

徐信辉, 庄振业, 曹立华, 等. 岬湾海滩静态平衡模式及其应用[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(10): 1-11.

岬湾海滩静态平衡模式及其应用

徐信辉¹, 庄振业¹, 曹立华^{1*}, 邱若峰², 张永华³

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 河北省海洋地质资源调查中心, 河北秦皇岛 066000;

3 国家海洋环境检测中心, 大连 116023)

摘要:岬湾海岸是全球海岸地形的重要组成部分, 存在着大量的人类活动, 这类海岸的研究对于海岸建设和人类活动有着重要意义。海岸科学家和工程师不断尝试用数学公式来量化这种理想的湾形, 20 世纪 80 年代以来取得了大量的成果, 获得了各种经验模型。进入 21 世纪后, 计算机行业迅速发展, 这些理论成果被整合到软件当中使得理论的应用更便捷、人性化和普遍。笔者详细介绍了静态平衡海湾理论, 结合三亚湾人工岛建设对海岸的影响、巴西因比图巴的不稳定海滩、潍坊滨海度假区海滩养护改进方案以及西班牙希洪市海滩设计, 阐述和验证了静态平衡理论在海滩的稳定性判定和解释、现存海滩的改进方案的选择、现存海滩评估和全新海滩设计中的应用和优势, 以期后续海岸工程评估、改进和建设提供参考和指导。

关键词:岬湾海岸; 静态平衡; 工程设计; 平衡海滩; 海滩养护

中图分类号: P753

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2019.173

0 引言

海岸带是人类集聚的重要区域之一, 自 20 世纪 40 年代起, 科学家们对海岸带展开了广泛研究。自国际地圈生物圈计划(IGBP)提出海岸带陆海相互作用(LOICZ)计划之后, 海岸带研究越发被重视。全球大多数的海岸线参差不齐, 存在着突出的岩石岬角或人工构筑物, 砂质海岸经常被这些岬角所分隔, 在全球波浪系统的作用下, 被塑造成特殊的形态——岬湾海岸。岬湾海岸是海岸地形的重要组成部分, 占全球岸线的 51%^[1]。静态平衡理论对于岬湾海岸的平面稳定性研究有着广泛的工程意义, 在岬湾海滩的整体设计研究中也具有重要意义。

1 静态平衡海湾理论

对于岬湾海岸的研究可以分为观测、认识和模拟 3 个阶段。20 世纪初, Halligan^[2] 对相间分布的岬间海湾进行了观测, 几十年后才对这种形态有了理解, 认识到海滩是一种稳定的地形特征, 而且砂质海滩的方向与全球风系引起的盛行涌浪相一致^[3]。Silvester^[4] 首次提出了稳定海湾海滩的概念。之后海岸科学家又从事了大量的深入研究和统计验证。

自然状态下的湾岸, 在输沙和水动力条件稳定的状态下, 岸线会保持相对稳定, 如果上游输沙量减少, 在相同的水动力条件下, 岸线会逐渐后退; 当完全截断上游输沙时, 岸线会后退到一个相对稳定的最终状态, 海滩达到静态平衡(没有上游输沙和河流输沙)。对已经达到静态平衡的海滩, 在“0”输沙的情况下, 岸线也可以保持不变。

就海滩的稳定性而言, 岬湾海滩可以被划分为静态平衡、动态平衡和不稳定海滩(自然重塑海滩)^[5-6], 这 3 种状态随着环境条件改变而相互转化。动态平衡是指存在上游输沙的情况, 在波浪作用下

收稿日期: 2019-08-18

资助项目: 国家海洋局海域管理技术重点实验室开放研究基金(201706)

作者简介: 徐信辉(1995—), 男, 在读硕士, 主要从事海底探测方面的研究工作. E-mail: 2323382343@qq.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

岸线保持动态稳定。随着上游的输沙量逐渐减少,岸线会向岸蚀退,直到蚀退到岸线与优势浪的波峰线方向几乎平行,此时的沿岸输沙量为 0;在海湾没有长时间的侵蚀或者堆积,不需要外部输沙就能维持平衡的海滩,称为静态平衡海滩。不稳定海滩是由于岬头变动导致对波浪的遮蔽效应增加,使得下游侵蚀,上游堆积。

在探索稳定海湾海滩形态的过程中,人们提出了许多基于静态平衡理论的长期经验模型,并用曲线拟合它们的边缘形态。其中,最著名的模型有对数螺线模型^[7]、双曲正切模型^[8]和抛物线模型^[9],由于前 2 个模型只能模拟海岸线的形态拟合而没有考虑海岸稳定性,在海岸工程方面的意义不大,而抛物线模型由于能兼顾海岸稳定性成为工程应用中最常用的方式。本文主要介绍的就是抛物线模型。

在拟合了被认为达到静态平衡的 14 个原型海湾模型和 13 个实验室模型的基础上,Hsu 和 Evans^[9]提出了抛物线海湾形状方程,这个方程是二阶多项式的形式:

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left[\frac{\beta}{\theta} \right] + C_2 \left[\frac{\beta}{\theta} \right]^2$$

式中: θ 为任意极角;

R 为对应的极半径;

R_0 为控制线的长度;

β 为控制线和优势波波峰线之间的夹角;

C_0 、 C_1 和 C_2 是 27 个模型的拟合得出的经验参数,是 β 的函数。

对于已知的 β ,其表达式如下:

$$C_0 = 0.0707 - 0.0047\beta + 0.000349\beta^2 - 0.00000875\beta^3 + 0.0000004765\beta^4$$

$$C_1 = 0.9536 + 0.0078\beta - 0.00004879\beta^2 + 0.0000182\beta^3 + 0.0000001281\beta^4$$

$$C_2 = 0.0214 - 0.0078\beta + 0.0003004\beta^2 - 0.00001183\beta^3 + 0.0000009343\beta^4$$

