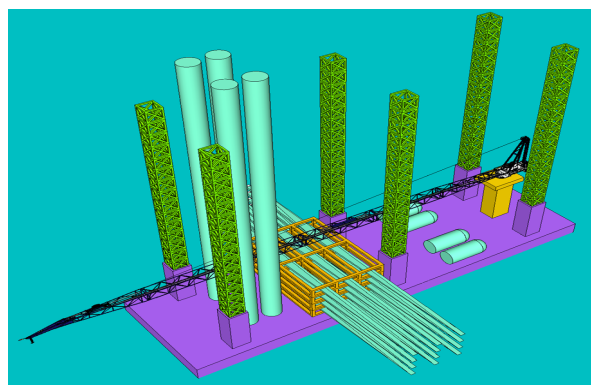
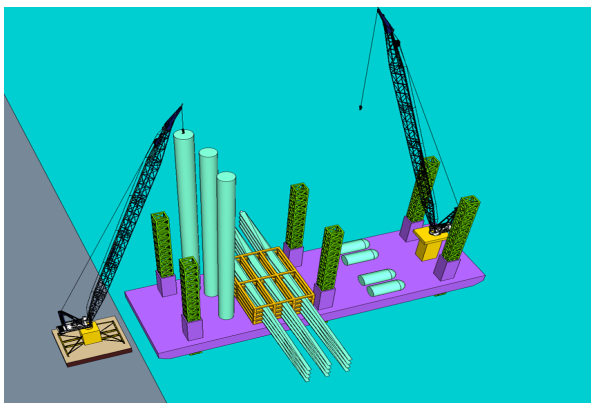
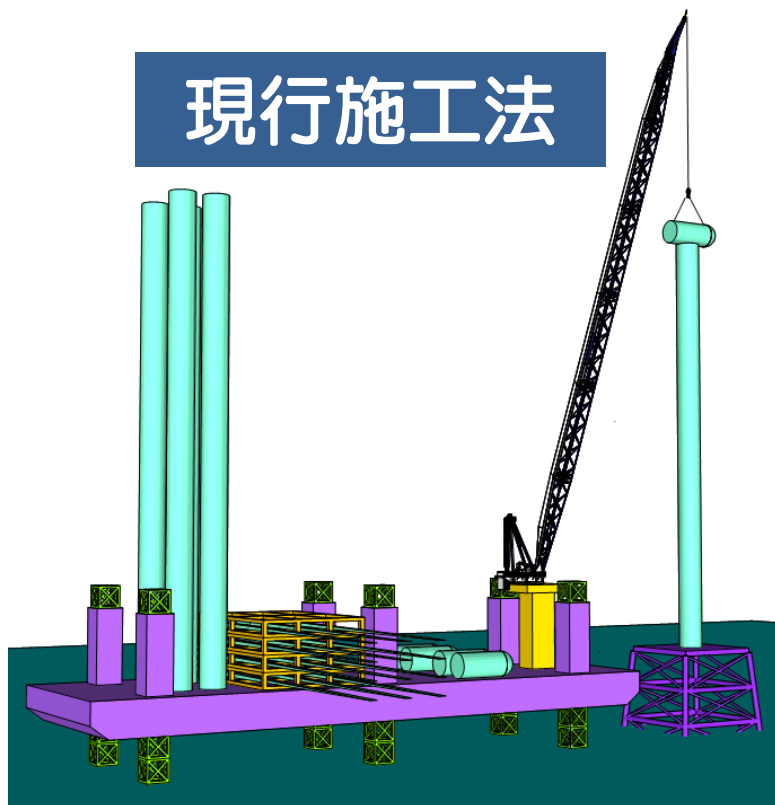


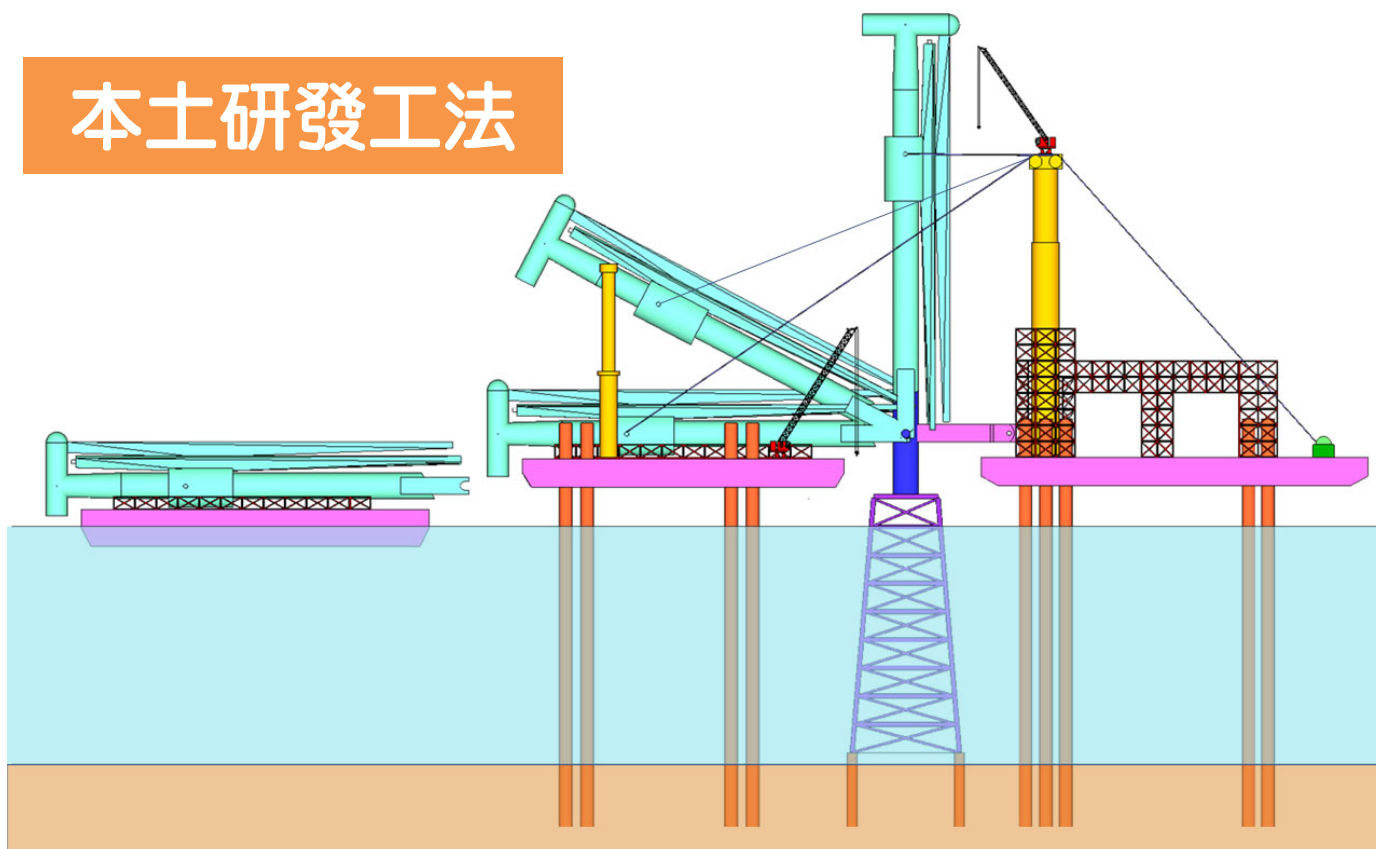
離岸風電海上風機 整機架設系統工法探究



現行施工法



本土研發工法



離岸風電海上風機整機架設系統工法探究

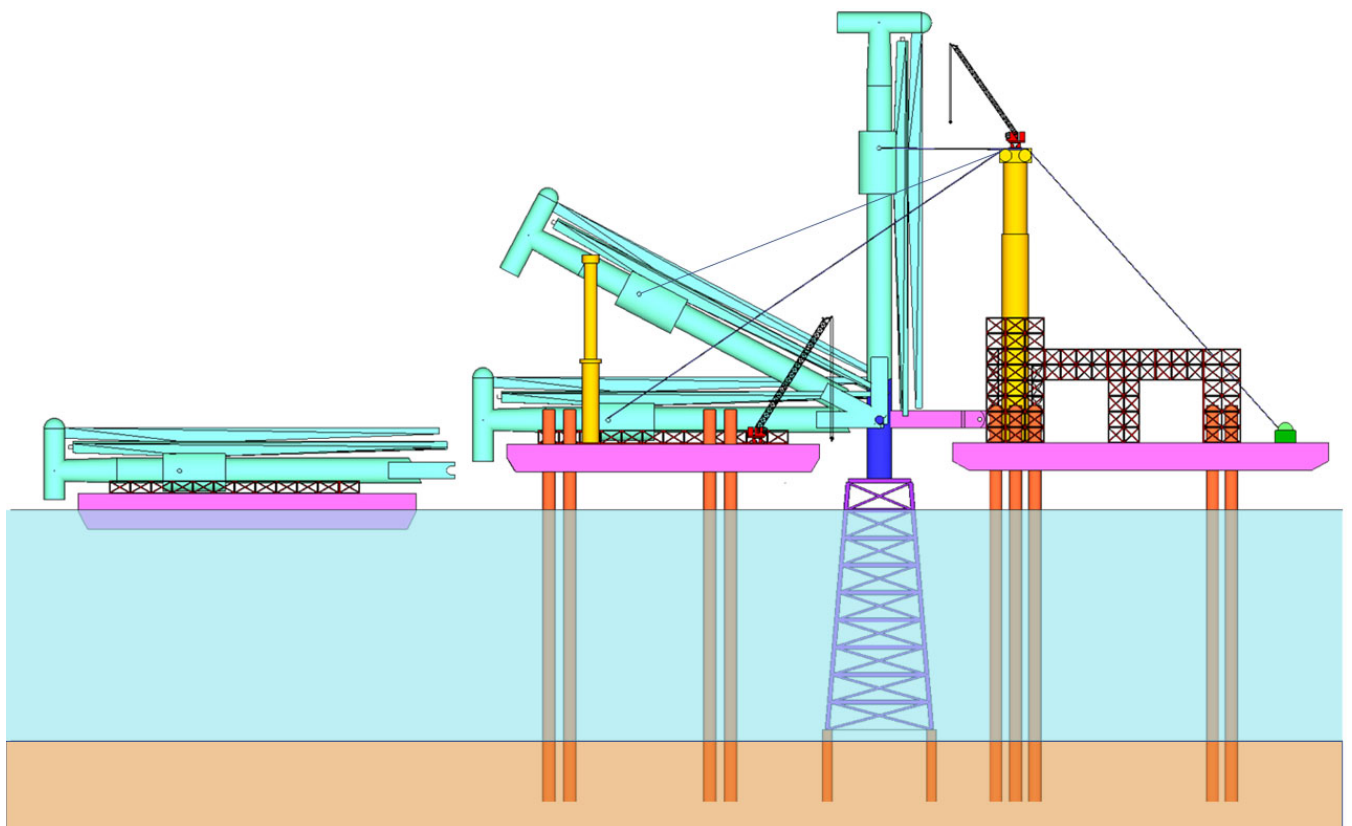
摘要	3
1、計畫緣起.....	4
2、臺灣地區離岸風電發展概況	5
2-1 臺灣地區離岸風電發展說明.....	5
2-2 臺灣離岸風場場址自然環境概況.....	6
2-3 自然環境因素對船機設備影響	9
3、現行離岸風機架設工法說明.....	10
3-1 離岸風機架設工法之決定	10
3-2 現行海上風機架設工法說明	10
3-3 現行海上風機架設工法設備之限制與困境	12
4、為何要發展本地風場之架設工法.....	13
4-1. 離岸風機海上架設工法之類型	13
4-2. 風場自然環境與設備適用性	14
4-3. 風場自然環境影響說明及因應解決之道	15
4-4. 現行工法之國外船機設備並非可全然移植至本地風場	16
4-5. 本土研發工法之施工構想及其應用原理	16
5、本土研發工法可行性探究.....	17
5-1. 工法應用技巧及船機設備	17
5-2. 船機設備承載計算與耐震分析	17
5-3. 本土研發工法相關船機設備、施工步驟及流程	20
6、現行工法與本土研發工法比較說明.....	23
6-1. 工法概念及應用技巧	23
6-2. 工法優劣比較說明	23
6-3. 工法差異對船機設備成本之影響	24
6-4. 本土研發工法相關作業時程.....	24
7、本土研發工法主要意義及貢獻.....	25
7-1. 結論	25
7-2. 建議	26
參考文獻	26

