重力式沉箱製作及拖放施工監造實務

關鍵詞：防波堤、重力式沉箱、浮游安定曲線、浮船塢、沉箱下水

台灣世曦工程顧問股份有限公司／高雄辦事處／資深協理／阮振興 ❶
台灣世曦工程顧問股份有限公司／高雄辦事處／經理／彭國源 ❷
台灣世曦工程顧問股份有限公司／高雄辦事處／副理／陳懿佐 ❸
台灣世曦工程顧問股份有限公司／高雄辦事處／正工程師／陳謙武 ❹

摘 要 ABSTRACT

防波堤、碼頭等為港灣工程常見之結構物，以重力式沉箱作為基礎者佔很大比例，其中沉箱製作下水及拖放定位為最重要關鍵作業且攸關工程成敗，以「高雄港洲際二期海堤及防波堤工程」為例，各式沉箱多達267座、動用之浮船塢達15,000噸、8,800噸及4,600噸級各1艘，本文乃藉由國內各重大工程案例，如蘇澳港、安平港、永安港、高雄港及九宮港等之施工監造過程，已累積豐富之實務經驗，在拖航部分甚至創下由高雄港遠距拖航至澎湖、金門，及屏東鹽埔港拖抵東沙島等100%之成功案例，遂於每一施工環節之工作程序經由不斷修正檢討，以建立合理之標準施工作業程序，俾作為未來設計或施工監造參考之依據。

壹、沉箱製作

沉箱製作工法之選擇與下水方式息息相關，需考量(1)施工區域之地形、地質、水深及場地之大小，施工場地是否有適宜碼頭及後線工料堆置場地。(2)海象及交通情況聯外道路等、(3)施工設備、(4)工程規模及沉箱之形狀、尺寸、數量、(5)料源取得等加以考量結果，從而制定一套因地制宜並符合經濟、安全、效率之沉箱製作設施需求。

一、沉箱製作下水工法之選擇

沉箱製作目前已知較常用之施工法有(1)浮塢法、(2)沉箱渠工法（沙灘工法）、(3)抽砂下水法、(4)滑道下水工法 、(5)其他等。

在考量上述因素及工程品質、工期、成本下等因素，以(1)浮塢法施工其成功率達100%為普遍採用之趨勢，其中(2)沉箱渠工法需有適當之地形水深與較寬廣之施作腹地。其餘(3) 、(4)施工法亦各有其實際成功案例，分別說明如下。

(一) 浮塢法製作沉箱

浮塢法製作沉箱係利用浮船塢可下沈及上升之特性，於浮船塢上製作沉箱後，將浮船塢下沈使沉箱自動浮起後拖離浮船塢之方法。浮船塢之製作應依據沉箱尺寸、重量、每循環所需製作沉箱之天數加以考量。

1. 以「高雄港洲際二期海堤及防波堤工程」為例，沉箱數量高達267座、各式沉箱尺寸分別為(15~26.45m寬)

X25m長X(7.5~21m高)、沉箱重量為1,840~6,820噸，重量隨其高度變化而增加，而在浮船塢上製作沉箱之承載能力、每循環製作沉箱所需工期影響整個製作時程功率甚鉅，經考量整體契約工期等因素結果，初期使用4,600噸級(尺寸45m×30m×3.8m)×1艘、隨後加入15,000噸(尺寸105m×36m×6.4m)×1艘、8,800噸級(尺寸88m×36m×4.8m)×1艘共計3艘，如照片1、2所示，浮船塢上製作沉箱時之實際容許承載力，可能因重複使用次數頻繁而需考慮安全係數約1.2之折減。

照片1 浮船塢4,600 噸級、8,800噸級、15,000噸級（由左至右）

照片2 浮船塢4,600 噸級、8,800噸級、15,000噸級（由左至右）

2. 浮塢上製作沉箱注意事項：(1)若同時製作2、3座沉箱時尚須注意沉箱製作空間配置，沉箱距浮船塢兩側邊緣至少應有2.5m寬左右之通道、(2)各式沉箱製作原則上採同尺寸高度製作為宜，此因若兩座沉箱間高度差異太大、重量差異甚至達千噸以上時，僅靠浮船塢底部水艙系統難以平衡而導致傾斜時，可能造成沉箱製作採用之滑動模板因未呈水平狀態致全面夾模失效，或沉箱出塢拖航之風險增加應予留意。

3. 沉箱製作

沉箱製作通常配合滑動模板施作，較之傳統固定模板工法可大量縮短工期，高度愈高，可節省工期愈多。僅於數量較少且在考量經濟效益前提方可能採用固定模板施作，以高雄港中型沉箱22.2X25X12.5m為例，底版厚60cm、沉箱製作採滑動模板每一循環所需工時17天(如表1)。若採傳統式固定模板施工，以每升層2m計，牆高(12.5m－0.6m＝)11.9m、共分6層(含混凝土養護期)所需工時約需53天以上；採活動模板節省工期達36天(200%)。

