

漂砂制衡設施制衡工法

1. 各種制衡工法

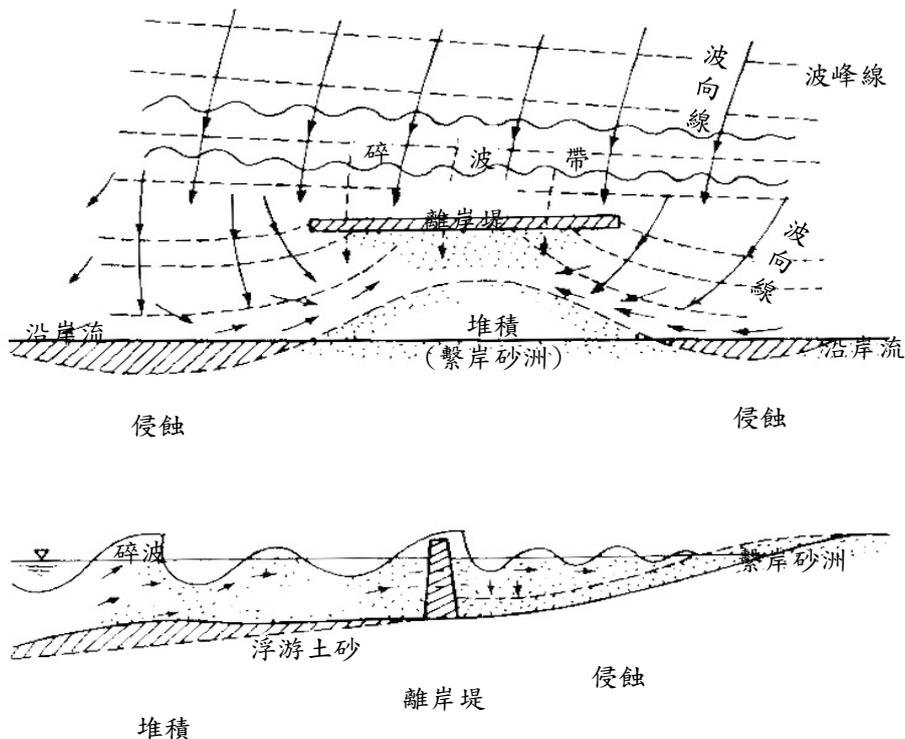
(1) 離岸堤

離岸堤是平行於海岸線，設置於海岸線外海域的結構物，主要機能為消波或減弱波高，促進離岸堤背後堆砂、前灘向前成長，並可減少沿岸漂砂量。傳統離岸堤係利用消波塊從海底堆積至海面，通常設置在水深 5m 以下的淺水海域，結構型式分成以堆砂為目的的透水結構(消波塊)及以減波為目的的不透水結構等 2 種。

傳統離岸堤受大波作用，堤體破損消波塊散落，影響周邊環境的案例，時有所聞。近年來為防護海底坡度陡處的海岸侵蝕及環境景觀保育，有大水深耐久性的新型離岸堤，設置水深約在 8~20m，消波效果約為透過率 60%以下、反射率 50%以下。由於設置水深深，離岸距離大，背後利用面積變大，亦可減少景觀視野影響，結構型式分成有腳式或重力式。

離岸堤如下圖所示，具有波繞射及消波的功能，可制衡沿岸方向及垂直沿岸方向漂砂的效果。

2011 埃及尼羅河之旅

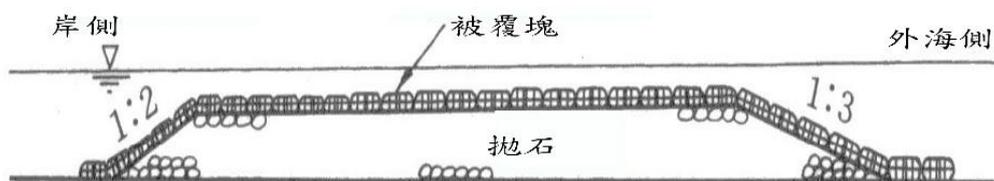


在碎波帶內設置透水結構離岸堤的堆砂機構有：

- ① 離岸堤引起波繞射會成沿岸方向的沿岸流，衰減離岸堤背後的波高，導致發生通過離岸堤從外海流向岸的流。
- ② 碎波或反射波致使底質浮游，隨上述流搬運至岸側。
- ③ 離岸堤背後因離岸堤存在，該水域靜穩度較其他水域靜穩，部分浮游底質沉降，致使離岸堤背後灘線前進，形成**繫岸砂洲**，逐漸發達靠近離岸堤，甚至有完全接合者。離岸堤背後因循環流發達，沿岸流被阻斷無法形成強烈沿岸流，可減少沿岸漂砂量，在離岸堤設置範圍可抑制侵蝕。若選定開口寬的高消波效率離岸堤，其效果同如人工岬，可形成**靜安定海灘**。離岸堤對供給土砂減少的海岸，可減少沿岸漂砂量，是有效的漂砂制衡對策，但是若完全阻隔沿岸漂砂，會致使離岸堤下游側產生侵蝕，必要小心檢討。前灘已完全被侵蝕或漂砂源已枯竭的海岸，設置離岸堤亦無法復原前灘，周邊海岸會持續侵蝕。選定離岸堤工法時必要檢討海岸的漂砂特性，判斷其可行性。

(2) 人工礁

人工礁不同於突堤的直接制衡沿岸漂砂，主要是制衡波高、波向及波引起流，屬間接制衡漂砂的工法，其斷面例如下圖。



人工礁適用性，從漂砂制衡觀點有下列4點：

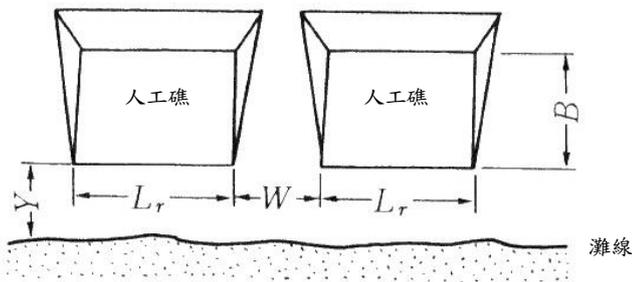
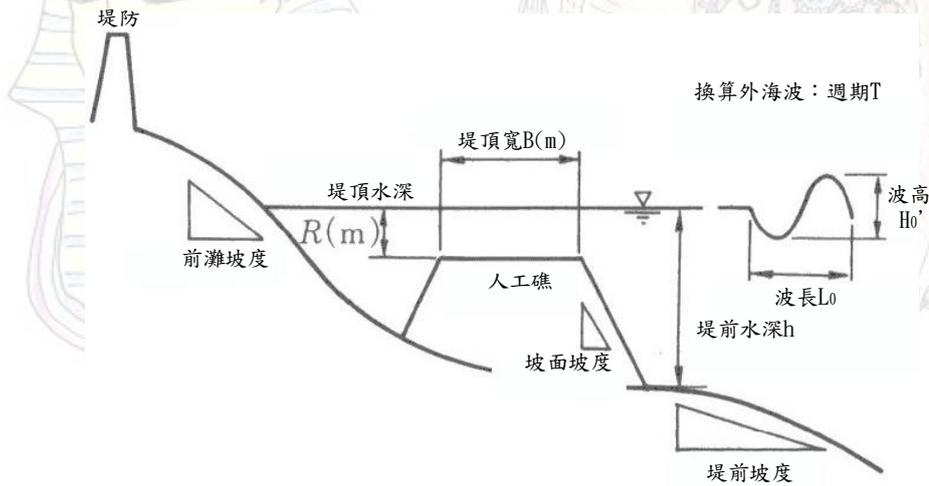
- ① 設置人工岬或離岸堤海岸的灘線前進
- ② 人工礁群引起沿岸漂砂量減少
- ③ 形成安定海底(利用人工礁的高消波效果)
- ④ 防止養灘砂流出外海

