



工程模組化作業之應用考量

中鼎工程股份有限公司管線設計部副總工程師 / 魏嘉成

關鍵字：模組化、模組規格、重量管理、海象資料、模組運輸分析、模組防護措施

摘要

自20世紀80年代以來，在工地現場勞動力短缺、人力成本過高、環保要求苛刻等不利因素影響下，模組化建造（Modularization）利用不同於傳統建造（Stick-built）的作業模式，讓業主逐漸採用，因而在設計和建造技術方面迅速發展。模組化建造與傳統建造方式不同的是：需將廠區事先規劃成模組，在工地以外的地方預製後，運送至工地安裝，所以需根據陸地或海洋運輸的限制考量模組的大小和重量。當模組需利用船舶運輸時，模組結構的強度，必需能夠抵抗來自波浪加速度所引起的外力。另外為確保模組的運輸安全與安裝順利，對於模組重量管理與重心控制也需要加以管理與控制。

本文將對工程採用模組化作業時，有關模組規格、模組規劃、模組重量管理、模組結構分析、模組管線接合及模組的防護措施等概念進行說明，協助設計人員了解工程模組化作業的要點，進而掌握工程採用模組化作業的考量。

一、前言

模組化建造是將結構、設備、管線、控制系統及電力等物件，依設計要求將其集中佈置成模組，然後在工地以外的模組預製廠製作組裝，完成後運輸至工地安裝的建造模式。採用模組化建造具有時程短、施工效率高、品質可控性好、施工安全性高、成本低等優點，當工地位置受到地形、環境或勞動力等因素的限制時，考量專案執行的進度與成本，採用模組化建造已成為傳統建造以外的另外一種選擇。

由於各式工廠的特性不同，採用模組化建造時，模組的數量、尺寸和重量皆有相當的差異，加上技術能力與機具規格的提升，模組已朝向大型化、複雜化的趨勢發展，相對地，運輸的挑戰亦隨著模組尺寸和重量的增加而提升。所以如何掌握模組的規劃、設計、預製、運輸及安裝等專業技術，往往成為專案應用模組化建造時成功的關鍵。以下將說明工程應用模組化作業時，有別於傳統建造方式的考量。



二、模組化作業的發展

模組化建造方式於二次世界大戰時，由美國人首先將其應用於軍艦製造。從20世紀60年代開始，模組化技術在造船業發達的美國、蘇聯、韓國和日本等國得到了迅速發展。到了70年代，開始應用於海上油氣鑽井平台工程。之後隨著設計方式的演進和現代化大型裝備的出現，模組化技術陸續應用於油田地面工程、天然氣處理廠、煉油石化工廠的建造，模組化技術的應用由海洋發展到陸地。

模組的型式可分為下列幾種：

- 製程模組 (PAU, Pre-Assembled Unit)：包含結構、設備、管線、電力與控制系統、防火披覆及保溫等物件。
- 管架模組 (PAR, Pre-Assembled Rack)：包含結構、管線、電源線和儀表電纜托盤、防火披覆及保溫等物件。
- 供應商模組 (VAU, Vendor Assembled Unit)：供應商將其提供之設備固定於框架，並將與該設備相關之管線、電力與控制系統於工廠內組裝完成後提供。

三、模組化評估

比起傳統建造，工程採用模組化建造時有下列的優勢：

- 模組在模組預製廠製作時可並行施工，減少現場施工申請相關許可的時間，縮短專案時程。
- 在廠房內作業，可提高生產率，減少現場勞動力需求和成本。
- 可降低氣候或環境影響建造作業的風險。

- 可減少高空作業、危險作業的項目，提供作業人員更安全的工作環境。
- 在可控的環境中作業，可確保施工品質。

在美國德州大學奧斯汀分校營建工業學院 (CII, Construction Industry Institute) 的研究中發現：應用模組化建造的驅動力包含各種因素，如有較低的成本，可降低時程風險，可提高施工品質與安全性，最小化營運衝擊及法規要求等等。成功的模組化專案往往在FEED階段或更早之前的Pre-FEED階段即確定模組化的策略，因為儘早決定有助於業主與專案團隊了解前進的目標和方法。所以工程是否採用模組化的評估，應從專案的概念階段開始。

