

沉箱式防波堤基礎工程

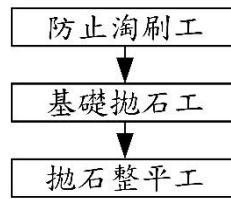
港灣結構物中除棧橋式或鋼板樁式繫船碼頭等將外力直接傳遞至地盤外，皆為重力式結構物，須基礎承載，結構物由堤體與基礎共同構成，基礎功能是将堤體安定設置於海底地盤上。就力學上而言就是将基礎上堤體垂直載重，分散傳達至海底地盤。防波堤承受波力，碼頭及護岸承受土壓，並防止圓弧滑動引起破壞。

構築沉箱式防波堤，海底為預期有充分承載力的良質砂地盤時，通常採用基礎拋石(拋石堤基)。由軟弱黏土或厚泥層構成，無充分承載力時，利用各種海上地盤改良工法改良海底地盤強度後，再進行基礎拋石施工，將結構物垂直載重直接傳遞至海底地盤深處的承載地盤。

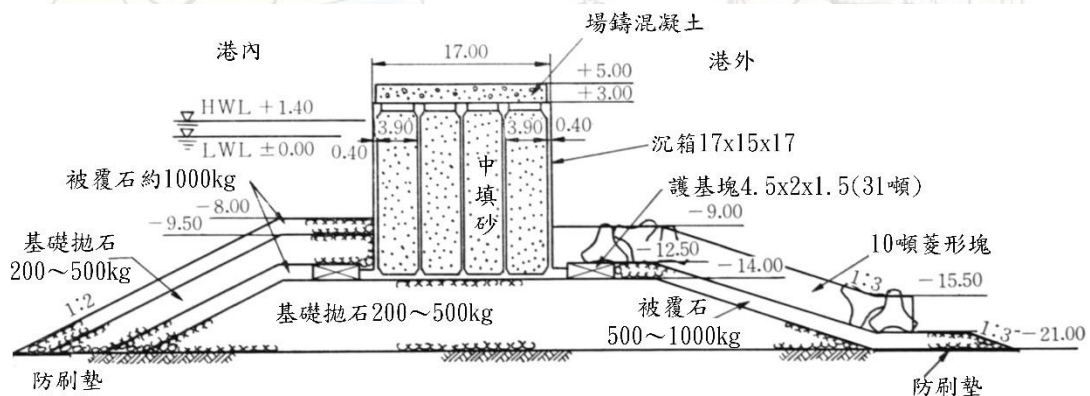
不論採用那一種形式基礎，應依海底地盤條件作最適設計，必要進行前置鑽探調查了解海底地盤狀況，海底地盤強度隨地質而異，基礎地盤承載力可參照下表。

地盤種類	地盤地質狀態	承載力(kN/m ²)
岩盤	① 極硬花崗岩、閃綠岩、安山岩、片麻岩	1000~400
	② 黏板岩、片岩等硬盤	400~200
	③ 硬質砂岩、石灰岩	150
	④ 軟砂岩、頁岩、硬土丹(hardpan)	100~60
砂礫層	① 緊密砂礫、卵石或含砂礫石	100~60
	② 鬆砂礫、含砂礫石，緊含礫石砂	60~40
砂層	① 密細砂、鬆粗砂	40
	② 含黏土緊密砂	40~30
	③ 鬆粗砂	30~20
	④ 鬆細砂	20~10
黏土層	① 乾固黏土	50
	② 極緊密黏土	40~30
	③ 硬黏土	30~20
	④ 軟黏土	20~10
	⑤ 極軟黏土	10 以下