摘要

本文主要係探討臺灣西部離岸風場自然環境因素對海上風機架設工法之影響，自然環境因素包括海床地質、颱風及地震，這三項環境因素為臺灣風場特有，其與歐洲風場環境條件截然不同，因此國外既有船機設備，並非可全然移植至本地風場操作。

本文所揭示海上風機整體施工規劃，其中船機設備係採【運架分離，整機安裝】之設備規劃；工法原理則係應用【借力使力，以小博大】之工藝技巧，因此使得船機設備更為普及及輕量化。整體施工規劃，除充分考量風場之特殊環境條件，更兼俱施工之成本經濟性，操作安全性，維修方便性及發展未來性，可謂“與時俱進純本土化”之全新施工法。

此外，本文所揭示工法概念及技術應用有別於現行國外船機設備及操作方式，因此未來勢將涉及許多設計及施工法規之規範，此將有賴政府相關單位籌設一“產、官、學”之協調機制平臺，以發揮風電產業之規劃、設計、施工、營運、維修之整合協調，並藉此一平臺落實“研發本土性、產業在地化”之政策目標。



許金城：臺大土木研究所碩士

現職：博海風電科技股份有限公司 總經理兼技術長

1、計畫緣起

為因應全球氣候變遷，提倡碳零排放，各國政府無不大力發展綠能，其中一項重要綠能即為離岸風力發電。離岸風力發電顧名思義即為離海岸邊之適當風場，利用其豐沛風力轉動風機葉片帶動發電機產生電能，再經海底電纜設施傳送至陸域變電站。

離岸風機因建置於海上，施工期間深受海上天候、海象、海床地質、海深等影響，與陸域施工條件完全不同，屬高難度特殊施工，因此一座風機其建置過程能否順利依設計旨意如願完成達成目的，建置過程之施工法規劃尤為重要；甚且成為工程成敗之關鍵，因此風機海上組裝之規劃會因風場自然環境及工程需求發展出各種不同施工法，而工法最終將反映其可行性、安全性及經濟性。

政府自 2010 年起大力推展離岸風力發電。【離岸風力發電】在臺灣是一項陌生之新興產業，發展之初，有關風場選址、風機規劃設計、海上組裝及後端營運、維修全需仰賴國外有經驗之技術團隊。然國外既有船機設備是否可全然移植至本地風場，其有很大疑問；主要原因就是自然環境條件不同。自然環境包括海床地質、颱風、地震。這三項環境條件是臺灣風場特有的，而這些自然環境條件將會決定海上風機組裝工法及船機設備。

本文將依據臺灣風場之自然環境條件及風機構件之工程特性，探討現行臺灣離岸風機架設工法所面臨困境，進而研擬出適合本地風場且具施工安全性、操作方便性、成本經濟性及發展未來性之最佳施工法(以下稱本土研發工法)，由於篇幅之限制本文擬分三部份撰寫。

第一部份:本土研發工法之可行性探究，包括與現行工法之差異比較。

第二部份:本土研發工法船機設備之規劃設計、施工工率及施工成本比較。(在此階段將規劃本土研發工法之 1:1 模型試驗操作)

第三部份:本土研發工法施工船機應用於後端營運維修。

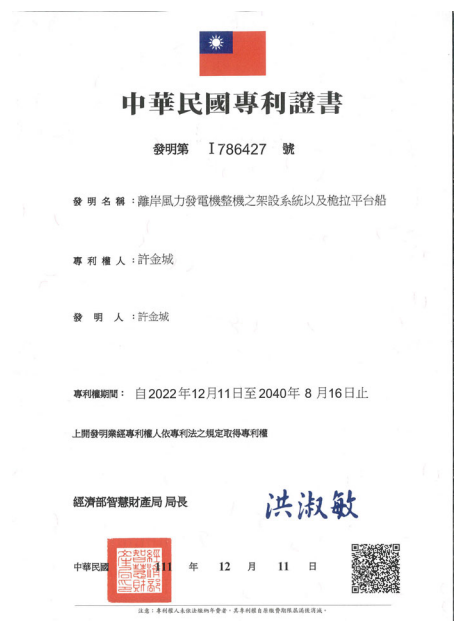
本土研發工法全名為【離岸風電海上風機整機架設系統工法】，本項工法歷時三年研發並於 2022 年 12 月經經濟部智慧財產局核准發明專利。

專利編號:I786427 號

發明名稱:離岸風力發電機整機之架設系統以及桅拉平臺船。

專利權人及發明人:許金城

專利權期間:2022 年 12 月 11 日至 2040 年 8 月 16 日止。



2. 臺灣地區離岸風電發展概況

2-1 臺灣地區離岸風電發展概況說明

政府推動離岸風電自 2010 年開始分三個階段，即先示範風場，次潛力場址，最後區塊開發，目前正進行第二階段風機建置預計於 2027 年完成。依據經濟部工業局所公佈之風場場址，開發時程、容量以及風機成本配置，如說明。註①

(1) 風場場址

① 第一、二階段場址大部份位於竹苗外海，離岸約 10 公里以內，部分位於彰化、雲林外海。

② 第三期場址位於彰化雲林外海，離岸約 20~30 公里，海深 30~80m 不等。

(2) 開發時程與開發容量

	規劃時程	發電容量及風機數量	備註及說明
規劃時程及發電容量	1. 第二階段 (潛力場址) 2020 ~ 2025	1. 5.5 GW 2. 風機組數約 600 座	—
	2. 第三期 (區塊廠址) 2026 ~ 2035	1. 15GW 2. 風機組數約 1500 座	1. 發電容量 10~14MW/座 2. 平均造價 20~22 億/座

(3) 風機機組成本結構配置(成本佔比取自經濟部工業局)

單座風機造價以 20 億估計，風機各項成本佔比如下表所示

	項目	占比(%)	單價(億)	數量(組)	總價(億)
1	設備金及保險	4	0.8	2,100	1,680
2	專案作業及管理	5	1.0	2,100	2,100
3	電纜及電力設施	16	3.2	2,100	6,720
4	水下基礎	23	4.6	2,100	9,660
5	風機組件	34	6.8	2,100	14,280
6	風機組裝	18	3.6	2,100	7,560
	合計	100	20.0		42,000

2-2. 臺灣離岸風場址自然環境概況

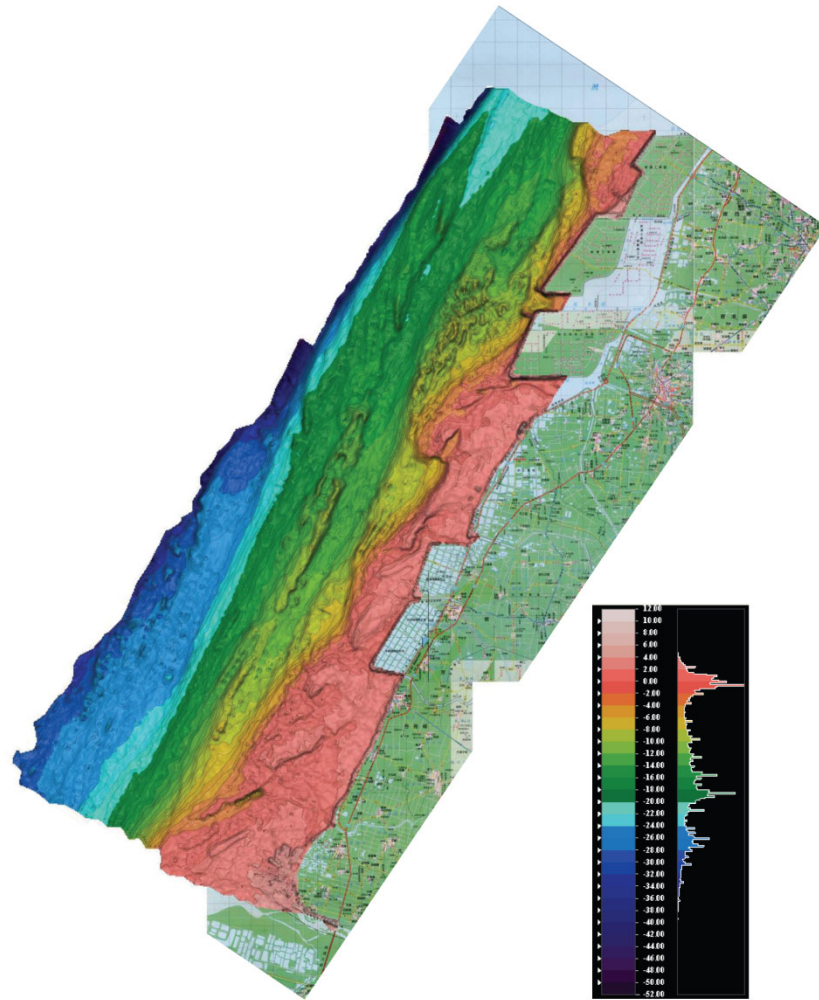
臺灣四面環海擁有豐富的自然環境資源，海洋資源更是經濟發展的重要基礎。近年來臺灣大力發展離岸風力發電，取代傳統燃煤發電，實現能源轉型，達成友善環境的目標。

臺灣的離岸風場場址多分佈於臺灣海峽和西海岸沿線，其中以離岸風場建設以彰化縣雲林縣及臺中市外海等區域為主。這些地區風能資源豐富，風速穩定，加上海域面積廣大，能夠提供較佳的建設空間。因此本文主要探討在彰化、雲林外海離岸風場之自然環境，依其自然環境條件進而研擬發展適合該風場之施工法。

(1) 地形

彰化海岸早期受到濁水溪、烏溪甚至大甲溪之漂砂影響，形成隆起形沖積平原，海灘坡降極為平緩；加以潮差大之緣故，退潮時海岸潮間帶灘地寬達 3~5 公里；近年來受到工業區開發與海岸構造物興建之影響而有局部海岸侵蝕退後狀況發生，但整體上彰化海岸除工業區外側海域外，其他地區海岸仍約有 1.4~5.6 公里沙灘露出。其海岸地質屬於第四紀沖積層狀況，主要以沉泥質砂為主，夾雜沉泥質黏土或黏土質沉泥，大致可以分為兩區：①北半部沿海地區，主要是由源自砂岩及頁岩分佈區的大肚溪沖積而成；②南半部沿海地區，其沈積物主要是由行經粘板岩及頁岩分佈區的北斗溪、濁水溪、虎尾溪及北港溪等沿流搬運而來的。