在CII研究文獻 (RS-283) [1] 提供一個評估流程圖，可作為應用模組化的分析參考 (如圖1)。從技術的可行性、專案時程的比較、工地限制、模組預製廠的評估、模組化的必要性、模組化的範圍、模組的大小、模組化的成本估算等等，透過有系統的評估作業，工程採用模組化的可行性及模組化工作量和現場工作量的比例，可在專案的FEED階段獲得確認。

四、模組規劃

採用模組化策略，需要綜合考慮設計、製造、運輸、專案管理等一系列的影響因素，其中每一個因素都關係到整個專案的成敗。模組化作業在專案的Pre-FEED或FEED階段，即應展開相關的規劃。

在模組的規劃中，首先要決定模組規格

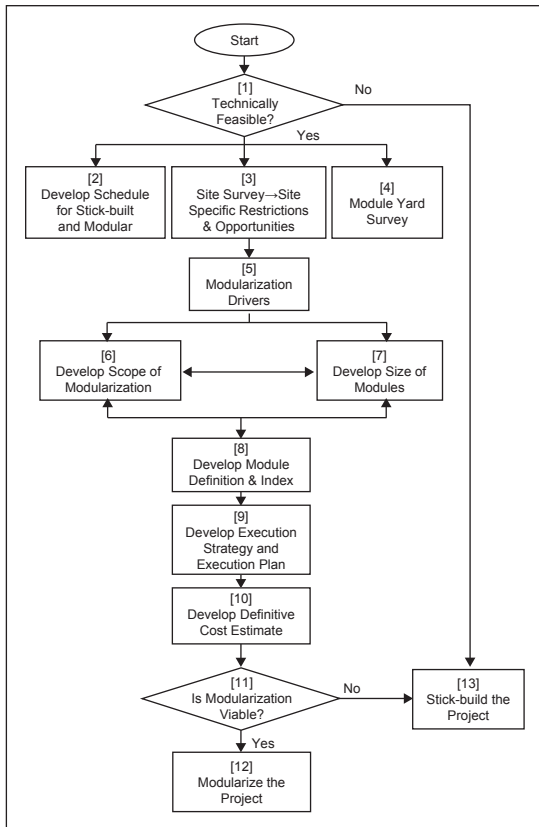


圖 1 模組化作業評估流程

(Module Envelope)。模組規格是指模組在製作、運輸和安裝過程中，因外部條件的限制，模組允許的長、寬、高、重量和重心位置等資訊。

(一) 模組預製廠

模組化建造是將現場工作由工地轉移模組預製廠進行，包括鋼構噴砂，油漆與組裝、設備安裝、管線預製與安裝等等。所以在決定模組規格時，需考量模組預製廠的廠房大小，組裝空間與機具規格的相關限制。

(二) 模組運輸路線

大多數的模組化專案，模組運輸的方式不是單一的，而是公路、鐵路或水路等多種方式聯運的形式，所以需考慮因運輸工具不同而產生的限制。需注意的是有時候在多種方式聯運的情況下，運輸限制並不是某一段或某一種運輸工具決定的，它很可能是由多種運輸工具的限制疊加而成。例如，採用公路與鐵路聯運的運輸方式時，鐵路運輸貨物的寬、高和重心高度都比公路運輸小，但長度卻比公路運輸大，所以，運輸限制的寬、高和重心高度由鐵路運輸決定，而長度由公路運輸決定。

(三) 碼頭卸載設施(MOF, Marine Offloading Facilities)

模組若採用水路運輸時，碼頭卸載設施是模組運輸環節的重要工程設施之一，碼頭為了能夠卸載大型的模組，其相關投資可高達數億美元。因此，碼頭卸載設施允許的長、寬、高與重量將影響模組規格。

模組規格確定後，接下來的模組化作業，是以最大程度地減少現場工作為原則，多方考慮製程、模組規格、專案成本與工期安排等因素，發展模組化廠區佈置圖(Plot Plan)，規劃模組大小與重量。如採用模組化作業的專案，需將具有關連性的製程規劃在同一個模組，形成集中、相對緊湊而獨立的單元，使其與周邊介面可清晰劃分，但又能透過公用設施互相連接。另外，模組預製廠大多位在人工成本具有競爭優勢的區域，模組常需藉由重件船(HTV, Heavy