由於人工礁設置於水面下，反射率小為其特徵，下列狀況亦適用：

- ⑤ 因景觀需求必要設置於水面下
- ⑥ 同時必要考量背後漂砂、波浪暴潮對策及減輕前面水域反射波

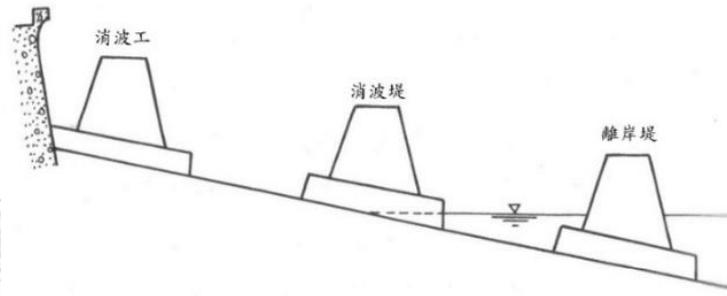
從波高制衡觀點，人工礁堤頂寬通常必要寬於離岸堤。在陡海底坡度海域，人工礁設置水深變深，設計波高變大，堤體大型化，提高工程費，故選定工法時，即使為景觀，亦必要考量經濟性。

宇多等學者研究了解人工礁背後的流，依人工礁平面配置，可隨堤長與離岸距離間的關係分類成4種型式。從海灘安定化觀點，決定可形成任意一種型式流況的平面諸元即可。如下圖，堤長為 L_r 、開口寬為 W 、離岸距離為 Y 時，若能達成 $W > 0.25L_r$ 、 $Y < L_r < 4Y$ 的條件即可。



(3) 消波堤

消波堤是利用衰減波力達成防止海崖或砂灘侵蝕的海岸結構物，通常採用異形混凝土消波塊作為堤體。類同消波堤的海岸結構物，有如下圖所示的離岸堤及消波工。消波工是作為海岸堤防、護岸的附屬工而設置，主要目的為減低越波或波壓，無關砂灘的現狀維護。離岸堤是平行設置於海岸線外海側的海域，主要目的為陸側遮蔽區的消波及砂灘的土砂堆積。消波堤設置於海岸線附近，主要目的為維持砂灘現狀。



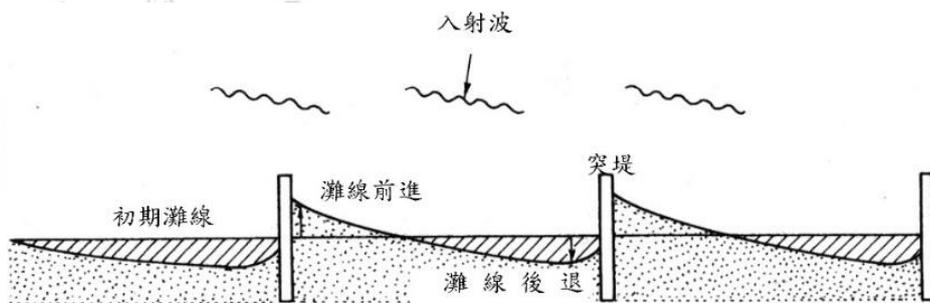
由於消波堤主要目的為維持砂灘現狀，通常採用連續堤。當前灘有寬裕的防災寬度時，為節省經費、縮短工期、確保連絡海灘通路等，可考量具有開口部的不連續堤，開口部容易發生灘線集中後退，必要預測海灘地形變化，決定適切開口寬，並可檢討養灘配合。

(4) 突堤

突堤是從陸上向外海突出的細長海岸結構物，在沿岸漂砂卓越海岸，為減輕防止海岸侵蝕及促進海灘安定化為目的而設置者。突堤通常如下圖，是數個突堤以適當間隔設置，以突堤群發揮其機能，最近配合砂迂迴法等養灘工組成複式工法。

2011 埃及尼羅河之旅

突堤作為漂砂制衡機能是利用捕捉沿岸漂砂的效果，減少沿岸漂砂量，然如下圖所示，在突堤沿岸漂砂下游側海灘，極可能會發生灘線後退，必要留意。



突堤設計目標是確保突堤間預測最終後退位置的砂灘寬，足以滿足海岸保育、海岸域利用及自然環境，因此除必要正確掌握現狀的沿岸漂砂移動方向及移動量外，尚需瞭解沿岸漂砂的連續性、供給源及供給量。在設計突堤時亦必要設定目標期待灘線形狀，及設置突堤可降低沿岸漂砂量的減少率。

設置突堤後的灘線形狀，主要依突堤群的平面形狀及設置間隔決定。漂砂捕捉率隨突堤結構型式、堤長(堤頭水深)、堤頂高、來襲波浪及地形等海岸特性決定。沿岸漂砂移動方向及移動量隨來襲波浪特性變化，因此除必要確定長時期的漂砂卓越方向及移動量，亦必要掌握中、短期的變動。沿突堤流向外海

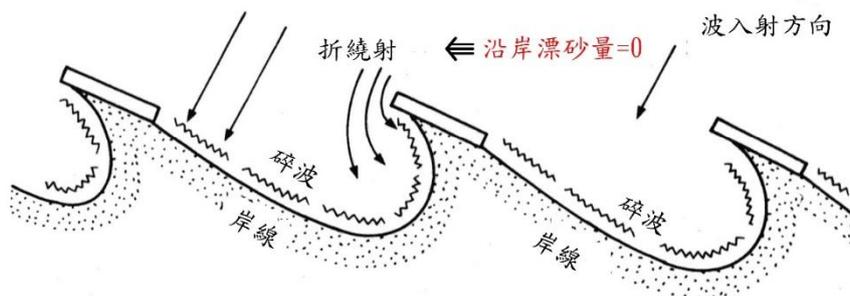
的流會減少沿岸漂砂捕捉率，可能致使無法達成預期效果，故亦必要掌握包含沿岸流在內的海濱流流況。

海岸侵蝕是因漂砂收支失去平衡致使，突堤建造可減少沿岸漂砂，若能使漂砂流入量與漂砂流出量取得均衡，就可能減輕侵蝕，維持海灘及安定化。若突堤阻止過多沿岸漂砂流入，會使漂砂下游側產生嚴重侵蝕，因此必要考量大範圍的土砂收支平衡，規劃突堤群的配置。