表1 沉箱製作採活動模板每一循環所需工時（以高雄港22.2X25X12.5m沉箱為例）

工作項目	工作天數
底版：放樣、組模、紮筋	4天
底版混凝土澆置	1天
內、外牆鋼筋組立、吊裝內模、外模 (調整試車)	4天
內、外牆混凝土澆置	3天
拆模及回收昇高桿、沉箱出塢儲存及浮塢回製作場	5天
合計	17天

4. 沉箱製作流程

沉箱製作階段可分為七個步驟：(1)底版放樣與鋼模組立、(2)鋼筋紮排、(3)內外艙牆鋼模組立、(4)滑動模板之元件組裝、(5) 箱壁混凝土澆置、(6)升模及重複第5.項之動作、(7)內外模拆除及其他安全措施。沉箱製作過程如照片3、4、5所示。

照片3 浮船塢上製作沉箱

照片4 浮船塢上製作沉箱－夜間施工

照片5 浮船塢上沉箱製作完成－內模拆除

滑動模板主要構造(1)鋼模、(2)昇高架、(3)昇高器、(4)昇高桿、(5)工作臺架、(6)輔助設施等六大部分組成，如圖1所示。其餘各階段之製作流程說明另詳「鍾英鳳、林原養、陳介、陳謙武，第23屆海洋工程研討會－重力式沉箱製作與拖放施工法」。

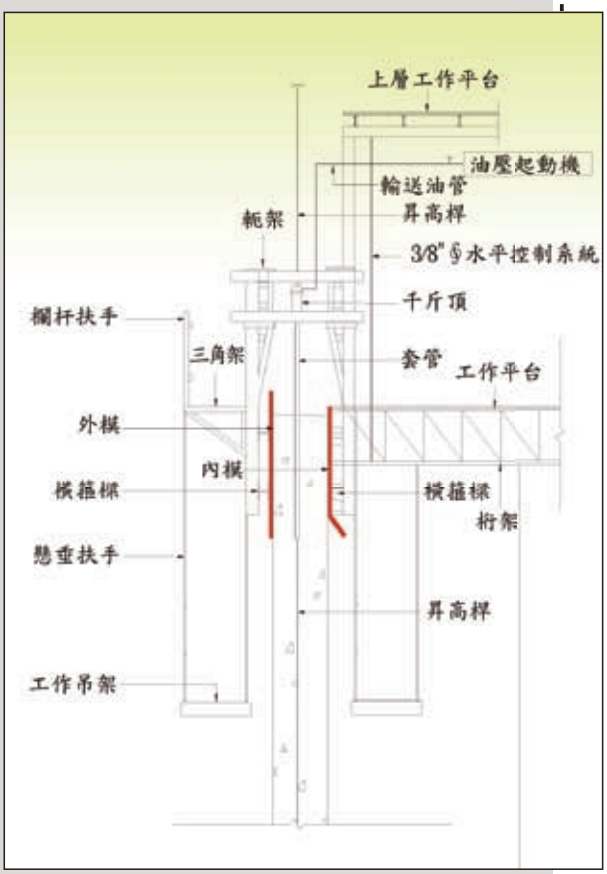

圖1 滑動模板主要構造圖

滑動模板爬升原理乃藉由升高桿提供傳遞反力至甲板，利用油壓千斤頂產生爬升力量使模板順利往上升，油壓千斤頂每次爬升高度約1吋左右、兩片模板並不呈直立狀態，而係維持1/100左右之傾斜度以使滑動模板順利爬升。

(二) 沉箱渠工法(沙灘工法)

沉箱渠工法又稱沙灘工法，也是最傳統式沉箱下水方式，需適當之地形水深與地質條件下施作，即在適當臨水區域打設鋼板樁圍堰(直立壁式沉箱渠)或土堤(自然坡式沉箱渠)等以擋水、抽水設施製作沉箱，選擇既易引水入渠而又不受颱風巨浪侵襲之灘地施作，製作過程與陸上製作工法無異，最大差別在當沉箱製作完成後，採「破堤」方式引水入渠、待沉箱起浮後以拖船拖離製作場地，再重複進行下一循環。

沉箱渠之水深要求以當地最低低潮位決定所需深度、應使港區最低潮時可使沉箱起浮；例如，當地最低低潮位 CD －1.0m、沉箱最低起浮深度4.0m，則渠底深度至少需為CD－5.0m。沉箱渠之高度應自原地表起算，以此進行鋼板樁或土堤等圍堰之結構設計分析。

