



中國工程師學會會刊

# 工程

孫震敬題



中華民國109年9月 Vol. 93 No. 3

<http://www.cie.org.tw> ISSN:1015-0773

- ▶ 中國工程師學會暨各專門工程學會109年聯合年會「迎接5G新時代開創AI新生活」
- ▶ 蔡總統英文接見並嘉勉中國工程師學會109年各項得獎人
- ▶ 2020 IPEA及APEC Engineer協調委員會年度會議
- ▶ 中國工程師學會學生分會109年會務評鑑

## 低溫儲槽工程實務與 模組化工法之應用

## CTCI 中鼎集團

CTCI 中鼎集團 (TWSE: 9933、TPEX: 5209、TPEX: 6803) 為國際級工程統包公司，承攬多元化重大工程。創立於 1979 年，總部位於台灣台北市，業務範圍包括煉油石化、電力、環境、交通、一般工業等工程領域，致力提供全球最值得信賴的工程設計、採購、製造、建造施工、試車操作及專案管理等服務項目。於全球超過 15 個國家地區成立約 40 家關係企業，集團員工總數超過 7,000 人，並入選道瓊永續指數 (The Dow Jones Sustainability Indices, DJSI)。



# CTCI

Discover Reliable

### 業務領域

- 煉油石化
- 電力
- 環境
- 交通
- 一般工業

### 服務內容

- 專案管理
- 可行性研究及前端工程設計
- 工程設計
- 工程採購
- 設備製造
- 工程建造與維修
- 工廠試車
- 智能解決方案
- 自動化控制
- 無塵室與機電配管工程
- 智能頂進工法
- 地盤冷凍工法
- 操作及維護

### 產品項目

- 設備製造
- 化學添加劑
- 智慧化能源管理系統

**CTCI**  
中鼎集團

11155 台北市中山北路六段89號  
Tel: (886)2-2833-9999  
Fax: (886)2-2833-8833

[www.ctci.com](http://www.ctci.com)

**CTCI EF**

財團法人中鼎教育基金會

10571 台北市南京東路五段188號2樓之2  
Tel: (886)2-2769-8599  
Fax: (886)2-2769-9299

[www.ctcief.org](http://www.ctcief.org)



## 低溫儲槽工程實務與模組化工法之應用

本專輯主題為低溫儲槽工程實務與模組化工法之應用，透過五篇專題文章之專業解析，具體而微地反映國內工程團隊運用創新工程技術及工法，克服工程執行的地域、天候及人力等不利現場施工等因素，有效降低工程執行時間和成本，而在日趨激烈的國際統包工程市場中保持優勢競爭力。介紹之內容涵蓋低溫儲槽保冷設計及施工工法，亦探討工程模組化作業之應用考量、模組工法之結構設計及模組運輸實務。

## 活動報導

- 02 中國工程師學會暨各專門工程學會109年聯合年會「迎接5G新時代開創AI新生活」
- 05 109年聯合年會參訪活動
- 09 蔡總統英文接見並嘉勉109年得獎人
- 11 慶祝工程師節系列活動
- 13 2020 IPEA及APEC Engineer協調委員會年度會議
- 15 參訪淡江大橋願景館
- 17 中國工程師學會學生分會109年會務評鑑
- 19 「智慧科技應用」研討會與觀摩交流活動精彩豐收

## 低溫儲槽工程實務與模組化工法之應用

客座主編：陳裕仁/中鼎工程股份有限公司總經理

- 23 低溫儲槽保冷設計/陳仲正
- 32 低溫儲槽施工工法探討/張宗霖
- 47 工程模組化作業之應用考量/魏嘉成
- 57 淺談模組工法之結構設計/于景華
- 69 模組運輸實務簡介/許家輔

## 工程與技術

- 81 5G安全自動化攻防框架/呂錫民

## 會務佈告

- 97 工程師宣言敬請力行廣宣

理事長：廖慶榮

常務理事：李世光 高宗正 楊宗興 楊偉甫

理事：王錫欽 呂良正 宋裕祺 李偉賢

胡湘麟 孫以濤 涂元光 徐善慧

莫仁維 陳仲賢 陳彥伯 陳哲生

彭振聲 曾國正 黃金生 楊慶煜

廖學瑞 蒲鶴章 歐善惠 賴建信

薛文珍 薛富盛

常務監事：邱琳濱

監事：王昭烈 李建中 郭新進 陳振川

秘書長：張武訓

發行所：中國工程師學會出版委員會

主任委員：黃慶東

委員：李大行 林根勝 邱煌仁 孫以濤

郭重顯 張武訓 陳裕仁 廖學瑞

戴文凱

總編輯：陳沛清

客座主編：陳裕仁

編輯：石昱郁 李宥萱 林秀琴 張桂瑜

梁愛倫 蔣雪芬 蔡琦嫻

聯絡地址：10607臺北市大安區基隆路四段43號

電話：(02)2733-3141轉1177、3252、6938

傳真：(02)2730-1000

會址：10055臺北市仁愛路二段1號3樓

電話：(02)2392-5128

傳真：(02)2397-3003

網址：<http://www.cie.org.tw>

郵政劃撥：00059892

戶名：社團法人中國工程師學會

編印：英杰企業有限公司

地址：10667臺北市大安區復興南路二段293-3號10樓之1

電話：(02)2732-1234

行政院新聞處出版事業登記證局版臺誌0765號  
中華郵政臺北誌字第721號執照登記為雜誌交寄  
入會申請手續請上本會網站查詢

## 中國工程師學會暨各專門工程學會109年聯合年會「迎接5G新時代 開創AI新生活」

中國工程師學會暨各專門工程學會109年聯合年會於8月7日假中華電信公司綜合活動中心2樓舉行，活動當天計有來自全國各地的會員、得獎者及貴賓共500多人與會。

本屆年會活動由中華電信公司籌辦，籌備會主任委員為中華電信公司謝繼茂董事長，活動擇定以「迎接5G新時代 開創AI新生活」為主題。開幕典禮由樂舞工坊以「5G狂潮 AI躍動」為題帶來舞蹈表演，續由司儀宣讀總統賀電，祝賀年會活動圓滿成功，為年會帶來喜氣。

活動開幕式，廖慶榮理事長邀請行政院李孟諺秘書長、工程會顏久榮副主任委員、

臺北市府彭振聲副市長、土木學會宋裕祺理事長、建築學會江維華理事長、籌備會謝繼茂主任委員及林昭陽總幹事等貴賓上台隆重啟動3D特效光球，光球展現出學會標誌、



▲ 廖慶榮理事長致詞



▲ 出席貴賓合影

年會活動字樣及主視覺，宣示邁向5G新時代及AI新生活，續邀請貴賓一起上台合影後正式開始聯合年會活動。

廖慶榮理事長於致詞首先恭賀得獎人及得獎單位，感謝會員朋友的參與及產官學各界對學會的支持及鼓勵，並簡要說明過去一年的重大會務活動辦理情形。行政院李孟諺秘書長致詞肯定本學會及各專門工程學會在各領域投入的努力與付出，建設臺灣、帶動經濟發展，提供民眾優質生活。李秘書長表示，大會主題是5G跟AI，在此領域，臺灣有良好條件及軟、硬體機會，未來4年政府將投入近600億元，盼在全球5G領域競賽彎道超車，官民合作創造更好的投資與產業環境，站上世界領先地位。

謝繼茂主任委員續於致詞表示感謝本學會，由中華電信負責籌辦本次年會活動，並說明因應疫情籌備會不斷調整工作非常辛苦，因此特別感謝中華電信工作同仁的盡心盡力。專題演講邀請臺灣AI實驗室杜奕瑾創辦人特別就年會主題進行演講，全場聚精會神聆聽。張武訓秘書長會務報告除說明近一年會務重點及鼓勵會員收聽新開創的CIE Podcast有聲廣播，並介紹自2020年啟動的3月4日「世界工程日」及本學會響應情形，張秘書長最後帶領與會人員宣讀學會甫訂頒的「工程師宣言」，鼓勵工程師勇於負責主動任事，期望大家廣為宣揚與身體力行。