1. 施工流程



1) 防止淘刷



2011 埃及尼羅河之旅

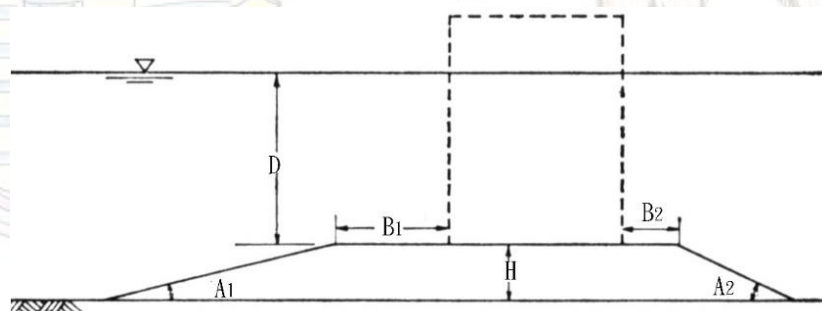
- (1) 拋石堤基施工時最常遭遇問題是，在砂質海岸當強風大浪時，海底變動激烈海岸線附近或碎波帶施工者，或在洪水發生時急流，河口附近海底變化激烈處施工亦有同樣問題。在上述位置直接拋石構築拋石堤基，會有大量拋石陷入地層、散亂、流失等，應極力避免在上述水域構築防波堤。不得已非構築不可時，使用直接拋石方法，若不計工期及龐大成本，或許有成功的一天。現今，在此狀況非構築防波堤不可，大致有下列 2 種解決構想。
 - ① 預測強浪來襲時海底地形的變化，將會發生變動海底全部挖掘，再拋放拋石構築堤基，並在防波堤底面及堤基坡趾處配置必要防止下陷及防止淘刷工。
 - ② 在原地盤直接構築拋石堤基，強浪來襲時當然會被淘刷下陷，但是應可期待保留部分，因此沿此構想，事先就將肩寬及坡面設計多餘長度，作為損耗用，此時當然要作好防止下陷及防止淘刷工。
- (2) 近年來有各種防止下陷淘刷工被開發，可有效保護拋石堤基。
- (3) 拋石堤基淘刷不限於碎波帶。在海域構築新結構物會可能導致附近海底水理條件產生變化，局部形成強烈流而沖刷拋石堤基，尤其是在堤頭，此時可注入瀝青砂膠等，使拋石固結成一體。
- (4) 在洪水期河口附近海底及河底可能會發生極大變動處，構建防波堤或導流堤，有被破壞之虞，應留意。

2) 基礎拋石工

(1) 拋石堤基構成

拋石堤基(基礎拋石)如下圖，通常呈梯形，相關因素如下。

- ① 堤基頂面標高(D)，即堤基頂面水深。
- ② 前肩寬(B₁)，後肩寬(B₂)。
- ③ 前坡面坡度(A₁)，後坡面坡度(A₂)
- ④ 堤基厚度(H)



- Ⓐ 為了不讓來襲波在拋石堤基產生碎波衝擊堤體，拋石堤基標高(D)，即堤基頂面水深應盡可能深，使堤前只會產生重複波。
- Ⓑ 拋石堤基海側肩寬(B₁)，以堤體安定立場，應取充分寬裕。但是由另一立場，肩寬大時對特定周期、波長的來襲波容易促成碎波，誘發強大衝擊波壓，可能致使堤體或堤基破壞，應納入考量。
- Ⓒ 最適坡面坡度隨堤前水深、來襲波周期及波長、被覆材尺寸等而異，理論上坡度越緩堤基安定度越大。若坡度過緩，與Ⓑ同樣理由，容易促成碎波，亦應納入考量。
港內波浪遠小於港外，因此港內側坡面坡度大於港外者。但是若防波堤頂高度低，會越波或越流時，有沖壞港內側坡面的可能，亦應納入考量。
- Ⓓ 堤基厚度事關將堤體載重廣泛分散至地盤，不宜太薄，原則上厚於 1.5m，對直線滑動破壞，可依下述作驗證。
對如下圖所示，合成堤單一拋石基礎，假定為直線滑動時，滑動安全率為

$$F = \frac{(W - P \tan \phi)}{W \tan \alpha + P}$$

P: 波力分佈(kN/m)

