



淺談模組工法之結構設計

中鼎工程股份有限公司土建部助理總工程師 / 于景華

關鍵字：模組工法、結構設計、陸運分析、海運分析、吊裝分析

摘要

本篇針對模組結構的設計概念，除考慮現場操作、風力、地震力的狀態外，更需符合從模組預製廠至現場安裝的運輸要求，此過程包括模組出廠裝船（Load out）、海運航程、卸載（Offloading）、陸運至工地安裝，其中載重及環境條件複雜多變，直接影響現場、陸運、海運或吊裝之結構分析設計。其運輸規劃需配合重量管控規定，以控制重心位置及重量限制。結構設計理論亦需配合實務作業的習慣和可行性，除滿足傳統建造的基本要求外，在相關的預製、陸運、海運及吊裝方面亦有不少值得探討的地方，在此做一介紹。

一、前言

結構設計不外乎使構造物符合強度及服務性需求為前提，模組工法亦不例外，但如何將成品從模組預製廠移動至工地，拜自走式模組化運輸車（Self-Propelled Modular Transporter, SPMT）的重件運輸能力之賜，重達數千噸的製程模組（PAU）也可在精確

的設計下達成。許多原來安排在地面上的設備及管線也轉移至模組結構上，為使現場工作盡可能移至模組預製廠完成。不只運輸連同安裝及操作所需考慮的問題都有別於傳統建造，在設計方面需考慮各種狀態下之結構行為，其分析方法即取決於模組運輸的方式。考慮從模組預製廠至工地，所經過的陸運、海運或吊裝的過程及之間複雜的界面。對於採用模組工法的專案，這是設計者必須面對的課題，從前端規劃經細部設計至建造及運輸其資訊都息息相關。所以在兼顧品質、時程及成本的要求下，結構設計更應以嚴謹的態度面對。

二、模組結構設計特性

從結構外觀上可看出模組的構材尺寸較大、斜撐較多且連續、底層構架完整且主梁深度大，因要考慮不同的載重及環境狀態，其狀態分為工地安裝前包括：在模組預製廠秤重、Load out、海運航程、Offloading及陸運至工地；及工地安裝後的狀態包括：現場施工、操作運轉、地震、風力作用及其它危

害發生之情況。

模組鋼構常用圓管做柱及斜撐，其採用的鋼構設計規範必須符合構件類型，如以國際規範AISC 360做非圓管構件及接頭的設計，而圓管則採用API RP2A。又因圓管無強弱軸之差別，各方向性質一致，可使模組空間配置效果好，且海運力量變化大，對於柱及斜撐之壓力桿件，比其它形狀的斷面俱有更良好的抗壓能力，是合適的構材選項。其圓管斜撐接圓柱的接頭，須按規範檢核穿孔剪力。另H形梁接圓柱，需在梁柱交接處銲連接的鋼板，或是圓管垂直斜撐接到H形梁，需在梁腹板處補加勁板（如圖1）。

模組構件之間的連接可在模組廠採用全面銲接，銲接接合可提高結構靜不定度，但須注意產生的扭矩對支承大梁的影響。另構件銲接組裝後再以油漆塗裝。

轉動設備設在模組上則需進行振動分析，以檢核設備在工作轉速範圍內循環載荷對結構動力之影響，檢查速度及位移是否超

過容許值。為避免共振，模組整體結構及支承振動設備的主梁都要個別檢核其自然頻率，須避開可能產生共振的轉速範圍。其改善方式以修改結構配置、增補斜撐、增加結構勁度及重量等。

因模組運輸所增加的鋼構尺寸及臨時支撐數量不少，應研究如何有效減少鋼構量，例如管架模組（PAR）第一層通道空間可考慮在運輸時先移除，也就是將第一層柱從模組拆成散裝物件先在工地安裝，再以吊裝方式安裝模組。以下為拆分第一層柱之優缺點：

1. 優點

模組重心可降低，可減少運輸產生的慣性力，對於減少鋼構材料重量及運輸體積都很有幫助，且不需增補陸運支承大梁。

2. 缺點

模組運至現場後，仍需再用吊車或頂升機械才能安裝，第一層構件的安裝皆在現場施作，現場工作量增加。

（一）模組在碼頭裝卸的方式

在碼頭裝卸模組的方式可採用吊裝（LOLO）或滾裝（RORO），其模組吊裝有重量限制，視重件船所配備之吊車能力，而RORO是藉由SPMT載運模組上下船，此需經過碼頭和船之間的臨時橋板，此橋板可由H型鋼及鋼板並排銲接而成，以簡支梁結構檢核承載強度，考慮SPMT在梁上同時通過的輪軸數和輪壓。有些重件船尾部可開啟平放做為連接碼頭的臨時橋板，方便RORO作業。對這兩種裝卸方式所設計出的模組是不同的