本屆年會表揚之各類工程獎項，包括工程界最高榮譽「工程獎章」，由國立成功大學蔡明祺講座教授榮獲，會士獲推選共3位，分別為工研院暨資策會李世光董事長、臺灣營建



▲ 行政院李孟諺秘書長（左）頒贈109年工程獎章予蔡明祺講座教授（右）



▲ 會士獲選人為高宗正董事長（左）及楊偉甫董事長（右）



▲ 謝繼茂主任委員致詞

研究院高宗正董事長及台電公司楊偉甫董事長。其他獎項還包括「傑出工程教授獎」、「詹天佑論文獎」、「石延平教授工程論文獎」、



▲ 杜奕瑾創辦人進行專題演講



▲ 聯合年會會場情形

「工程論文獎」、「傑出工程師獎」、「優秀青年工程師獎」、「優秀工程學生獎學金」、「沈怡獎學金」、「工程優良獎」、「產學合作績優單位」、長青會員表揚等；頒獎典禮歡欣隆重。

本年度的年會活動，原訂於6月5日舉

辦，因疫情關係，延至8月7日順利舉辦，特別感謝各界的大力支持，使活動得以順利舉行。本次年會照片及影音檔將放置本學會官網 ([www.cie.org.tw](http://www.cie.org.tw)) 及臉書粉絲團 (<https://www.facebook.com/CIE1912/>)，歡迎前往瀏覽下載。

## 109年聯合年會參訪活動

8月8日在109年聯合年會籌備單位中華電信公司的規劃與帶領下，特別進行兩路線工程建設參觀活動，包括路線A的淡海輕軌捷運體驗、陽明書屋及中華電信陽明山衛星地面站，及路線B的新北捷運三鶯線工程、中華電信綠能智慧園區和北資局中庄調整池，讓會員朋友們實地深度觀摩及親身體驗，進一步瞭解國內重大工程建設成果。參訪活動於當日上午在中華電信信義園區集合後出發，共有180位工程先進、眷屬和工作人員，出席相當踴躍。

淡海輕軌由綠山線及藍海線路段組成，可由紅樹林V01站沿登輝大道高架橋到淡海新市鎮V10站，後續可到漁人碼頭。第一期路網主體工程於2014年11月23日開工，綠山

線於2018年12月23日通車，這次參訪體驗路段從V01到V10站，沿線各車站公共藝術最亮眼獲得讚美。



▲ 三鶯線簡報後張武訓秘書長主持討論



▲ 參訪人員於捷運三鶯線工地合影



▲ 參訪人員於中庄調整池合影



▲ 參訪中華電線能智慧園區致贈會旗與紀念品

原名中興賓館的「陽明書屋」，興建於民國58年至59年間，昔日是蔣先總統接待國內外貴賓及夏日避暑之處，係先總統在臺親自擇定興建的行館；目前是陽明山國家公園重要人文史蹟建物之一，有提供遊客諮詢及導覽解說等各項服務，兼具自然與人文、知性與感性的參觀遊憩場所。

位在陽明山的衛星地面站歷時30年共設有11座，第一座於民國58年啟用，87年退休。目前修復為具紀念價值與教育意義的博物館。其他8座可同時追蹤太平洋與印度洋上空的通訊衛星，構成我國全球性商業衛星通



▲ 張武訓秘書長（左）致贈會旗予北資局

信系統。另2座衛星地面站，則專屬於中心一號衛星控制與監測使用。



▲ 參訪人員於淡海輕軌捷運合影

路線B由本學會張武訓秘書長帶領，抵達後首先致贈會旗予接待單位敬表感謝協助。捷運三鶯線工程路線全長14.29公里，從土城頂埔站開始，經土城、三峽、鶯歌到福德一路終點站止，未來路線往桃園八德地區延伸，與桃園綠線銜接。屬中運量捷運系統，全線採高架型式。總計12座車站（土城2站、三峽5站、鶯歌5站），1座機廠，預定112年底完工，目前計畫總進度42.90%。施工統包商由日立軌道交通號誌系統公司、榮工工程股份有限公司和株式會社日立製作所組成。台灣世曦工程顧問公司專案管理，中興工程顧問公司是監造顧問。業主為新北市捷運工程局。

中庄調整池，是臺灣一座離槽備用水庫，地處桃園市大溪區，由大漢溪左岸原廢河道興建完成。位於石門水庫與鳶山堰之間，主要功



▲ 配戴5G AR智慧眼鏡體驗高速傳輸

能是若颱風期間石門水庫原水濁度升高，可提供緊急備援水源，讓石門水庫在颱風期間，以水力排砂方式排除水庫淤砂時，不致於影響下游新北市板新地區及桃園地區的民生用水。



▲ 參訪淡海線人員於漁人碼頭合影

中庄調整池儲水量可提供大臺北與桃園地區7天需水量。調整池蓄水面積約42.6公頃，總庫容約506萬立方公尺。造型與風景優美，目前已經成為民眾休閒好去處。

中華電信綠能智慧園區設置有智慧家庭、智慧差勤、智慧教室、智慧運籌中心（IOC）等相關技術與設施。無論最新5G基地台、5G手機功能展示、VR體驗、薑黃智慧農業培育管理等一應俱全，開放會員實際體驗未來智慧科技情境。

本次報名參加工程參訪的會員們個個精神抖擻，熱情喜悅，參訪期間和導覽志工間交流熱絡。中工會除表示歡迎外，更希望大家年年都能出席年會活動，既可以認識新知，亦可以對從事國家建設的工程師給予肯定與鼓勵。感謝新北市捷運工程局涂主任和楊工程司等、台灣世曦工程顧問公司謝經



▲ 籌備會黃志雄組長（左）致贈會旗與禮物感謝新北捷運局

理、榮工公司工地主任、中華電信公司智慧園區3位老師與地面站陳主任、水利署北資局郭副局長、石門水庫張主任等親自接待、簡報與導覽。

## 蔡總統英文接見並嘉勉109年得獎人

109年8月13日上午總統於總統府大禮堂接見中工會109年各項得獎人，並陪同至一樓大廳與全體合影。

蔡總統致詞時表示，很高興能夠和中工會今年度重要獎項得獎先進們見面，並向獲得109年度「會士」、「工程獎章」、「傑出工程教授」、「傑出工程師」、「優秀青年工程



▲ 蔡英文總統致詞



▲ 全體人員合影



▲ 李世光會士（左）接受蔡英文總統（右）贈禮



▲ 籌備會謝繼茂主委（左）致贈紀念品予蔡英文總統（右）

師」、「詹天佑論文」及「產學合作績優單位」的各類組第1名等得獎者，表達崇高的敬意與歡迎。總統特別向得獎人表達恭喜之意，感謝他們讓臺灣的工程建設能夠日新月異。

續強調政府將加快5G基礎建設的部署，投入資金，並且透過鬆綁法規，來調整技術和資金門檻，活絡市場，強化5G產業的發展。總統也期許所有獲獎人，能夠像工程師宣言所說，努力運用工程技術，追求環境永續發展，創造良好生活品質，造福全人類，讓臺灣被世界看見。政府也會和大家共同努力，我們一起加油。（完整致詞內容詳連結總統府發布新聞：<https://www.president.gov.tw/NEWS/25499>）

接見過程，首由廖慶榮理事長引言、工程獎章得主蔡明祺教授代表致詞、李世光會士接受總統贈禮，籌備會謝繼茂主委致贈紀念品予總統。張武訓秘書長藉總統邀請與會

人員發言機會，感謝總統於8月7日年會時頒贈賀詞，並感謝總統於接見致詞時肯定本學會甫發布的「工程師宣言」。

張秘書長向總統報告，明年是中工會110歲，將擴大年會慶祝，敬邀總統蒞臨大會鼓勵工程師的努力與肯定工程對環境永續發展的貢獻。

接著總統陪同全體與會人員至一樓大廳合影，這是各得獎人所獲得的最佳禮物。晉見結束後，各得獎人在志工導覽下參觀總統府文物館分享歷史古蹟的總統府建築奧妙和歷史回顧，行程圓滿結束。