该方程的模型缩略图见图 1。 β 角的一般范围为 $10^\circ \sim 80^\circ$, C 值范围为 $2.5 \sim -1.0$,适用于大部分的现场条件。以 2° 为增量, β 从 20° 到 80° ,对应的无量纲比 R/R_0 的值已制成表格供使用^[6]。抛物线模型中焦点就是波浪绕射点,根据方程表达式可以看出曲线的形态取决于 β 和 R_0 , Moreno 和 Kraus^[8]

分析了两者的变化时曲线形状的响应。在模型中, β 和 R_0 是处于相互制约的关系,由于模型定义 θ 始终大于等于 β ,所以随着 β 增加, R_0 是不断减小的。总的来说, β 和 R_0 分别控制着曲线的形状和尺度大小。

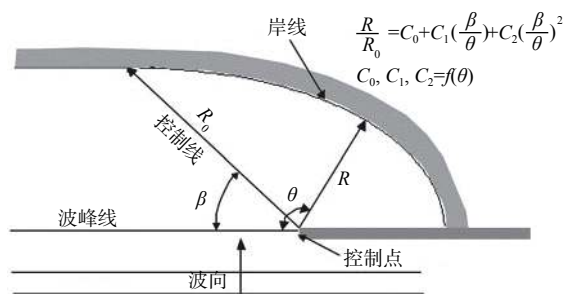


图 1 静态平衡抛物线略图

Fig.1 Diagram of static equilibrium parabola

模型的物理意义是在 2 个控制点 R_0 和 β 已知的情况下,不同的 θ 对应的 R 端点能确定唯一的一条抛物线;其地质意义就是模拟了在稳定的水动力条件下(波峰线控制),波浪在经过岬角的绕射和散射后,在岸边同时破碎时(不产生沿岸流时)的边缘形态。

这个模型的应用建立在优势浪波峰线方向和 β 、 R_0 这 2 个参数的确定上。在优势浪方向的确定方法上,Hsu 和 Evans^[9]主张用下游海岸尖端岸线的切线来确定,但是这个方向可能跟真正的主波前方向没有什么关系。González 和 Medina^[10]用衍射点的区域平均波能流方向作为优势波峰线方向,这个准则应用较为普遍。在优势波浪确定的情况下,在 Hsu 和 Evans^[9]最早的研究中, β 和 R_0 都是由控制点的选择决定的,下游控制点的选择最初是靠肉眼来判断;而 González 和 Medina^[10]定义了 $\alpha_{\min}$ 来确定下游控制点, $\alpha_{\min}$ 是关于上游控制点到下游直线段垂直距离与波长比值 (Y/L_s) 的函数,其中, $L_s = f(h_0, T_{s12})$, h_0 为控制点附近的平均水深, T_{s12} 是波高超过 $12 h/a$ 的波浪平均周期。定义了 $\alpha_{\min}$ 后有 $\beta = 90^\circ - \alpha_{\min}$, $R_0 = \frac{Y}{\cos \alpha_{\min}}$,即得到下游控制点。当 β 和 R_0 为既定值,根据上面提到的物理意义则可以得到唯一的一条理论岸线。随着遥感技术的发展,只需要一张目标海湾的垂直卫星图像,就可以用这个方法进行分析,然后将现存岸线和平衡岸线对比,就能给出其稳定性评估。这些步骤虽然原理简单,但是操作起来工作重复而且繁杂,为

了减少人力劳动, 抛物线模型被数字化到了 MEPBAY^[11] 和 SMC^[10, 12] 中, 为该理论在海岸工程上的应用提供了更方便的工具, 凸显了该模式的工程意义。

2 静态平衡理论在工程中的应用

2.1 验证岬湾海滩的稳定性

海岸带是人类活动最为频繁的区域, 随着经济发展的需求, 人们需要在近海建设大量的工程, 尤其是在存在天然岬角的海湾中, 有天然岬角的遮蔽, 湾内平静海域适合建设港口码头和供休闲游览的人工岛。这些工程的建设会对岸线产生严重的影响, 可以用静态平衡来对工程的影响评估, 并提出

合理的建议来完善或维护。

2.1.1 三亚湾海滩平衡状态判定

三亚湾海滩位于肖旗河口和三亚河口之间, 长度达 17 km, 属于沙坝潟湖海岸, 海滩位于向外海敞开的大沙坝的向海侧。其物源主要是来自湾内的陆架沉积物和沙坝少量输沙, 这些沉积物是古海岸沉积, 包括大量的河口堆积和海蚀沉积物, 在物源丰度方面很有优势, 因此, 长期处于动态平衡状态。作为我国著名的旅游景区, 三亚为了给旅游提供更便捷的服务和基础设施支持, 不断在海岸进行开发建设, 2003 年和 2014 年先后在湾内岬角后侧围海造陆, 建设了凤凰岛的一期和二期工程(新游轮码头)。本文用 MEPBAY 软件对 18 年的卫星云图(图 2)进行了处理。



图 2 三亚湾凤凰岛工程建设前后 MEPBAY 曲线变化

(底图: 谷歌地图)

Fig.2 Changes of MEPBAY curves before and after the Phoenix Island project in Sanya Bay

(courtesy of Google Earth imagery)

该湾内常浪向为 SW 和 S—SE 方向^[13], 其中, S—SE 向波浪的频率高, 强度相对较低, SW 向浪则相反。2003 年凤凰岛未建设之前, 选择点 A 作为上游控制点, 由于鹿回头岬角能遮蔽的浪向主要是 SE 向波浪, 故下游控制点选择在 D 点, 在该点的岸线切线上选一个 F 点作为切线点, 进行拟合得到 DA' (红色线)。静态平衡界限在现有岸线的靠陆一侧, 说明在没有外来沉积物供应的情况下, 岸线要蚀退

到 DA' 位置才能达到平衡, 而事实上存在来自湾内的沉积物供应, 因此, 现有阶段仍处于动态平衡状态。

2003 年建了凤凰岛的一期工程后, 选择 B 点作为上游控制点, 在该点的波浪是来自 A 点波浪绕射折射的效果叠加, 波峰线向 NE 方向有所转动, 因此, 选择了 E 点为下游控制点, G 点为切线点。拟合得到 DB' (黄色), 相对于 DA', 静态平衡界限更加向陆地方向靠近, 这说明比原来侵蚀趋势更加严重, 这