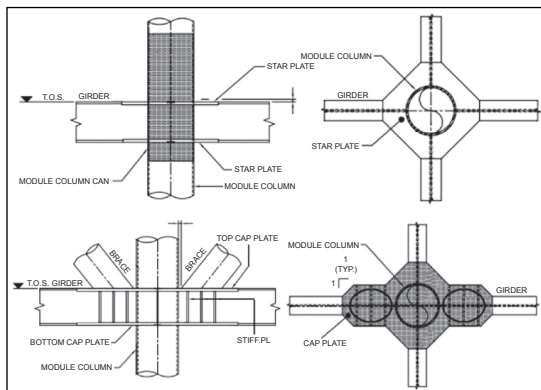


圖 1 圓柱與大梁之接頭



結構系統，RORO的結構由底部大梁支承，而LOLO的則須再做整體的吊裝分析。所以在模組採用何種裝卸方式要先確定，以免結構系統不符需求。RORO多數是從船尾部裝卸並配合壓艙水的調節，使模組在船上移動時都能維持船的穩定平衡。SPMT將模組放置在甲板上特製的格床支承（Grillage）上，並開始進行海上繫固（Sea fastening）的安裝銲接。

（二）模組重量管控

模組重量直接關連到成本及運輸的可行性，為預估模組完成的重量，在設計初期即開始模組重量管控，為預估模組完成重量，各工種需提供含有適當裕度的重量。配合緊湊的設計時程，結構設計以主構架為優先，次要構件等變化較大且初期尚未直接建入分析模型，需列入重量裕度的涵蓋範圍。重量控制工程師彙總各工種提供之資料產生模組重心及最大不可超過（NTE）重量。並依此數據修正陸運、海運及吊裝結構分析模型之重心及重量。模組重量管控資料要定期更新，且從重量管控資料的變化可得到重量及重心發展趨勢，提早發現潛在的風險。

重量管控程序最後是以實際秤重做驗證，以比較模組組裝完成後實際重量重心和計算值的差異。但操作秤重過程對模組結構的力量傳遞卻是一種特殊的載重狀態，設計時需考慮秤重系統在各大梁端部將模組一起頂起離開原支承的情況（如圖2），此時模組重量傳遞由柱底轉移到大梁端，結構分析模型需增設此條件，並設計加勁構材抵抗集中力。

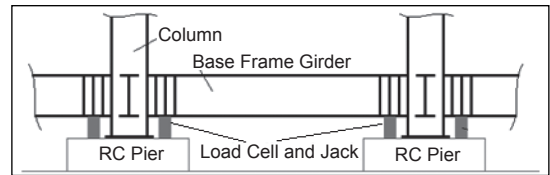


圖 2 模組預製廠秤重配置

三、模組陸運分析設計

陸運包括Load out & Offloading之作業及從卸載碼頭至工地之運輸，沿線之路寬、高度限制、轉彎半徑、坡度及承载力都是影響設計的因素。相關的建造性評估如是否會經過地下管線及排水設施、工地內運輸動線之設施是否會造成妨礙、模組安裝順序等。

必須儘早知道從碼頭至工地這一段較長的路況及對模組運輸的限制，進而配合模組的尺寸及現場安裝條件做SPMT規劃。大型模組皆以SPMT直接運送至基礎上安裝，雖出廠至工地有分幾段陸運，但SPMT和結構之間的排列都不變，分析即取其中最嚴苛的條件，進行結構設計項目如下：

1. 運輸路線規劃
2. 建立結構模型
3. 規劃SPMT配置
4. 執行結構分析設計
5. 檢核載重限制
6. SPMT強度及穩定分析

（一）模組陸運 SPMT 配置

除單層類似貨櫃型的小模組可用拖板車運送外，SPMT是模組陸運的必備運輸工具。

它由組合式車體搭配大量的液壓油缸及獨立懸吊的高壓輪組，達到行進平穩及轉向自由的性能，並可以上下升降。以每節4軸或6軸為一單元排列，可按模組長度需求串聯成一列車體，兩列之間亦可再並聯，每列組合前端有一節柴油引擎動力單元（Power Pack Unit，PPU）。所以可配合模組支承位置，計算所需足夠數量的組合SPMT單元，雖然每個模組SPMT組合的車體數量不少，但在控制行進上只需由一人操作。