## 慶祝工程師節系列活動

本學會為慶祝六六工程師節，特安排系列活動。

6月2日由得獎人聯誼委員會與女性工程師委員會共同舉辦參訪2020臺藝大美術與設計聯合畢業展【沃野 叢萃】。該展為臺藝大建校65年來，首次美術學院與設計學院之應屆畢業生聯合展覽，展出系所共7個學系，分為聯合畢業展以及美術學院各系所之獨立策展。本次參訪感謝臺藝大薛文珍副校長接待。



▲ 薛文珍副校長（前右2）與團員合影



▲ 參觀藝術展人員合影



▲ 參訪人員於士林官邸正館合影

6月6日與臺北市政府共同舉辦士林官邸深度人文生態之旅，工務局公燈處和文化局協辦。本次由邱琳濱常務監事與高宗正常務理事共同率團，共30人參加。士林官邸花園的各景點都深具故事性和歷史性，經導覽解說瞭解士林官邸內有4項建物已於2005年經內政部定為國定古蹟，可見其歷史意義重大，一般民眾來士林官邸看看花展純遊憩，經過深度導覽解說彷彿回到當時情境，也了解到官邸內建物和生態的緣由和其代表意義。參觀正館時戴上導覽耳機，了解先總統與夫人的起居作息，也知道先總統有每天寫日記讀報習慣。參觀結束後於正館前廣場合影留



▲ 邱琳濱常務監事代表致贈會旗

念，特別感謝市府薛春明秘書長全程陪同及相關工作人員協助安排，讓與會人員收穫良多，活動圓滿完成。

## 2020 IPEA及APEC Engineer 協調委員會年度會議

因新冠肺炎疫情，國際工程師協議（IPEA）及亞太工程師（APEC Engineer）協調委員會的年度會議，於2020年首度以視訊方式召開。

國際工程師協議（IPEA）年度會議於6月24日上午8點（台北時間）召開，由中華台北亞太及國際工程師監督委員會李建中主委、孫以濬副主委、曾大仁委員兼執行長、杜俊副執行長、工程會技術處陳義昌科長以及中



▲ IPEA年度會議視訊情形



▲ 李建中主委（右2）等代表參與國際工程師協議（IPEA）年度會議



▲ 本學會代表出席亞太工程師（APEC Engineer）協調委員會年度會議



▲ APEC Engineer協調委員會年度會議視訊情形

工會張武訓秘書長代表出席。會議由IPEA主席、與我友好之馬來西亞籍Dr. Gue See Sew全程主持，長達4個小時的會議，共16國40餘位代表跨時區開會，詳細討論會員國接受國際稽核的查核報告，並通過各國提出的年度報告。

亞太工程師（APEC Engineer）協調委員

會年度會議於6月25日召開，由李建中主委、秦中天副主委、孫以濬副主委、曾大仁委員兼執行長、工程會技術處陳義昌科長代表參與，行使會員權益。15國與會代表們多為舊識，透過視訊平台除了有效率地討論重要議案，也彼此問候。

## 參訪淡江大橋願景館

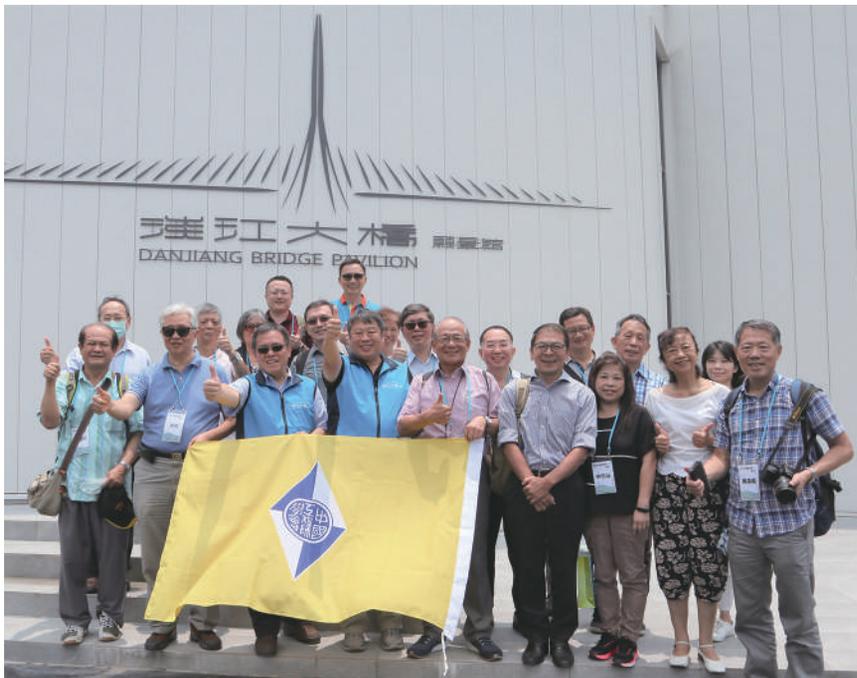
本學會得獎人聯誼委員會於109年7月28日舉辦「淡江大橋願景館」參訪活動，一行24人由張武訓秘書長帶領，活動順利圓滿。

交通部公路總局西部濱海公路北區臨時工程處，於新北市八里區建置淡江大橋願景館，館內利用科技的技術，巧思利用模型，結合3D影像動畫和觸控模式，透過現場解說人員說明展覽區五大區塊-「網來未來、設計美學、工程試驗、監控管制、環境生態」，參訪者如臨實境的了解淡江大橋的計畫緣起、設計內涵、施工中品質掌控及經濟效益。並

歡迎參觀者使用AR體驗完工後的景象。

感謝公路總局西部濱海公路北區工程處林廷彥副處長與主管同仁接待，中興工程顧問劉永輝經理精闢簡報，德國設計公司陳文凱技師回答深入技術問題。公關公司並就設施解說導覽，大家收穫滿滿。

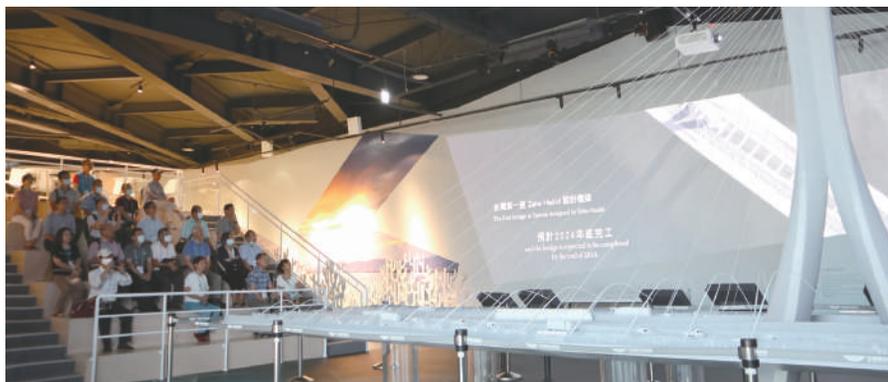
「淡江大橋願景館」是公路總局為提供民眾與工程界認識淡江大橋規劃、設計、施工與環境關係而設置的展示館。有意願參訪單位可以組團預約，願景館安排有專責人員



▲ 參訪人員於願景館合影



▲ 願景館聽取簡報



▲ 觀看淡江大橋影片與模型

解說，國語、英語或日語都無礙。

淡江大橋為跨越淡水河連結淡水區與八里區的大跨度橋梁，並與台2線、台15線、台61線西濱快速公路及台64線八里新店線快速公路快速連接，淡水與八里間交通不須再繞道關渡大橋，除可縮短15公里路程及有效改善關渡大橋之交通外，另亦為臺北港及淡海新市鎮提供聯外道路，使北部公路系統更臻完善。