突堤的主要水理機能不是制衡波浪而是制衡沿岸流，當來襲波浪垂直海岸線時，入射波浪不會受突堤影響，因此突堤原則上無制衡離向岸方向漂砂的機能，反而有助長離向岸方向漂砂的可能，應留意。

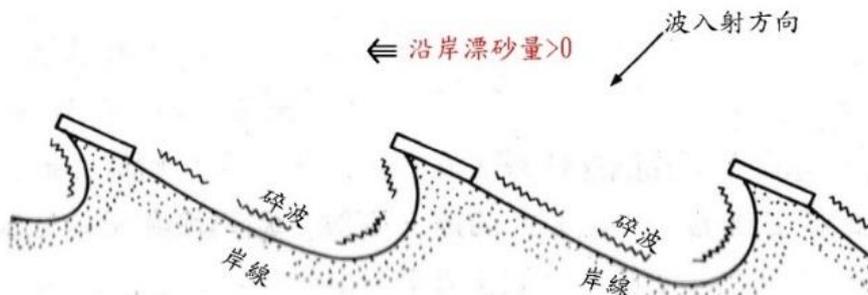
(5) 人工岬

人工岬工法是首先由 Silvester 提唱的岬頭控制系統(headland control system)，是在自然砂灘海岸，針對卓越來襲波浪方向，配置如下圖所示離岸堤群，形成安定砂灘地形的工法，即在卓越波浪傾斜入射沿岸漂砂發達的海岸，配置大規模離岸堤人工海岸結構物，期待不會發生沿岸漂砂，形成靜安定海灘。



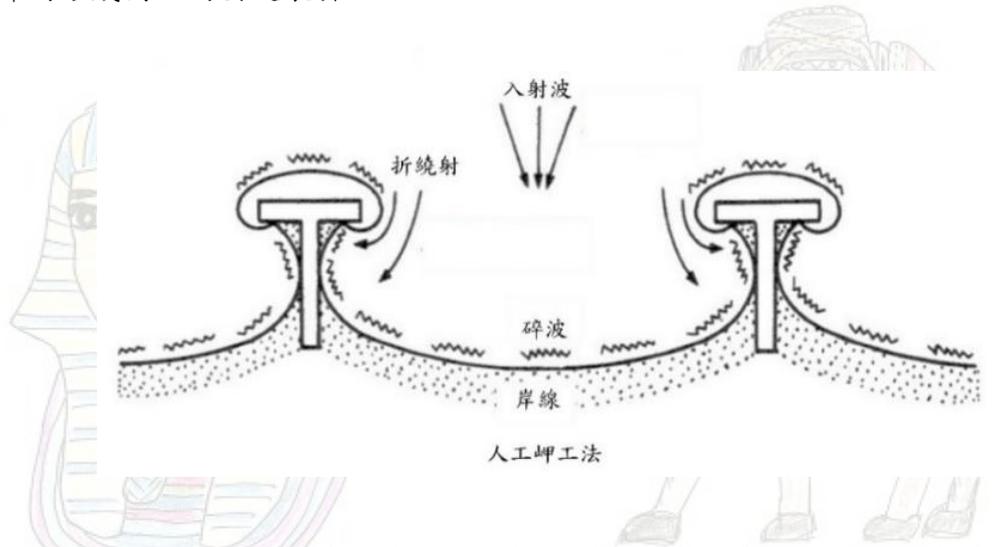
岬頭控制:靜海灘安定化

日本學者土屋將 Silvester 提唱的靜安定海灘工法加以改良，擴展至如下圖所示，包含靜安定海灘的動安定海灘工法。



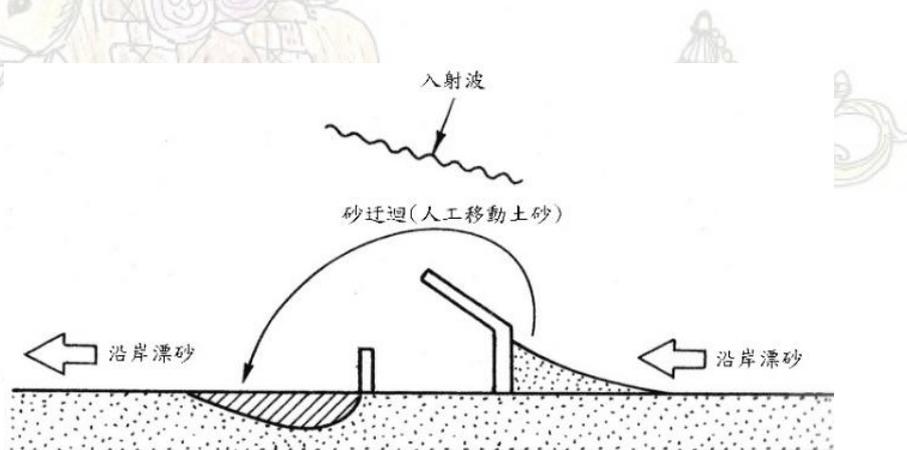
安定海灘工法:靜、動海灘安定化

日本學者宇多考量沿岸漂砂的卓越方向隨季節而異，建議配置如下圖所示，數個岬頭型的突堤或離岸堤，稱為人工岬工法，其構想源自袋灘，在各人工岬間形成獨立的安定袋灘。



上述3種工法均是將直線海岸線以較大間隔的結構物加以區隔，期待各區間內的海灘安定化，這3種工法均可稱為人工岬工法。人工岬工法異於突堤工法，岬頭或人工岬的設置間隔約為1km，可形成調合自然環境的海灘，減輕對海岸域利用或景觀等自然環境的衝擊，是目前常用的漂砂制衡工法。在沿岸漂砂卓越的侵蝕性海岸設置人工岬，會使人工岬背後產生堆積形成繫岸砂洲，灘線形狀會出現岬附近灘線前進、岬間中央灘線後退的變化，隨著時間經過，變化量減少，最終達平衡狀態，形成安定海灘地形。本工法是基于如何使岬間灘線前進量與後退量取得平衡的概念，因此同如突堤工法，必要檢討下游側海灘的侵蝕。