在設計時要確認SPMT的規格，常用的車型之一為高度1.5 m、單列寬度2.43 m、雙列並聯寬度5.33 m，以安排配置在模組的梁底空間，SPMT規格除長寬高尺寸外，還需要容許輪壓、縱向大梁（Spine beam）之容許剪力及容許彎矩，可供結構分析時將SPMT模擬至結構模型檢核，其容許輪壓會隨行進的速度增加而遞減，也需檢核最大輪壓是否會超過道路的容許承載力，藉以調整SPMT配置。改善的方式可延長SPMT的長度或列數以增加總輪軸數，有時需在模組兩側外擴臨時斜撐構架，以分攤模組重量及彎矩至外側的SPMT。

在安排SPMT時首先以模組的穩定性為前題，利用模組結構分析模型之陸運支承點反力進行穩定性檢核。模組重量、重心資料以重量管控程序求出的為依據，而支承點反力以三組或四組合力代表，因SPMT載運時其液壓系統自動調配各輪壓，分配成三組或四組均佈力來平衡模組的重量，可視其各組均佈力的合力在平面上為一虛擬三角形或四邊形的頂點，另在此平面圖上將模組重心標出，若各種載重組合下之模組重心皆在此虛擬三角形或四邊形之內，則表示此陸運配置是

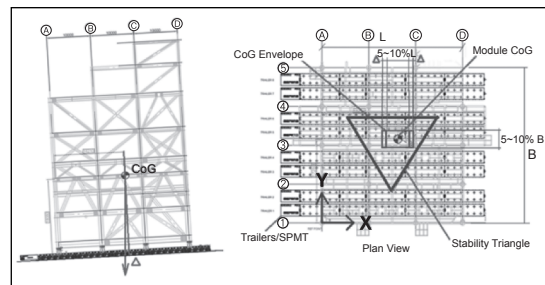


圖 3 模組陸運重心與穩定性

穩定的（如圖3）。

陸運是由底層大梁支撐整個模組，需保留底層大梁下為SPMT進出的空間，若模組結構本身無底層大梁做支撐梁，則需設計臨時支承梁或臨時構架，模組安裝後再另行拆除。SPMT的配置，除需滿足構架穩定性及完整性外，仍需檢核可建造性，如保留SPMT邊與柱有足夠之淨間距，避免與工地RC柱墩或船上的海上繫固構材發生碰撞。安排SPMT之縱列方向需配合行進動線及現場安裝順序，建議將SPMT、RC柱墩、臨時支撐及海上繫固構材皆建入3D模型做完整的碰撞檢查。

（二）陸運載重及設計特點

SPMT在崎嶇的道路行進時仍可維持整體模組的水平，可避免產生對穩定性不利的側力及彎矩，模組重量以垂直向反力抵抗。運輸採用之重量是指乾重（Dry weight）為不含設備及管線內容物的重量，亦不加活載重。但因重心位置計算的準確性直接影響陸運的穩定，關係運輸的安全，故在模組穩定性檢核時要做重心偏移之假設，作法是將重心擴展為包絡區，以保守假設為重心誤差的範圍，通常取與模組平面外形相似比例的小



方形。模擬方法是在結構模型上施加兩向彎矩，分別將重心偏移至此方形之四個端點，再重複做分析設計。

至於在慣性力的加載方面，當SPMT啟動或煞車時在縱向及橫向之加速度需分別考慮，又因道路坡度造成的縱向及橫向分力效應亦不可忽略。安排模組和SPMT之排列關係及行進方向，其縱向力大於橫向的。並在結構分析模型以個別荷載分別將縱向及橫向慣性力輸入，並做適當載重組合。陸運載重組合亦要聯合風力，此風力是取模組預製廠及卸載碼頭至工地區域的常態環境時的風速。

為正確模擬陸運的結構力學行為，會將SPMT縱向大梁全長建入模組結構模型中（如圖4），其梁斷面性質按實際規格輸入。模型中各SPMT和模組大梁間的支承點設定為只能傳遞壓力及水平力，以符合實際承載型態。水平力的產生由運動慣性力、風力及道路坡度所造成，這些水平力由SPMT和模組大梁間的摩擦力抵抗，實際可在間隙加墊枕木及用拉力鋼纜綁紮以增加摩擦力。綜合模組重量、慣性力、風力、支承變位及重心偏移效應，進行各種載重組合的分析，其檢核重