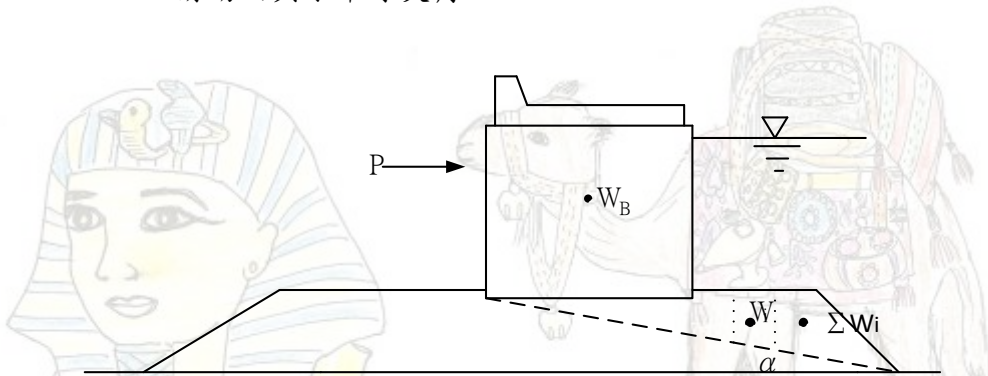
ϕ : 拋石內部摩擦角(度)

W: $W_B + \sum W_i$ (kN/m)

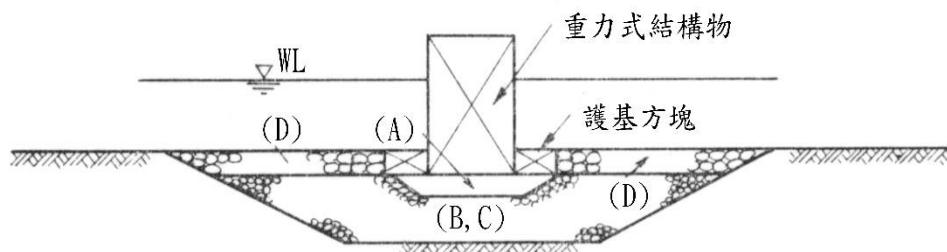
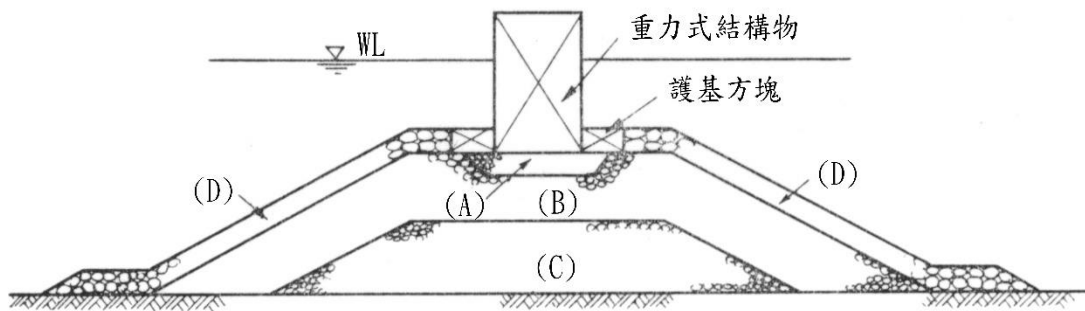
W_B :堤體重量(kN/m)

W_i :拋石分割片有效重量(/m)

α :滑動面與水平線夾角



- ⑤ 前肩寬(B_1)至少 5m 以上，後肩寬(B_2)為前肩的 2/3 倍左右。
- ⑥ 拋石堤基斷面非由均一特定尺寸拋石構成，標準示意斷面如下圖，A 層為直接承受上部結構物，A 層載重傳遞至 B、C 層，D 層為承受波力的被覆層。