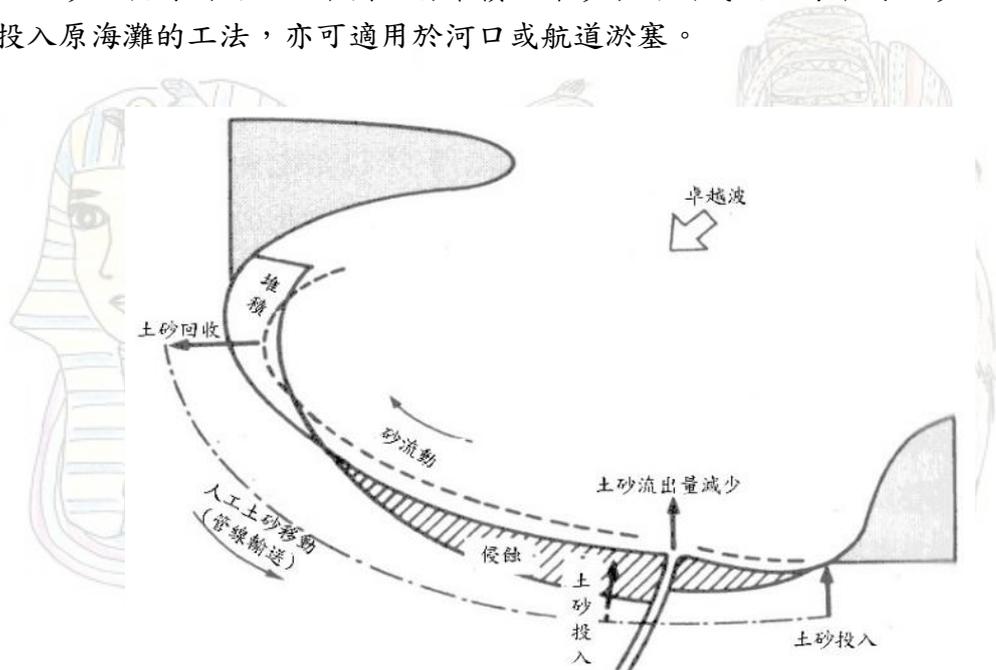
(6) 養灘工



養灘工是在被侵蝕海岸，以人工投放砂礫的工法。在利用養灘工投放砂礫形成的海灘，設置各種防止砂礫流出設施，以期達成靜安定化的海灘稱為人工海灘。作為侵蝕對策的養灘工是持續投放砂礫以期海灘的動安定化，例如砂迂

迴法或土砂回收再利用法等。砂迂迴法如上圖，將因結構物阻斷漂砂連續性，堆積於結構物上游側的漂砂輸送至結構物下游側，以期漂砂連續性。

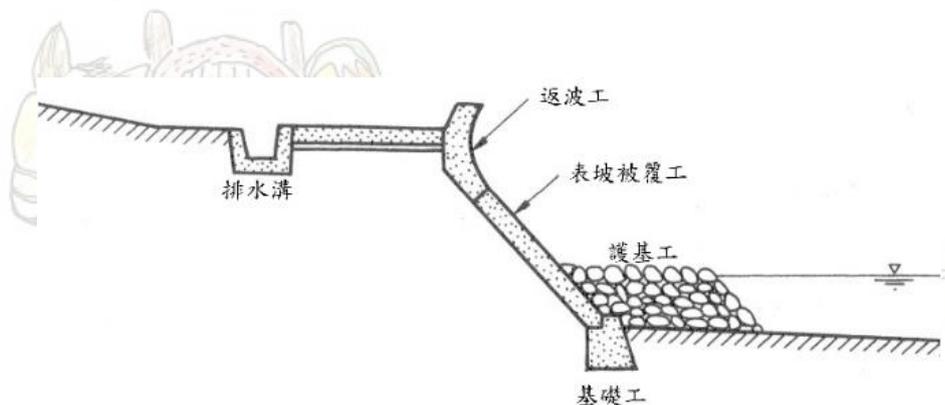
土砂回收再利用法如下圖，將堆積於漂砂下游側或流至海中的土砂回收，再投入原海灘的工法，亦可適用於河口或航道淤塞。



(7) 護岸

2011 埃及尼羅河之旅

護岸是直接從陸地防止侵蝕的工法，一般斷面如下圖，針對砂礫海岸及岩石海岸說明其適用性。



① 砂礫海岸

對侵蝕性砂礫海岸，即使採取護岸對策亦無法長期防止侵蝕，其因為護岸對海灘變形不具影響，減輕沿岸漂砂量效果少，因此護岸原則上僅適用於暫時性或應急對策。近年來，採用緩傾斜護岸，其反射率小，有利於減少反射波引起的侵蝕及堤體前面的淘刷，可期待提高海岸保護機能。由於減輕沿岸漂砂量效果小，規劃應組合突堤或離岸堤。

② 岩石海岸

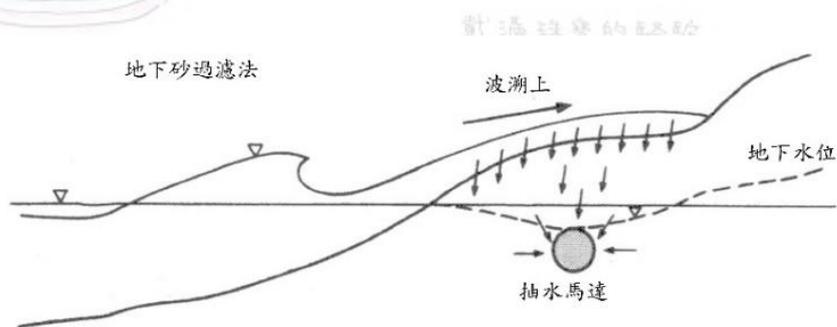
岩石海岸設置護岸，可防止波浪直接作用於崖，但是有連續設置的必要。

(8) 降低地下水位

傳統突堤或離岸堤是利用衰減入射波能量達成降低波潮上的效果，進而制衡砂灘侵蝕。降低地下水位法無降低容許波潮上機能，是以降低地下水位及防止土砂從前灘滲出，減輕前灘被侵蝕及促進堆積的工法。降低地下水位工法有地下砂過濾法及埋設透水層法等 2 工法：

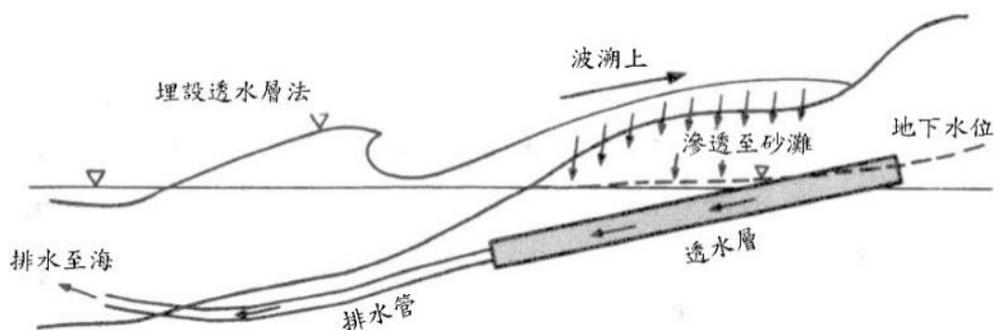
① 地下砂過濾法

地下砂過濾法是如下圖，在前灘地中設置抽水馬達強制降低地下水位的工法。



② 埋設透水層法

埋設透水層法是如下圖，在前灘埋設透水層，以自然排水將地下水排至海中，以期降低地下水位的工法。



上述 2 種工法皆將主要設施埋設於地中，海濱可在不影響自然景觀下進行海灘保育，可謂防災機能、親水性機能及沿岸環境保育機能等 3 者兼顧的海灘

制衡工法。由於主要機能是離向岸漂砂制衡，在侵蝕海岸是否可行，有待檢討必要。

(9) 複合式防護

過往係將上述 8 種漂砂制衡工法，以對症下藥方式逐次施工，最終呈複合式防護。近來規劃時即考量各工法的機能，適切配置傾斜堤、海灘、離岸潛堤等數個海岸保護設施如下圖，稱為面防護方式。