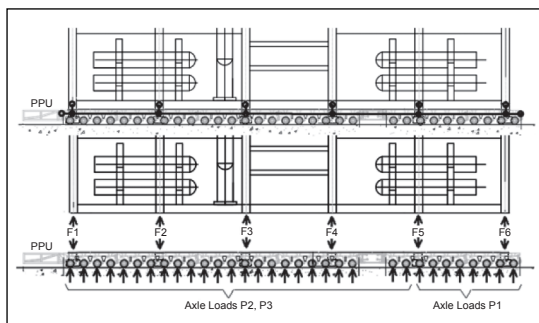


圖 4 模擬 SPMT 陸運荷載

點為：

1. 模組大梁支承點總反力需符合重量控制報告的模組總重
2. SPMT 大梁強度及變形量
3. SPMT 輪壓力及地面乘載力
4. 模組支承大梁的變位是否在容許範圍內
5. 確認模組結構桿件及接頭皆符合鋼構設計規範要求

四、模組海運分析設計

為確保在航行過程中的安全，從設計初期至Load out前，都要持續修正設計資料，包括重件船重心的運動數值、模組重心距船重心的相對位置等，設計初期資料尚未確定故較保守。海運過程中會產生對模組結構行為造成影響的受力作用由結構模型及船舶運動模型進行模擬，且對於各種受力狀態下的結構行為，設計出滿足強度及勁度要求的結構，並提供安裝在結構上所有的設備、管線、儀電等物件良好的支撐。

模組在船上的安排，每艘船能裝幾個模組，及不同重量的模組如何排列，亦須檢核其船的穩度及強度。而船選的型式要考慮模組尺寸重量及航線，若要橫越洲際海洋，駁船（Barge）就不適用，因多半此種船本身無動力，需要靠拖船牽引，且為平底船無法橫越海洋，僅適用於沿岸或河道運輸。越洋的條件就要選專用的重件船，且模組越重越要提早預訂。另外配艙計劃（Stowage plan）之裝載排列組合亦要考慮到現場安裝的順序，或者是否會在中途換船，例如由海運的重件船轉換到河運的駁船，這些情況都要在做海運分析設計時注意到。



海運分析設計的流程，先規劃出各模組的尺寸和估算重量重心，再依模組預製廠之地點定出航線，選擇船型及配置船上模組位置，利用海運程式演算出船舶的海運加速度，並輸入結構分析設計模型，設計模組的鋼構，搭配設備、管線、儀電等海運支撐，及安排整體的海上繫固，並取柱底反力，設計船甲板的格床支承，及檢核船體穩定及強度。

(一) 船舶運動及荷載特點

海運分析之荷載主要來源為模組重量，及海浪及風聯合作用下的運動慣性力。另加上甲板的變形效應，因船在長浪作用下，浮力變化相對於重力的縱向彎矩會使船體彈性變形，船舳拱（Hogging）及舳垂（Sagging）的變形量，會形成模組支承變位。其設計用的甲板變形量，則需由船舶運動程式求出。

加速度來自船舶受波浪影響所產生的運動，船舶運動為縱移（Surge）、橫移（Sway）、起伏（Heave）之平行運動；及橫搖（Roll）、縱搖（Pitch）、平擺（Yaw）之旋轉運動。在這六向運動中，以橫搖最顯著，船舶出現橫搖的情況，就是船舶繞縱軸向左右舷方向作週期運動，如此會造成模組很大的橫向慣性力。同理在縱搖的運動方面，因船體縱向受浪時，當船艏或船艉升起後下落而造成的加速度，對模組亦造成很大的縱向慣性力，尤其模組位置距離船重心越遠，其慣性力越大。

在設計初期的海運運動大小可參考相似

的船舶及航線資料，若無相似統計資料，先依據DNVGL-ST-N001準則中對船舶運動之設計值，建議在10秒週期下橫搖及縱搖之最大角度及起伏的最大加速度。而另外三個自由度，縱移、橫移及平擺的影響較小可暫不考慮。依據海況環境的類型，再搭配船長、船寬及船底形狀，即可對應出一組橫搖、縱搖及起伏之運動數值，此為船舶受波浪影響之基本慣性力來源。

波浪與風力的載重組合取兩者同向聯合作用下的組合狀態。DNVGL準則規定風速基準，若在航線未確定採用非限制氣候條件，其航程越久相對需採用較長回歸期的風速做設計。在航線及時程確定後，除設計風力需按航運路線季節上之實際風速統計數據做調整，海浪造成的加速度亦應做修正。在取得計畫航線特定季節的實際海況統計數據後，利用船舶運動軟體如MOSES、SESAME、SMP等，可求得詳細的三組各六個方向的海運加速度。這三組分別為船受到橫向（Beam seas）、正向（Head seas）及斜向（Quartering seas）波浪所產生的運動，由這些加速度可分別計算出模組各構件所對應的慣性力。另外對重心位置較敏感的模組，在分析時要假設模組實際重心和設計重心有誤差，將重心可能的範圍擴大為重心包絡區，並故意偏移後再另做分析。