A 層直接承受載重需強度大者，B、C 層次之，拋石粒徑依序減小，D 層為被覆層，接觸 D 層的 B 層為避免被吸出，其重量應為 D 層拋石重量的 1/10 左右。

面對外海的防波堤被覆層(D 層)通常採用 800~2000kg 石材，過大塊石雖可增本身抵抗性，但可能會影響全體咬合度，反而降低整體抵抗力，故必須採用在容許範圍內的拋石，通常容許範圍為 $\pm 20\%$ 。

波浪大，被覆塊重量不足時，可於被覆層表面被覆混凝土消波塊，被覆層塊石為避免被吸出，被覆層塊石應為混凝土消波塊重量的 $1/10 \sim 1/20$ 左右。

防波堤基礎拋石中心部 A 層塊石重量通常約在 $10 \sim 500\text{kg}$ ，B、C 層約為 $100 \sim 200\text{kg}$ 。

拋石應具有材質為，因拋石直接承受堤體及上部工的載重，不可有因載重導致起拋石龜裂或破碎狀況發生，宜採用十分堅硬且具韌性者，通常使用 10kg 以上塊石，扁平細長易風化者不適宜，花崗岩、安山岩等比重大於 2.5 以上者最佳。近年來因良質石材不足，基礎拋石中心部，即 B、C 層比較不會受波流影響，可考慮用石灰石、砂岩、礦渣、硬質土(hardpan)等代替。砂岩、硬質土容易促成基礎破壞或上部結構物下陷，除臨時性結構物外應慎用。

各部分基礎拋石大小依設計決定，應充分考量採石場條件，太過細分會致使取得困難。即使取得，分類費時不符經濟原則，實際施工時採用同一尺寸的案例不少。

拋石粒徑應求均勻分佈，不宜偏靠上限或下限，驗收時以超過規定重量上限為 50% 以內，下限以運石船 1 艘容量的 5% 以內為基準，但在工地現場斷判不易。

面海防波堤直接承受波浪，為防止拋石被淘刷流失，通常採用 1 噸以上被覆塊保護拋石，無法取得時，可使用被覆混凝土塊取代。

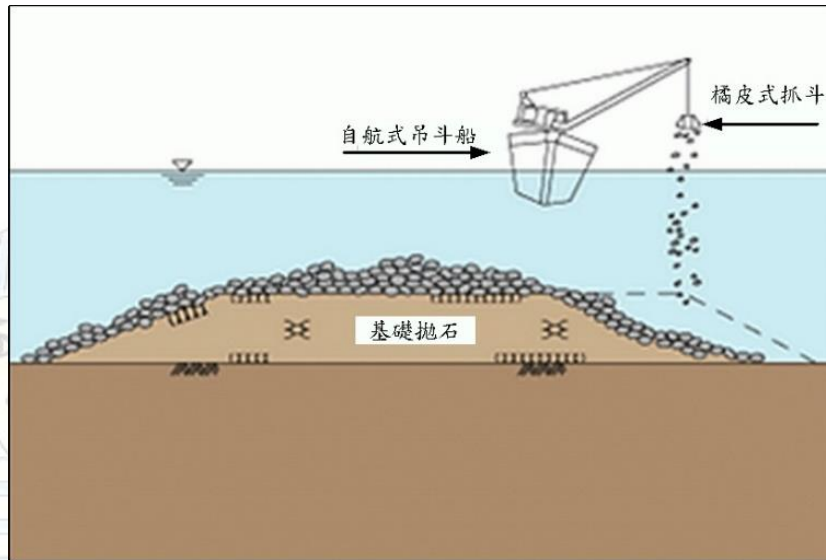
被覆塊或被覆混凝土塊必要重量隨來襲波高、水深、基礎坡面坡度而定，一般使用 [Hudson 公式](#) 計算(線上計算)。