Transport Vessel) 運輸，所以模組運輸時需考量的海象條件，會因為運輸路線的差異而造成結構設計的考量不同，進而影響模組的大小。

五、模組重量管理

模組化建造與傳統建造主要的差異之一是：模組化必須考慮陸運或海運條件，並且根據運輸條件進行模組設計。為成功的將其運輸並順利安裝到最終位置，採用模組化作業之專案需要進行模組重量管理。

ISO 19901-5[2]規定了重量和重心管控的相關要求，其中因應專案特性對重量和重心的敏感性不同，而制定不同等級的重量管理報告要求。

(一) Class A

- 所有模組物件的重量和重心均需有完整的可追溯性。
- 使用系統資料庫方式，彙整模組設計階段，供應商，製造商及實際量測等模組物件的重量與重心資訊。
- 透過實際量測，驗證每個模組物件的重量和重心。
- 從模組製作到模組竣工，過程中持續更新每個模組物件的重量與重心。

(二) Class B

- 根據模組的複雜性，評估使用系統資料庫或是表格方式記錄模組物件的重量和重心資訊。

- 透過實際量測，驗證每個模組物件的重量和重心。
- 從模組製作到模組竣工，過程中持續更新每個模組物件的重量與重心。

(三) Class C

- 使用表格記錄模組物件的重量和重心資訊。
- 透過實際量測，驗證每個模組項目的重量和重心。
- 提供包含設備重量及相關材料重量的圖面，做為模組物件重量和重心的依據。
- 模組製造過程中無需更新每個模組物件的重量和重心。

模組尺寸初步規劃後，即應開始進行模組重量管理。但因設計尚未完成，可應用預估的方式估計模組重量。一般模組的重量預估有三種方式：設備重量推估法；結構體積推估法與結構樓地板面積推估法，應用時需視專案資料的完整度選擇合適的模組重量預估方式。模組預估重量加上各個物件的裕度重量，及因應模組運輸的臨時支撐桿件的保留重量等，即構成模組的不可超過重量 (NTE, Not-To-Exceed)，如圖2。有關模組重量的相關數據需彙整為模組重量管理報告，為控制模組重量變化的基礎，亦是模組吊裝和運輸的主要設計文件之一。模組化作業專案應每月發行模組重量管理報告，管控模組重量和重心的變動或修訂的資訊。

六、海象資料

船舶在海上航行時，海水受到風力及海流的影響，產生的波浪加速度會對船舶產生

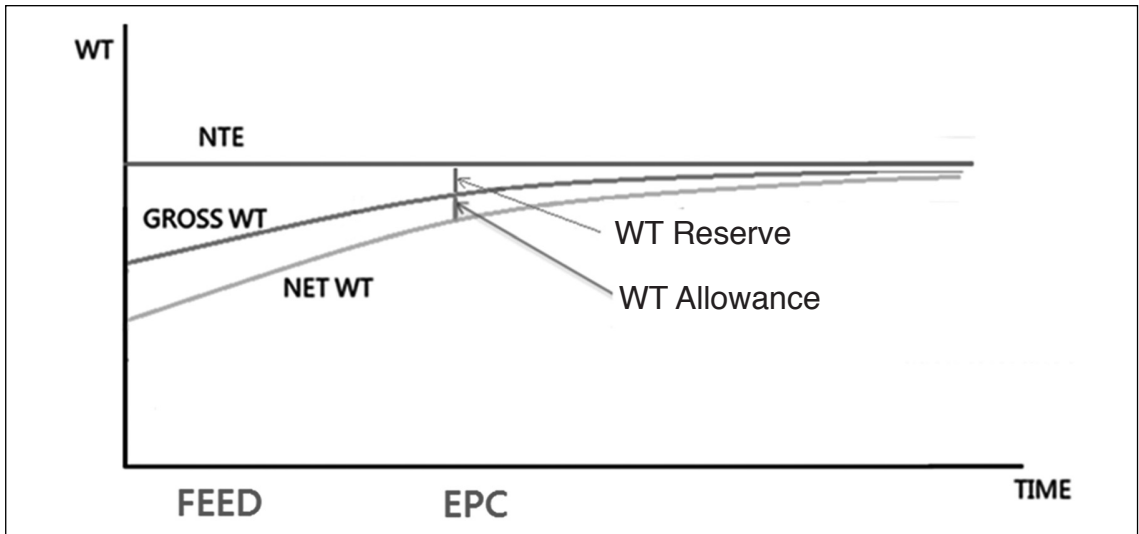


圖 2 模組重量圖

作用力。風力依蒲福風級 (Beaufort Scale) 基準劃分為12級，每一級可大概得知相應的壓力，如蒲福風級6級為強風等級，風速10.8~13.8 m/s，約為12.1 kg/m²。海水受到風力作用換算成相應的壓力後，會對船舶產生六個方向的運動 (如圖3)。