彰化沿海地區一方面受到河川流能的改變沈積物由粗到細，另一方面又因潮汐在平坦的灘地漲退幅度很大(達到 4 公里)，以及河道經常變遷，致使沈積物在水準或垂直方向都具有很大的變異性，局部地區承载力仍嫌不足，圖 2-1 所示為彰化海岸全區海域之地形水深線分佈圖。

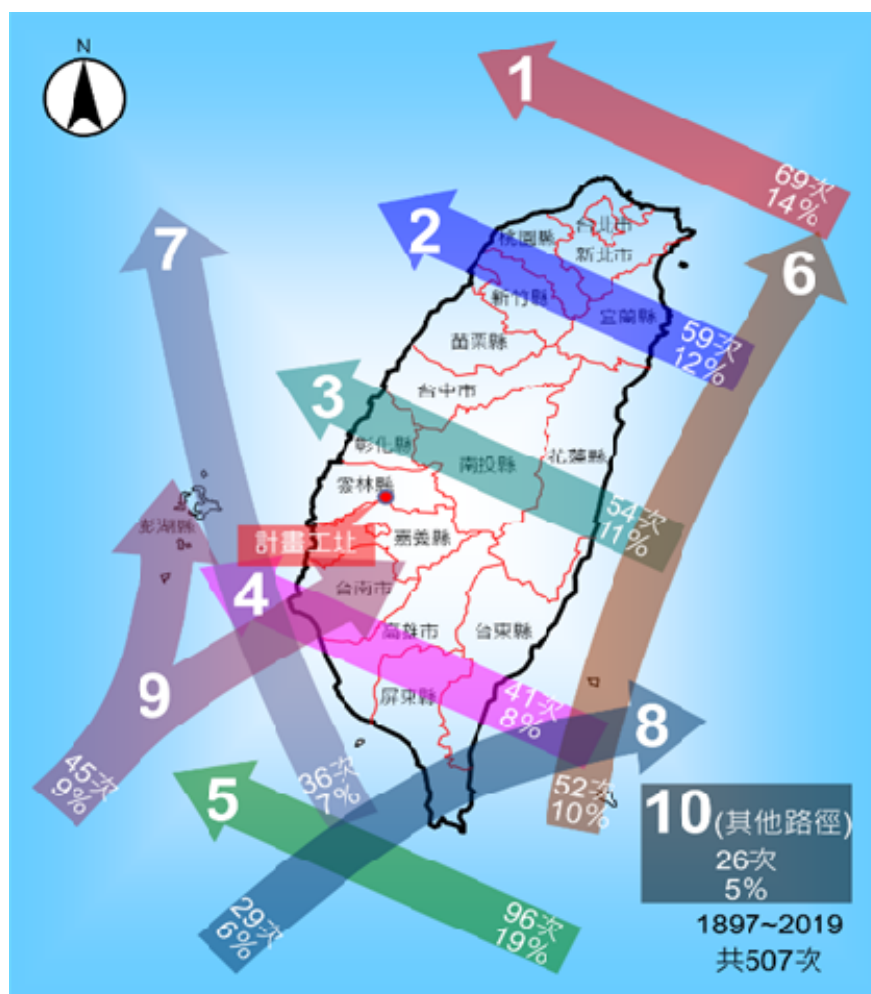


資料來源：彰化離岸風力發電計畫可行性研究

圖2-1 彰化海域地形水深分佈圖

- (2)地質：彰化隆起海岸平原係屬沖積層地質，地質上屬於現代沖積層，以砂質土層及粉土層或黏土層為主，層次呈交互分佈。深層的砂土層中則偶夾有礫石，粉土、黏土層的層次較為複雜且不規律。根據民國 85 年 7 月中興工程顧問公司受經濟部工業局委託辦理「彰濱工業區開發工程地盤液化分析與岩盤深度調查報告」，資料顯示本區域附近的沖積層厚度約介於 610 m ~ 680 m，顯示此沖積層厚度相當深厚。
- (3)土壤：彰化地區土壤之生成及其特性，受大肚溪及濁水溪兩大流域之沖積物之來源與沉積方式之影響甚大。區內土壤依其沖積物之來源與沉積方式不同，分有砂頁岩及黏板岩沖積土，黏板岩新沖積土以及黏板岩老沖積土等三大類。
- (4)海溫：該區域的海水溫度年平均約為 23-26°C，海水鹽度為 32-34ppt，水溫會受到季節和降雨量等因素的影響而有所變化。
- (5)海流：該區域的海流較緩慢，受到海底地形、季節性風向和潮汐等因素的影響而有所變化。

- (6)風速和風向：該區域年平均風速約為8-12m/秒，風向主要為東北季風和西南季風。
- (7)降水日數：平均月降雨日數在2日以上，平均年降雨日數約為82.6日。
- (8)颱風：颱風侵臺時間大部分介於4~11月間，每年以7~9月最盛。根據中央氣象局於1897年~2012年間針對颱風侵襲臺灣路徑統計資料，直接或間接影響該地區之颱風路徑主要為第3、7及9類路徑，共計135次，約占27%，如圖2-2所示。



資料來源：中央氣象局。

圖2-2 颱風路徑統計示意圖

臺灣離岸風場之自然條件綜合說明如下表列

自然環境	環境說明	備註
風場場流	臺灣的離岸風場場址多分佈於臺灣海峽附近，此區域位於中央山脈與大陸福建武夷山山脈中間，這些地區風能資源豐富、風速穩定，平均風速 8~12m/sec，加上海域面積廣大，為離岸風電優良場域。	優
海床地質	臺灣中部彰化雲林外海地區，其海岸地質屬於第四紀沖積層，主要以粉土質砂為主，土層分佈厚且廣，未有明顯承載層。	劣
颱風	每年夏秋之際有颱風入侵	
地震	臺灣位於環太平洋及歐亞板塊與菲律賓板塊擠壓帶，終年有不同規模地震發生。	

2-3. 自然環境因素對船機設備影響

1) 海床地質

海上風機組裝為避免組裝過程海浪對於船機之影響，一般船機都採升降式平臺船，亦即將平臺船利用支承柱樁將平臺升起離開海平面以避免海浪對船機衝擊。因此海床地質條件將決定柱樁之支承型式，現行歐洲船機大多採點承樁，而臺灣地區風場海床大多屬粉土質沖積層，沒有明顯承載層，柱樁承載須改採摩擦型樁設計。

2) 颱風

臺灣地區夏秋之際有颱風入侵，現行船機大都無避颱經驗、設置，於颱風警報發佈時須停止操作，並將船機駛離暴風圈路徑範圍。

3) 地震

臺灣位處地震帶終年有各種不同規模地震，船機設計須考慮地震影響，此為本土研發工法之重要考慮。

3、現行離岸風機架設工法說明

3-1. 離岸風機架設工法之決定

一般離岸風機架設工法之規劃主要考量因素包括：

- (1)構件之工程特性與風場場址之自然環境條件。
- (2)工法可行性及施工風險，說明如下。

影響因素		影響因素說明	備註
構件外觀尺寸及風場自然環境因素	構件外觀尺寸	1. 構件外觀尺寸：決定運輸船機及起重作業半徑。 2. 構件重量及施工高度：決定起重容量及施工高度。	決定船機設備
	自然環境因素	1. 海床深度：決定船機柱樁長度。 2. 海床地質：深度分佈決定船機柱樁承載計算。 3. 颱風：決定船機駛離避颱或原地抗颱。 4. 地震：決定船機耐震設計。	
工法可行性及施工風險	工法可行性	依據風場各項自然環境條件，評估各項船機設備及工法可行性	本之決定 施工工法及成
	施工風險	1. 天候海象：天候海象海上運輸，構件高空組裝 2. 海床地質：海床地質不確定性	

3-2. 現行海上風機架設工法說明

離岸風電在國外（歐洲地區）發展多年技術已臻成熟，有其固有之設計經驗及參數模式；而風機之架設組裝，包括架設工法、船機設備，均須依據風場場址之各項環境條件，因地制宜，國外施工團隊經歷二、三十年不斷研究改進，形成現今施工方式，其施工法大致如下說明：

(1)船機設備：【運架一體，分體安裝】升降平臺船

主要係利用運架一體、自航、自升之工作平臺船，於碼頭裝載、整機運輸、運抵現場進行分體安裝。運架一體船機通常一次載運3~5組風機組件。其優點為可減少巨型船機進出碼頭次數，減少運輸成本。