各防護域的主要防護設施如下圖

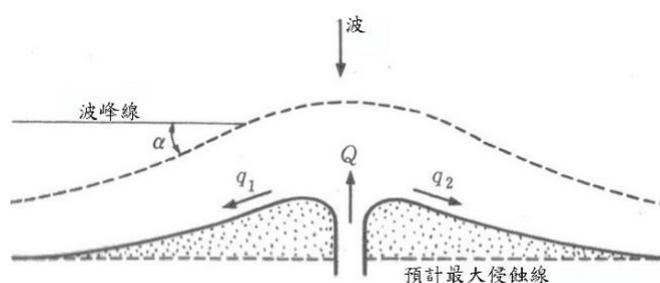
防護域	外海	外灘	前灘	後灘	背後地
		離岸堤	人工海灘	護岸堤防 (階梯式、緩傾斜式)	背後空間
主要防護設施	暴潮、海嘯防波堤	潛堤、人工礁		複合斷面	
		浮消波堤	突堤	突堤	
			袋灘		

2. 依機能觀點選定工法

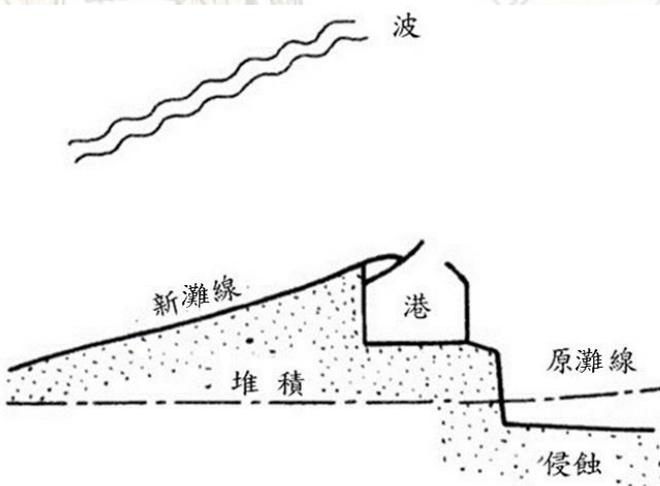
砂灘的砂易受波、流作用移動，致使海灘地形隨時變化不息，海灘雖然短期間會有變動，但是以長時間觀點卻具有邁向安定的自律機構。因河川供給土砂減少、沿海岸進行大規模港灣建設等導致沿岸漂砂量變化或失衡，會引起大空間、時間長達10數年的緩慢變化。週期約為1年的變動稱為季節性變動，包含波向季節性變動引起沿岸漂砂方向變化，入射波能量流(energy flux)變化，即大波來襲頻率高的季節海灘被侵蝕、小波卓越時海灘被堆積等。天候惡劣時的波濤會致使海灘急激侵蝕，其後緩穩的小波作用會引起海灘堆積，其循環會形成週期約為1年的地形變化，屬短期變動，是離向岸方向漂砂變動的主因。

1) 長期性漂砂變動制衡

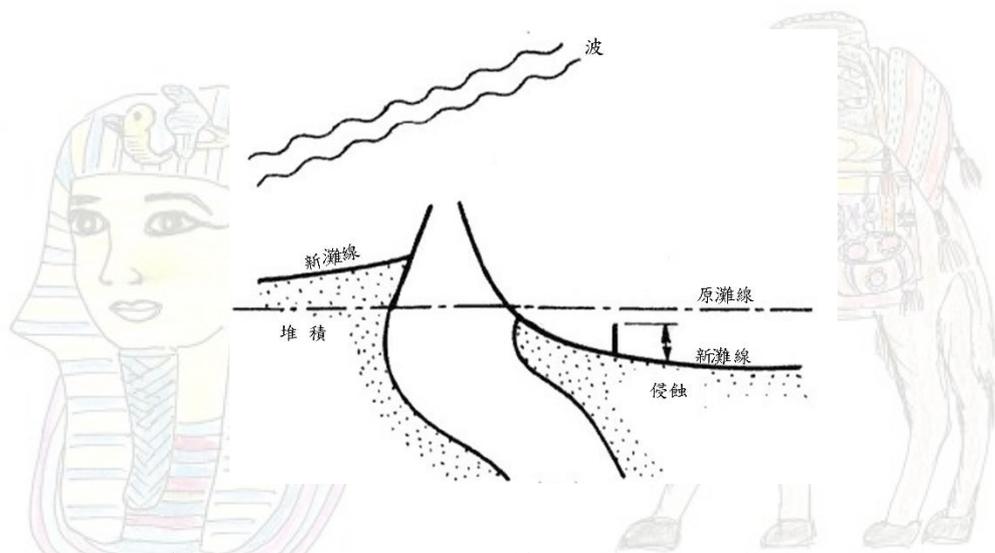
自然砂灘是依砂供給及流出間的平衡維持，當失去平衡就會發生海灘變形，例如河川排出土砂量減少會造成河口扇狀沖積海岸侵蝕。



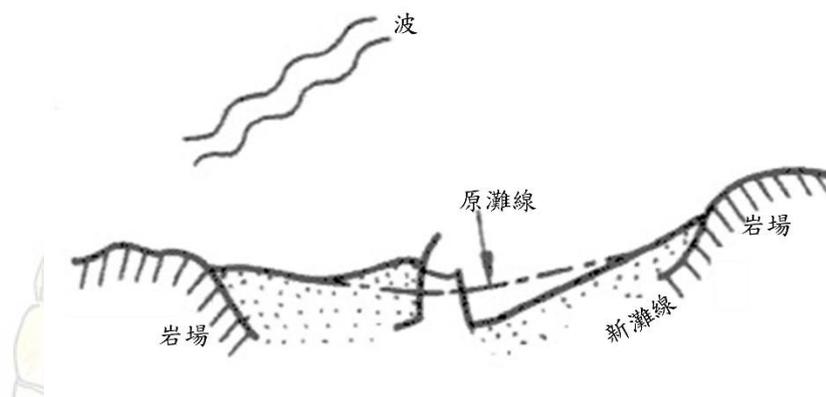
如上圖，河川排出土砂量為 Q ，波引起漂砂量為 (q_1+q_2) ，當 $Q=(q_1+q_2)$ 時海岸呈安定狀態。河川排出土砂量 Q 減少時海岸線開始後退，海岸線後退會使海岸線與波峰線間夾角 α 變小，為達平衡，海岸線會持續後退至 $Q=(q_1+q_2)$ 為止。若從海岸的供給土砂完全消失，灘線會後退至圖中所示幾乎平行於波峰線的虛線。