一点也在前人研究成果中得到了验证。这一海滩段是三大侵蚀热点之一^[14],而且从 2014 年起,政府开始人工抛沙来对这一岸段进行维护。

2015 年前后凤凰岛二期工程投入建设,将海上绕射点推移到了图中的 C 点处,以该点作为上游控制点,下游控制点和切线点不变拟合所得的 DC' 已经与现存的岸线很接近。说明新工程的建设可能会使得海滩趋向稳定,这个工程的具体影响还要在后续的观测研究资料中验证。

对整个过程进行波浪响应分析。来自 SW 方向的波浪在经过鹿回头礁石的绕射后,向湾内扩散,到达海岸靠岬角处波峰线方向与岸线锐角相交,在平衡曲线上看,岬角下游处于侵蚀状态。部分抵达东部岬角反射后波浪与海岸锐角相交,形成向 W 的沿岸流,对侵蚀有所缓解,但是经过反射后波能消减很多,缓解有限;SE 方向的绕射波浪几乎垂直下游岸线,西段的岸线也相对处于稳定状态。波浪在岬头波能辐聚折射后,向 N 或 NW 方向流动,在海岸处形成向 W 的波能较弱的沿岸流,由于 SW 方向为强浪向,且波能较弱只能轻微缓解。在进行了凤凰岛一期工程后,SW 方向的波浪在近岸处先经过这个次级岬角处反射,反射的波浪和原来的波浪在这里叠加,加强了侵蚀。同时,来自 SE 方向的波浪经过鹿回头岬角的绕射后,本来在湾内扩散消减的波能能量在次级岬角处再次波能辐聚,形成较强的侵蚀。总体来看,侵蚀比没建这个工程之前更加严重。由于湾内有大量沉积物,减缓了侵蚀。在 2015 年建设二期工程后,由于离岸更远了,岬角的波能辐聚对海岸的影响相对变弱,能够较好地抵消来自 SW 方向波浪形成的向 E 的沿岸流。加上对于近海采砂的严格管控,近岸泥沙回淤,水深变浅,削弱了波浪影响,使得海滩处于相对稳定状态。政府针对建设海岸工程对海滩破坏严重这一状况采取措施,在 2014 年 6—9 月在金鸡岭路口至光明路口处进行了海滩养护,并且在侵蚀严重岸段建设了护岸。

可以看到,人工构筑物对于海岸影响巨大,但可以利用静态平衡岸线来判断稳定状态。在动态平衡状态下,海滩沉积物供应减少会导致严重侵蚀。通过建设次级岬角,可以使其不受外来物源供应的限制。这实际上是通过改变岬头位置来使其达到静态平衡。除了建设次级岬角以外,还可以在原来

岬头基础上延伸或弯折,以此达到静态平衡状态。

2.1.2 因比图巴波尔图海滩的自然重塑

图 3 中的防波堤建在巴西圣卡塔琳娜州的因比图巴(Imbituba)波尔图海滩的自然岬角上,目的是使港口产生平静的水面。防波堤的建设始于 1972 年,到 1975 年建设到了图中的 B 点(550 m),1980 年在海滩上建设了 3 个防波堤,随后在 1982 年将防波堤延伸到了 C 点(850 m)处。图片拍摄于 2009 年,应用 MEPBAY 软件进行分析,在 1972 年之前,选择 A 作为上游控制点,下游控制点 D 点,选择下游岸线的切线上的 E 点作为切线点,拟合所得曲线为 DA',位于现存的海岸向陆侧,即建防波堤之前,因比图巴湾处在动态平衡状态;1975 年,防波堤建成后,上游控制点选择点 B,下游控制点和切线点不改变,拟合所得曲线为 DB',海滩处于自然重塑状态;1982 年后以 C 点为上游控制点,拟合后得到的 DC',更加偏向海一侧。

从拟合曲线状态和自然重塑海滩特征可知,建设防波堤之后,海滩发生自然重塑,D 点所在的下游会发生侵蚀,侵蚀的物质会在 NE 向浪产生的向 S 沿岸流的作用下,在港区发生淤积。在第 1 段防波堤建成后,人们就发现了这一点,所以在 1980 年在海滩上建设了 3 个垂直海岸的防波堤,阻断下游侵蚀物质向海湾内输沙,以此来保证湾内航道畅通。对于下游的侵蚀,需要进行人工填充沉积物来维持下游的稳定。这一结论在 Robert Lausman 的研究中得到验证^[15],对比 1966 年和 2001 年的岸线(图 4)可以看出,定义的 D 点北部发生侵蚀,岸线蚀退,而防波堤遮蔽的港区内则发生了大量的淤积。对港务局的大量数据分析得出,这些大的形态变化主要在 1972 年到 1982 年之间^[16],也就是第 1 段防波堤建成到 1980 年的垂岸防波堤发挥作用的这一段时间。

在海岸的建设中,经常会由于新的构筑物对海滩的稳定产生严重影响,甚至会影响海岸设施的功能,应用静态平衡的概念来对其进行分析,根据反馈的侵蚀和淤积结果,有针对性地进行维护和规划,有助于海岸的高效和可持续利用。

2.2 基于静态平衡理论的防波堤和丁坝设计

对于一些比较长的海滩的养护,两侧岬角丁坝由于工程量原因可能达不到合适的长度,所以不能



图 3 巴西因比图巴码头防波堤建设对海岸稳定性影响和应对工程 (底图: 谷歌地图)

Fig.3 Impact of the breakwater construction of the Imbituba Pier in Brazil on the stability of the coast and response engineering (courtesy of Google Earth imagery)