模組經過海運分析後鋼構尺寸增加，重量控制應注意不可超過NTE重量，且不使用混凝土材料，鋼構防火方式亦採用防火塗料取代混凝土，若必須使用混凝土材料，應設法在現場安裝完成後再行澆注，以減輕運輸重量及避免海運時發生龜裂。



荷載項目確定後即可加以組合進行結構分析，彙總其荷載項目如下：

1. 模組重量
2. 模組受波浪之運動慣性力
3. 風力作用
4. 船體變形，船舫拱及舫垂造成模組支承變位
5. 模組重心偏移至重心包絡區的四個角隅

(二) 海運疲勞分析

若海運航程超過兩週，模組週期性運動的次數已太多，需另外進行疲勞分析。利用離岸工程結構分析軟體如SACS將海運分析模型輸入所需資料做進一步分析。

因波浪使船舶運動及船體變形聯合作用的循環應力，由疲勞分析可計算出它對結構所造成的損傷。分析所需的海況資料包括實際之波譜，代表各方向不同周期波浪之波高。亦需輸入代表船特性的響應幅度算子（Response Amplitude Operator，RAO），是船受不同方向不同周期之單位波高作用，其六個運動自由度的反應幅度。

主要檢核結構桿件節點及斷面變化處，需要用到應力集中係數（SCF）及S-N曲線，在管接管之K、Y、T及X型式接點處都是檢核的重點。跟據結構節點的類型定出對應的應力集中係數及S-N曲線，這些係數和曲線的算法按DNVGL-RP-C203及API RP2A-WSD的規定。

疲勞分析的流程，先利用RAO資料轉換為慣性力，以產生在不同方向上各周期波浪

對模組結構各構件端點力的影響，再組合個別的SCF形成特定節點的應力響應，這部分以波浪頻率函數 $H_i(f)$ 表現， i 為檢核點，由 $H_i(f)$ 和特定海況資料 $S_h(f)$ ，可得檢核點 i 之最大至最小應力範圍如下式：

$$\sigma_{RMSi} = \sqrt{\int_0^{\infty} H_i^2(f) S_h(f) df}$$

再配合累積時間及S-N曲線，可得在此特定海況航行之疲勞損傷值，再加總在各海況航行之疲勞損傷值。

除因慣性力造成的疲勞外，根據海況資料及由船舶運動軟體算出的舫拱及舫垂變形量和發生頻率，可回饋至疲勞分析模型以計算因船週期性變形導致模組柱循環性支承變位的疲勞損傷。全部加總後之疲勞損傷值應限制在可接受的範圍內，此範圍應視個案情況進一步研議。

(三) 海運支撐設計

模組海運設計，首先要符合重量控制的要求，並優先使用有完整立面斜撐或桁架的結構系統，以增加整體的勁度並減少側向變位。柱及斜撐常使用圓管構材，除斷面積較小所受風力較小外，節點間的距離較長。對於在模組內的垂直設備，除設計設備本體能承受海運加速度，設備周圍亦要有充分的支撐抵抗海運慣性力。故需增加許多模組內部的支撐，包括永久或臨時構件，若為臨時構件應漆成鮮豔的顏色，如橘色及粉紅色，並採用螺栓連接便於拆卸。

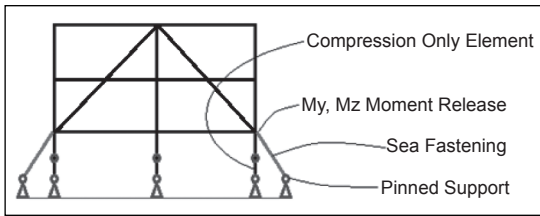


圖 5 模組海運結構支承條件

做海上繫固與格床支承的設計需配合模組在船上的位置，這些模組外的支撐構件需連接至船體結構之加勁構材。船甲板上的格床支承傳遞模組重力，此構件和模組柱基板採鉸接或滑動的接頭（如圖5），不會採用彎矩接頭，也不會將模組柱基板直接銲在格床支承。有些較小的模組在柱基板旁做擋板，以抵抗側向滑動，或設計用鋼板夾住柱基板以抵抗拉拔力，這些設計皆需考慮方便拆卸。若需抵抗較大的側力或彎矩時，應在模組的主節點上增加強度大的外部斜撐。連接模組與船體的構材，多數分析採拉力桿件，以有效抵抗側向力避免挫屈。橫向的海上繫固主要抵抗船舶橫搖的慣性力，縱向的繫固主要抵抗船舶縱搖的慣性力。在模組外部的海上繫固圓管構材，和模組或船之接頭皆以連接板銲接，分析模型設為鉸接接頭。亦有繫固構材以鋼纜用鬆緊器鎖緊，這些鋼纜的綁紮繫固可連接至模組較高處，對抵抗傾覆彎矩有較佳的效果。