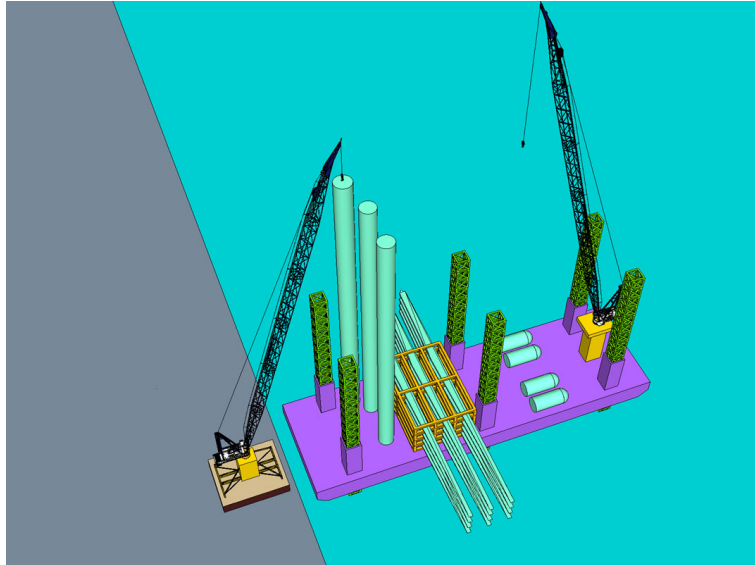
(2)應用技巧：【以大克小、居高臨下】

構件運抵現場後將船機柱樁下放並貫入海床中，後將船機頂升離開海水面，俟船機定位完成後，利用船機配置之大型起重機進行組裝。

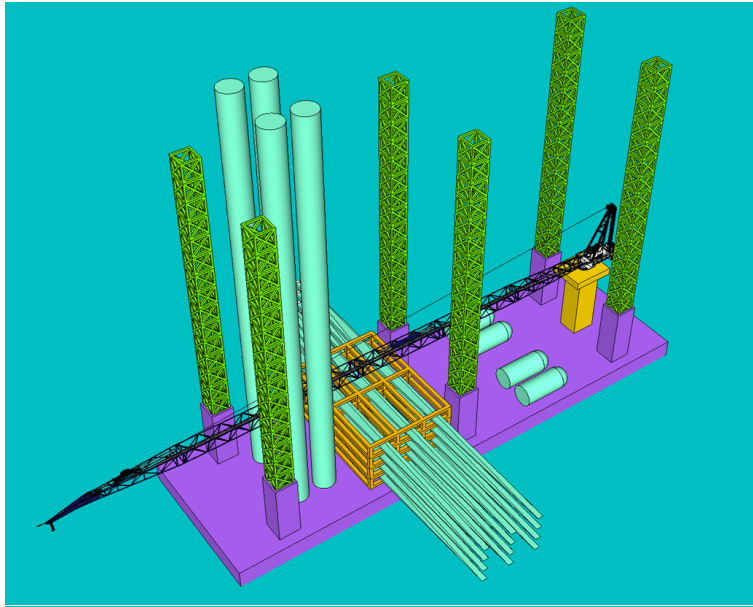
(3)現場施工：現場施工主要包含三個部分

▲碼頭裝載 ▲海上運輸 ▲現場組裝

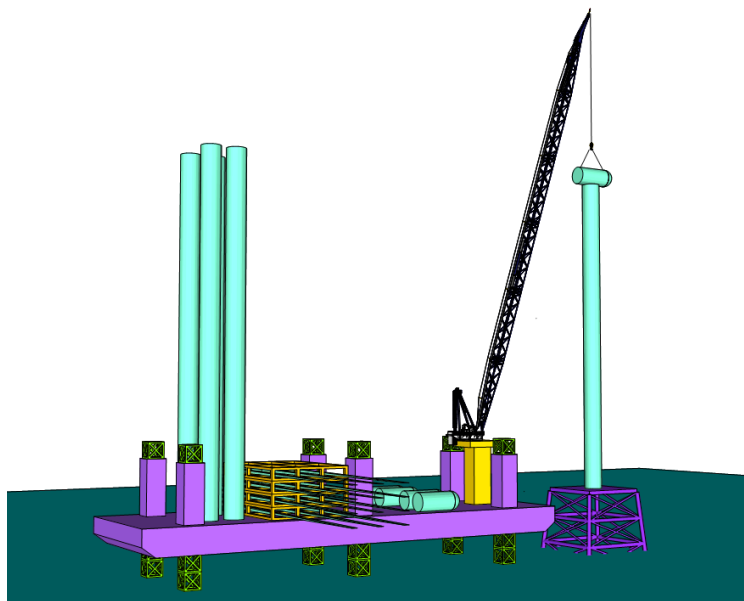
現場組裝



海上運輸



現場組裝



3-3 現行海上風機架設工法設備之限制與困境

第二(潛力場址)及第三期開發(區塊場址)風場主要係位於臺灣彰化、雲林、臺中外海之風場場域，因其海床屬於粉土質沉積軟弱地層，此沉積軟弱地層對船機柱樁之承載有重大影響，彰化、雲林、臺中外海海床地質分佈如 3-1 圖所示。

表 3-1 為針對臺灣風場自然環境因素對風機組裝船機規劃影響說明。

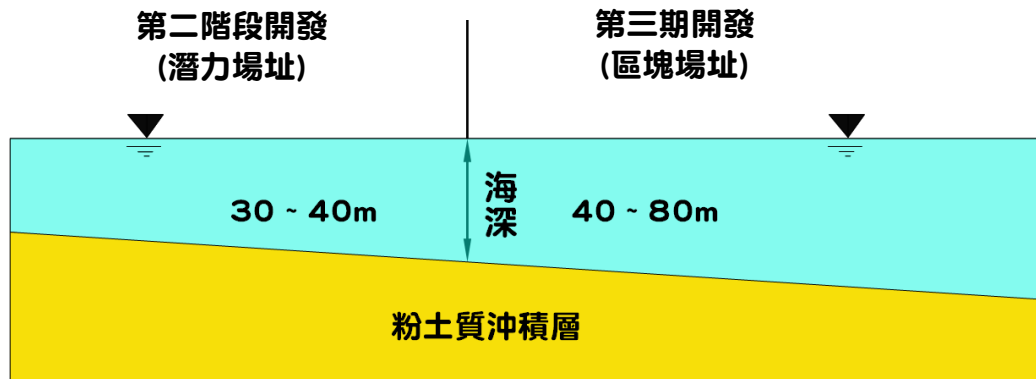


圖 3-1 彰化雲林外海海床地質及海深分佈

表 3-1 臺灣風場自然環境因素對船機規劃影響說明

環境因素	環境影響說明	設備限制與困境
海深及海床地質	- 海深分佈 30~80m：海床深度決定船機柱樁長度及斷面，進而影響船機結構之規模及穩定。 - 海床地質：風場之地質粉土質沉積層無堅硬承載層，船機承載力無法精確計算，易造成差異沉陷且起樁困難。	- 需改變船機結構設計，單一船機負載不宜過大。 - 海床深度及地質條件限制柱樁形式、尺寸及船機設備發展。
颱風	臺灣地區每年夏秋之際有颱風侵襲期間長達 5 個月，颱風來襲船機必須人機停止操作，駛離暴風圈路徑避颱。	臺灣未有大型碼頭設施可供大型船機避颱。船機須離岸避颱。
地震	海上船機頂升後重心高，地震時對船機造成不利影響，且易造成船機柱樁與周圍土壤分離或液化使柱樁承載力降低或造成差異沉陷。	既有大都數施工船機未有耐震設計，必須重新考量耐震設計。

4. 為何要發展本地風場之架設工法

4-1 離岸風機海上架設工法之類型

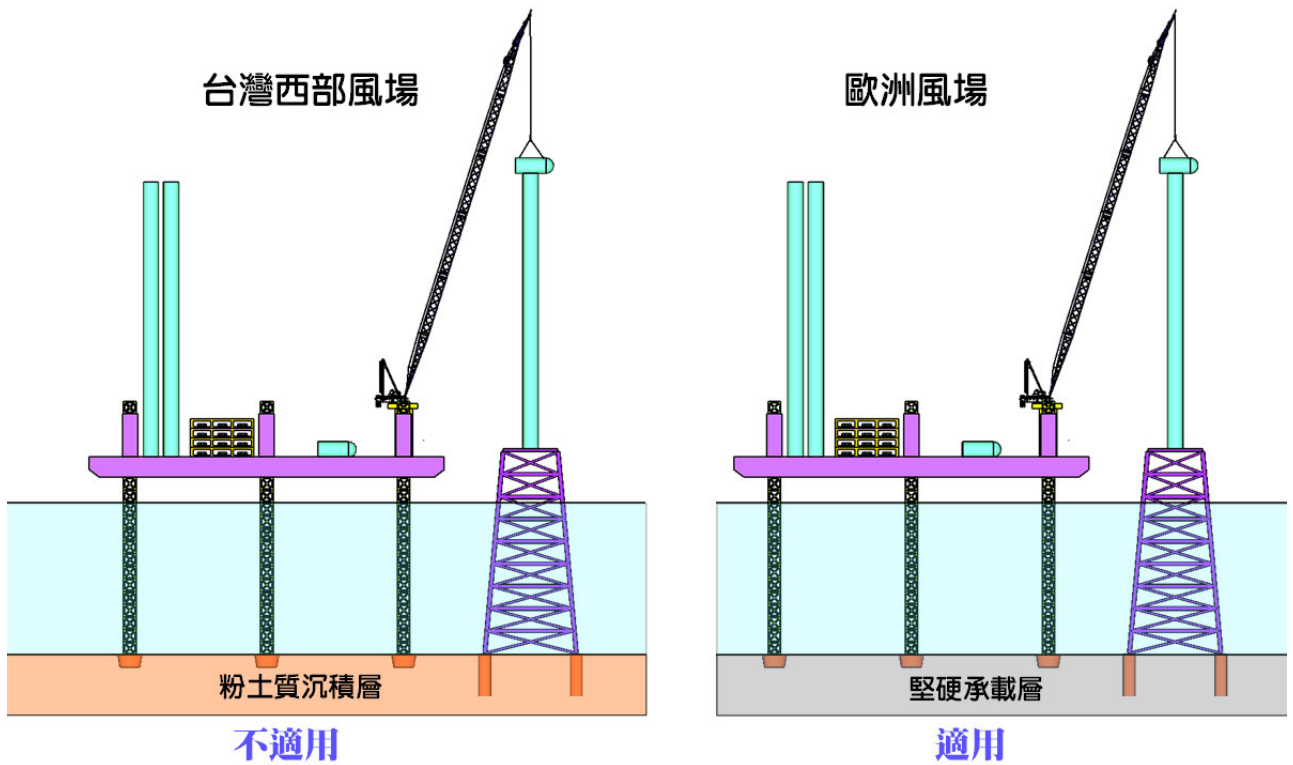
依風機架設工法及船機設備不同，海上風機之架設一般可分成三大類，各類組裝之船機設備均係依風場場址之不同而做不同規劃，說明如下：

離岸風機海上架設工法之類型

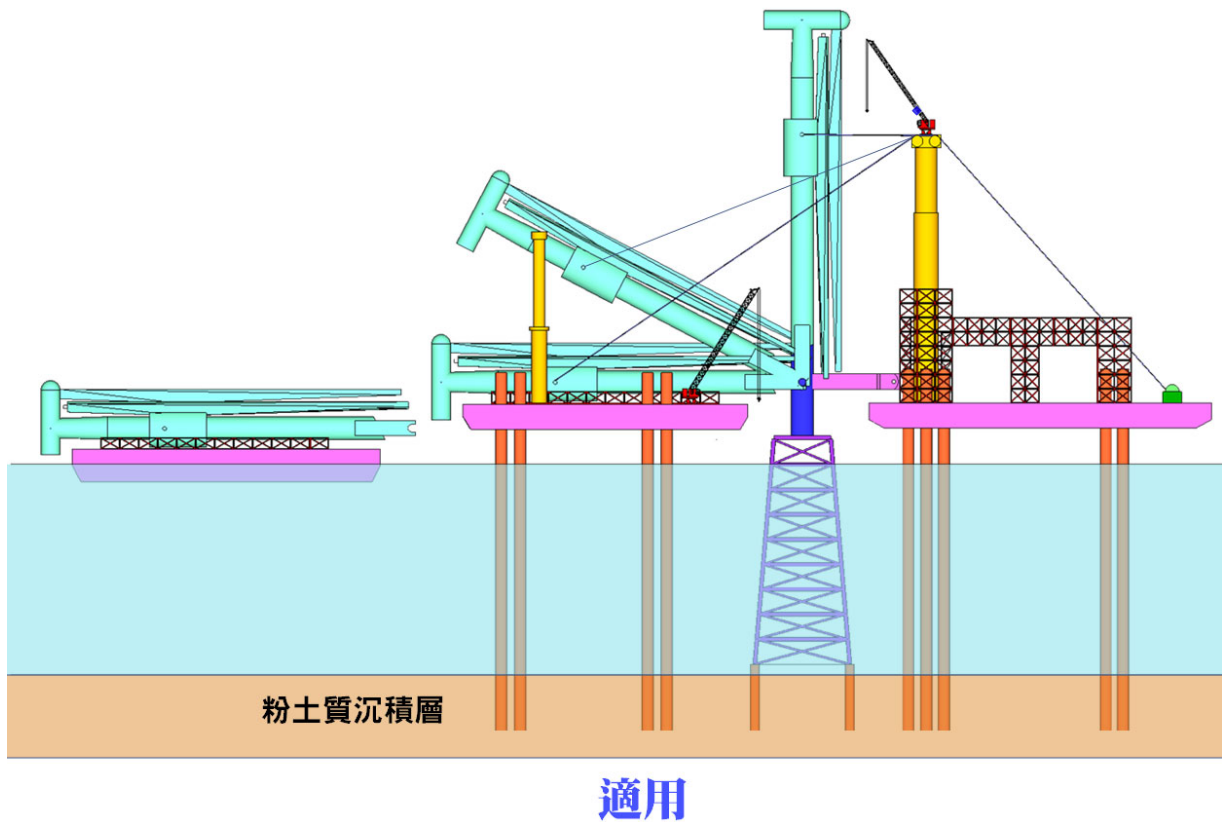
風機海上架設工法類型	組裝工法類型	主要船機設備	適用風場環境
	運架分離 分體安裝 【早期歐洲工法】	運載船機與組裝船機為分離式獨立運作。	適用船機規模較小，海床較淺且堅硬海床。
	運架一體 分體安裝 【現行國外工法】	運載船機與組裝船機為同一，每次運載三~四組風機至現場進行分體安裝。	適用於海深較深，較堅硬海床。
	運架分離 整機安裝 【本土研發工法】	運載船機與組裝船機為分離式各自獨立運作，各自發揮功能。	1. 適用各種不同海床地質。 2. 海深 60m 以內。