在沿岸漂砂卓越海岸建造大規模結構物，會如上圖，使周邊海灘發生變形，防波堤建造會使漂砂方向上游側的灘線前進，下游側的灘線後退。



河口港周邊的海灘變形如上圖，因導流堤建造致使漂砂方向上游側灘線前進，下游側灘線後退。



如上圖，在延長數公里的凹型海岸建造港灣，會使港灣漂砂方向上游側灘線前進，下游側灘線後退。

對上述因沿岸漂砂量減少致使灘線後退的處理對策有下列構想，亦可將之作適當組合。

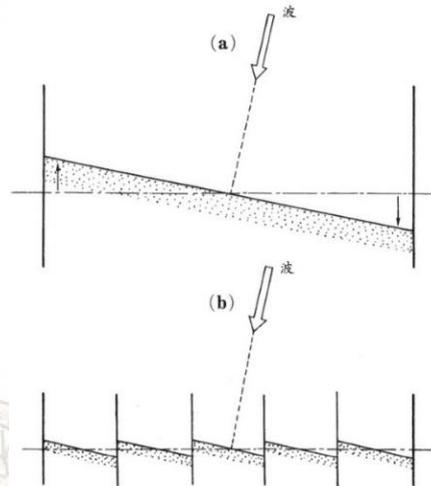
① 實施人工供給沿岸漂砂

利用砂迂迴法或土砂回收再利用法等工法，由於必要持續供給土砂，必要在附近有可持續供給土砂的供給源才可行。

② 利用波浪減少沿岸漂砂量

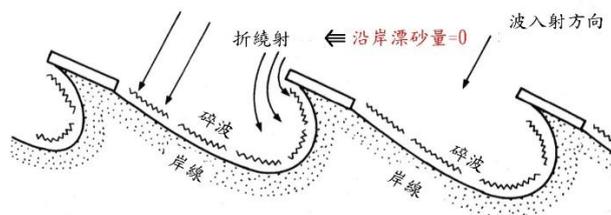
有改變灘線方向方法或控制波向方法等方法。為減少沿岸漂砂量，必要建造結構物，例如沿岸漂砂卓越海灘建造突堤，上游側海灘堆積，下游側海灘侵蝕，相關工程人員眾所皆知。如下圖(a)，建造2條長突堤，突堤間的灘線方向會因沿岸漂砂緩緩變化，最終會達與能量平均波向呈垂直方向達平衡狀態，即總沿岸漂砂量為0，灘線方向停止變動，至達成平衡狀態前，灘線前進、後退量大，達成時間亦長。

若如下圖(b)，在同一區間內設置短突堤群，在各小區間內的灘線變動現象同如上述2條長突堤，但是由於灘線前進、後退領域分散，其絕對量小且達成平衡時間短。突堤長度不夠長無法完全捕捉沿岸漂砂時，灘線方向雖會朝向平衡狀態變動，卻無法達到與入射波方向呈垂直的狀態，由於灘線方向改變，可減少沿岸漂砂量。因此欲以較少量砂供給下游，形同如砂迂迴法供給砂量給下游時，可適切調整突堤群長度，減少沿岸漂砂量。



由於灘線與入射波高會呈垂直的自然特性，可考量改變波向制衡沿岸漂砂，例如利用前述岬頭工法(如下圖)設置大型離岸堤群，在背後形成繫岸砂洲，上游側灘線會與入射波向呈垂直，下游側灘線會因入射波受離岸堤引起繞射波的波峰線呈平行，即大型離岸堤可改變波向。

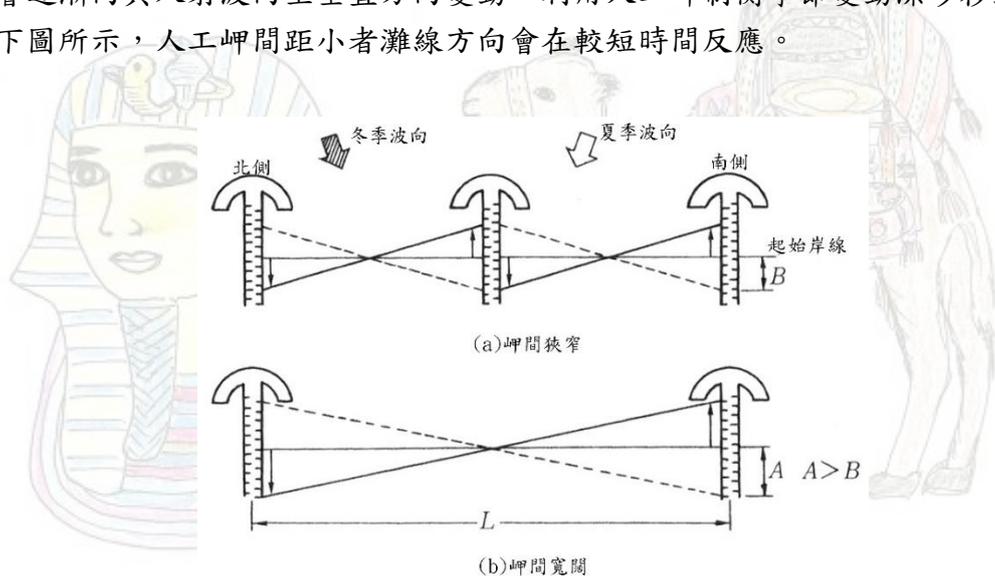
利用養灘工造成人工海灘時，將灘線方向設計成與入射波向呈垂直，可期待海灘的長期安定。



岬頭控制:靜海灘安定化

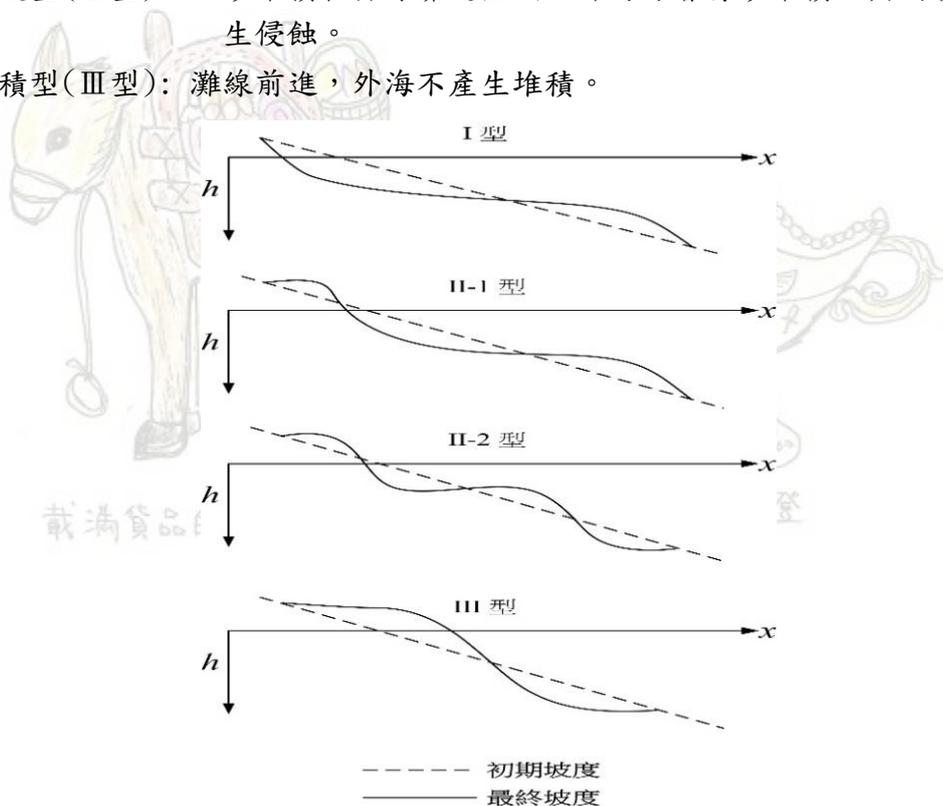
2) 季節性漂砂變動制衡

來襲波浪波向會隨季節變動的海岸，沿岸漂砂方向亦會隨之變動，灘線方向會逐漸向與入射波向呈垂直方向變動。利用人工岬制衡季節變動漂砂移動，如下圖所示，人工岬間距小者灘線方向會在較短時間反應。