- 縱移 (Surge)：船舶沿縱軸 (X 軸)，前後移動之運動現象。
- 橫移 (Sway)：船舶沿橫軸 (Y 軸)，左右移動之運動現象。

- 起伏 (Heave)：船舶沿垂直軸 (Z 軸)，上下移動之運動現象。
- 橫搖 (Roll)：船舶繞縱軸 (X 軸)，向左右舷方向擺動之運動現象。
- 縱搖 (Pitch)：船舶繞橫軸 (Y 軸)，前升後降或前降後升之運動現象。
- 平擺 (Yaw)：船舶繞垂直軸 (Z 軸)，艏艉向左右迴擺之運動現象。

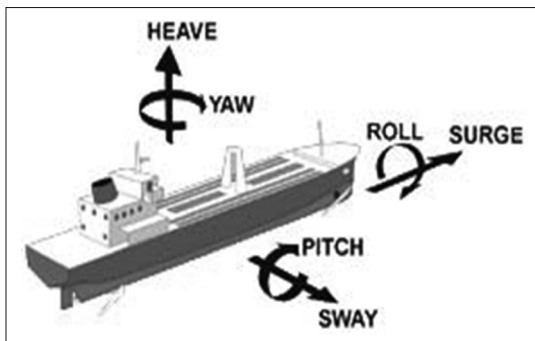


圖 3 船舶受力運動方向示意圖

其中對船體結構較有威脅的外力，依序是橫搖、起伏、縱搖。通常需取得航行區間波浪的波高，波長及頻率，才能計算外力對船體結構的影響。在設計初始階段若無相似的船舶型式與航線海況資料可參考時，可參照DNV GL Standard[3]各個方向外力對船舶運動之建議值，包括橫搖及縱搖之最大旋轉角度，及起伏最大的重力加速度百分比等資訊，進行模組結構強度分析。表1為DNVGL根據歐洲北海狀況，在波浪週期為10秒的條件下，將海況概略分為五類，依船舶型式



表 1 DNV GL 不同航行條件船舶運動建議值

Nature of Transportation	Case	LOA (m)	B ^[1] (m)	L/B ^[1]	Block Coeff	Full cycle period (secs)	Single amplitude		Heave
							Roll	Pitch	
Unrestricted (these values to be used unless any of the following apply)	1	> 140	and > 30	n/a	< 0.9	10	20°	10°	0.2 g
	2	> 76	and > 23	n/a	any	10	20°	12.5°	0.2 g
	3	≤ 76	or ≤ 23	≥ 2.5	< 0.9	10	30°	15°	0.2 g
	4				≥ 0.9		25°		
	5	≤ 76	or ≤ 23	< 2.5	< 0.9	10	30°	30°	0.2 g
	6				≥ 0.9		25°	25°	
Weather restricted operations in non-benign areas for a duration <24 hours (see Section 7.9.2 d. For L/B < 1.4 use unrestricted case.	7	any		≥ 2.5	any	10	10°	5°	0.1 g
	8	any		< 2.5, ≥ 1.4	any	10	10°	10°	0.1 g
Weather restricted operations in benign areas ^[2] (see Section 7.9.2.e). For L/B < 1.4 use unrestricted case.	9	any		≥ 2.5	any	10	5°	2.5°	0.1 g
	10	any		< 2.5, ≥ 1.4	any	10	5°	5°	0.1 g
Inland and sheltered water transportations (see Section 7.9.2.f). For L/B < 1.4 use unrestricted case.	11	any		≥ 1.4	any	Static	Equivalent to 0.1 g in both directions		0.0
Independent leg jack-ups, ocean tow on own hull. For L/B ≥ 1.4 use unrestricted Cases 1 to 6	12	n/a	> 23	< 1.4	n/a	10	20°	20°	0.0
Independent leg jack-ups, 24-hour or location move. For L/B ≥ 1.4 use Case 7 or 8 as applicable	13	n/a	> 23	< 1.4	n/a	10	10°	10°	0.0
Mat-type jack-ups, ocean tow on own hull. For L/B ≥ 2.5 the pitch angle may be reduced to 8°	14	n/a	> 23	< 1.4	n/a	13	16°	16°	0.0
Mat-type jack-ups, 24-hour or location move.	15	n/a	> 23	n/a	n/a	13	8°	8°	0.0