4-2. 風場自然環境及設備適用性

(1) 現行工法船機設備 vs 海床地質條件



(2) 本土研發工法



4-3. 風場自然環境影響說明及因應解決之道

一般船機設備之設計主要係依風場場址之各項環境條件作規劃，以下為風場自然環境對船機設備設計及因應解決之道。

環境因素	環境影響說明	因應解決之道 (本土研發工法之對策)
海床地質	海床地質影響船機柱樁承载力，包括樁身摩擦力及樁點承载力，由於本地風場地質為軟弱沉積層其點承承载力約為歐洲風場地質承载力之 1/5 左右。	船機採運架分離，即運載船機與架設船機獨力運作，使得單一船機承載減低，船機柱樁採群樁設計，降低海床地層承載不確定性。
颱風	1. 由於本土海床為軟弱沉積層，颱風瞬間易造成船機柱樁與周邊土壤分離使得摩擦阻抗降低。 2. 一般船機遇颱風警報發佈後須迅速停止操作，並駛離颱風圈避風，影響後續施工排程及進度。	船機採群樁摩擦樁設計使船機荷重分散，降低單一柱樁過大承載。 平臺、船機、各項設備皆已輕量化。 船機結構設計可抵禦強風，颱風警報發佈時只須船機停止操作而不必駛離現場。
地震	風機海上組裝時係讓船機上升離開水面以上以避免海浪衝擊，唯其重心高，對船機穩定不利，同時地震之反復橫力作用易造成船機柱樁周圍土壤液化而降低承載。	船機採運架分離，降低船機自重，轉接及桅拉平臺重心較低，架設時風機部份重量係由風機機座承受，以減少船機起重荷載重量，使施工平臺得以小型化。

4-4 現行工法之國外船機並非可全然移植至本地風場

歐洲地區離岸風電已發展一段時間，累積十分豐碩實務經驗並對全世界輸出。而臺灣地區自 2010 年開始發展離岸風電，開發之初無相關經驗、技術、人才，因此全需仰賴國外技術團隊及船機設備；考慮臺灣特有之自然環境，這些國外既有的經驗技術、船機設備是否可全然移植進入臺灣離岸風場，不無疑問。綜觀前述風場之自然環境差異，可發現國外這些船機設備移至本地風場操作有其困難。因此發展可以適用本地風場之施工工法與船機設備為本文主要目的。

4-5. 本土研發工法之施工構想及應用原理

綜合考量風場之各項環境條件因素進而研擬適合本地風場之最佳工法。本項工法所規劃船機設備及應用原理與現行離岸風機之組裝係二個完全不同概念，依工法應用原理及使用船機設備如下說明：

(1)船機設備：採運架分離及輕量化設備，進行整機運輸，整機安裝。

船機設備主要包括三種船機設備準備：

① 運載船機：

將整組風機由陸域碼頭運往風場場址。

② 轉接平臺船：

風機機組運至場址後即置入轉接平臺船，轉接平臺船機主要功能為風機組件置入樞軸後進行各項組裝準備工作。

③ 桅拉平臺船：

為一具升降塔柱之桅拉平臺船，轉接平臺船上之風機組件準備完成時，桅拉平臺船之升降塔柱升起進行風機組件斜拉旋轉。

(2)應用原理：使用借力使力，以小博大之施工用技巧進行整機組裝。

① 構件斜拉仰起：

整組風機構件運至現地並置入轉接平臺船，再利用桅拉平臺船之升降塔柱進行斜拉仰起至垂直狀。

② 葉片組裝：

葉片係於陸域碼頭預組裝好其中第一組葉片，第二及第三組葉片固定於塔筒之左右二側。於現場整組風機斜拉仰起垂直後，第二及第三組葉片採易位旋轉，進行組裝。

5. 本土研發工法可行性探究

本文所研擬之施工法主要係依據國內風場自然環境條件及結合國內各項工程已臻成熟之施工工藝技巧發展出適合本地風場之施工法：

5-1 工法應用技巧及船機設備

- (1)應用技巧:**借力使力，以小博大**。本工法之各項起重不採用傳統的起重設備而係利用工程界常用之轉動斜拉工藝，發揮借力使力，以小博大之各項技巧。
- (2)船機設備:**運架分離，整機安裝**。為配合運架分離，船機設備採輕量化設計，即構件機組之海上運輸與風機組裝之船機採分離設計以降低單一船機荷重，船機輕量化運輸船成本低、靈活度高，可多組船機搭配使功率效益極大化。
- (3)構件組裝：
 - ① 風機塔筒：**【斜拉旋轉】**。風機塔筒及機艙輪轂於陸域碼頭裝載後海運至工址置入轉接平臺船上，進行各項準備工作後利用桅拉平臺船之斜拉塔柱作斜拉旋轉，呈垂直狀。
 - ② 風機葉片：**【易位旋轉】**。葉片係於陸域碼頭組裝好其中一組，第二及第三組葉片固定於塔筒之左右兩側，於現場整組風機斜拉仰起垂直後，第二及第三組葉片以易位旋轉分別組裝。

5-2 船機設備樁承載計算與耐震評估

(1) 船機柱樁承載力計算

風機海上施工其船機荷重係透過柱樁傳遞至海床地層，而一般地層承載力貢獻包括 1. 樁頭點承力，2. 樁身摩擦阻抗。臺灣西部風場場址地層大部份為粉土質沉積層，樁底無堅硬承載層。因此點承載計算忽略不計，全部由樁身摩擦力阻抗，更偏安全保守。柱樁承載力 $Q_u = \alpha A_s f_s$ (註 1) 其中

Q_u =單一柱樁承載力(T/支)

A_s =樁身摩擦表面積(m^2)

f_s =樁身表皮摩擦阻抗(T/ m^2)

α =折減因數

(2) 船機耐震評估

耐震設計是將基面以上之結構系統受地震力作用透過設計手段使各構件總應力小於容許值。風機構件於海上組裝，施工船機設備於頂升離開海平面之船機之上，船機、風機及施工荷重透過柱樁傳遞至海床地層，此對抵抗地震橫力極為不利，因此船機設計時須尤考慮船機之耐震評估。

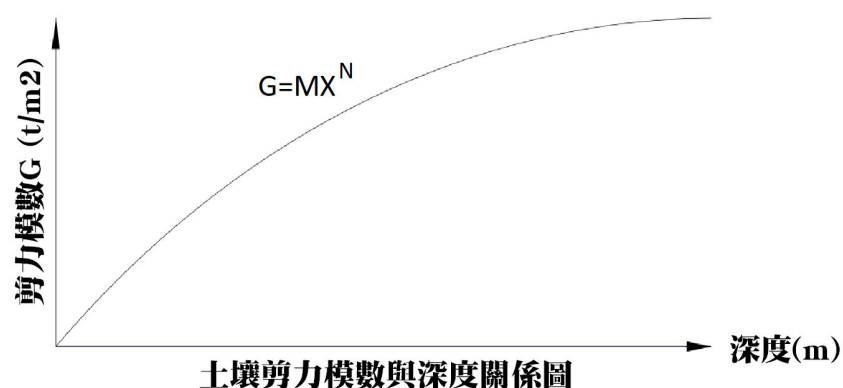
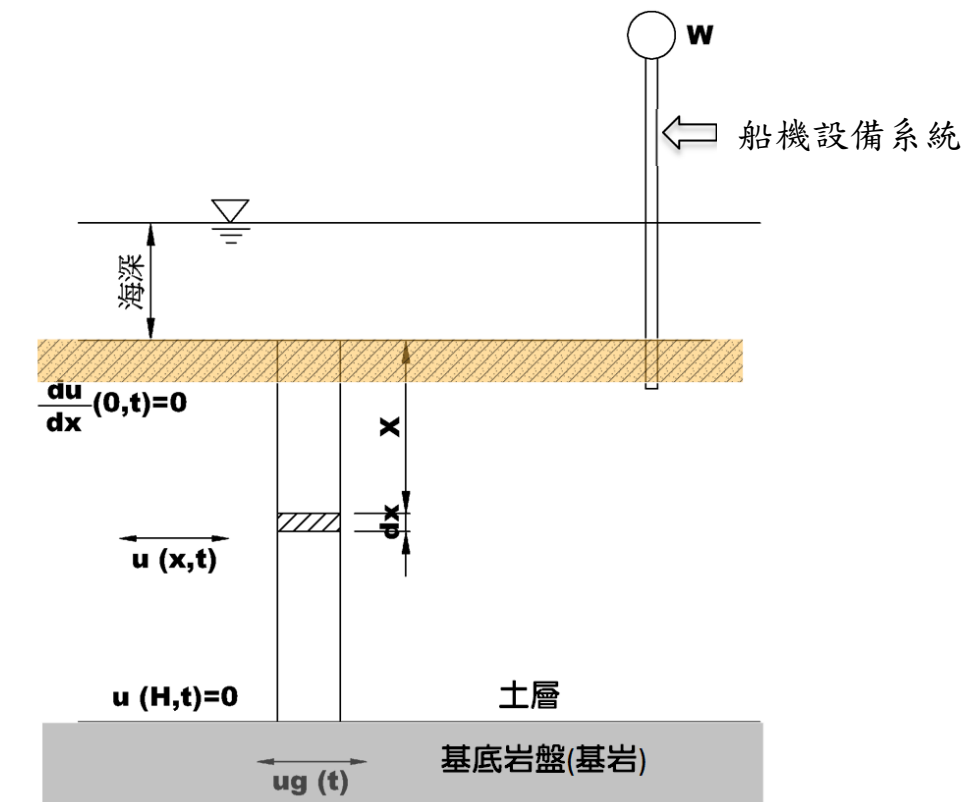
一般進行構造物耐震評估主要探討內容大致包含三部份。

① 耐震反應譜：

一般船機受地震時之地震反應可由風機基礎設計時之耐震反應譜，亦可收錄工址海床之相關地震歷時紀錄再製作成設計反應譜，唯目前國內尚未有海床之相關地震記錄。

② 土層特性：

臺灣西部風場之地層主要為分佈寬廣深厚之粉土質沉積層，依前述資料顯示其厚度可達 600m 以上，為進一步瞭解土層分佈厚度對地震分析之影響，則需進一步探討土層之振態週期(顯著週期)。土層振態週期是土壤基本物理特性，其與土層分佈厚度，堅硬程度及地震規模有關。筆者曾利用波動理論推導非均質土層之顯著週期(Predominant period)(註 2)亦即土層受地震力作用時，土層二個振態所對應之第一個週期。下圖為土層受地震力作用時之分析模式：