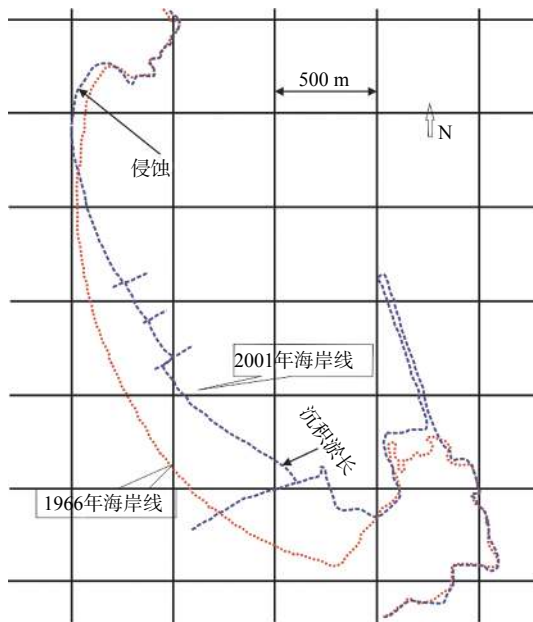


图 4 因比图巴 1966—2001 年岸线变化 (据文献 [16])

Fig.4 Imbituba shoreline change from 1966 to 2001 (from reference [16])

完成对于整个海滩的遮蔽, 这种情形需要将长沙滩分段并且使得每一段都符合静态平衡, 从而更好地对海滩进行养护。一般情况下建设丁坝和防波堤是常用的应对手段。

潍坊滨海旅游度假区为了充分发挥其旅游功

能, 在原本是粉砂淤泥质的海滩上建设了人工沙滩。沙滩共经过 2 期建设, 第 1 期人工滩由两侧 250 m 长的丁坝围堵, 海滩全长 1 600 m (不符合《美国海岸工程手册》中丁坝间距和有效长度比值达到 2~4 倍的规格), 1 年过后, 人工滩侵蚀严重 (图 5), 之后又进行了第 2 期改进。本文主要就第 2 期改进建设应用静态平衡来评价。

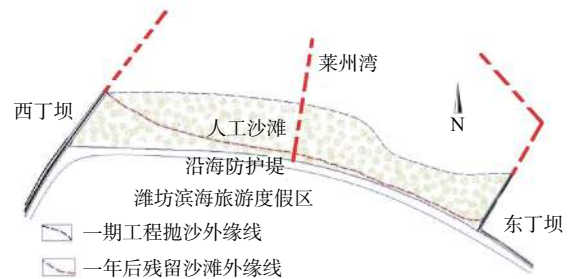


图 5 潍坊滨海度假区人工海滩一期工程侵蚀情况和初步改进方案 (据文献 [17])

Fig.5 The erosion of artificial beach in Weifang Coastal Resort and its preliminary improvement plan for the first phase of the project (from reference [17])

要改进第 1 期工程首先要分析海滩侵蚀原因。据统计, 该区的常浪向为 NE 向, 次常浪向为 NNE 向, 强浪向为 NE 向^[18], 长度 1 600 m 的海滩完全暴露在 NE 向主浪下, 波浪入射线与岸线锐角相交产

生向西的沿岸流,导致海滩沙自东向西输运,从剖面来看表现为东部侵蚀极为严重,而西部相对较弱。

总结第 1 期侵蚀原因,改进的方向应该是遮蔽 NE 向波浪,并阻断海滩沙的自东向西输运,同时要防止海滩沙逃逸出西丁坝。大致改进方案如图 5。中间堤坝将海滩分为东区和西区,就西区而言,如果中间堤坝形态为“1”字型,就会失去对西海滩的波浪遮蔽效应,西部海滩即使抛沙也难以维持;而对东区而言,在方案 1 中就有对东部堤坝的勾头设想,勾头效果会在后面检验,所以进一步的改进方案就是在中部采用“T”字型丁坝,初步确定改进形态后,东西两区都形成了较为封闭的岬湾海岸,可以应用静态平衡理论来分析设计最终方案。这里以西区勾头设计为例来分析。

勾头的平面布置形态可以用坝长、勾头长度和

勾头角度来进行描述。分别研究 3 个因素对于沙滩的平衡界限影响。以坝长作为自变量,控制其他 2 个因素分别为 180 m 和 0° ,以 20 m 为间隔,用 MEPBAY 软件绘制出静态平衡界限,如图 6a,能够看出随着坝体长度增加,平衡界限所圈闭的沙滩面积是增加的,左侧未封闭区以现有沙滩作为边界,在 CAD 中同比例尺面积测量得出增幅为 3.2%。对勾头长度影响的研究如图 6b,控制其他 2 个因素为 450 m 和 0° ,先得出了没有勾头情况下的平衡界限的位置(黑线),然后以 20 m 间隔分别绘制勾头为 160、180 和 200 m 时的平衡界限,160 m 勾头对应圈闭沙滩面积相对没有勾头增加了 48%,之后的增幅分别为 5.3% 和 6.5%。研究角度影响时,控制其他 2 个因素为 450 和 180 m,以 15° 为间隔,画出平衡界限如图 6c,面积增幅分别为 2% 和 -0.6% 。