提供船舶運動的參考值。第一類為船舶航行在非限制氣候條件下 (Weather unrestricted operations) 海域，包括考慮各種嚴苛環境，是最常用且最保守的設定。第二類為航程在一天以內且風力不超過蒲福風級5級，風速在 10 m/s內之情況。第三類為船舶航行在特定低緯度氣候良好之海域，其相對的運動旋轉角及加速度較小。第四類為船舶港內避風的情況。第五類為海上鑽油平台之情況。設計人員可根據船型尺寸 (LOA, B, L/B) 及船舶在水面下的方塊係數 (Block Coefficient) 等資訊，對應船舶受波浪影響之主要三個運動數值：橫搖、縱搖及起伏，來計算模組結構在各個位置的加速度及受力狀況。這些數值

在選定船舶型式後，需配合模組在船舶上的配艙計畫及選擇航線的海況資料再次確認。

七、模組運輸分析

(一) 結構分析

模組在陸地運輸一般是透過自走式模組化運輸車 (SPMT, Self Propelled Module Transporter)，如圖4。在運輸前模組的重量與重心需搭配SPMT的組合計算分析，必要時需設計臨時構架與臨時支撐梁，以確保模組運輸時的穩定度與安全性。結構因應運輸需求而增加的臨時支撐，在模組安裝後需予以



圖 4 自走式模組化運輸車

拆除，通常表面會塗裝亮色系之油漆，協助現場人員識別需拆除之構件。

另外模組透過重件船進行海上運輸時，結構設計尚需考慮一定的剛性，以因應運輸時波浪引起的加速度造成的外力影響。有別於傳統結構分析所使用的STADD Pro或SAP 2000等軟體，在進行模組結構分析，一般需使用SACS軟體，模擬結構在浮動船體的狀態下，分析結構桿件的尺寸（如圖5）。若海上運輸航程較長時，結構可能因波浪反覆作動而產生循環應力，則需另外再進行結構疲勞

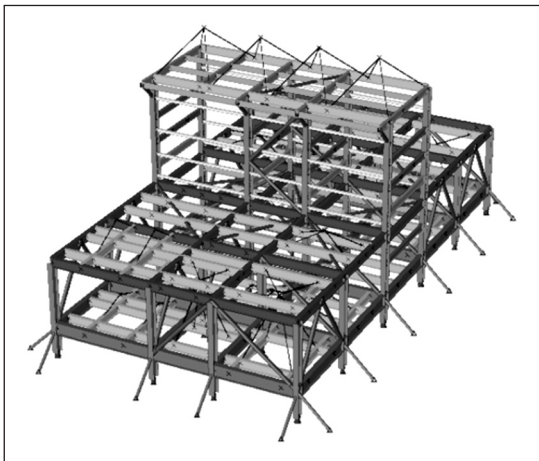


圖 5 SACS 結構模型

分析，以評估模組在海運後對結構的損傷。

（二）船體結構分析

模組在海運時需考量格床支承（Grillage），使模組重量能均佈於船體結構上；需設計海上繫固（Sea Fastening）將模組與船體結構固定。所以將模組與船體結構建模後，可透過海洋工程分析軟體MOSES或Sesam，對航行於不同波浪條件下的船體結構，進行船舶運動與船體結構的分析，計算波浪作用於船舶的水動力負荷，再將此負荷轉換至船體結構模型，分析計算出船體結構的應力及變形量，確認船體結構的強度及船舶的適航性。