渠底鋪砂整平、打設PC混凝土、隨後進行PE布鋪設、底版紮筋組模以免沉箱起浮困難，後續製作方式與陸上製作程序無異。沉箱出渠之拖離順序亦應事先詳擬計畫，施工前應仔細考量沉箱於渠內之製作數量、及位置應妥善規劃足夠之間距，當沉箱渠預備破堤時開啟水閘門緩慢控制引水速率入渠，起浮之前各沉箱間需以繩索連結、設置橡膠輪胎、碰墊等防撞設備以免沉箱間相互碰撞、破損，此點應予留意。

(三) 抽砂下水法

沉箱於沙灘上製作，完成後需配合抽砂船或挖土機等船機設備加以浚深至沉箱起浮深度使沉箱下水，如灘地土質堅硬則不適用抽沙法需改採挖土機施作，抽砂下水時沉箱之入水角度應以平緩為宜，不可因貪圖方便造成沉箱底部懸空之部分過長，易使沉箱因而翻滾滅頂，安全之作法為施工前先核算沉箱入水時安全傾斜角度使回復力臂大於0，岸邊再輔以挖土機等機具設備以協助順利下水，此工法曾於高雄港洲際一期工程有實際成功案例。

(四) 滑道下水工法

顧名思義即在岸邊斜坡上鋪設軌道，使製作完成之沉箱利用軌道斜坡下滑入水至沉箱起浮深度後浮起之設施，滑道設置之場所應選擇無巨浪侵襲平穩之水域，地盤應堅實平整、可提供軌道所需之反力以承受沉箱載重壓力，必要時應加以地盤改良。軌道上另需設置所謂「台車」以推送沉箱，軌道末端長度應延伸至低潮位時沉箱最低起浮深度加50cm左右；滑道一端沒入水中、一端設於岸上，滑道傾斜度不可過陡以免控制困難約在3~5度左右，陸上端設置門型吊車、絞車捲揚機等設備，台車尾端需以鋼索固定，鋼索強度應足以承受沉箱之拉力，緩慢放鬆鋼索因軌道傾斜度關係使台車緩慢下滑，藉以運送沉箱，待沉箱達起浮高度後以拖船脫離，台車則藉由絞車拖回完成作業。

(五) 其他

除上述所提沉箱製作下水工法外，近年東南亞地區亦有採用所謂「軌道工法」之案例，與前述滑道下水工法亦有雷同之處，惟最大差別處在於並非利用軌道之傾斜度使其下水，而採軌道設置為水平，利用軌道上配置台車及千斤頂平台裝置運送沉箱，為便於大量製作沉箱且充分利用場地需求，並設置轉換器使沉箱轉向置於台車上運送，於接近至岸邊時再輔以既有之浮船塢接駁下水。

二、沉箱出塢與座底

(一) 沉箱出塢前

應檢視沉箱各艙通水孔有無異物堵塞，以免各艙進水過程中因相鄰艙異物阻塞水壓差過高，可能導致之艙牆損毀，尤以巨型沉箱20m高度以上更應注意。

(二) 沉箱儲存區水深與海床需求需符合

沉箱儲存區水深以沉箱坐底後，低潮時水深需超過沉箱起浮深度、高潮時沉箱頂高出水至少1m以上為原則。水深過淺將使沉箱起浮發生困難，為避免沉箱坐底於軟弱或不均勻土層產生不均勻沈陷，造成沉箱受力不均勻，海床若屬軟弱不均勻土質，應以10cm大小之卵石鋪築50cm厚作為基礎為宜。

(三) 沉箱下水前強度需求

沉箱下水後，底版需承受反力，牆體需抵抗水壓，故混凝土需達一定強度沉箱方可出塢下水。規範要求強度達0.8fc'方可下水坐底儲存。如遇製作高度超過約20m高度以上之中大型沉箱，或需要於水中加高時，施工者需特別注意勿提早下水易導致沉箱受損。

此外，現場施工混凝土強度與水中養生試體抗壓強度亦有落差，應於混凝土澆置過程中，加作置放空氣中相同養護條件之混凝土試體數組以供下水前核對強度之參考。

(四) 沉箱出塢前外觀檢查

沉箱製作完成後出塢前，需檢查有無破損、龜裂、脫落等缺陷，並清除各艙浮什物，避免堵塞通水孔，及於內牆標示高度以利觀測及控制。

為避免進、出水過程中各相鄰艙水壓差過高，以不超過1.6m為原則，國內曾有因抽水起浮過程中相鄰艙水壓過高導致隔艙損毀案例。於各項設施檢查及設置妥善後，即拖至儲存區暫存如(照片6、7)。