參與本次參訪的團員大都為工程界專業人員，工程公司總經理與技師人數超過半數。為提升技術分享與學習，本學會將持續

舉辦工程參訪及聯誼活動，希望與會專家學者可分享心得並宣揚推廣我國工程成果。



▲ 張武訓秘書長代表接受公路總局贈禮

# 中國工程師學會學生分會109年會務評鑑

中國工程師學會教育委員會教育小組於8月13日假國立臺灣科技大學辦理109年學生分會會務評鑑，恭喜表現優異獲獎的學生分會。

本年度榮獲第一名為國立屏東科技大學學生分會，第二名為彰化師範大學學生分會，第三名分別為國立清華大學學生分會、中原大學學生分會及臺北市立大學學生分會，佳作由國立暨南大學學生分會獲得。

本學會各學生分會在過去一年持續積極推動會務，舉辦演講、業界參訪及廣納會員等。其中，國立屏東科技大學學生分會為本次參與評鑑中唯一位於南部地區的學生分會，成立僅一年時間但對會務推動不遺餘力，不因新冠疫情停頓，並能調整作法進行活動，招集會員涵蓋工學院同學，務實宣達中工會宗旨，也積極與學會洽談邀請本年度傑出工程教授赴學生分會進行演講及座談，獲得評鑑委員一致肯定，因此榮獲評鑑



▲ 國立屏東科技大學獲得第一名



▲ 國立彰化師範大學獲得第二名



▲ 國立清華大學獲得第三名



▲ 中原大學獲得第三名



▲ 臺北市立大學獲得第三名

第一名佳績。

另為使學生分會更加茁壯，評鑑委員本學會張武訓秘書長、教育委員會教育小組顏怡文召集人及蔡孟霖執行秘書持續宣導並鼓勵各學生分會參與學會所舉辦的參訪活動，以及舉辦講座邀請獲得傑出工程教授、傑出工程師及優秀青年工程師等獎項的年度得獎人進行分享，希望藉此將學會相關活動向下

紮根並進行實質的經驗傳承，以培育下一代的傑出的工程人員。

評鑑會議後張秘書長特別期許各學生分會同學可經常至中工會官網與臉書瞭解學會的活動並協助宣導，尤其是「工程師宣言」和各種國內外的聯誼與學術成果。張秘書長也與各學生分會交換意見及聯絡方式，以進一步協助各學生分會順利推廣相關會務。

## 「智慧科技應用」研討會與觀摩交流活動精彩豐收

本學會得獎人聯誼委員會與中興大學領袖學者助攻方案團隊、研發處、產學研鏈結中心於109年8月18日假中興大學圖書館第一會議室共同舉辦「智慧科技應用」研討會與觀摩交流活動。活動由張武訓秘書長兼主任委員率隊參訪，本學會中興大學學生分會12位會員踴躍出席，並有其他在校學生及來自北中南的會員熱情參與。

薛富盛理事（國立中興大學校長）首由致詞歡迎學員並介紹中興大學的規模與現況亮點，續由張秘書長表達感謝及宣導本學會甫公布的「工程師宣言」。張秘書長強調 蔡總統接見本年得獎人時亦引述宣言內容，期許各得獎人持續努力運用工程技術，追求環境永續發展，創造良好生活品質，造福全人類，活動續由蔡清池副主任委員（特聘教



▲ 出席人員於育成中心合影



▲ 出席人員於專題演講後合影

授兼副研發長) 主持。

中興大學重點發展農業生物科技，培植農業綠環境、環境保育與防災科技、人文社會科學等領域，另以地利之便支援中部科學園區廠商，引領臺灣綠色工程及精密機械產業發展，研發成果豐碩，並積極推動傑出研發成果的商品化，引領創新產業發展。本次活動特別邀請到楊明德、蔡清池、陳政雄、賴永康、陳全木、黃介辰等6位教授於上午進行專題演講，分享農業科技、生物科技、智慧機械等領域最新研究成果。下午則參訪中興大學校本部育成中心，促進產學交流與合作。由產學研鏈結中心林佳鋒主任及謝昌衛組長帶領育成廠商－育生醫有限公司、漢鼎智慧科技股份有限公司、台灣塔奇恩科技股份有限公司、智耕創新股份有限公司、大自然生技素材有限公司、康呈生醫股份有限公司、加特福生物科技股份有限公司等發



▲ 薛富盛理事致詞

表有關研發創業情形與成功上市產品，展現豐碩成果，與會人員討論熱烈，活動順利成功。

# 低溫儲槽工程實務與模組化工法之應用 — 專輯序言

中鼎工程股份有限公司總經理 / 陳裕仁

中鼎工程致力提供全球最值得信賴的工程服務，工程實績遍及亞洲、中東和美洲等地區，活躍於煉油石化、電力、環境、交通及一般工業等工程領域。面對競爭日趨激烈的國際統包工程市場，中鼎工程以豐富的全球統包工程專案管理經驗與實績，滿足客戶的客製化需求。秉持卓越追求、技術精進、工程效率提升及控制時間和成本之精神，落實設計、採購與建造，打造「一條龍式」的工程服務。

本專輯【低溫儲槽工程實務與模組化工法之應用】共分為五篇專題，介紹中鼎如何透過創新工程技術及工法，克服在工程執行的地域、天候及人力等不利現場施工等因素，有效降低工程執行時間和成本。

本專輯第一篇為低溫儲槽保冷設計：介紹如何以適當的保冷層選材與配置規劃，來確保儲槽內的低溫儲存物每天的蒸發氣(Boil Off Gas, BOG)量，以符合業主合約保證值之要求；並評估身為第二道安全防線的預力混凝土外槽，在儲槽正常

操作(Normal Operation)及內槽洩漏(Inner Spill Condition)狀況下的分析與設計。文中會以地上型全覆式雙層穹頂低溫儲槽(Full Containment Tank, Double Dome Type)的保冷設計為例，介紹保冷層選材與配置、蒸發氣量之計算關係、內槽底部保冷材承壓能力評估，以及預力混凝土外槽應力分析與設計。

第二篇為低溫儲槽施工工法探討：因低溫儲槽建造工序繁雜且緊密連結，在施工工序上，土木、保冷及內外槽體機械工項會交錯執行，要如何安排分段移交或同步協調作業工序，及各工種間於施工要求及保護措施，皆有極重要及密切關聯性，過程中任一環節失誤，對於品質、工期及成本皆可能造成重大衝擊。文中以雙層穹頂(Double dome roof) LNG地上型超低溫儲槽(Cryogenic tank)之建造工法為例，對槽體結構、施工應用法規、土木施工流程、機械施工流程、銲接作業、保冷施工及執行管控重點等提供說明。

第三篇為工程模組化作業之應用考量：



說明工程應用模組化建造時，有別於傳統建造的考量。模組化建造雖然具有許多亮點，包括現場施工工期短，施工效率與品質可控性好及施工安全性更高等優勢，但是要完成一個模組化作業的專案，也有許多重重的挑戰。文中對應用模組化的評估流程、規劃模組的考量因素、執行模組重量管理的需求、海象資料對模組運輸的影響、模組運輸的相關分析、模組間管線接合考量到模組運輸的防護措施等提供說明。

第四篇為淺談模組工法之結構設計：文中說明因應模組吊裝運輸的要求，如何處理結構複雜的力學行為。模組結構在設計過程中最大的挑戰在於如何避免模組在吊裝或運輸過程中變形，造成模組在現場安裝的困難。因此文中內容介紹模組結構設計特性、模組陸運分析設計、模組海運分析設計、模組吊裝分析設計等相關的考量。

第五篇為模組運輸實務簡介：在模組製作完成後，從模組預製廠離開到現場安裝前，要如何確保吊裝與運輸期間的穩定與安

全，是整個運輸過程中應注意的工程考量及查核重點，也是工程採用模組化作業成功的關鍵點，因此文中針對內陸運輸階段、海洋運輸階段及海事保險鑑定對於模組運輸的要求加以說明。

企業競爭優勢來自整合整體資源與提升相關工程技術，為因應日益競爭激烈的國際工程市場。中鼎工程將持續精進工程技術，去打造更多符合時代需求的優質工程建設，創造與國際統包工程競爭對手的差異化，永續打造「最值得信賴」的工程品牌。