（三）管線應力分析

模組化作業的專案，重要管線除原有之應力分析外，尚需考慮海上運輸時加速度產生之外力對管線強度的影響。例如與設備連接的管線，需確認設備管嘴的允許負荷在運輸時是否符合設備廠商的規定。若已超過設備廠商的規定，在模組運輸時可增加臨時支撐降低管線負荷，或將管線與設備管嘴之連接法蘭分離。另外管線利用結構固定時，結構在海上運輸所產生的變形量需納入管線應力分析模型內，以免因結構變形的影響而造成管線的損壞。

八、管線接合方式

模組與模組之間的管線宜選用非銲接的連接方式，如法蘭連接，以減少現場銲接工作量。但在煉油與化工裝置中存在大量高



溫、高壓管的管線，減少法蘭連接可減少洩漏的風險，可增加製程安全運轉的機會。在製程不允許採用法蘭連接的管線，應預留銲接及非破壞檢驗所需的空間。進入或離開模組的管線應集中佈置，並儘可能將管線連接點規劃於模組內部，並利用模組內部平台作業，減少工地施工搭架的費用。若模組內的管線數量不多時，管線連接點可考慮規劃至設備法蘭位置。

模組間的管線使用銲接方式連接時，有一道銲口和兩道銲口兩種方式（如圖6）。採用一道銲口方式連接時，需要更高的製造和現場安裝精度，更寬的管線間距和更小的調節裕量，在製作和現場安裝难度大，一般應用於PAR與PAR之間的連接。而PAU與PAR或PAU與PAU之連接，一般採用兩道銲口的方式。當模組間的管線連接採用兩道銲口的方式時，管段（Piping Spool）的設計應為二維的平面型式，或規劃為三維空間的型式，讓

管段在現場安裝時能有調整的彈性。

九、模組防護措施

模組在海上運輸時間需視模組預製廠與現場的距離而定，有時長達一個月以上。所以模組內的物件需考量如何避免波浪加速度產生的外力造成變形或破壞，及航行期間海水產生的腐蝕影響。

（一）變形或破壞防護措施

管線在分析海上運輸期間外力造成的影響後，視需要將管線與設備管嘴分離或將物件拆卸，此時應製作控制表並註記在相關的圖件，如管線立體圖中，以利模組運送至工地後的復裝作業。而未進行海運分析的管線或未拆卸運送的儀表，則需考慮設置臨時支撐加以固定，以免因外力作用造成損壞。（如圖7）

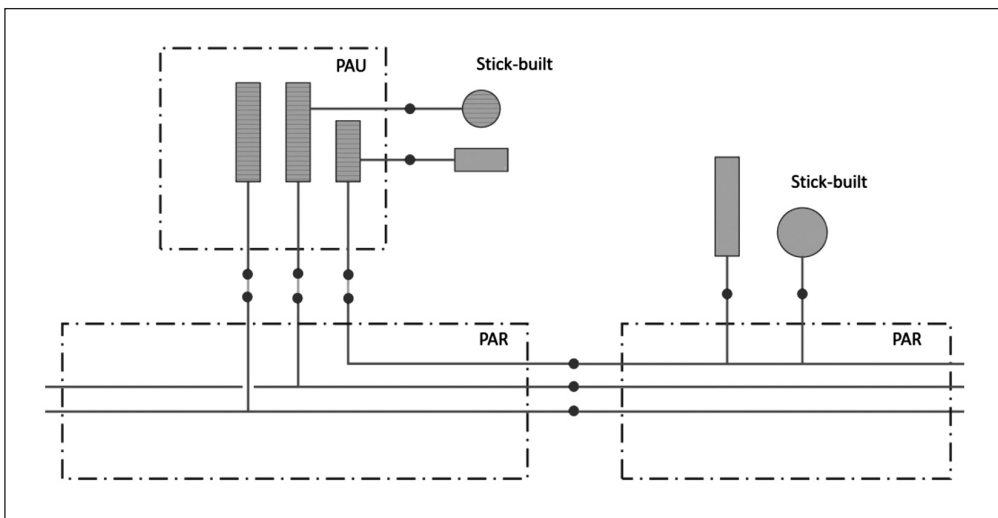


圖 6 模組間管線接合方式



(二) 腐蝕防護措施

模組內的物件表面一般會利用油漆隔絕外界物質，所以模組腐蝕防護措施主要在防止異物或海水進入物件的內部空間。主要的作法如下：

- 密閉的設備與管線系統內部可充填氮氣，防止水氣進入內部空間。
- 管線若有開孔端，可在內部放置除濕劑吸附水氣，並以塑膠蓋或膠合板覆蓋，防止異物進入內部空間。
- 對於閥門或法蘭接合之間的縫隙，可噴塗合適的腐蝕抑制劑或包覆防水材料，防止水氣進入或腐蝕。
- 電纜托盤，接線盒及面板以帆布包覆，以防止水分積聚後灰塵堆積而產生腐蝕。