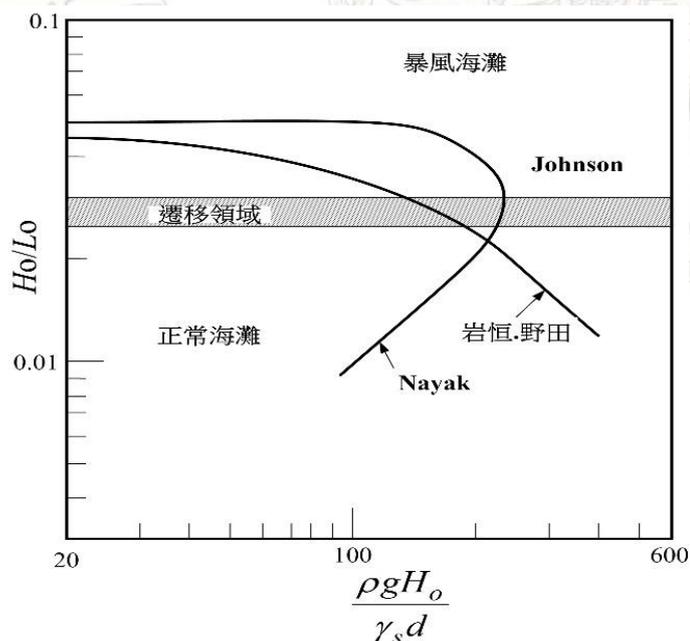


上述說明了季節性漂砂平面變動，入射波浪發生變化時海灘斷面亦隨之變化，對某特性波浪，當其斷面達安定狀態時稱為平衡斷面(equilibrium profile)，通常平衡斷面可如下圖分類成侵蝕型、過渡型及堆積型等3類。

- ① 侵蝕型(I型)：灘線後退，砂堆積於外海。
- ② 過渡型(II型)：砂堆積在灘線靠近陸側，外海亦會有砂堆積，其間會產生侵蝕。
- ③ 堆積型(III型)：灘線前進，外海不產生堆積。



過渡型斷面可分成有形成及不形成沿岸砂洲 2 種，Johnson(1949)稱有沿岸砂洲存在的海灘斷面為暴風海灘(storm beach)或冬型海灘，無沿岸砂洲海灘為正常海灘或夏型海灘。前者為侵蝕型，後者為堆積型，認為深海波之波形尖度大於 0.025~0.03 者屬暴風海灘，但是爾後學者發現沿岸砂洲形成，即使在波形尖度小的海灘亦可能發生。下圖表示各學者對形成沿岸砂洲的臨界條件，Johnson 不考慮底質粒徑及密度，岩垣、野田考慮底質平均粒徑，但未考慮底質密度，圖中的 d 及 γ_s 分別表示底質平均粒徑及水中比重。



沿岸砂洲的形成，在海灘斷面變形過程中，只為其過程而已，實際上並不太重要，我們要了解的是，海灘到底是屬於堆積型或侵蝕型，根據掘川、砂村的實驗結果，海灘屬於何種地形，可由下式推算。

$$\frac{H_0}{L_0} (\tan \theta)^{0.27} (d/L_0)^{-0.67} \geq 7 \quad \text{侵蝕型(灘線後退)}$$

$$\frac{H_0}{L_0} (\tan \theta)^{0.27} (d/L_0)^{-0.67} \leq 4 \quad \text{堆積型(灘線前進)}$$

$\tan(\theta)$ 表示初期海底坡度， d 為底質粒徑， H_0 及 L_0 分別為深海波波高及波長。從上式可知，欲減少冬型海灘的灘線後退量或海灘侵蝕，必要令上式左邊的值盡可能變小，即有

- ① 將 H_0 變小
- ② 將底質粒徑 d 變大
- ③ 將波長 L_0 (或週期 T) 變長
- ④ 將海底坡度 $\tan(\theta)$ 變小

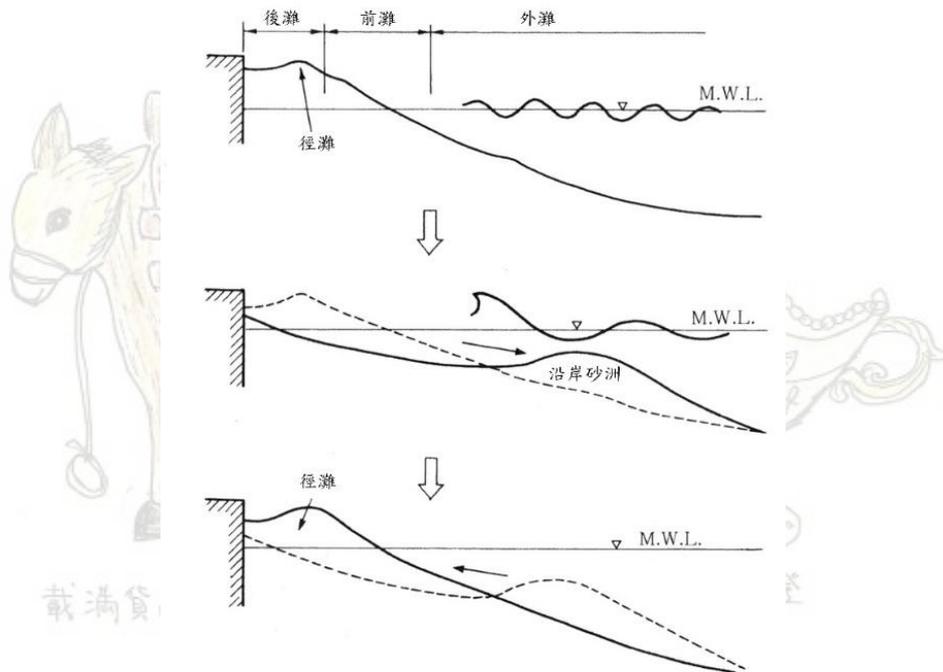
等可能的方法。由於結構物無法改變波長，可排除③的方法，海底坡度無法變更，因此只能依賴①或②。降低波高主要是依前述(1)~(5)的各式結構物或其組合，變大底質粒徑必要依賴(6)的養灘工。