# 低溫儲槽保冷設計

中鼎工程股份有限公司設備設計主任工程師 / 陳仲正

關鍵字：低溫儲槽、保冷、蒸發氣、預力混凝土

## 摘要

液化氣體是氣體經過壓縮並冷卻至凝結點溫度以下呈現液態，在低溫條件下儲存於儲槽內，為了維持低溫儲存狀態，必須隔絕外界溫度的影響。本文將介紹地上型全覆式雙層穹頂低溫儲槽 (Full Containment Tank, Double Dome Type) 的保冷設計，包含蒸發氣 (Boil Off Gas, BOG) 量之計算關係、內槽底部保冷材承壓能力 (Load Bearing Capacity) 評估，以及預力混凝土外槽應力分析與設計。

## 一、前言

液化氣體因為其低溫常 (低) 壓的儲存方式，具備儲存效率高、相對占地空間少、儲槽易於大型化 (儲存量) 等優勢而被廣泛的應用。液化氣體是氣體經過壓縮並冷卻至凝結點溫度以下呈現液態，在低溫條件下儲存於儲槽內，然而儲槽外部暴露在環境溫度下，造成儲槽內外溫差極大，尤其液化天然氣 (Liquefied Natural Gas, LNG) 儲槽設計

溫度更是下探至 $-160^{\circ}\text{C}$ 或更低，因此隔絕外界溫度影響的高性能保冷層，也是低溫儲槽設計重要的一環。

基於安全性的考量，低溫儲槽一般都是採取雙層槽設計，需考慮槽體構件材質低溫脆化與保冷隔熱問題，以全覆式儲槽為例，與低溫儲存物接觸之內槽構件，均採具有良好低溫耐衝擊特性之鋼材，外槽構件則使用預力混凝土或低溫鋼材，確保在內槽洩漏或失效的情境之下，仍可確保密封儲存的功能。內外槽之間採用保冷材料隔熱，以確保儲槽內之低溫儲存物每天之蒸發氣量符合業主合約保證值之要求；另外在外槽底部配置電熱系統 (Heating System)，以防止儲槽內的低溫儲存物透過熱傳效應，將冷能傳遞至儲槽基礎底下的土壤，使土壤裡的水份結冰膨脹隆起而造成基礎結構破壞。

## 二、低溫儲槽保冷設計流程

考量保冷施作空間需求，並依據不同的保冷層區塊的功能性需求 (保冷隔熱優先或

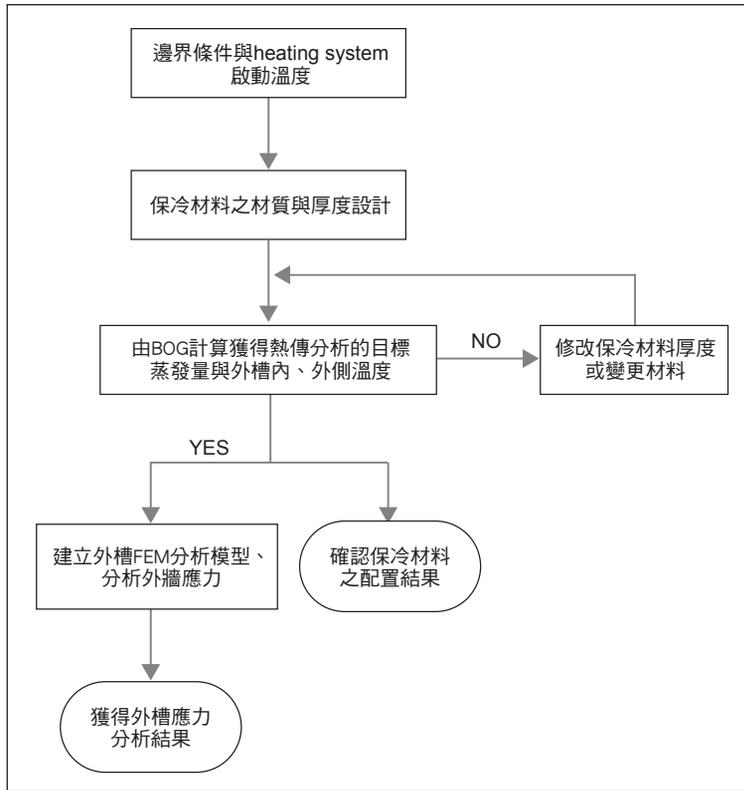


圖 1 低溫儲槽保冷設計流程圖

是抗壓載重能力優先)，於內外槽壁之間設置適當的保冷材料，並初步規劃保冷材料層數及其厚度。

接續評估保冷層所提供的溫度隔絕功效，在綜合外界環境溫度、外界風速、太陽輻射熱效應、槽底電熱系統等因素影響之下，儲存於儲槽內部之液化氣體，受熱蒸發而產生之BOG最大容許產生率保證值設計，是否合乎合約要求，藉此判定所選用之保冷材料及其厚度是否恰當。如果BOG之最大產生率超出合約要求，則重新規劃保冷材料的選用或設計厚度，直到BOG之最大容許產生率滿足設計保證值。

低溫儲槽保冷設計最後的步驟為外槽的應力分析與設計，一般低溫儲槽的外槽採用預力混凝土外牆與預力混凝土或鋼筋混凝土基礎底板，在進行外槽熱應力分析之前應先獲得外槽牆體內、外側的溫度梯度，此溫度梯度可由上述章節的保冷層規劃與設計及各種天候與時間下的BOG分析計算得到，有了溫度梯度資料後即可進行外槽預力混凝土牆與基礎底板於儲槽正常操作（Normal Operation）以及內槽洩漏（Inner Spill Condition）狀況下的分析與設計（參考ACI 376-11）。低溫儲槽保冷設計流程如圖1所示。



### 三、保冷層

#### (一) 選材與配置

內外槽壁之間的隔熱保冷層設置，大致上可分為槽頂保冷、槽側壁保冷以及內槽底保冷三個區塊，如圖2所示。保冷材料應具有使用壽命長、低熱傳導性、抗凍、耐火及不易燃等特性，槽底保冷材料亦需具備足夠的抗壓強度來承受儲槽本身和槽內儲存物的重量與外力負載。

槽頂保冷層規劃在內外槽頂之間，需充填質輕且保冷絕熱效能高的膨脹珍珠岩（Perlite Power）；槽側壁保冷層規劃則在內槽壁外側安裝彈性毯（Resilient Blanket），外槽壁內側鋪設TCP（Thermal Corner Protection），其餘空間則需充填膨脹珍珠岩，為了防止膨脹珍珠岩進入彈性毯內層，彈性毯與膨脹珍珠岩之間以玻璃纖維布隔離。

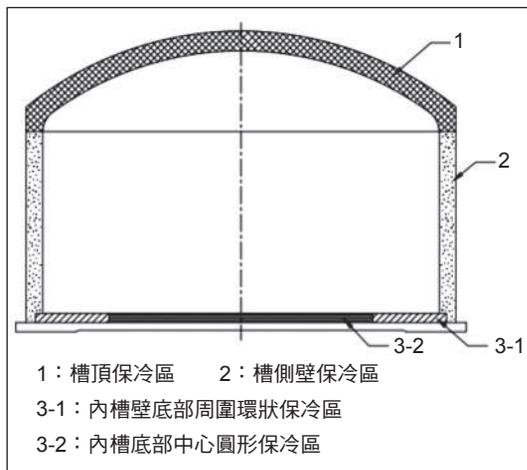


圖 2 保冷層區域示意圖

依據槽底受力分佈情況與減少冷損的保冷需求下，將槽底保冷層規劃成內槽壁底部周圍環狀區與中心圓形區，再依照選用材料逐層堆疊組成，一般採用剛性多孔玻璃（Cellular Glass）、珍珠岩混凝土（Perlite Concrete）、輕質混凝土（Lightweight Aggregated Concrete）等作為主要保冷材料。由於內槽壁底部保冷材料須承載內槽構件與槽頂/槽側壁保冷層等重量，以及地震力荷載，選用材質的整體抗壓強度、密度會高於中心圓形區；低溫儲槽底部主要是藉由熱傳導形式進行熱量傳遞，而且中心圓形區不需要具備與環狀區等同的強度，採用的保冷材料以隔熱性能為優先，熱傳導率則相對較低，以提供溫度隔絕的功效。