(2) 石材搬運

港灣工程使用石材昔日是採用卵石，今日則是開採原石山的碎石。從採石場石材搬運方法依採石場的地理位置、至工地現場距離等決定陸上運送或海上運送。

港灣工程大部份為海上工程，除陸上施工外，使用大卡車載運石材，首先搬運至水際線的儲存場暫時存放，再由 [自航吊斗船](#) 或 [非自航吊斗駁船](#) 將石材搬運至拋放現場，使用自備抓斗拋放石材，亦有使用底開式或翻轉式 [運土船](#) 者。

規劃石材搬運計畫時，要規劃充裕拋放時間，遠距離海上運送時，必須進行海氣象預測，並考量石材搬運船停泊水域。



摘譯自：<http://www.umeshunkyo.or.jp/108/prom/237/page.html>

(3) 石材拋放

石材拋放，首先應作水深測量確認海底狀況，海底地形與原設計比較，有發生變化時，為確保基礎設計斷面應修正施工斷面。施工前必要確定海中基礎拋石正確施工位置，即在基礎拋石坡趾、坡肩位置設置竹竿或浮標以明示拋放位置。通常石材拋放是依上述標識進行，並由潛水夫在海中觀察拋放狀況，必要時指示石材拋放船拋放位置及拋放量。

近年來因 GPS 衛星高度發展，可進行高精度測量，GPS 與聲納接合可更正確掌握海底狀態。利用此系統取得數據可供拋放模擬，立案短時間高效率搬運船配船計畫。

通常石材拋放分成初拋及補拋等 2 個階段施工。

① 初拋

石材拋放，形成小於設計斷面約 1.0~1.5m 的雛型斷面，此時只要求大致平坦即可。在進行第 2 階段的「補拋」前，先規劃最終拋放計畫並放樣，放樣在整平階段亦會使用，必須正確設置，是在海面平穩日，使用水中標竿，由潛水夫一邊測量基礎計畫頂高一邊設置，放樣通常使用木材或輕質鋼材直接設置於海底或雛型基礎上，其間隔如沉箱設置，需要平坦潤飾(finish)時，一般間隔為 5m 左右。

② 補拋

第 2 階段石材拋放是為使下階段的「整平」作業能順利執行。放樣依潛水夫指示仔細作業，包含利用拋石船抓斗，將已拋放多餘拋石移至拋放量不足位置。

以上是一般拋放方法，基礎拋石由數層構成時，除最上層外，只作第 1 階段拋放作業。

石材拋放是由拋石船上的抓斗拋放，石材在海中自由落體落下，到達海底面時會有某些程度分散，水深越深分散越大，若潮流強時會產生偏離，故必須事前規劃或進行實驗。為避免偏離可於搬運船配置料斗(hopper)，用導管(tremie pipe)拋放至施工位置。為避免施工時產生海水污濁，可從船上垂下污濁防制框，再拋放石材等考量環保的施工法被開發。

被覆層石材拋放與後續整平作業有密切關係，通常不從海面直接拋放而由基礎面附近直接拋放者為多。

陸上拋放作業除機械為履帶式起重機及大卡車外，作業程序同海上拋放。

3) 拋石整平工

拋石拋放入海底是呈亂堆狀態，為安定基礎必須將這些拋石鋪整平。整平分成「粗整平」和「細整平」2種。粗整平是指不與被覆石、護基方塊或上部結構物直接接觸部份(B、C層)的整平作業，細整平是將拋石最上層(A、D層)的拋石鋪整、使之不會鬆動，變成堅固結構的作業。拋石整平區分如下表。

整平區分	整平精度	水中整平	陸上整平	備註
細整平	±5cm	○	○	
	±5cm	○	○	已粗整平(±50cm)
粗整平	±10cm	○	-	
	±30cm	○	○	
	±30cm	○	○	