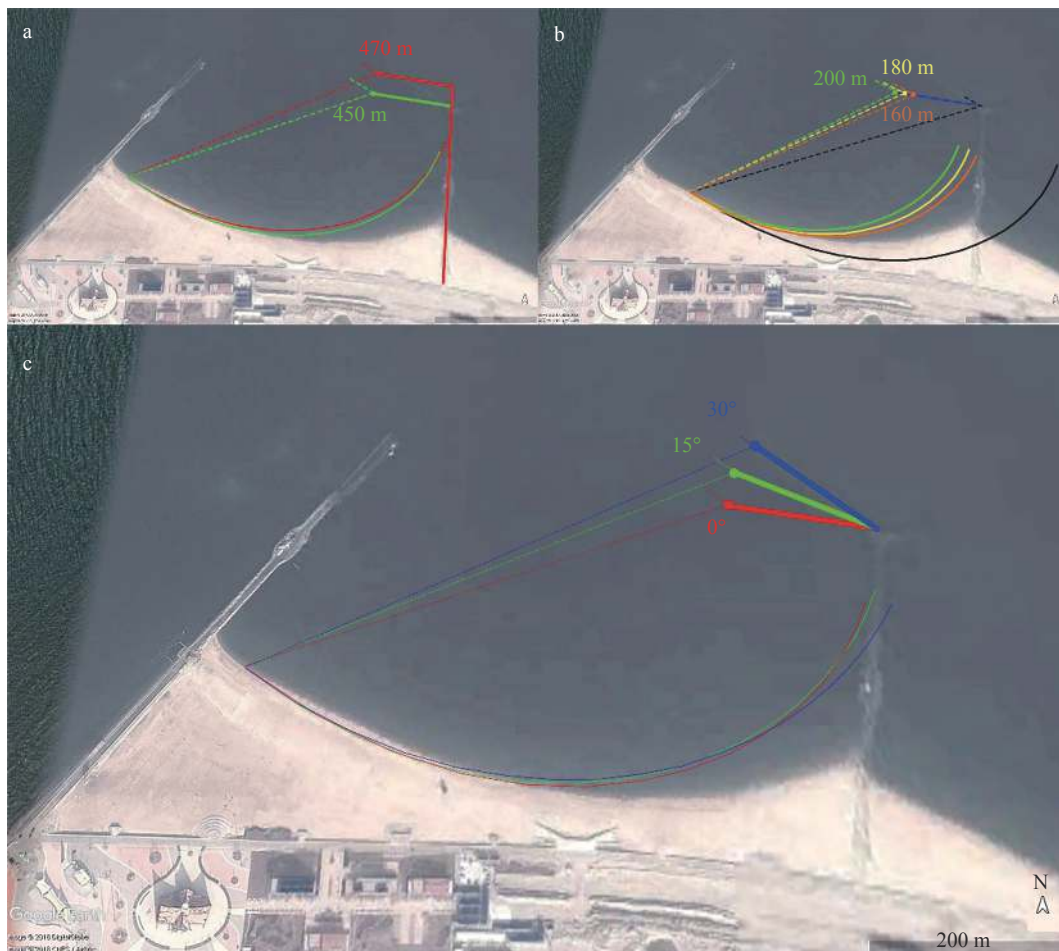


图 6 坝长、勾头长度和勾头角度对海滩设计效果的作用(以西区为例;底图:谷歌地图)

Fig. 6 The effect of dam length, hook length and hook angle on beach design
(take the Western District as an example; courtesy of Google Earth imagery)

综合考虑相同的工程量情况下(同样长度增量),勾头所能取得的效果比增加坝长好得多,角度影响方面,虽然 30° 相对 15° 面积总量有所减少,但就图中所能看到,在凸顶处实际上面积是增加的,这也从侧面反映出勾头角度向与主波向角度越接近,对海滩的遮蔽效果越好,减少的部分主要存在于靠近丁坝附近,以沙滩中部面积权重较高为出发点和抛沙的规模来看,实际上的有效面积是增加的,可以认为勾头角度向主波向平行靠近能够达到最优角度,并且这一角度的优化不会造成工程量的增加。具体的方案选择还要考虑抛沙的规模和对于海滩宽度的需求。

设计者权衡工程量和实际需求最终设计如下:东丁坝向海延伸至 762 m,丁坝头向沙滩中部环抱,指向 NW 向;西丁坝延伸至 620 m,T 型坝建设在东丁坝西 700 m 处,西部勾头 180 m,方向为在垂直坝身基础上旋转 30° ,东部勾头 100 m,垂直坝身建设。

对现有的丁坝设计和现有海滩的分布再应用静态平衡曲线来评价,得到的结果如图 7 所示。其中,红色线为以现在的丁坝的坝头位置作为上游控制点获得的静态平衡边界。虽然设计的过程中尽量以面积/工程量的最大化为准,但是预设计的静态平衡界限与实际的抛沙在靠近丁坝附近的差距还是比较大的。可能是由于靠近丁坝随着水深增加对沙的需求量与这一部分海滩的效益出现不平衡,所以选择不往深处填沙,而原来是粉砂淤泥质潮滩的性质也很难提供达到这个平衡所需要的泥沙供应。蓝色线为这一边界与现有海滩吻合的比较好的情况下,上游控制点的位置。单纯考虑这一因素的前提下,设计时将坝头位置控制在蓝色控制点处,分别可以省 50 m 和 200 m 左右的工程量。周军^[17]提到二期工程以来约半年,人造沙滩稳定显淤。2013 年 10 月 14 日,增水 1.0~1.5 m,击浪达岸边防潮坝,监测显示沙滩无侵蚀迹象,总体相对是稳定的。



图 7 现有丁坝设计的评估(底图:谷歌地图)

Fig.7 Evaluation of existing spur design
(courtesy of Google Earth imagery)

2.3 平衡平面和剖面结合的综合设计应用

前面应用静态平衡的案例都是在现存沙滩的基础上进行养护,这些设计都只是应用了静态平衡岸线的平面设计原则。González 和 Medina^[10]在提出下游控制点的具体计算方法的同时,结合平衡剖

面的原理进行这类海滩的设计,提出了平衡海滩的概念。

西班牙波尼恩特海滩位于希洪市码头附近,在西侧坎塔布里亚造船厂和东侧码头防波堤之间(海滩建设前研究区域的位置见图 8),原来只有岩滩,没有沙滩。当地政府和港务局致力于在研究区内

创建新的海滩,并对海滩的建设提出了要求:海滩设计的首要限制是海滩的沉积物不能绕进码头和船舶的入口;养护所用的沙遵循就近原则,用陆架疏浚的岸外物质进行养护($D_{50}=0.4\text{ mm}$);在夏季,工程海滩区域中部从边墙到岸线(平均大潮高潮面)的干海滩宽度接近 75 m。

