Uncertainty in the application of the parabolic bay shape equation: Part 1 [J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(2): 132-141.
- [20] Lausman R, Klein A H F, Stive M J F. Uncertainty in the application of the parabolic bay shape equation: Part 2 [J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(2): 142-151.

PARABOLIC EQUATION OF STATIC EQUILIBRIUM THEORY FOR HEADLAND-BAY COAST AND ITS APPLICATION TO BEACH NOURISHMENT

PAN Ruiwei, CAO Lihua*, ZHANG Zhenye

(College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Headland-bay coast is a major type of coastal terrain, which accounts for 51 percent of the coastal line of the world and the headland beach is the most important part of the headland-bay coast terrain. Since 1940s, marine geologists and coastal engineers have devoted a lot of researches to the headland bay coast. Especially, the publication of the parabolic bay shape equation (PBSE) in late 1980s and the development of software MEPBAY in 2003, which have played a crucial role in emulating the shape of a balanced coast and assessing the headland-bay shoreline stability. In this paper, we reviewed the concept of a static equilibrium headland-bay, and its application to the understanding of the transformation between the static equilibrium and the dynamic equilibrium, the protection of the straight sand beaches by offshore breakwaters, and the stability enhancement of downstream of single headland point and spur dikes. The parabolic equation is proven effective for the static equilibrium headland-bay coast. Appropriate artificial structures and static equilibrium beaches are significant to the development and protection of the coastal zone. Limitations and uncertainties of the parabolic bay shape equation are also discussed.

Key words: headland bay beaches; static equilibrium; parabolic equation; artificial beach nourishment