註 容許範圍+0、-20cm時的粗整平能力，適用粗整平±10cm能力

拋石拋放施工時，除應注意上述事項外，應注意基礎拋石下陷。一般拋石厚在1.5m以上，當拋石厚超過3m以上，堤體工或上部工施工時，因其重量會使石材咬合變密，硬土質原地盤會有10~20cm的下陷，換置土等軟土質原地盤因石材擠壓會下陷約40~60cm，故應預估頂部下陷作餘堆積。通常約加成20~25%，下陷嚴重者加成50%，被覆石亦應加成20~25%。

基礎拋石完工形狀有必要確保正確頂高時，可放置沉箱或方塊等加載，或長時間放置等其下陷。沉箱或方塊重新設置費時費力，通常下陷量最終調整以上部工打設厚度為之，因此上部工打設盡可能在工期容許期限前打設，以期減少下陷量。

經考量上述各項而得基礎拋石表面承载力，依塊石材質、搗固程度而異，通常可期待有30~50kN/m²。

海底整平作業通常是由潛水夫使用量尺或軌條作業，整平精度因為受到細整平為±5cm、粗整平為±50cm的容許範圍限制，為保持高施工精度須人工協助作業。近年來，深水深、海況嚴峻外海處的快速施工案例增多，海中作業機械