#### (二) 抗壓強度評估

內槽底部保冷層應具有足夠的承重能力，其抗壓強度亦須確保可以滿足設計條件，並符合業主設計規範中承壓荷載的安全係數之要求。

依據不同的設計情境，評估儲槽操作、水壓試驗、運轉基準地震（Operating Basis Earthquake, OBE）、安全停機地震（Safe Shutdown Earthquake, SSE）等情境下的設計載重組合，再各別計算每一層保冷材料的承壓受力情況，並透過調整保冷材厚度與更換保冷材質的方式，反覆確認，確保其抗壓強度符合設計規範。

載重則包含來自於設計壓力、水壓試驗壓力、內槽構件重量、保冷材料重量、儲存流體重量、水壓試驗流體重量、地震力等造



成之效應。並依據中心圓形區或環狀區的劃分，評估相對應的設計載重組合。

#### 四、蒸發氣產生率 (BOG Rate)

液化氣體以低溫液態方式儲存於儲槽內，由於儲槽外部暴露於大氣溫度下，大氣溫度與液化氣體的溫度相差極大，熱傳效應使外界環境之熱能傳輸 (Heat In-leak) 至槽內，使儲存於儲槽內部之液化氣體受熱蒸發而產生蒸發氣。

蒸發氣產生率與儲槽保冷材料選用及設計有著密切關係。而蒸發氣之最大容許產生率保證值依不同業主、不同合約，有不同的規範。因此保冷材料之選用及設計將依合約中所規範之最大容許蒸發氣產生率保證值設計。

蒸發氣產生率一般定義為於合約規範之儲槽最高液位及氣候條件下，每天的蒸發氣產生率。

依API 625規定，蒸發氣產生率之計算必需考慮以下氣候條件：

1. 日平均最高大氣溫度 (Highest One-day Mean Temperature)
2. 無風速 (No Wind)
3. 太陽輻射熱效應 (Solar Radiation Effects)

##### (一) 總熱通量 (Total Heat Influx) 計算

總熱通量之計算如下式 (1) 所示。

$$Q_{\text{Total}} = Q_b + Q_s + Q_r \quad (1)$$

$Q_{\text{Total}}$ ：總熱通量 (Total Heat Influx)(W)

$Q_b$ ：槽底熱通量 (Heat Influx through Bottom Part)(W)

$Q_s$ ：槽側壁熱通量 (Heat Influx through Side Wall Part)(W)

$Q_r$ ：槽頂熱通量 (Heat Influx through Roof Part)(W)

由於儲槽底部之中心圓形區與周圍環狀區所選用之保冷材料或層數可能不同，造成熱傳導率與熱通量均不同，因此儲槽底部之中心圓形區與周圍環狀區之熱通量必須分別計算，槽底之熱通量與下式 (2) 所示。

$$Q_b = Q_{bi} + Q_{bii} \quad (2)$$

$Q_b$ ：槽底熱通量 (Heat Influx through Bottom Part)(W)

$Q_{bi}$ ：槽底中心圓形區熱通量 (Heat Influx through Center Part of Bottom)(W)

$Q_{bii}$ ：槽底周圍環狀區熱通量 (Heat Influx through Ring Part of Bottom)(W)

各熱通量之區域示意圖如圖3表示。

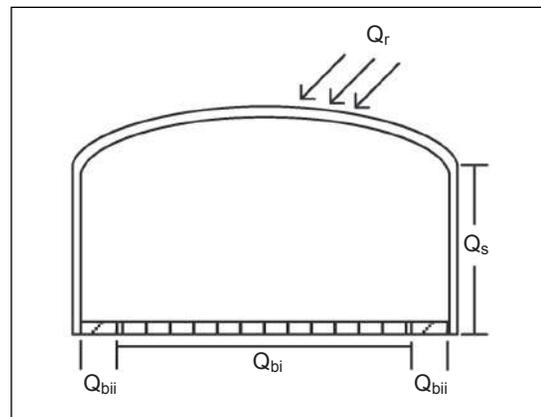


圖 3 熱通量區域示意圖



## (二) 槽底熱通量 (Heat Influx through Bottom Part) 計算

儲槽底部之熱量傳遞方式主要是藉由熱傳導形式進行，而其熱通量不受白晝及晚間而有所影響。

其槽底中心圓式區及周圍環狀區之熱通量計算如下式 (3) 及 (4) 所示。

$$Q_{bi} = U_{bi} \times A_{bi} \times \Delta T_b \quad (3)$$

$U_{bi}$ ：槽底中心圓形區平均熱傳係數 (Average Heat Transfer Coefficient) (W/m<sup>2</sup>-K)

$A_{bi}$ ：槽底中心圓形區受熱面積 (Heat Transfer Area) (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_b$ ：槽底兩壁面之溫度差 (Temperature Difference) (K)

$$Q_{bii} = U_{bii} \times A_{bii} \times \Delta T_b \quad (4)$$

$U_{bii}$ ：槽底周圍環狀區平均熱傳係數 (Average Heat Transfer Coefficient) (W/m<sup>2</sup>-K)

$A_{bii}$ ：槽底周圍環狀區受熱面積 (Heat Transfer Area) (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_b$ ：槽底兩壁面之溫度差 (Temperature Difference) (K)

其平均熱傳係數之計算可依儲槽底部中心圓形區及周圍環狀區之保冷材料之層數、不同層保冷材料之厚度及其各保冷材料之熱傳導率計算之，如下式 (5) 及圖4所示。

$$U_b = \frac{1}{\left(\frac{t_{b1}}{\lambda_{b1}} + \frac{t_{b2}}{\lambda_{b2}} + \frac{t_{b3}}{\lambda_{b3}}\right)} \quad (5)$$

$U_b$ ：槽底平均熱傳係數 (Average Heat

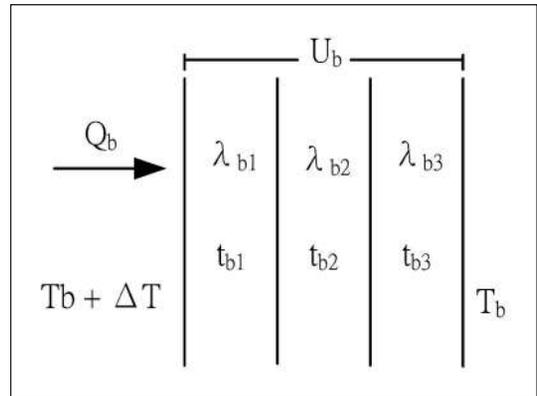


圖 4 平均熱傳係數與各保冷材關係示意圖

Transfer Coefficient) (W/m<sup>2</sup>-K)

$t_{b1,2,3}$ ：各層保冷材之厚度 (Cold Insulation Thickness) (m)

$\lambda_{b1,2,3}$ ：各層保冷材之熱傳導率 (Cold Insulation Thermal Conductivity) (W/m-K)

## (三) 槽側壁熱通量 (Heat Influx through Side Wall Part) 計算

儲槽側壁之熱通量計算與儲槽底部熱通量之計算同，但必須考慮於白晝期間儲槽一側會受太陽照射，故該側槽壁之熱通量必須考慮太陽輻射熱之影響。

儲槽側壁熱通量如式 (6) 所示。

$$Q_s = U_s \times A_s \times \Delta T_s \quad (6)$$

$U_s$ ：槽側壁平均熱傳係數 (Average Heat Transfer Coefficient) (W/m<sup>2</sup>-K)

$A_s$ ：槽側受熱面積 (Heat Transfer Area) (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_s$ ：槽側兩壁面之溫度差 (Temperature Difference) (K)