土體受地震時之運動方程式

$$\rho(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + C(x) \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left[G(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right] = -\rho(x) \frac{\partial^2 u_g}{\partial t^2}$$

其中 $\rho(x)$ ：土壤密度， $C(x)$ ：土壤阻尼， $G(x)$ ：土壤剪力模數

利用分離變數法得其變係數之二階微分方程，得

$$\ddot{Y}(x) + \frac{N}{x} \dot{Y}(t) + \frac{\lambda^2}{M} \frac{1}{X^N} Y(x) = 0$$

此方程式為一有條件之貝索微分方程式(Conditional Bessel Differential Equation)，當 $M \neq 0$, $0 < N < 1$ 時，方程式具有貝索函數解，其精確解(Closed form solution)可表為下式

$$Y(x) = C_1 X^S J_\nu(mx^r) + C_2 X^S J_{-\nu}(mx^r)$$

其中 J_ν 及 $J_{-\nu}$ 為 ν 階之第一類貝索函數。當 $\nu \neq$ 整數時 J_ν 及 $J_{-\nu}$ 為上式之二個線性獨立解，代入邊界條件得其有意義解分別為

$$\left. \begin{array}{l} J_\nu(mH^r) = 0 \\ J_{-\nu}(mH^r) = 0 \end{array} \right\} \text{-----} \langle A \rangle$$

式(A)在數學上為一特徵方程式，而在物理意義上，此方程式為一頻率方程式，亦即土層之振態頻率方程式，各組第一個振態相對應之週期即為土層顯著週期(predominant period)，可表為如下所示。

$$T1 = \frac{2\pi H^r}{\gamma \beta \nu_1 \sqrt{M/\rho}} \quad (\text{高頻振態項, 短週期})$$

$$T1 = \frac{2\pi H^r}{\gamma \beta_{-\nu_1} \sqrt{M/\rho}} \quad (\text{低頻振態項, 長週期})$$

其中

$T1$ ：土層顯著週期

$\beta \nu_1$ ：為 $J_\nu(mH^r)=0$ 之第一個根

$\beta_{-\nu_1}$ ：為 $J_{-\nu}(mH^r)=0$ 之第一個根

M ：與土壤剪力模數有關之常數，剪力模數越大則 M 越大

ρ ：土層質量密度(t/m^3)

γ ：與土層組成有關之參與係數

一般而言只要工址基岩處地震規模夠大，其頻率內涵分佈夠廣，土層二個基本振態週期勢必出現，此即為一般加速度反應譜上呈現之二個尖峰週期。土層尖峰週期分佈主要是瞭解土層受地震力作用時，其尖峰週期之可能延伸範圍以作為反應譜制定之參考。

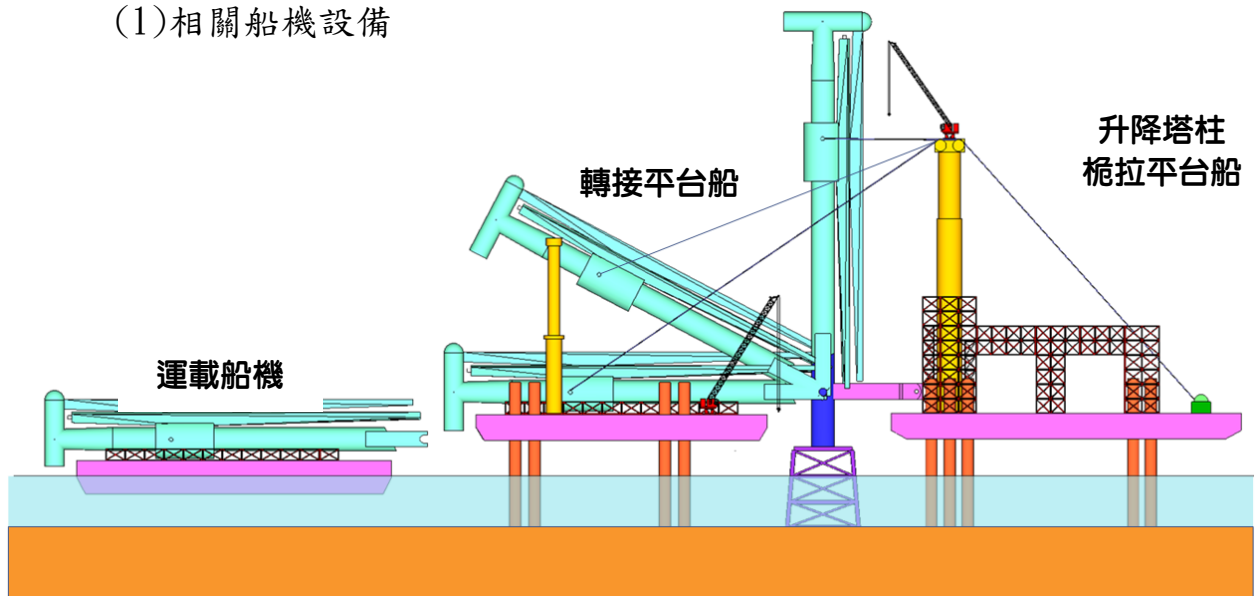
③結構物特性：

船機結構須依施工設備及工作載重，建置船機之結構系統，並計算船機結構系統之基本週期，船機柱樁與船身結構之韌性接合。既有運架一體的船機其重心高、整體重量、單點支承柱樁均不利無預警的地震來襲。有關本土研發工法的設備規劃設計將於第二部分詳細呈現。

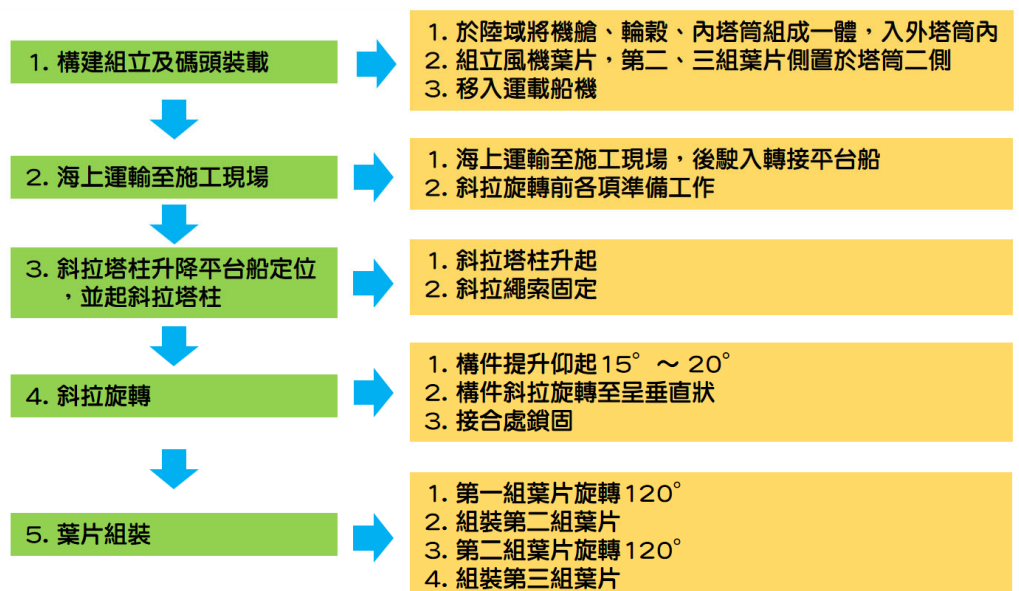
由於臺灣風場工址之自然環境條件與歐洲風場條件截然不同，相關施工船機設備，無論是承載力計算與耐震設計均與國外既有船機設備不同，因此國外施工船機並非可全然移植至本地風場使用。