照片6 浮船塢下沉

照片7 沉箱出塢坐底儲存中

三、施工中防颱緊急應變措施

當海上颱風警報發布時一般尚約有2~3天之應變期間，其處理方式說明如下。

(一) 空塢時

浮船塢製作場地應盡可能選擇於有良

好遮蔽效應之防波堤內施工，當海上颱風警報發布時，若浮塢上尚無沉箱製作應立即將浮船塢拖抵有遮蔽之安全水域下沉繫纜牢靠，並保持浮塢與海床約3m左右之適當深度以免因波浪起浮撞擊艙底。

(二) 浮塢上滑動模板組立紮筋、及沉箱混凝土澆置作業中

1. 滑動模板組立、紮筋中遇颱風警報發布時應立即將所有模板構件、尚未綁紮鋼筋等零星工料拆除並吊離船塢，浮船塢於安全水域就地下沉避風浪。

2. 浮塢上沉箱混凝土澆置作業進行中時，若可能澆置完成至預定高度時應儘速完成，若無法澆置至預定高度時則應選擇至有良好遮蔽之碼頭水域連同沉箱就地下沉，唯應先行檢核下沉高度時之外牆應力是否足夠，若沉箱高度過低則外牆剛澆置混凝土強度不足將無法抵擋水壓。

(三) 沉箱水中加高

1. 沉箱製作以在浮塢上製作最為穩定，整體滑動模板昇高垂直度易於控制，不易發生大片夾模之情況，如浮船塢承載力不足，不得已採水中加高時，由於沉箱浮體受風浪影響，平衡穩定性較差較容易發生夾模現象，故需於可提供遮蔽作用穩定水域中製作為宜，水深條件亦應有足夠之深度不可觸底。

2. 沉箱水中加高時遭遇颱風之緊急處理，若採就地下沉方式避颱，應事先檢核沉箱最低起浮深度，底部應堅實平整以免颱風過後起浮困難。

貳、沉箱拖放

沉箱拖放前應擬訂計畫，包括抽浮檢修、箱頂準備作業、陸上及其他機具設備待命、及拖航前之氣、海象資料蒐集、出塢、拖航所需動員之船機性能、設備型式、數量、拖力計算、沉放定位方法之流程、沉箱堤端之絞車設備、碰墊、定位測量儀器、坐底前海床水深資料校核及後續回填砂封頂作業等，說明如下。

一、沉箱拖放前準備

(一) 抽浮檢修

沉箱由儲存區預備拖放前，抽浮檢修作業應先行查驗箱體外觀是否傾斜，並派遣潛水伕進行水下檢查，檢視沉箱坐底情形是否不均勻沉陷，不可強行打浮，國內曾有因儲存區海床鬆軟沉箱下陷，而導致底版起浮拉裂、沉箱損毀之案例。另抽浮檢修時應控制鄰艙水壓差於1.6m內，避免相鄰隔艙壓差太大損壞艙牆結構，並確實檢視沉箱各部位是否滲漏水之情形，否則極可能於拖航途中因大量滲水而沉沒。

(二) 沉箱頂準備

沉箱完成抽浮檢修並繫泊固定完成後預備拖放到目的地前，應逐項檢查（1）沉箱進水閘門、（2）箱頂安全網、（3）發電機(抽水時備用)、（4）固定及移動式碰墊、（5）測量瞄準用刻度尺等設備是否完善。另於長程拖航時，沉箱頂宜以鋼蓋板密封以防止海水漫入艙內，造成不穩。

(三) 陸上及其他機具準備

沉箱堤拖放施工一般多採端進法，故於陸上端應備有沉箱定位、坐底所需輔

助機具設備，如履帶式堆土機、移動式輪胎碰墊、測量儀器、擴音器、花桿、封塞水門孔用之料具等，使坐底、定位順利進行。

二、沉箱拖航

沉箱拖航前應確實掌握氣象、海象資料之蒐集研判、沉箱起浮拖航作業、沉箱定位坐底、及沉箱進水堵塞水門復原及填充等階段作業。

(一) 沉箱拖航前氣象、海象資料研判

台灣地處亞熱帶、四面環海，每年6~10月常遭受颱風威脅，一旦颱風形成，海象不佳，故沉箱拖放前應確實掌握氣象、海象資料研判，乃至實際拖航行動展開攸關全體海上作業人員生命財產安全甚鉅，尤其長程拖航風險相對增高更應注意，沉箱拖航應至少掌握拖航期間及其前後1~2天氣象、海象狀況。在確定海象、氣象良好情況下，才可進行拖放沉箱作業。通常風力6級(10.8~13.8m/sec)以上不可拖放，另各式輔助工作船隻如：工作船、吊桿船等之耐波浪程度不一應分別檢視之，例如小型組裝之8吋平底抽砂船等之耐波性甚至小於1m；出海作業前應詳知海象浪高，以免沉箱翻覆或工作人員被強風吹落海。另因沉箱定位坐底後之保護作業：艙內填砂、封頂及基礎護基方塊吊排等後續作業，視沉箱大小至少需四、五天以上，若未能及時進行後續穩固保護措施，如此時遭遇颱風、大浪等侵襲損毀，將使工期延宕及成本增加，故適宜拖航時機之研判相當重要。