3) 短期性漂砂變動制衡

下圖為緩坡度細砂構成海灘的 2 維安定機制模式，大波來襲前灘被侵蝕，砂被帶至外灘形成沿岸砂洲(inner bar)，沿岸砂洲具有等同潛堤的碎波機能，減弱作用前灘的波，可停止侵蝕進行，即沿岸砂洲具有儲存大波來襲時前灘被侵蝕砂的功能，及阻止砂流出外海的機能。海面恢復平穩，構成沿岸砂洲的砂被推向岸際，堆積於前灘，形成徑灘(berm)，周而復始。徑灘是在平穩期儲存惡天候時必要被削除砂量的地形，是維持前灘動安定的必要因素。

自然砂灘，在惡天候大波來襲時被侵蝕，天候回穩小波來襲又會恢復。若後灘寬變窄或有護岸等人工結構物存在時，可能無法恢復原狀，即惡天候大波來襲時，海灘被侵蝕，波浪直接作用於護岸基部時，護岸產生的反射波會將砂挾帶向外海移動，致使海灘的復元力衰減。因此，建造緩傾斜或階段護岸時，必要規劃前面有足夠灘寬或利用養灘工擴展灘寬。

對短期性漂砂變動，可利用離岸堤或人工岬衰減波高，亦可利用降低地下水位工法，由於此工法無法制衡沿岸漂砂，必要和其他工法配合。



4) 複合防護工法制衡

面防護方式概念如下圖(a)，若砂灘消失，必要以高堤頂護岸或堤防保護背

後土地、財產及生命等。

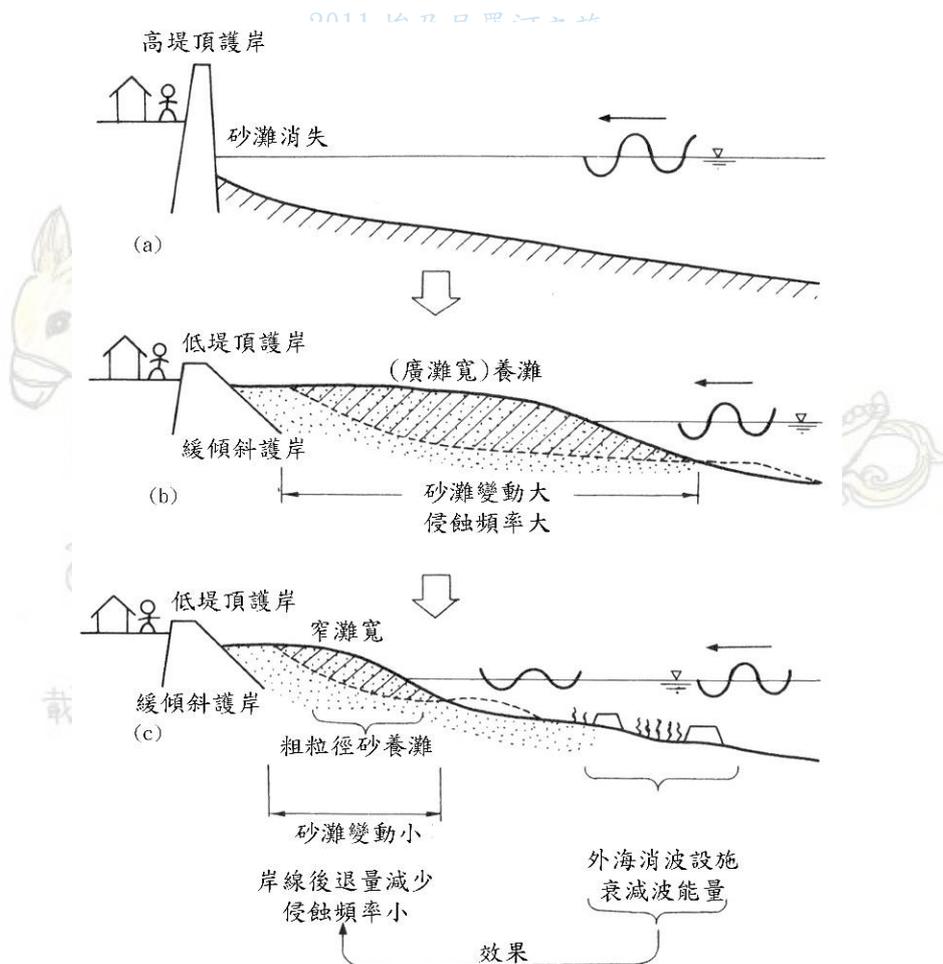
如下圖(b)，在堤前利用養灘工設置寬灘時，可利用低堤頂護岸或堤防防護，但是有下列問題：

- ① 砂灘變動大
- ② 惡天候時灘線大量後退，必要有足夠灘寬，需較多養灘砂。
- ③ 侵蝕頻率大

如下圖(c)，在外海配置潛堤、人工礁等消波結構物，會有下列效果：

- ① 砂灘變動小
- ② 惡天候時灘線後退量小，必要灘寬較少。
- ③ 侵蝕頻率小

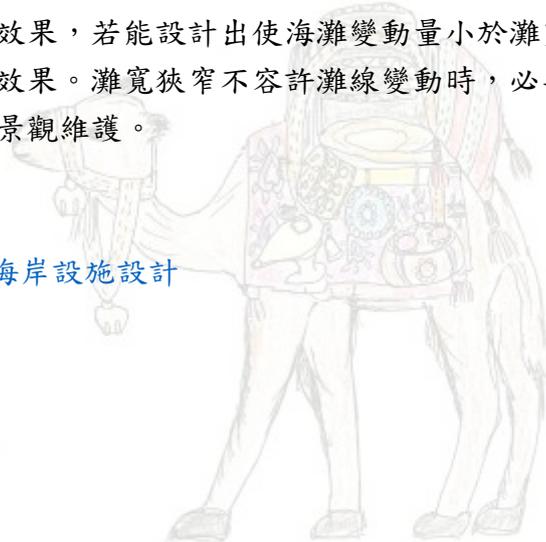
但是必要瞭解消波結構物特性，例如離岸堤、潛堤的波高傳達特性各異。離岸堤不論入射波高的大小，其透過率一定，即對全部來襲波以相同比例減弱波能，意味著對部分波高較小來襲波，復原海灘必要的能量被衰減，致使海灘復原力變弱。潛堤的透過率隨堤頂水深、堤寬與入射波高的比例而異，波高越小透過率越大，可將會造成灘線後退的大波高減能，小波高則保持其海灘復原力。應注意者為在潮差大海岸，高潮位時的波浪衰減效果會減弱。護岸本身應設計為低反射率的緩傾斜堤或在護岸前面設置消波結構物。



面防護方式規劃，若發生灘線後退會到達砂灘背後護岸時，護岸安全性降低，嚴重者使背後地受災，輕微者會因從護岸的反射波致使海灘無法復原，故大波來襲時的最大灘線後退位置，對砂灘的防災機能極為重要。堤頂水深較深潛堤具有減少最大灘線後退位置的效果，若能設計出使海灘變動量小於灘寬的潛堤，除漂砂制衡外並具景觀維護效果。灘寬狹窄不容許灘線變動時，必要設置離岸堤，此時無法兼顧親水性及景觀維護。



回海岸設施設計



載滿珠寶的駱駝

2011 埃及尼羅河之旅



載滿貨品的驢子



阿拉丁神燈