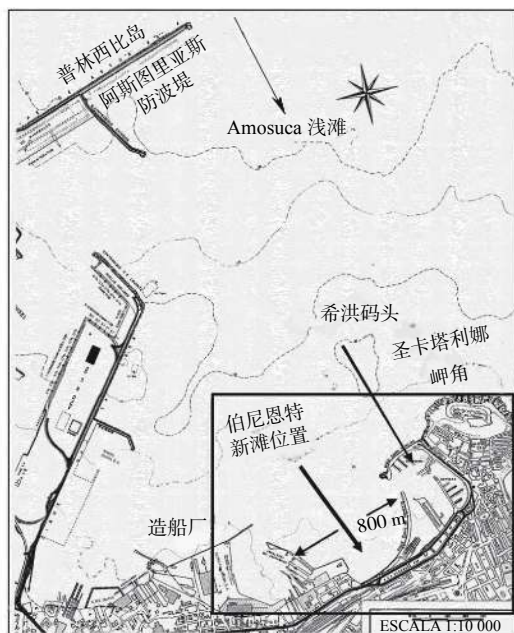


图 8 波尼恩特海滩位置 (据文献 [19])

Fig.8 The location of Poniente Beach (from reference [19])

海滩设计时选用了海滩养护研究中比较成熟的袋状海滩,确定东西两侧各一个防波堤。结合 SMC(海岸营力系统)对研究区域分析,进行合理的设计。

用 SMC 中的 Oluca-SP 模型对于研究区内波浪的传播进行模拟,结果显示波浪传播主要受普林西比岛阿斯图里亚斯防波堤、Amosucas 浅滩和当地的硬质海底起伏的影响。

由于应用静态平衡岸线确定平均波能流和平衡剖面的参数都需要用局部的波候特征,所以要得出近岸的波候状况。西班牙 SMC 系统的长期监测数据经过校准得出多个假定防波堤岬头上波浪状况,每一个假定的岬头都对应着不同的平均波能流方向。

对于平衡剖面,要求中以夏季状况为标准,这与 González 等^[20]的反射—衍射平衡剖面(RDEP)一致,中部由于存在-1.0 m 处的岩礁作用,而选用 Medina 等^[21]提出暗礁保护的平衡海滩剖面。对于

任意给定防波堤定点 T 可以通过如下的步骤获取其对应的平衡岸线(图 9):①根据上述的矫正后模型中相应 T 点的波候状况获得该点的平均波能流的方向;②确定平衡岸线经过的一点 C(这里 C 点由夏季干滩宽度为 75 m 确定),得出 R_c 和 θ_c ;③根据控制点 T 点的波浪参数得出 $L_s = f(h_0, T_{s12})$,其中 h_0 、 T_{s12} 意义前文已经提到;④定义平衡岸线的 Y,此时的 Y 还是个估计值,在预测岸线可能会经过的区域选择一个 Y,后面还会对这个 Y 进行评估,这会是一个迭代过程;⑤根据 $\alpha_{\min} = f(Y/L_s)$ 求得 $\alpha_{\min}$ 的值进一步得出 β , $\beta = 90^\circ - \alpha_{\min}$;⑥求出 R_0 的值,定义下游控制点 P_0 :

$$R_0 = \frac{R_c}{C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta_c} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta_c} \right)^2}$$

式中: C_0 、 C_1 、 C_2 由抛物线模型定义得出,而其他参数由 C 点定义;⑦对选取的 Y 进行评估: $Y' = R_0 \cos \alpha_{\min}$, 比较选定的 Y 和 Y' 值,如果差值过大,那么回到第 4 步重新选择 Y 值,直至差值达到可接受范围;⑧此时的 Y 对应的岸线就是这一控制点 T 对应的平衡岸线。

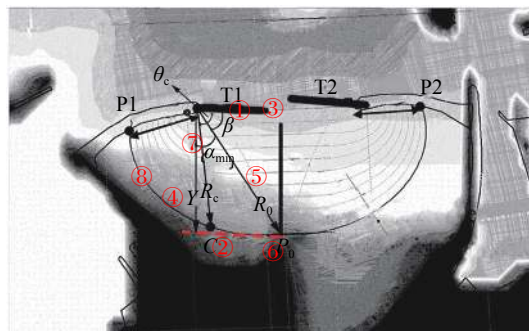


图 9 应用 SMC 设计平衡海滩 (据文献 [10])

Fig.9 Apply SMC to design a balanced beach (from reference [10])

对于上游控制点 T 的选取也是个迭代的过程,对于给定的 T1 点,沿着防波堤附近的剖面符合反射-衍射剖面模型,用该模型得出剖面,从 T1 点开始安置剖面,结束点为 P1,得出的静态平衡岸线不仅要经过点 C,还要经过剖面界线点 P1,以此条件迭代得出合适的 T1 点。

关于中部区域的剖面设置,由于存在岩石暗礁(-1.0 m),基于客沙的平均粒径($D_{50}=0.4\text{ mm}$)得出形状参数 A;根据暗礁保护的平衡剖面分析^[21],得出调整过后的参数 A_{rp} ;根据波候条件,得出对应

剖面。

最终的平衡海滩设计如图 10,最大防波堤长度为 225 m,控制点选择了 T1、T2(图 9),根据波候得出平均波能流方向分别为 N6E 和 N17E,防波堤附近平衡剖面长度达到 110 m。

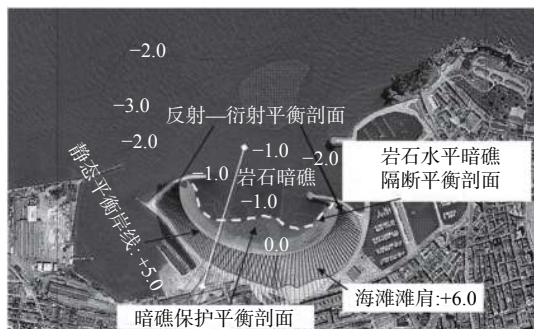


图 10 波尼恩特海滩设计全貌(据文献[19])

Fig.10 Overall design of the Ponente Beach
(from reference [19])