5-3 本土研發工法相關船機設備及施工步驟流程

(1)相關船機設備

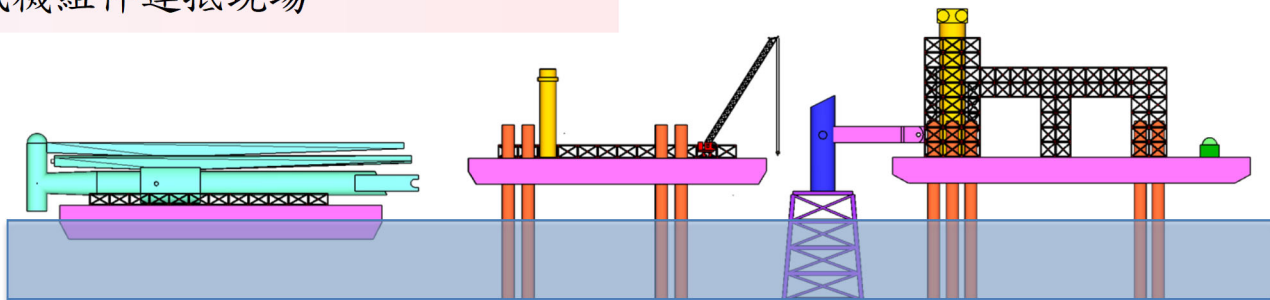


(2)施工流

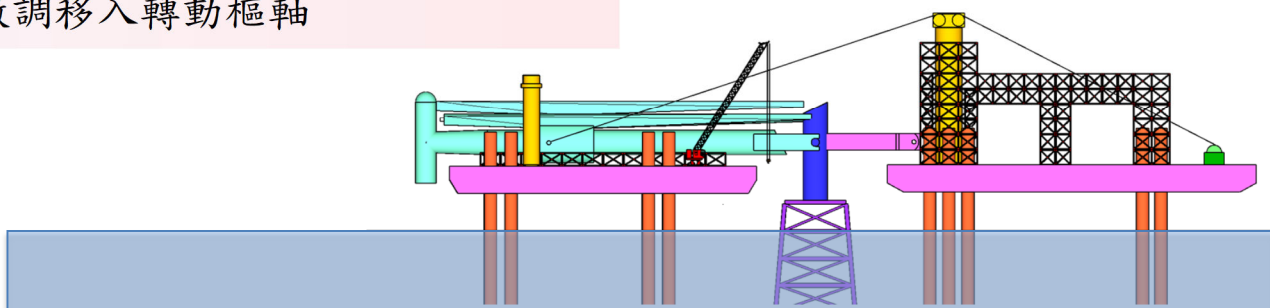


① 風機斜拉旋轉步驟說明

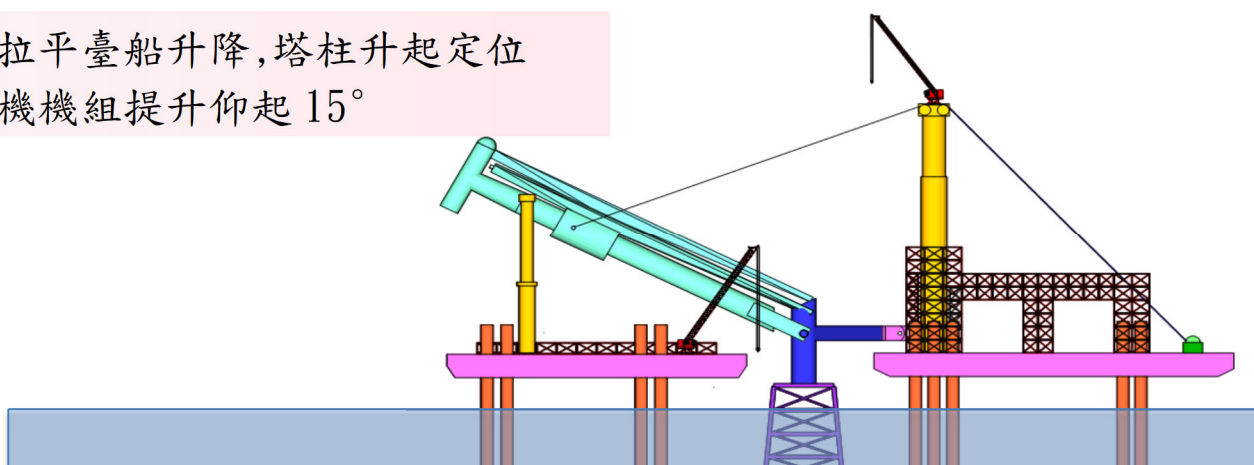
1 風機組件運抵現場



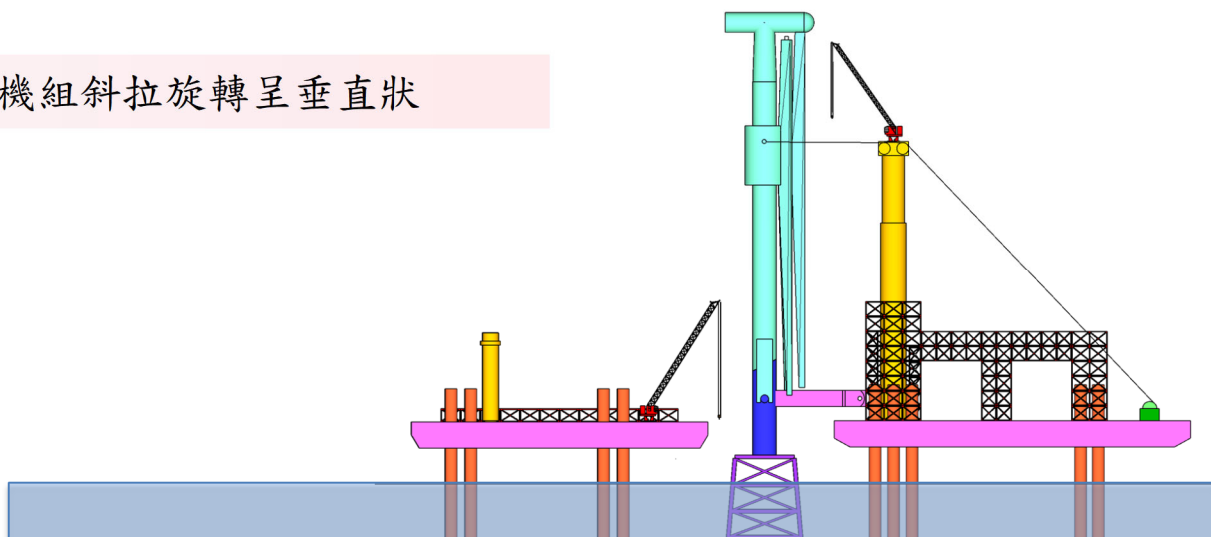
2 風機機組置入轉接平臺船 微調移入轉動樞軸



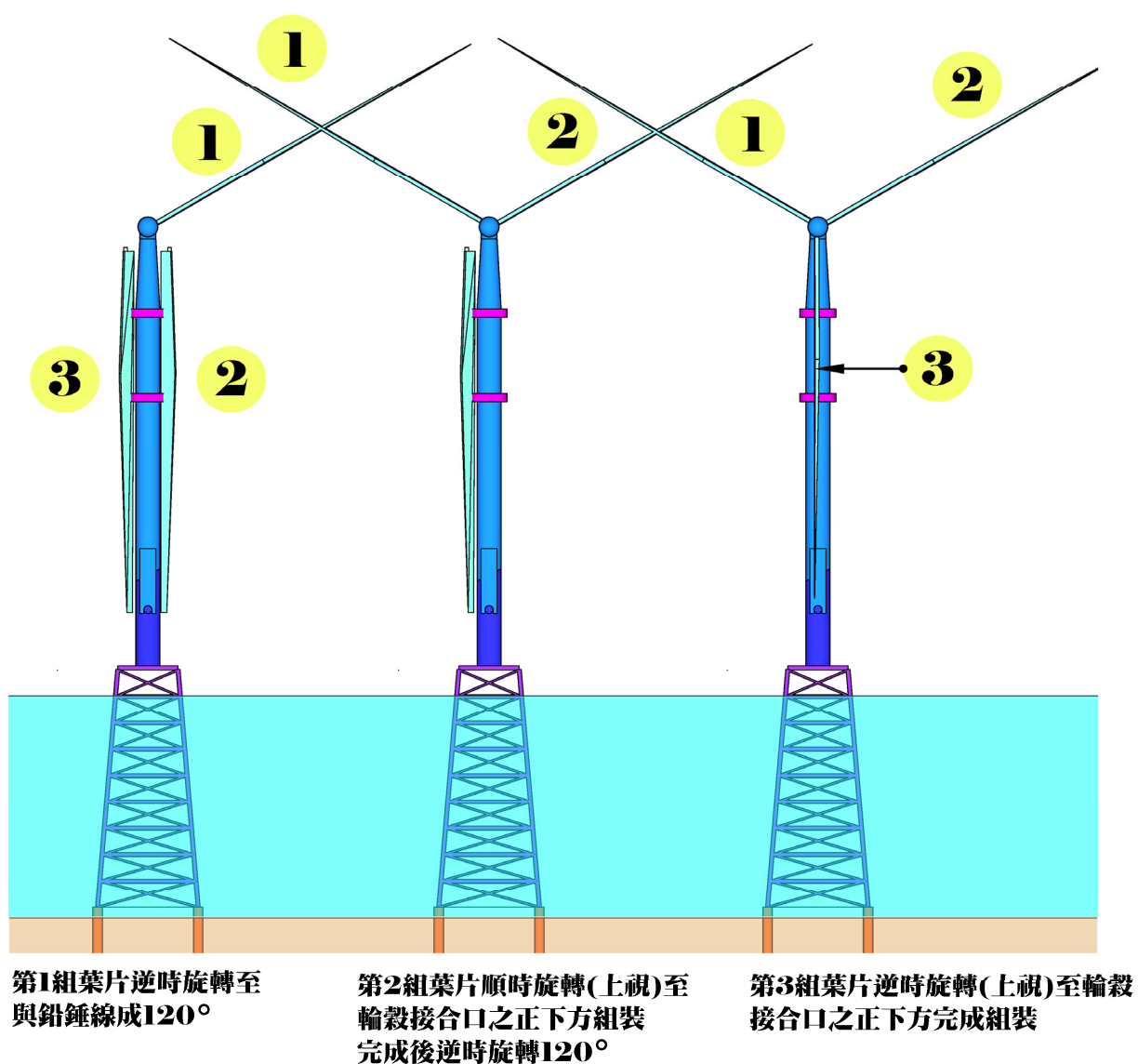
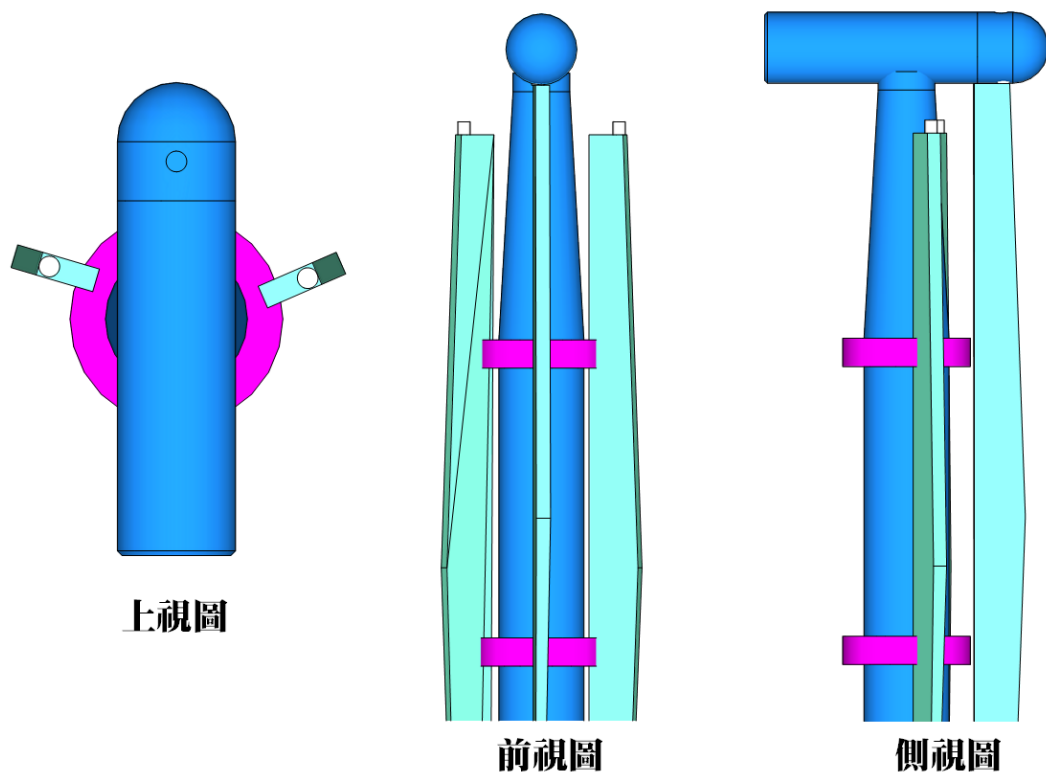
3 桅拉平臺船升降, 塔柱升起定位 風機機組提升仰起 15°



4 風機機組斜拉旋轉呈垂直狀



② 葉片易位旋轉施工步驟說明



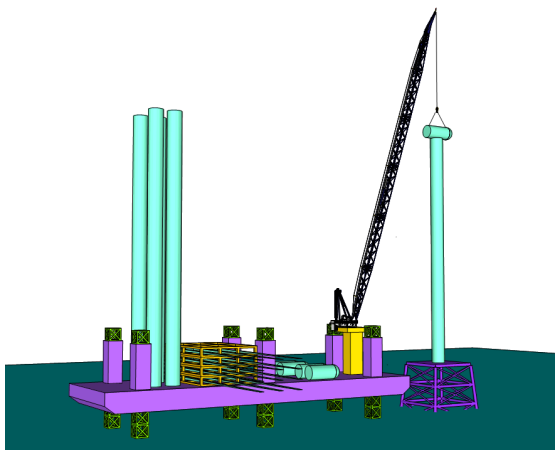
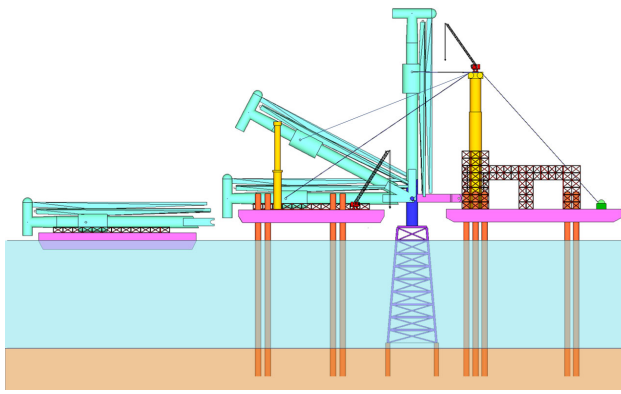
第1組葉片逆時旋轉至與鉛錘線成120°