在設計這些甲板上的格床支承時應注意，需使模組裝、卸載時能夠達到穩定、快速之需求，亦不能占用SPMT行進的空間，在同艘船上不同模組間的繫固不能相互干涉。海運支撐設計除需滿足模組及船舶結構強度勁度要求，應以可行性為優先考量，並盡量

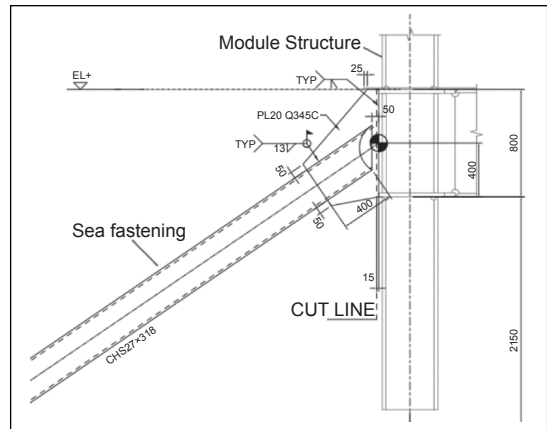


圖 6 海上繫固切割線圖示

採用標準化構件及接頭，以簡化大量的安裝及拆卸作業。

海上繫固與格床支承，都是海運的臨時構材，使用完即為廢料，故不需做額外的塗裝。但這些材料因為用量甚多，亦須加總在鋼構工料數量內，會評估這些鋼構占模組總重的百分之幾，並和經驗值比較。這些格床支承及海上繫固最後要移除、運棄，故設計時要考慮預留繫固構件在移除時的切割線，不得傷及模組結構。繫固構件切割後，其在模組上殘留量應減至最低。在設計圖上，需標示繫固移除時的切割線位置（如圖6）。

五、模組吊裝分析設計

吊裝分析會用到的載重就只有模組重量，首先需準備重量及重心資料供評估，使用有吊車的重件船以LOLO方式裝卸載，需考慮吊車的能力以評估模組吊裝重量的上限。規劃時除先檢核吊裝重量限制，亦需評估工地之吊車及空間是否適合以吊裝方式



安裝模組。

(一) 吊裝之結構配置

計算出模組重量及重心後，研究吊裝方法及選取適合的吊車，安排吊點位置及吊具配置。對於吊點及吊具的安排，若採用不同的配置，各有其不同力量傳遞路徑，較複雜的配置無法用幾何公式算出，可將吊具組合一併建入結構模型中，進行整體的分析設計，最後取出受力最大的吊點做設計檢核，統一應用在其它吊點。

最基本的吊裝配置是一部吊車配四個吊點，其四個吊點的垂直力分配可由幾何公式算出，再以吊纜的角度換算出吊纜的拉力。重點在於模組重量重心之準確性要求，為使吊裝時吊鉤能和模組重心的位置對齊，可在平面圖上畫個十字形，其中心點取四個吊點對角線的交點，此十字形範圍的大小及寬度由各吊點及吊鉤之相對間距決定。設計吊點位置使模組重心保持在一個十字形範圍內，以確保吊裝穩定性。

若以兩部吊車各兩個或四個吊點吊裝，力量的分配需按配置的組合去計算，亦取其中受力最大的吊點做一致的設計。兩部吊車的吊裝分析，需檢核模組中間連接段的結構強度及變形量，因考慮兩部吊車獨立操作，中間連接段結構需承受模組整體的剪力及彎矩，故中間連接段的結構須有完整的支撐系統，足以傳遞兩部吊車間吊裝的衝擊荷載。

不論是採用一部吊車或兩部吊車，仍可在吊裝的配置上不盡理想，則可利用增設

輔助吊具做改善。配合模組吊點位置增加一組立體桁架，或是增加一支大型鋼梁串接並聯的吊纜，此方式對於較輕但較長的管架模組，可使結構更經濟。輔助吊具介於主吊鉤和吊點間可平衡吊升之力量使各吊點受力均勻，或改變吊纜連接吊點的角度改善受力量方向，尤其應避免在吊點施加面外方向的拉力，會產生過大的應力，故須限制吊纜的水平夾角不得小於60度，並儘量在垂直向施力。