考虑到研究区域的海平面影响因素,最终将海滩滩肩设置在 6.0 m 高度处,平衡岸线设置在 5.0 m 高度处,填沙底界面设置在接近 0 高度。具体填沙位置根据所得的平衡剖面形态填充,最终填沙 300 000 m³。经评估在十年尺度乃至现今都能保持平衡稳定状态^[19]。

平面与剖面相结合适用于没有海滩基础情况下的全新海滩设计,能够做到量化设计,但是需要相应的数据来支持,对于设计长期稳定的海滩具有很好的实用性。

3 讨论

上述海岸工程案例中应用了静态平衡模式,从静态平衡理论发展的历史能够得出,这个理论是一种统计规律,得出的是一种最终状态和发展趋势,而应用该理论进行设计是为了能用最小的成本使得建设时期就达到这一最终状态,减少无用的建设或消耗。从这一点来讲,静态平衡理论有很重要的经济价值。

3.1 多变量方程应用中的如何求得唯一解

方程在工程中的实际应用可以分为 2 种情况:①已经存在天然的海滩;②不存在海滩,从“零”开始设计创造一个海滩。对于前者,根据 Hsu^[9] 最早的方程,在 R_0 和 β 已知时,方程会定义一条唯一的

曲线,波峰线方向和下游控制点的选取决定了这个唯一解。下游控制点的选取是以平均波能流方向为下游岸线切线方向的点(有原始的海滩岸线才能用)。对于后者,由于没有现存海滩岸线,要用迭代方式结合海滩平衡剖面来获得最终解,具体方法在西班牙波尼恩特案例中详细介绍了。

3.2 静态平衡理论岸线选择

静态平衡理论在实际应用中既可以应用于高潮时的岸线,也可以应用于低潮时的岸线,具体选择要视项目要求和具体情况具体选择。项目要求最小干滩宽度或者没有要求但是成本预算比较紧凑的项目适合一高潮时岸线作为养滩预测岸线,如果要求较好的岸线保护能力,注重海岸基础设施的防护,进行保守设计,那么低潮时的岸线作为预测岸线是更好地选择。

3.3 静态平衡理论的不确定性

由于静态平衡理论是统计规律得出的理论,所以在应用的过程中就有条件性和不确定性。适用的条件潘瑞伟^[22]已经给出了总结,这里要补充一点,统计大多数海岸得出的 β 范围为 20°~80°,但是工程设计时在预选方案中可能会超出这个限度,这时就要用其他的预测方式来实现。关于不确定性的原因,本文给出详细讨论:

首先,不确定性的原因来自底图获取的方式。获取海岸图像的方式可以是有目的性的航拍或者是卫星图(Google Earth),获取图的方式不同,得到的清晰度有差异,结果也会有差异;除此之外,卫星云图是图片配准后的拼合,在拼合的界限处的海岸图像可能存在一定误差,结果也会存在不确定性。

其次,处理方式造成的不确定性。最原始的在图上手动确定各点不会存在转换时的信息丢失,而用 MEPBAY 等软件时,较早的版本对于图像的大小、格式有限制,只能处理 jpg 格式,并且不能超过 20 Mb,要用它处理就会牺牲清晰度,或者在格式转换上导致信息丢失。

最后,控制点选择上的不确定性。根据下游海岸切线选择下游控制点时,点位置随着人的主观意识而不同。在 Lausman 等^[15-16]的研究中,多名参与者在没有任何参照,仅凭肉眼选择控制点时,得到的结果相比实际平衡岸线向陆整体偏移 40 m, β 误

差在 10° 范围内,但在给出了控制点对应的平衡岸线图像的情况下取得了更好的效果^[15]。下游控制点的定量算法^[10]提出后,仍然存在不确定性。这一方法用的是上游控制点的平均波能流方向作为岸线的延伸方向,而在计算角 β 时,又引入了新的参数 Y 。 Y 的选取仍然是通过肉眼判断,但是研究表明误差降低到 5° 以内,而且波尼恩特海滩案例中,通过迭代的方式能进一步减小误差,具体要看迭代的间隔或密度。

3.4 MEPBAY 和 SMC 系统的适用性

将静态平衡岸线整合到软件当中使其在海岸工程中应用变得更为便捷,其对海岸保护的意义才能凸显出来。在上述案例中应用到了常用的软件 MEPBAY 和 SMC。其中 MEPBAY 基于最早的平面抛物线模型,程序化了抛物线获得过程,操作和应用都比较简单。SMC 则是以 González 提出的平衡海滩^[10]为基础,结合了平衡平面模型^[9-10]和平衡剖面模型^[20-21, 23-25]。所有这些平衡公式的输入数据均由 Odín、Atlas 和 Baco 预处理程序提供。

MEPBAY 适用于工程评估,从结构(长度、位置和方向)配置不同从而导致的波浪衍射点不同的众多提案中确定最佳设计方案。设计者可以从屏幕显示的预测静态海湾形态中构筑物对海滩稳定性影响。然而,MEPBAY 不能为设计阶段提供准确的数据,它的数据只能从图像上提取,输出数据的质量直接取决于图像的分辨率。因此,MEPBAY 适用于预设计阶段。SMC 在 MEPBAY 基础上还需要输入一组历史数据,如水深和波浪方向数据,使用数学模型处理,提高了预测的精确度,所以比较适用于设计阶段。

虽然 SMC 精确度更高,但是需要额外的数据输入,对于有着完善的海岸监控体系的西班牙来说是很好的方法,而对于海岸监控体系不完善的地区,需要建设新的长尺度的监控网络,以获得可用的历史数据,这就提高了成本。软件的选择可以在成本和精度要求之间平衡取舍。2 个软件亦可以用于同一个项目的预设计和设计阶段,既能够提高效率,还能提高精确度。