照片8 拖航船機配置

(二) 拖航船機配置、船速、潮流與水深要求

1. 長、短程拖航所需之船機配置亦有差異，基於各海域施工條件之不同，本文所謂「短程拖航」係指港域內或鄰近水域之短距離拖航，而「長程拖航」係指拖航距離超過70浬以上(如高雄港至澎湖龍門尖山港)而言，倘現有港域內無適當水深、碼頭製作沉箱或因受限於其他料源設備等因素影響，而需於他處製作完成後再拖至目的地沉放之需要稱之；再依拖航載具型式區分有2種，分述如下：

(1) 直接由拖船拖帶沉箱(如照片8)，俗稱「裸拖」：箱頂作業需覆蓋鋼板、間隙密封防止海水漫流滲入、抽水設備發電機固定、防墜網、水閘門、傳動桿作動等查驗確認無誤後再予拖航，此類型式之拖航以早期(73~78年)LNG永安液化天然氣建港填站工程所需沉箱計93座，係於台南安平港製作完成後再拖抵高雄永

安區沉放，航程約13~15浬、航速約2~3節(knot)左右為代表。

(2) 以浮船塢(或平台船)搭載沉箱拖航：長程拖航例如於高雄港製作完成後拖抵澎湖龍門尖山、金門，甚至由屏東鹽埔漁港拖抵東沙島等地，其風險相對短程拖航增高，整體拖航之拖曳拉力及船機最低馬力需求計算公式如式(1)~(3)，實際案例整理如照片9、10、11、12及表2所示。

照片9 長程拖航高雄拖抵金門九宮港

照片10 長程拖航高雄拖抵金門九宮港－浮塢下沉中

照片11 長程拖航高雄拖抵澎湖龍門尖山港－沉箱預備出塢

照片12 長程拖航高雄拖抵澎湖龍門尖山港－沉箱出塢

表2 長程拖航主要船機配備總表

拖航起、訖點	拖航距離(浬)	沉箱尺寸 長*寬*高(m)	拖船航速、航程(hr)	實際使用船機設備 / 核算馬力最低需求	浮船塢(平台船)尺寸 長*寬*高(m)
高雄港~澎湖龍門港	70	25*18*9.5	4~5節、14~16 hr	主拖船7,200HP 3,408HP(船速4節) 6,657HP(船速5節) 註：拖航時假設箱前波高以3.5m計算。	FD7000 62.4*40*25、底艙4.0m高
高雄港~金門九宮港	168	25*14.1*12.5、25*9.65*11.5	4~5節、36~40 hr	主拖船7200HP、副拖船500~1000HP、 3,408HP(船速4節) 6,657HP(船速5節) 註：拖航時假設箱前波高以3.5m計算。	FD7000 62.4*40*25、底艙4.0m高
屏東鹽埔港~東沙島	240	3.50*3.50*3.50	4~5節、48~55小時	主拖船(海揚8號馬力2,200HP、總噸位：1998頓) 1,899HP(船速4節) 3,709HP(船速5節) 註：拖航時假設箱前波高以3.0m計算。	平台船合隆108號、26*75*3.8

$T' = (w/2g) \times C_d \times V^2 \times A$ （1）

其中 $A = B \times (H + h')$

拖船馬力 $HP = 2.0 \times E.H.P$ （2）

$E.H.P = T \times V / 75 = T \times V' / 146$ （3）

上式中

E.H.P ：有效馬力（Effective Horse Power）

V：拖行速度（m/sec）、

V’ ：拖行速度（節knot）

T：拖拉力（kg）、T’ ： 拖拉力（噸）

w：海水密度（ 1.03 t/m^3）

g：重力加速度（ 9.8m/sec^2）

C_d：阻力係數0.06(流線型物體)~2.0(L型柱)