- 模組運輸時儀表若未拆卸，應以塑膠套包覆，以防止水分積聚後產生腐蝕。

十、結論

由於經濟、氣候及環境的影響，部份國家或地區的建廠工程，在成本、時程與品質的考量下，應用模組化建造已是專案執行的選項之一。模組化作業主要在減少現場工作量，這種建造方式可以降低專案執行風險，減少環境制約因素，達到縮短專案工期、提高施工品質的目的，所以越來越多的業主或工程公司會選擇以模組化建造的方式完成工程。但是模組化建造在規劃、設計、採購、製造、運輸及安裝各個環節，皆有不同於以往傳統建造的考量。展望未來，工程公司需

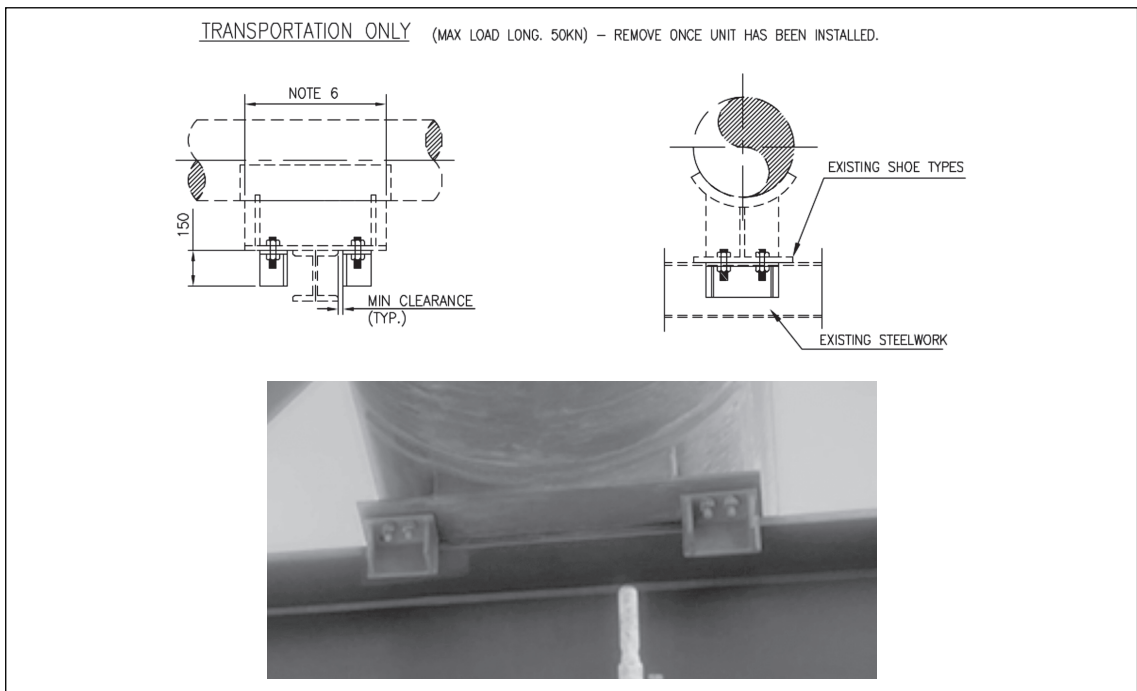


圖 7 管線臨時支撐



要在專案執行的各個環節進行優化和創新，不斷地精進模組化作業的技術，才能在這波施工方式變革的趨勢中，開創未來業務成長的契機。

參考文獻

1. Construction Industry Institute, Industrial Modularization: How to Optimize; How to Maximize, Research Summary 283-1, Dec. 2012
2. International Standard, Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures, Part 5: Weight control during engineering and construction, ISO 19901-5, Feb. 2016
3. DNV GL Standard, Marine operations and marine warranty, DNVGL-ST- N001, Jun. 2016