對於塔形的模組若無法直立運輸，可考慮採用橫躺方式運至工地，再以兩部吊車，主吊搭配尾吊方式，拉成直立後安裝。此模組的結構要做不同角度的吊裝分析。並同時設計管線及設備的臨時支撐。

以下幾點相關的設計要求：

1. 若採用容許應力法設計，吊裝重量載重組合，其載重亦不可折減，且容許應力亦不得提高
2. 要檢核在吊裝載重狀態下結構的變形及扭曲量
3. 為符合建造性及經濟之目的，在設計吊點及輔助吊具時，應採用標準化設計
4. 吊裝設計圖應包含吊車、輔助吊具的配置圖，並標註模組 NTE 重量重心及吊纜所受最大拉力值
5. 對於模組吊點的設置，應選擇結構內部主柱頂或有設加勁構材處
6. 若以吊裝方式在工地續接上下兩層模組，要做到快速精準對齊螺栓孔可在交接處加裝便利對齊的小零件。如在模組對角兩柱交接面裝設樺卯，安裝時上部模組柱基板樺孔順著下部模組柱頂樺卯，方便續接接



頭螺栓的安裝。

(二) 吊裝設計之安全考量

吊裝結構分析可利用現場操作狀態之分析模型修改而成，在模組上方吊鉤處加設鉸接支承，以拉力構件連接至各吊點以模擬吊纜，並將原柱底支承改成兩向水平彈簧，使結構分析模型穩定。載重項目僅保留模組自重，其重量需再乘上載重係數後進行分析設計。

載重係數包含不同分項的係數，各係數相乘後成為整體的安全係數，規範ISO 19901-6之吊裝載重係數如下：

1. Consequence Factor 是結構及吊具各構件之個別重要性的加權係數，依據各元件對整體吊裝安全影響性的大小，若影響性越大則此係數越大，例如吊耳為 1.3，主柱為 1.15，小梁為 1。
2. Weight Accuracy Factor 類似重量控制程序中的重量裕度，需配合設計重量的準確度，乘上此係數以預估實際模組重量。
3. CoG Accuracy Factor 是考慮設計重心和實際重心偏差之影響，若分析時已有將重心擴大為重心包絡區，此係數可採 1.03，若無則用 1.1。
4. Dynamic Amplification Factor 為考慮吊裝動態衝擊力，模組越輕則此係數越大，其值從 1.0 至 1.15。
5. Skew Load Factor 是假設吊具之製造誤差或吊纜長度可能不一致，如此會造成吊裝過程中模組歪斜，影響平衡之程度按吊具所能提供的力量再分配能力決定，其中吊具靜不定度越大此係數越大，因在實際若有誤差下力量不易平攤，造成單一吊點受

力增加，故利用此係數做修正。

若採用兩部吊車，按ISO 19901-6規定需考慮兩組吊鉤在吊裝過程中可能產生的晃動疑慮，其相關修正係數如下：

1. CoG Shift Factor 為考慮模組平移慣性力的影響，採增加 3% 的設計重量做補強。
2. CoG Yaw Factor 及 CoG Tilt Factor 分別考慮模組對水平軸及垂直軸旋轉慣性力之影響，採增加 5% 及 3% 的設計重量做補強。

(三) 吊耳設計

在做完吊裝結構分析後，取吊點處的節點力進行吊耳設計。吊耳屬於特殊的接頭，因除傳遞模組靜態重量，還需抵抗吊裝過程動態荷載，其各細節設計需按鋼構規範逐條檢核。

標準型的吊耳，是一片圓弧形主鋼板中間設一栓孔使鉤環 (Shackle) 栓穿過並密合。需依據吊重檢核板厚，若此片主鋼板栓孔厚度不足時，需在兩側加鉚圓形頰板 (Cheek plate) 補強 (如圖7)，並在支承結構的腹板處補加勁板。吊耳設計需配合強度及鉤環尺寸需求。

若吊耳設計在柱或梁的外側，因不在中心線上故有偏心問題，需檢核吊裝時所產生剪力及彎矩。若吊耳採用在柱腹板上端開栓孔並鉚 Doubler plate，即可直接穿鉤環進行吊裝 (如圖8)，但此方式僅適用於小型管架或製程模組為配合空間限制所設計的吊耳。