A：沉箱前進方向之浸水面積（m^2）

B：沉箱寬度（ m）

H：箱前吃水深（m）

h’ ：箱前波高（m）

由表3案例得知，實際使用船機設備較推算最低馬力需求為高、馬力且與船速平方成正比。長程拖航時除氣象因素外，拖船馬力大小佔相當重要之地位，甚至影響整體作業之成敗，其主要考量係因長程拖航時程較長，在氣象或海象惡劣條件下拖船需加速避風，或因較難以預期之波浪海流之故，平均拖航航速亦較港內短程拖航為高；另沉箱於浮船塢製作完成後，以浮船塢(或平台船)搭載沉箱拖航至目的地，因浮船塢本身水艙具平衡能力，海水不易漫流入箱體，整體耐波浪之回復穩定性較直接裸拖沉箱為佳，唯成本較高；另外被拖帶之浮塢(或平台船)端兩側採用鋼纜因其具較高之容許拉應力，與主拖纜繩成60度夾角配置、並利用浮塢水艙系統調整被拖帶浮體成約略水平狀態以利拖航，應注意不得因拖帶鋼纜高度設置不當形成太大俯仰角度，否則拖航時有翻覆之虞。

2. 依沉箱大小尺寸、航速計算所需拖拉力：長短程拖航所需纜繩之拉斷力、長度等因拖航浮體之慣性力作用下亦有所不同，主拖纜繩長度通常較短程拖航為長，端視被拖帶浮體之長度尺寸而定，短程拖航航速約2~3節、長程拖航船速略增至4~5節左右；船隻拖拉力計算可以式(1)估計，實際案例計算結果以「安平港外廓防波堤工程」為例，各式沉箱所需拖船馬力計算及拖航船機性能配置如表3、4所示。

表3 各式沉箱尺寸拖力計算(以安平港外廓防波堤新建工程為例)

項次	沉箱尺寸 寬×長×高(m)	箱前浸水面積 (m^2)	拖拉力T’ (ton)	最低拖船 馬力需求 (HP)
1	14×24.8×7.5	78.40	8.71	239
2	16×24.8×9.5	100.80	11.20	307
3	18×24.8×11.5	142.2	15.79	433
4	20×24.8×11.5	136.00	15.11	414

註 ：$E.H.P = T \times V / 75 = T \times V' / 146$ ，港內拖航航速 V’ 以2節(knot)計算，C_d 採2.0。

表4 拖航船機配置(以安平港外廓防波堤新建工程為例)

項次	機具名稱	數量	規格或功率	備註
1	標誌定位船	1	海力號或D18吊桿船	一錨機具有四組捲筒，各捲筒有10T以上拉力
2	惠記T5拖輪	1	855HP	主拖輪
3	惠記T3拖輪	1	855HP	副拖輪
4	熊谷三號起錨船	1	300HP	輔助船隻
5	興隆L-1號	1	90HP	前導船
6	長輝參號	1	1000HP	輔助船隻
7	繫纜繩(200m)	1	§ 50mm	拖放設備
8	發電機	1	220V,125KW	
9	抽水泵浦	6	§ 4”,5P	STD8m,1.4m3/min
10	無線電對講機	6	IC-M1	
11	擴音器	1	ER-56,DC12V	背肩式
12	鋼索	4	25mm §	
13	碰墊	31	20T、3.5T卡車車胎	固定式、移動式

3. 整體拖航船機設備配置及工作執掌說明

沉箱拖航過程中由於受到風力、波浪飄移力、不規則波等外力作用影響，實際拖船於整體拖帶系統過程中，拖船與被拖帶之浮體(沉箱或浮船塢)間並非成一直線狀態，以最危險之情況風向與波浪方向一致發生時，分三種情況說明如下。

(1) 拖船方向與風浪成180度(頂浪)，整體拖帶系統較穩定，被拖帶浮體飄移量較小，航向較易維持，但航速將大受影響，拖船馬力不足時拖帶系統將無法前進而被海浪沖走。

(2) 拖船方向與風浪成0度(順浪)，雖航速大幅增加，唯拖帶系統之相對間距拉大，纜繩有可能因瞬間驟增負荷而遭拉斷。

(3) 拖船方向與風浪成90度(側浪)，拖船與被拖帶之浮體(沉箱或浮船塢)間形成較大偏移角度，船速降低甚至無法依原定方向前進，解決方法為加大拖船馬力使航速增加，但要兼顧拖帶纜繩之負荷拉力；另長程拖航時應特別注意拖帶纜繩長度，約達150~200m(至少需2倍被拖帶浮體船長以上) 以確保足夠之緩衝餘裕，纜繩過短有被拉斷之虞，而港內短程拖航約僅需30~50m即可。

整體拖航船機配置及工作執掌如下：

前導船：負責拖航路徑、水深探測、避免觸底及引導。

主拖船：繫纜繩拖沉箱。

副拖船：輔助推頂沉箱。

護航工作船：位於兩側提供隨時支援。

4. 拖航所需纜繩拉力可依據公式（1）估算結果選用，其種類有尼龍繩（Nylon Rope）、PP（Polypropylene Rope）、PE（Polyethylene Rope） 等三種八股繩（8-Strand Cross Braided Rope）及鋼纜，