第2組葉片順時旋轉(上視)至輪穀接合口之正下方組裝完成後逆時旋轉120°

第3組葉片逆時旋轉(上視)至輪穀接合口之正下方完成組裝

6. 現行工法與本土研發工法比較說明

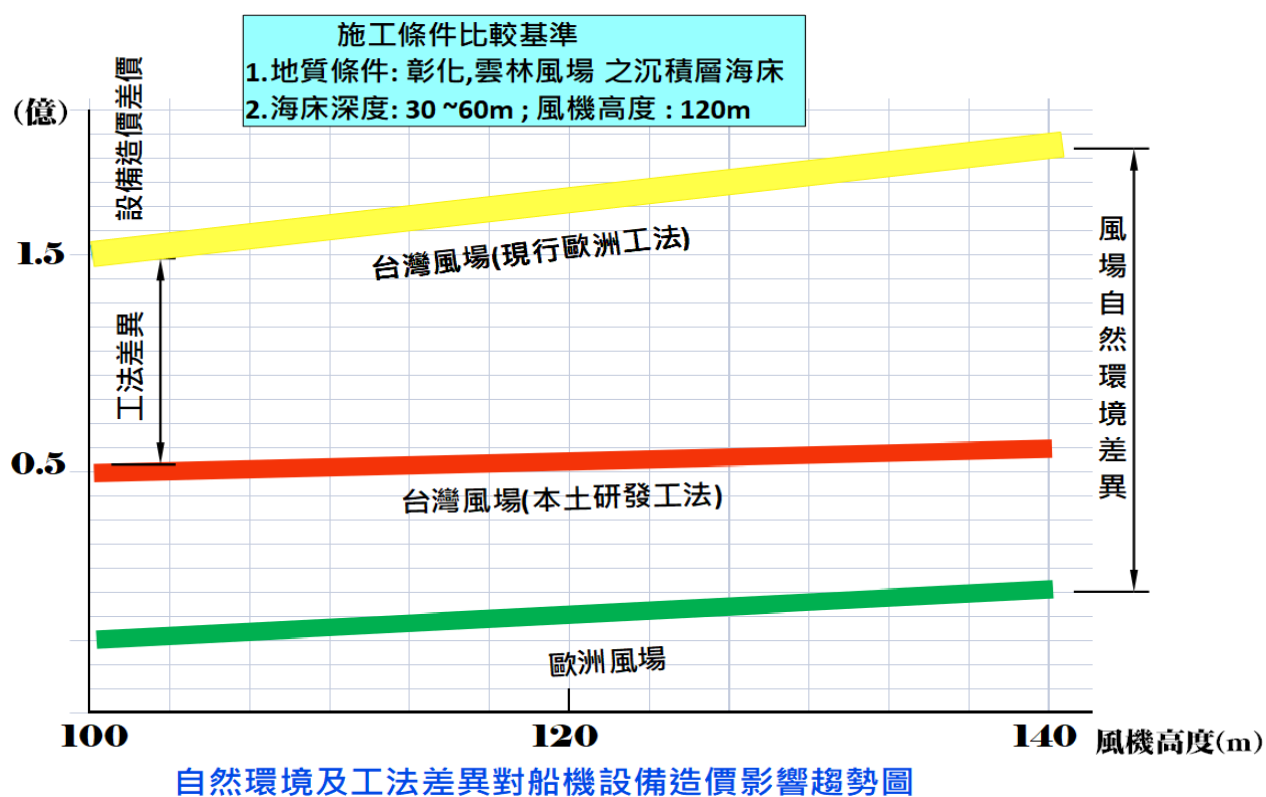
6-1 工法概念及應用技巧

	現行國外施工法	本土研發工法
工法示意		
工法概念	運架一體，整機運輸，分體安裝	運架分離，整機運輸，整機安裝
應用技巧	以大克小，居高臨下	借力使力，以小博大

6-2. 工法優劣比較說明

	現行國外施工法	本土研發工法
經濟性	彰化雲林外海海床為沉積層之地質，現行船機無法通用本地海床，須另造新船成本大幅增加。	本工法採運架分離，整機安裝使用斜拉旋轉工法，以借力使力以小搏大之施工工藝技巧，使得船機船機設計更為輕巧，造價較低且建造期短，所使用船機、平臺都屬輕量化，容易取得及維修。
施工安全性	施工採運架一體，構件塔筒採直立置放運輸，構件直立重心不穩，遇颱風須停機操作駛離颱風區增加風險性。海床沉積層柱樁承載不易掌握，船機易發產生差異沉陷及起樁困難。	採運架分離，各項設備獨立運作各司其職，設備輕量化操作方便靈活，採整機施工減少人員高空作業。
維修方便性	由於高度限制，葉片機艙等維修勢須採同等高度船機作業，增加維修成本，船機動員不具靈活性。	本工法之桅拉平臺船可兼作未來風機營運之各項維修船機，不須另打造維修船機，降低營運維修成本。
發展未來性	未來風機將朝大型化發展，採用現行施工法，未來勢須尋求更大之起重船機，施工費用更加龐大，施工風險更不易控制。	本項研發工法採斜拉旋轉及葉片之易位旋轉之施工技巧，對風機高度較無限制且操作靈活，適合發展大型風機組裝。

6-3. 工法差異對船機設備成本之影響



6-4 本土研發工法相關作業時程

		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
1	本土研發工法 規劃及說明									
2	實體操作規劃 及初步設計									
3	實體模型基地建置									
4	模型操作及試驗									
5	施工船機製造 (配合風機設計)									
6	認證									
8	離岸風機海上施工									

7、本土研發工法主要意義及貢獻

7-1 結論

本文所研擬之施工法主要係依據臺灣西部風場之自然環境條件，包括軟弱海床地層、颱風、地震等因素，應用各種已臻成熟之施工工藝技巧，研擬有別於現行之施工法，總其結論：

(1) 順應自然環境－客觀事實無法改變

自然環境條件包括海床地質條件、地震及夏秋之際颱風侵襲，這些都屬不可改變之自然因素，此自然因素為臺灣風場所特有其與國外截然不同，因此現行國外船機設備勢必無法全然移植至本地風場。而本項研發工法正可以解決風場軟弱海床地質之困境。

(2) 工法規劃原則－順應環境突破創新

綜合風場各項自然環境條件，考量施工安全性及船機延續性，工法及船機設備規劃兼顧下列原則：

① 風機組件運輸及架設採運架分離、整機組裝。

② 整組風機採斜拉旋轉呈垂直狀，第二、三組葉片採易位旋轉方式安裝。

(3) 工法經濟性－兼顧成本與施工安全

本項本土研發工法船機設備採運架分離，各項船機依功能獨立運作各司其職，工法應用原理採【借力使力，以小博大】之施工技巧，使得船機設計輕巧，造價較低且建造期短。船機設備配置如圖 7-1 所示。

此外，風機機組採整機斜柱旋轉安裝及葉片採易位旋轉方式，大量減少操作人員高空作業之施工風險。

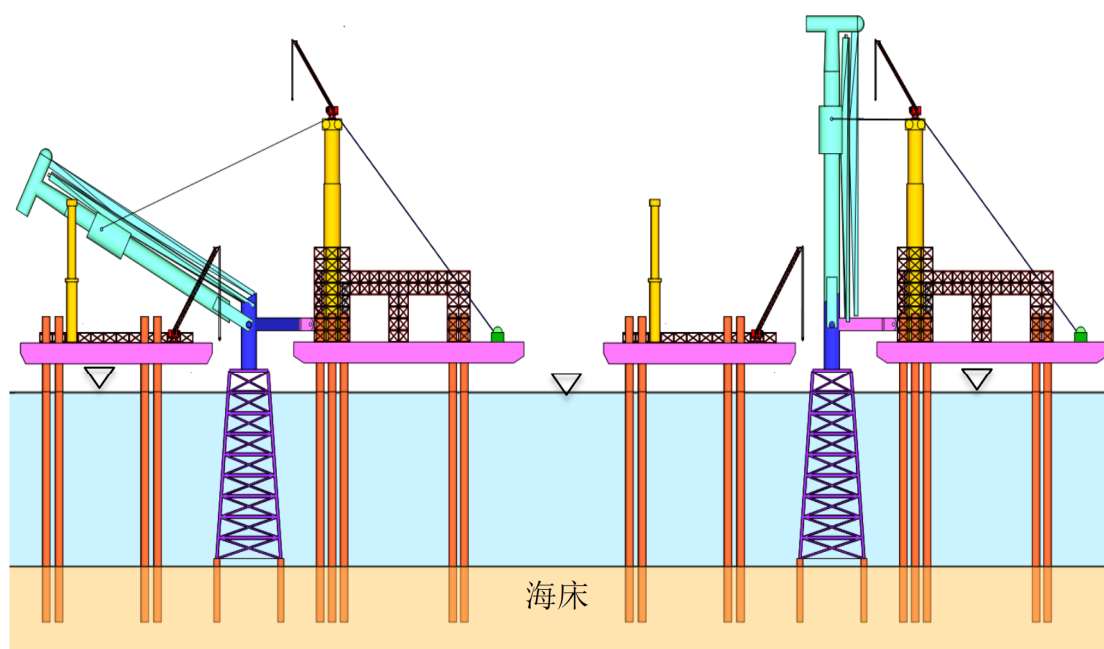


圖7-1 轉接平臺船及桅拉平臺

(4)展望未來-突破創新 開創未來

- ① 船機設備輕量及普及化：船機設備輕量化，國內造船廠可自行建造不需仰賴國外。新船機製造工期短、成本低，可紓減 2026 ～ 2028 年海上吊裝期船機不足壓力。
- ② 發展大型風機可行性：本項本土研發工法相關船機設備對風機外觀尺寸規模不具敏感性，有利發展大型風機之組裝架設。
- ③ 維修本土性：由於臺灣地區夏秋之際為常態性颱風入侵，致使風機損害風險提高，本項工法之升降塔柱桅拉平臺船機可作維修船機，維持作業之一貫性，不必另尋維修船隊。
- ④ 本土化產業鏈建立：本項工法施工各項船機、組裝設備均可由本土廠商自行設計建置，可快速發展本地產業鏈。

7-2 建議

離岸風電在臺灣尚屬新興產業，風電建置初期各項規劃、設計、施工及後續營運維修，均需仰賴國外技術團隊；臺灣西部有優良之風場場域，而政府亦大力推動離岸風電，據載未來 20 年將建置二千組離岸風機。本文所揭示之全新風機組裝施工法，工法規劃同時兼顧風場場域之自然環境條件，未來風機大型化之趨勢以及後續維修之方便性，其可謂“純本土化”且“與時俱進”之全新施工法。

此外，本文所揭示工法之概念及技術應用有別於現行國外船機設備及操作方式，因此未來勢將涉及許多設計及施工法規之規範，此將有賴政府相關單位籌設一“產、官、學”之協調機制平臺，以發揮風電產業之規劃、設計、施工、營運、維修之整合協調，並藉此一平臺落實“研發本土性、產業在地化”之政策目標。

參考文獻：

註 1：經濟部工業局

註 2：內政部，建築技術規則基礎構造篇

註 3：許金城，臺灣都會區土層動態週期之研究與現行耐震規範之檢討，結構工程第五卷第三期 1990 年 9 月。