臨時吊耳在模組吊裝完成後需要拆除，

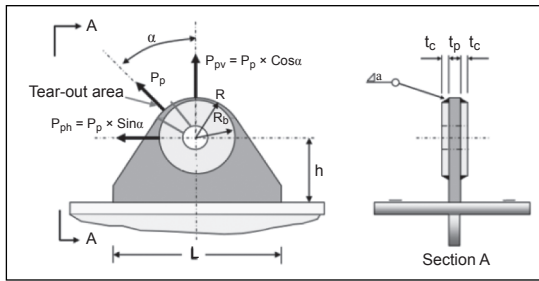


圖 7 吊耳之 Cheek Plate 補強

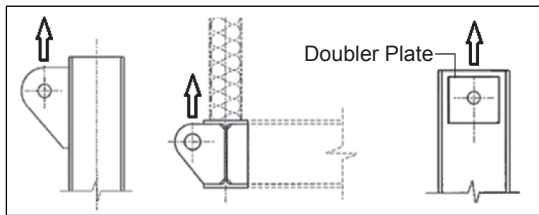


圖 8 不同型式的吊耳

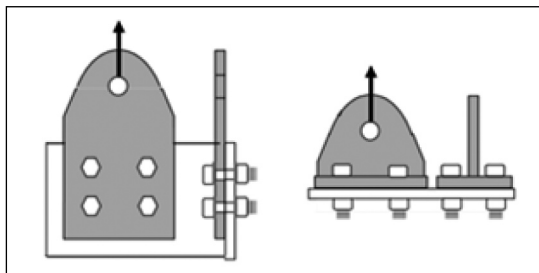


圖 9 栓接式吊耳

它和結構的接合方式設計成剪力或拉力螺栓接頭（如圖9）。永久性吊耳和結構的接合應設計為承受剪力為主的銲道，若為拉力銲道應皆採全滲透銲接，並對有層裂疑慮處進行檢測。

在選定適當的鉤環後，相對的栓孔直徑及邊距即可算出，接下來對吊耳的組成元件做一系列的檢核，主要的包括Tear-out極限

強度、拉力破壞強度、剪力破壞強度、栓孔承壓強度、Cheek plate填角銲應力、面外應力、主鋼板底部的聯合應力等，其銲道、螺栓及加勁板等所有檢核皆需符合鋼構設計規範、高強度螺栓接合之規範及銲接規範。

吊耳主鋼板面需對齊吊纜拉力方向，如果有偏差，需將主鋼板面外彎矩納入設計。另外為抵抗不可預期的側向動態力，ISO 19901-6規定吊耳至少要能承受已計算出的側向力外，再視吊具配置方式取吊纜拉力的5至8%為偶發性側向力。且在縱向與橫向水平力聯合作用下，要求吊纜、鉤環等吊具元件之材料最小破壞強度至少要達到五倍的需求強度，此需求強度由模組重量乘上載重係數經分析得到的吊點力，總之吊裝作業變因雖多，但可藉由周嚴的設計將風險降至最低。

六 結論

從重量管控至工地安裝完成，模組工法的每個細節都需要詳實的設計及嚴格的檢核。此工法的結構設計雖汲取不少離岸工程的技術，但仍以傳統鋼結構設計為核心。採用模組最直接的目的是減少工地工作，故應善用模組預製廠的優勢，如利用配備先進的切割銲接設施，結構亦配合採用全面銲接接合，柱和斜撐改用圓管構材的設計等特點。對於海運、陸運、吊裝和現場操作各不同環境狀態的分析設計，皆需按相關規範要求執行，亦包括離岸工程之規範及船舶運動軟體的計算結果。此外設備振動或海運疲勞分析視特定需求進行檢核。綜觀國際建廠模組化之趨勢日增，需秉持同步提升專業技術的目標持續精進。



參考文獻

1. API RP2A-WSD, API Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, 22nd, 2014
2. DNVGL-RP-C203, Fatigue Design of Offshore Steel Structures, 2016
3. DNVGL-ST-N001, Standard - Marine Operations and Marine Warranty, 2016
4. Guidelines for Marine Operations – Marine Lifting, LOC Group, 2016
5. ISO 19901-6, Petroleum and natural gas industries - Specific Requirements for Offshore Structures –Part 6: Marine operations, 2009
6. Manual of SACS v11.3, Fatigue, 2019
7. NORSOK R-002, Lifting Equipment, 2017
8. SCHEUERLE.com, Specifications of Self-Propelled Modular Transporters, 2020
9. Ship and Ocean Industries R&D Center, Taiwan, Seminar of Naval Architecture, 2018.