纜繩之拉斷力（Breaking Strength依各廠提供型錄核算之，表5為各種纜繩計算拉力。拖航所用主拖纜為尼龍、PP或PE等材質，以增加彈力避免驟然拉斷。繫泊沉箱端為鋼纜呈60度正三角形分佈。沉箱拖航作業所需船機設備配置情形如照片13、14所示。

表5 各種纜繩拉力表

直徑 mm	長度 m	八股繩						
		尼龍繩		PP繩		PE繩		
		重量	拉斷力	重量	拉斷力	重量	拉斷力	
		kg	噸	kg	噸	kg	Grade A噸	Grade B 噸
50	200	313	39.8	248	19	252	20.2	15.9
55	200	379	47.5	299	23	304	24.2	19
60	200	451	55.8	356	27	363	28.4	22.3
65	200	528	64.8	418	31.7	425	33	25.9

照片13 異型沉箱拖航中

照片14 異型沉箱到達

5. 水深要求及水深測量：沉箱最低起浮深度依個別浮游曲線吃水深而定，應仔細估算沉箱拖放所需到達時間當時潮位是否有觸底之虞。而在水深測量部分，較常採用者為迴聲儀(echo sounder)並配合全球定位系統(GPS、DGPS)運用可快速得知結果，迴聲儀依其頻率高低可分為單音束及多音束(Single-beam, Multi-beam echo sounder)2種，單音束音鼓頻率標準約200KHz ，音鼓頻率愈低測深範圍愈深；而多音束測深儀的音鼓因同時具備許多音束，一次可量測的水深點數較多。由於測深時船隻受到波浪等因素影響，示性波高(有義波高)50cm以上時單音束測深儀至少需以湧浪補償器(heave compensator) 之量測資料來加以修正，而採多音束測深儀時，因每次量測得水深資料為多點位掃描之橫斷面非為點位水深，此水深橫斷面受前後傾斜、左右搖擺影響，所量得之斜距必須換算為垂直距離，因此需具備可同時量測航向(heading)、前後傾斜、左右搖擺之角度及上下起伏高度之船隻姿態收集器(motion sensor)、及陀羅儀式的航向儀(gyro-compass)等設備可達所需之精度。

三、沉箱安放定位與坐底

(一) 沉箱安放定位：採用標誌船（Target Boat）工法

沉箱拖至預定地後，傳統工法係利用岸上挖土機、推土機等及具絞車捲揚機設備之起重船校準位置，並配合各式輔助工作船隻推頂方式定位，由於沉箱重量甚大動輒千噸以上，即使在水中雖提供浮力可減輕重量，亦不易控制沉箱定位精度；依據規範要求沉箱間隙不得大於20cm、法線方向誤差不得大於25cm、四角高差不得大於30cm，由於沉箱定位與進水坐底過程耗時，且受到波浪外力作用影響易撞擊損毀沉箱壁體結構，有鑒於此，於安平港西外廓防波堤工程率先採用標誌船（Target Boat）定位工法(如圖2)，其法為將沉箱繫纜於大型標誌船之一側，再利用船本身絞車設備使沉箱就定位。此法法線方向誤差可保持在15公分內，且具有安全、快速又可避免沉箱壁過度碰撞損毀之功效。俟達預定進水位坐底完成方可解除沉箱之繫纜。

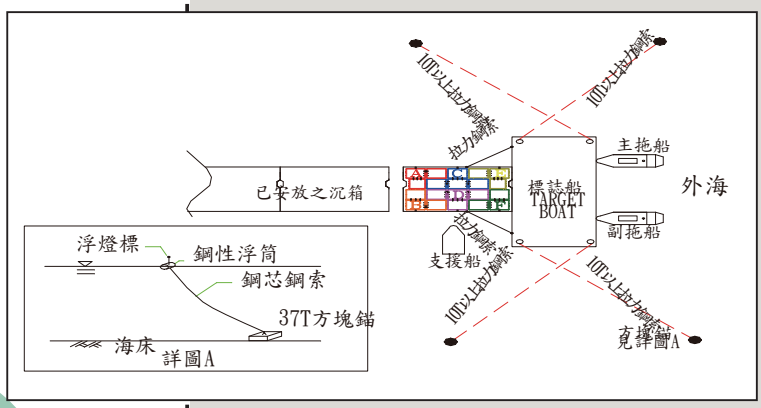

圖2 標誌船定位法

四、沉箱進水、堵塞水門復原及填充

(一) 為避免沉箱進水沈降過速，應分數階段進水，並核算水閘門開啟高度及時間，由指揮人員於箱頂配合岸上測量校準人員，於適當時機令所有水門操作人員漸進開啟水門，至沉箱底距基礎50cm處時先關閉所有水門，再調整內艙水位及校正定位無誤後，大量進水使沉箱坐底。異形沉箱進水過程更應慎重，進水作業前應詳加了解沉箱浮游曲線圖，如需壓重混凝土亦須完成施作至預定壓重厚度(如圖3)，以確認箱體穩定性。茲以凸型沉箱為例（榮工處，蘇澳港工程完工報告下冊，1986），照片15顯示該異型沉箱各階段進水過程係經過仔細核算後以左、右來回沉降方式完成。