於白晝期間受太陽照射之影響，單位面積所吸收之熱量如式(7)、(8)及(9)所示。

$$q = q_r + q_c \quad (7)$$

$q$ ：單位面積所吸收熱量(Rate of Heat Absorption)( $W/m^2$ )

$q_r$ ：單位面積受熱輻射影響之熱量(Rate of Surface Emit Radiation)( $W/m^2$ )

$q_c$ ：單位面積受熱對流影響之熱量(Rate of Heat Flow by Convection)( $W/m^2$ )

$$q_r = \varepsilon \times \sigma \times (T_s^4 - T_a^4) \quad (8)$$

$\varepsilon$ ：放射率(Emissivity)

$\sigma$ ：玻爾茲曼常數(Stephan-Boltzmann Constant)( $W/m^2-K^4$ )

$T_s$ ：儲槽外壁表面溫度(Surface Temperature)(K)

$T_a$ ：大氣溫度(Ambient Temperature)(K)

$$q_c = h \times (T_s - T_a) \quad (9)$$

$h$ ：表面對流係數(External Convection Coefficient)( $W/m^2-K$ )

從式(7)、(8)、(9)及業主規範所訂之太陽照射下之單位面積所吸收之熱量可計算出在白晝期間受太陽照射下該儲槽側壁之壁面溫度。

#### (四) 槽頂熱通量(Heat Influx through Roof Part) 計算

儲槽頂部之熱通量計算與儲槽側壁之熱

通量計算同，必須考慮於白晝期間儲槽頂部受太陽照射之輻射熱影響。以雙層穹頂式儲槽為例，儲槽頂熱通量如式(10)所示。

$$Q_r = U_r \times A_r \times \Delta T_r \quad (10)$$

$U_r$ ：槽頂平均熱傳係數(Average Heat Transfer Coefficient)( $W/m^2-K$ )

$A_r$ ：槽頂受熱面積(Heat Transfer Area)( $m^2$ )

$\Delta T_r$ ：槽頂兩壁面之溫度差(Temperature Difference)(K)

受太陽照射下輻射熱影響之槽頂頂面溫度可依式(7)、(8)、(9)及業主規範所訂之太陽照射下之單位面積所吸收之熱量計算而得。

#### (五) 蒸發氣產生率計算

低溫儲槽內容物受外界溫度影響，受熱所產生之蒸發氣如式(11)所示。

$$R = 24 \times 3600 \times Q_{Total} / (V \times \rho \times L) \times 100 \quad (11)$$

$R$ ：蒸發氣產生率(BOG Rate)(wt%/day)

$V$ ：儲槽於最高液位下之容量(Tank Content Volume)( $m^3$ )

$\rho$ ：儲槽內容物之密度(Density)( $kg/m^3$ )

$L$ ：儲槽內容物之潛熱(Latent Heat)(KJ/kg)

利用式(11)可求得每日蒸發氣質量產生率，並與合約規範中所訂之最大容許蒸發氣產生率保證值比較以判定所選用之保冷材料、保冷材料層數及其厚度是否恰當。



## 五、預力混凝土外槽應力分析

預力混凝土外槽分析上分為熱傳導分析以及熱應力分析。

### (一) 熱傳導分析

熱傳導分析主要是確定外槽壁各區域的溫度，以及是否有低於 $-20^{\circ}\text{C}$ 的區域，由於低溫因素，鋼筋、混凝土、預力鋼材等應採用非線性的材料參數。分析模型如圖5所示。

有限元分析模型元素採用立體元素 (Solid)，並且將網格 (mesh) 劃分成較細密的單元，以檢核牆內鋼筋與預力鋼材的應力-應變與牆內各點的溫度。

### (二) 熱應力分析

熱應力的分析模型與圖5熱傳導分析一致，可續用以進行熱應力分析，熱應力分析主要的分析重點在於混凝土、鋼筋、預力鋼材的應力-應變，並檢核殘餘壓力區 (Residual Compression Zone, RCZ) 的應力以及裂縫寬度，尤其是TCP以上的位置。

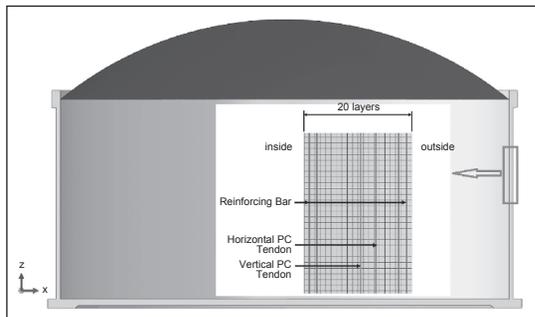


圖 5 熱傳導分析模型

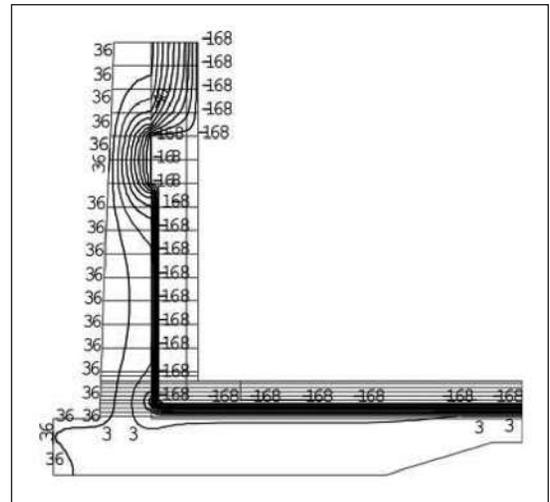


圖 6 TCP 以上的溫度變化

預力混凝土外槽的設計必須能夠容納內槽溢出的液體與氣體，因此一旦內槽發生洩漏，低溫液體將逐漸流入內、外槽間的環形空間 (Annular Space) 內，此過程剛開始時，低溫液體將保留在TCP區域內，一旦液體到達TCP的上緣，表示TCP在預力混凝土牆錨定溫度低，有最大荷載，詳圖6所示，其原因是鋼製埋件冷卻收縮，而混凝土的溫度尚未受冷，因此不會收縮，ACI 376-11 規定，為確保TCP錨定板 (Anchor Plate) 不會由牆面脫落，TCP錨定區上方至少兩倍牆厚之區域，最大裂縫寬度為 $0.2\text{ mm}$ ，如圖7所示。

分析時，有限元模型應考慮溫度隨時間變化過程，進行瞬時非彈性分析，開裂分析應反映混凝土應力-應變性能以及考慮受拉硬化效應，混凝土開裂計算應採用BS EN 1992-1-1的規定進行，裂縫寬度計算採用特徵值而不是平均值。

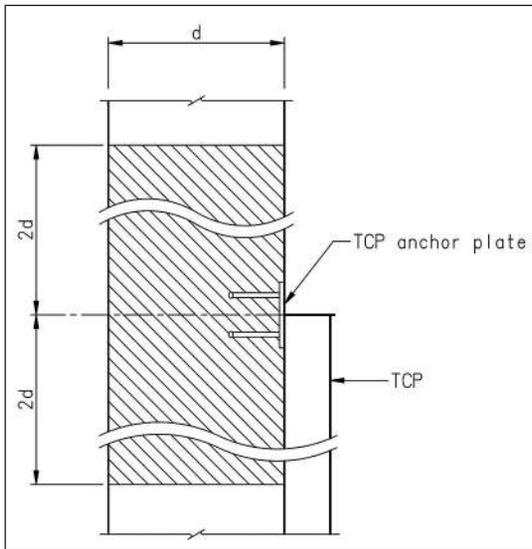


圖 7 TCP 處之錨定

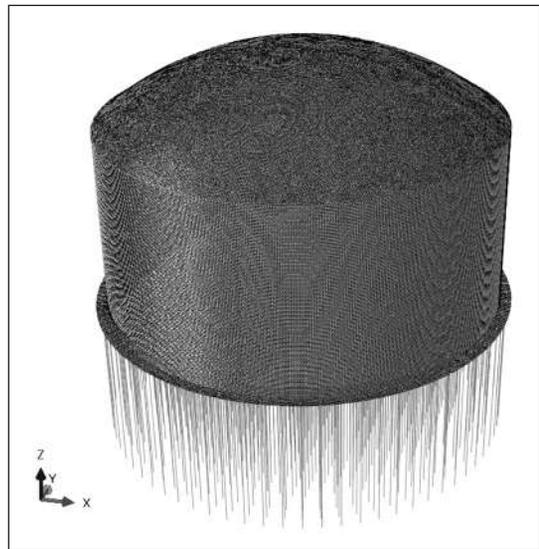


圖 8 內槽洩漏 +OBE 地震 (or ALE 地震) 分析模型

內槽洩漏，外槽必須容納液體並抵抗氣體壓力，因此混凝土橫截面必須滿足液密性的需求，EN 14620僅要求在混凝土橫截面內形成100 mm的RCZ，但ACI 376-11則要求橫截面的10%或90 mm，兩者取大值，再加上混凝土RCZ的平均殘餘壓應力不得小於1 MPa (1 N/mm<sup>2</sup>)，ACI 376-11規定的RCZ之壓縮應力1 MPa已被視為最低要求。