在处理工程问题时,要根据需求应用这一方程。要根据环境情况确定能不能应用,根据不同的工程情况(讨论 3.1)或者不同的设计阶段选择不同求解

方法,结合不同的软件来设计以满足工程要求。在应用过程中要根据产生不确定性的因素来对症下药,将不确定性降到最低。

4 结论

总体而言,静态平衡海湾的概念和其衍生的软件已经被广泛的应用于海岸防护工程中,本文众多案例就是应用的实践。三亚湾和巴西因比图巴案例表明静态平衡剖面对于动态平衡和不稳定状态的判定较为准确,可以为解释造成侵蚀或淤积的根源,为设计应对方案提供正确的指导;潍坊案例介绍了衍生软件 MEPBAY 在已有海滩的改进设计方案选取和评估方面的应用,应用方便,在总体趋势把控和方案选择中有很好表现;希洪市海滩案例为零设计一个海滩提供了参考,设计精确,可直接投入到工程应用中。

工程实践中将平衡岸线模型的功能与海滩养护相结合,能够明确指导改进方向,有效地节约建设和养护成本。但在应用的过程中要注意其适用性和不确定性,要结合研究区的具体情况和设计要求,合理地选择是否使用静态平衡抛物线模型以及适用于该区条件的软件,给出最简洁、最合理的方案。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Halligan G H. Sand movement on the New South Wales coast [C]// Proceeding of Limnology Society, New South Wales, Australia. 1906: 619-640.
- [3] Davies J L. Wave refraction and the evolution of shoreline curves[J]. Geographical Studies, 1959, 5(2): 1-14.
- [4] Silvester R. Stabilization of sedimentary coastlines[J]. Nature, 1960, 188: 467-469.
- [5] 于吉涛, 陈子桑. 华南岬间砂质海岸稳定性研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(2): 110-116.
- [6] Silvester R, Hsu J R C. Coastal Stabilization: Innovative Concepts[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.
- [7] Yasso W E. Plan geometry of headland bay beaches[J]. The Journal of Geology, 1965, 73: 702-714.
- [8] Moreno L J, Kraus N C. Equilibrium shape of headland-bay beaches for engineering design[C]// Proceeding of Coastal Sediments'99: ASCE, 1999: 860-875.
- [9] Hsu J R C, Evans C. Parabolic bay shapes and applications[C]// ICE Proceedings. Thomas Telford, 1989, 87(4): 557-570.

- [10] González M, Medina R. On the application of static equilibrium bay formations to natural and man-made beaches[J]. *Coastal Engineer*, 2001, 43: 209-225.
- [11] Klein A H F, Vargas A, Raabe A L A, et al. Visual assessment of bayed beach stability using computer software[J]. *Computer and Geosciences*, 2003, 29: 1249-1257.
- [12] González M, Medina R. A new methodology for the design of static equilibrium beaches and its application in nourishment projected[J]. *Coastal Engineering*, 2002, 1: 844-859.
- [13] 赵永印. 三亚新机场出运保障基地波浪场数值模拟研究[J]. *中国水运(下半月)*, 2018, 17(12): 103-105, 125.
- [14] 段依妮, 滕骏华, 蔡文博. 基于潮位观测的三亚湾海岸侵蚀遥感提取与分析[J]. *海洋预报*, 2016, 33(3): 57-64.
- [15] 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: 132-141.
- [16] 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: 142-151.
- [17] 周 军. 潍坊滨海旅游度假区人造沙滩监测及稳定性分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [18] 解鸣晓, 李 珊, 侯志强. 岬湾平衡海岸理论在人工沙滩岸线设计中的应用[J]. *中国港湾建设*, 2016, 36(6): 1-6.
- [19] 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.
- [20] Requejo S, Medina R, González M. Equilibrium beach profile for refraction-diffraction areas[C]// *Proceeding of American Society of Civil Engineers Fifth International Conference on Coastal Dynamics*. Barcelona, Spain: Coastal Dynamics, 2005: 1-13.
- [21] Muñoz-Pérez J J, Tejedor I L, Medina R. Equilibrium beach profile model for reef-protected beaches[J]. *Coastal Research*, 1999, 15(4): 950-957.
- [22] 潘瑞伟, 曹立华, 庄振业. 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[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(6): 56-63.
- [23] Dean R G. *Equilibrium beach profiles: U. S. Atlantic and Gulf coasts*[R]. Newark: University of Delaware, 1977.
- [24] Medina R, Bernabeu A M, Vidal C, et al. Relationship between beach morphodynamics and equilibrium profiles[C]//*Proceeding of 27th ICCE: ASCE*, 2001: 2589-2601.
- [25] González M, Medina R. Equilibrium beach profiles: effects of refraction[C]//*Proceeding of International Conference on Coastal Dynamics'97: ASCE*, 1997: 933-942.

BEACH STATIC EQUILIBRIUM MODEL AND ITS APPLICATION

XU Xinhui¹, ZHUANG Zhenye¹, CAO Lihua^{1*}, QIU Ruofeng², ZHANG Yonghua³

(1 College of Marine Geosciences, China Ocean University, Qingdao 266100, China; 2 Hebei Marine Geological Resources Survey Center, Qinhuangdao 066000, Hebei, China; 3 National Marine Environment Testing Center, Dalian 116023, China)

Abstract: The headland-bay coast, where prevail active human activities, is an important part of the global coastal system and the study of such a coast is of great significance to coastal construction and development. Coastal scientists and engineers have tried hard to describe and quantify this kind of coast using various mathematical formulas, especially since the 1980s, and a variety of empirical models have been obtained. With the rapid development of computer technology in the new century, these theoretical results have been integrated into software, which makes the application of the theory more convenient and user-friendly, and the application of the theory is getting more common day by day. This paper made a detailed introduction to the static equilibrium bay theory and its application, taking some examples as cases, such as the construction of artificial islands and its impacts in Sanya Bay, the unstable beach in Imbituba, Brazil, the beach maintenance improvement program in Weifang coastal resort and the beach design in Gijon, Spain. Detailed discussion is devoted to the further application of the static equilibrium theory to beach stability assessment and interpretation, the selection of schemes to protect the coast from erosion, the use of the theory to beach evaluation and beach design and the assessment, improvement and construction of subsequent coastal programs.

Key words: headland bay coast; static equilibrium; engineering design; equilibrium beach; beach maintenance