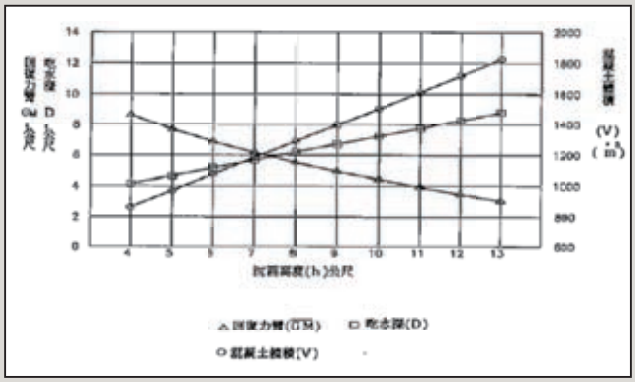

圖3 異型沉箱浮游曲線圖

照片15 凸型沉箱安放左右來回傾斜坐底

(二) 沉箱進水坐底後，經數次調整內艙水位平衡後，關閉水閘門，經檢測沉箱法線、間隙、四角高差等均符合規範要求後，進行船隻解纜水門拆除等工作。

(三) 堵塞水門復原及填充：潛水伕拆卸水閘門可回收供下次使用，留下孔洞自箱內加裝水門蓋板，箱外以皂土或水泥混凝土等填滿，最後拆除箱頂一切

設備，隨即進行箱內填充砂作業。

(四) 沉箱回填砂：填充材料可就近採用海砂或其他碎石料等，但不得摻雜泥土或有機物等，填充作業時均應注意鄰艙之高差，不可超過相當1.6M之水頭差壓力，回填設備通常以抽砂船為之，管徑大小視需要而定，一般而言，小型抽砂船隻耐波性較差應注意其海象變化。排砂管應依規定布設警示及照明設施。回填至設計高度後排除污泥及積水，經震實後澆置封頂混凝土、沉箱間隙回填卵、礫石，同時沉箱海側、港側吊放護基方塊保護，至此沉箱安放填充作業始告完成。

參、結論與建議

沉箱製作與拖放作業應兼顧工程品質、時程、安全、經濟等因素方能達成目標，尤其於颱風汛期期間工序安排攸關進度甚鉅，此亦為港灣工程之特性，如何避免災損發生或使災損降至最低有賴全體施工及監造團隊之智慧與努力付出。

在異型沉箱之出塢進水及儲放等方面，為較易疏忽及失敗之環節，施工監造者需對進、出水系統及壓重混凝土詳細檢討後施作。在沉箱定位方法，採用標誌船定位、船上再輔以絞車設備，其定位後法線誤差可達15公分以內，可獲致令人滿意之結果足供參考。

以浮塢法製作沉箱為目前最普遍採用之工法，技術亦已嫻熟，然由於科技知識提升，沉箱製作高度與數量繁多，其他工法(如軌道工法)等亦漸有被採納之趨勢，應詳加瞭解俟累積足夠之施作經驗後，期能建立一套標準作業程序以供遵循。

至於沉箱拖航部分係相當重要之一環，尤以長程拖航時風浪影響為最重要考慮因素之一；整體船機拖帶系統須預先詳細研擬周詳計畫，應包括具備足夠之拖船馬力性能、採安全之載具拖帶沉箱以增加穩定性、配合適當長度及拉力之纜繩拖帶，並由具備豐富經驗之專業操船技術人員為之以確保航行安全。

參考文獻

1. 鍾英鳳、林原養、陳介、陳謙武，第23屆海洋工程研討會「重力式沉箱製作與拖放施工法」，(2001)。
2. 安平港外廓防波堤工程，「沉箱製作與拖放施工計畫書」，(2000)。
3. 公共工程施工綱要規範第02395章，「港灣用沉箱」，(2013)。
4. 蘇澳港竣工報告，(1986)。
5. 湯麟武、徐忠猷、黃正欣，「港灣及海域工程」，中國土木水利工程學會類第十一篇，(1992)。
6. 朱俊翰，波浪中船舶拖帶系統之模擬研究，成大碩士論文，(2006)。