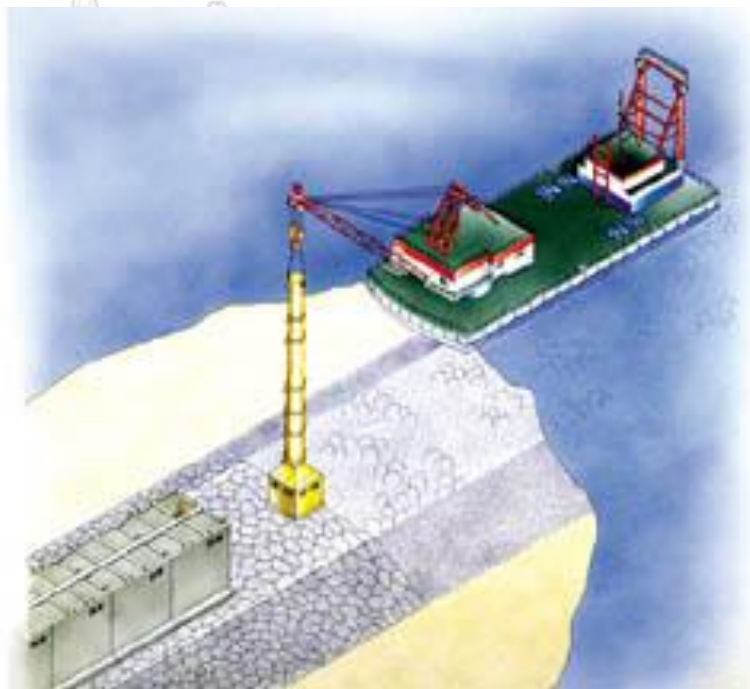
化，整平作業逐漸有由機械取代人力趨勢，目前主要拋石整平機如下：

- ① 如下圖，由海上支援駁船供給動力的8腳(或4腳)步行整平機，使用整平耙或整平滾筒進行整平作業。



摘自 <http://www.s-jwa.or.jp/index.html>

- ② 如下圖，利用重錘自由落體重量進行搗固及整平。



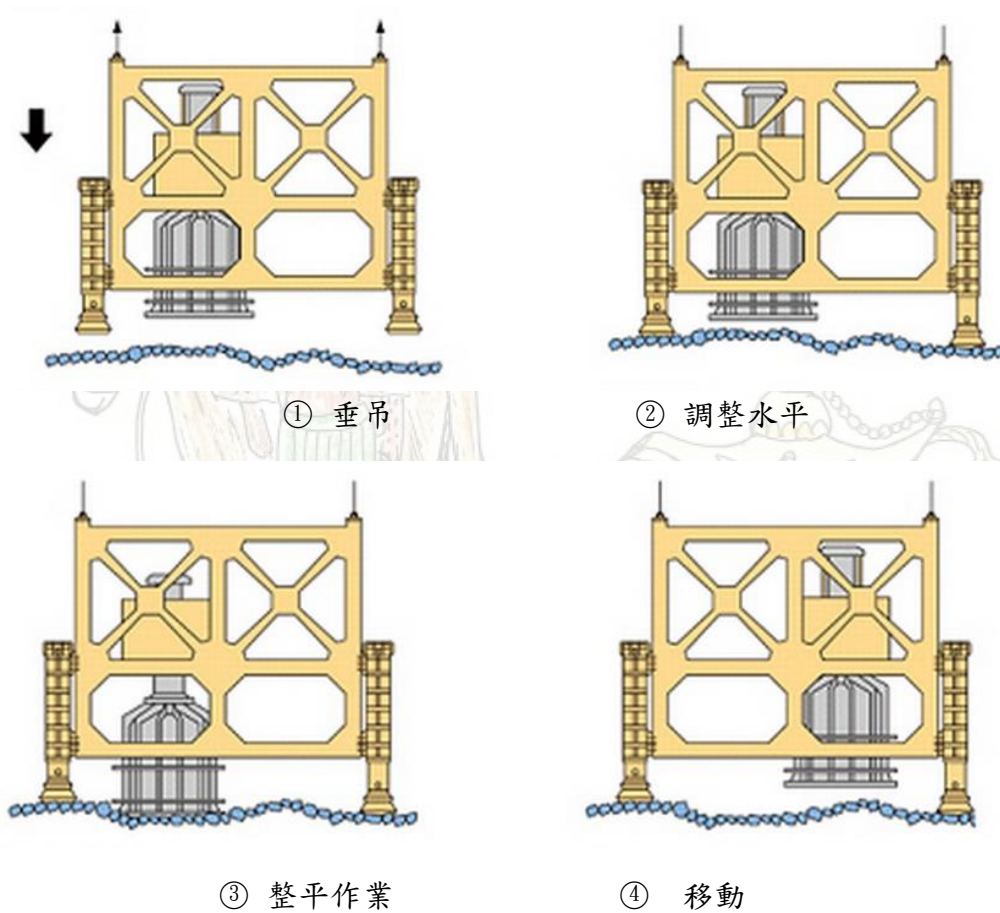
摘自：<http://www.umeshunkyo.or.jp/108/prom/237/page.html>

- © 如下圖所示，著底起振式拋石整平機，進行整平作業時將4腳著底，使用配置有起振機的搗固機整平基礎拋石。



摘自：<http://www.toyo-const.co.jp/technology/881.html>

著底起振式拋石整平機施工順序如下



摘自：<http://www.toyo-const.co.jp/technology/881.html>

④ 水中鏟斗機(underwater backhoe)



摘自 <http://www.s-jwa.or.jp/index.html>

⑤ 拋石拋放及整平同時連續作業方式

由於遠端遙控技術急速發展，海中作業機械施工效果可比美人力，潛水夫作業困難深水深處，亦可急速施工並降低工程費。

2. 施工法及施工上應特別注意事項如下

- (1) 從海上拋放堆積如山的拋石，應使用潛水夫手動或水中鏟斗機、或步行整平機加以鋪整平，將堤基造形成預定的梯形斷面，但是隨著時間，受波浪作用或承受堤體，當然會產生壓縮下陷。構築於軟質砂地盤時，可能會發生陷入或被淘刷，導致堤體整個下陷狀況。下陷程度隨設置水深、海底砂的比重及粒徑、波高、波長等而異，不能一概而論。
- (2) 為盡可能防止下陷，通常會先行構築拋石堤基(基礎拋石)，經過1季的強風大浪作用，使堤基產生壓縮下陷，再行補充整平，待堤基呈安定狀態再設置防波堤堤體。
- (3) 基於上述理由，設計拋石堤基頂面高時，可預測下陷量，預先將頂面加高，稱為餘堆。應餘堆與否，應餘堆多少厚，目前無計算公式可循，只能仰賴工程師經驗。