如果液體與氣體繼續洩漏，液位繼續升高，低溫液體會直接與預力混凝土牆接觸，混凝土開始冷卻。由於洩漏的流量與液位的升高是未知的，通常會檢驗4-5個液位，最高液位與TCP錨定液位，以及介於這兩者間的兩個液位。考慮以上各種液位後，槽壁最大彎矩通常出現於TCP錨定的正上方區域大約2d的範圍內，如圖7所示。

最後將熱應力的分析結果結合OBE地震

力(BS EN 14620)或是ALE餘震地震力(SSE After Shock Level Earthquake = 0.5xSSE，ACI 376-11)進行鋼筋、混凝土與RCZ的應變檢核，分析模型如圖8所示，分析模型材料依然採用非線性材料參數。

如在正常操作或緊急(包含洩漏)的情況下，鋼筋溫度降到-20°C以下的區域，對鋼筋有更嚴格的要求，設計時需降低鋼筋的容許拉應力，或是改用低溫鋼筋，但採用低溫鋼筋成本相對較高。

## 六、結論

冷凍儲槽保冷材料之設計，含保冷材料之選擇、保冷材料厚度、保冷材料層數等應依合約規範中所訂之最大容許蒸發氣產生率保證值設計，以設計最佳效益、符合成本之保冷材料。基於安全性的考量，當內槽洩漏



所引發的低溫衝擊效應，外槽應提供相對應的設計與防護措施，確保其品質及安全性滿足設計要求。

#### 參考文獻

1. ACI 376-11 “Code Requirements for Design and Construction of Concrete Structures for the Containment of Refrigerated Liquefied Gases and Commentary”.
2. NFPA 59A “Standards for Production, Storage and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG)”, 2019.
3. API 625 1st Edition “Tank system for Refrigeration Liquefied Gas Storage”, 2019.
4. BS EN 14620 “Design and Manufacture of Site Built, Vertical Cylindrical, Flat-bottomed Steel Tanks for the Storage of Refrigerated Liquefied Gases with Operating Temperature between 0 ~ -165°C”, 2006.
5. Adrian Bejan and Allan D. Kraus “Heat Transfer Handbook”, John Wiley & Sons, INC.
6. Josef Rötzer “Design and Construction of LNG Storage Tanks”, Ernst & Sohn.
7. BS EN 1992-1-1 “Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings”, 2004.



# 低溫儲槽施工工法探討

中鼎工程股份有限公司建造營運部品管經理 / 張宗霖

關鍵字：LNG、Cryogenic Tank、Dome Roof、銲接程序、SAW、ISO 3834、Special Process

## 摘要

低溫儲槽於工業及能源領域有許多使用案例，尤其近年來臺灣及國際上許多先進國家，對液化天然氣（LNG）之類的潔淨能源有快速需求成長，因此有大量興建此類儲放設備之需求，但此類設備具有超低溫、易燃、易爆及體積龐大等諸多危險特性，於國際上亦曾發生過多起因設備或系統失效致人員、環境及設備遭受嚴重傷害或財物損失之案例[1]，因此如何安全妥善的建造及使用此類設備，便成為一重要課題，必須有特別嚴謹之風險評估[1]與設計及製造上之考量。

本文主要以大型雙層穹頂（Double dome roof）LNG地上型超低溫儲槽（Cryogenic tank）為案例，對其槽體結構之土木、保冷及機械等工項之建造工法流程及施工重點做一介紹及探討。

## 一、前言

近年來全球對於LNG能源資源的需求有非常快速成長，為符合此需求，大量的

運輸、接收、儲存、製程及傳送設施不斷建立，臺灣亦預計至2025年以天然氣進行發電將占總發電結構50%比例[2]，同時國家潔淨能源政策亦持續積極推動中，因此除已完成之台灣中油永安天然氣接收站、北部液化天然氣接收站一、二期工程與目前執行中的第三期工程外，可以預見後續至少有台灣中油及台電之天然氣接收站擴建及新建案將陸續積極推展，類似LNG液化氣體能源之運輸、接收及儲存設施之大量建造需求，已是國內外必然趨勢，然此類設施屬高度易燃易爆之危險性設備，於安全風險評估、施工程序控管、品質確保與操作安全防範，皆須有相對較高之要求標準，對於工程施工技術、經驗、程序控管及人員要求，當然需有嚴謹之確認及控管才能確保其品質及安全性。

因低溫儲槽通常啟用後即不易再進行開槽維護，故於施工過程中必須由具優良技術、經驗及合格之人員，進行周全規劃、嚴密控管與落實執行，始能確保所建設之儲槽無所失誤達到設計要求之性能及品質，中鼎公司於此領域亦已有很長一段時間之涉略與

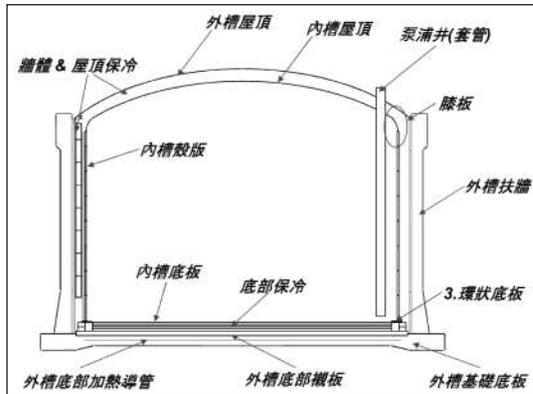


圖 1 槽體結構

研究，於海內外已成功承攬過多座低溫儲槽與接收站設施之EPCC興建案，於此以實際建造完成之案例做槽體建造施工之介紹及探討。

### 一、槽體結構

以雙層穹頂地上型超低溫儲槽主體結構而言，可簡要分類成三大部分，即混凝土結構外槽、金屬結構內槽及內外槽間之保冷層，主要結構配置（如圖1）。

### 二、施工應用法規

臺灣一開始建造地上型LNG儲槽是依據API-620（內槽）及BS 7777（外槽）法規進行設計及建造，但EN-14620發表後有取代BS-7777趨勢，而勞動部亦認可以EN-14620標準進行LNG儲槽外槽檢查，故後續興建地上型LNG儲槽之應用法規已修正為API-625（內槽）及EN-14620（外槽）。

### 三、低溫儲槽施工流程及執行概況

以低溫儲槽本體施工而言，其建造施工主要項目可概略分為土木（夯實、地改、基樁打設、基礎、外牆）、機械（外槽底襯板、外槽襯板、內外槽頂、內槽底板、殼板、泵浦井、內部管線）及保冷（底部、殼側及槽頂保冷）、儀電（儲槽底部加熱系統、儲槽基礎傾斜追蹤系統、電力供應系統、照明系統、溫測系統、液位量測系統）及附屬設備（輸送泵浦、安全閥、消防設備）等，圖2為相關之建造施工流程圖，以下將對相關施工作業流程進行介紹。

#### （一）土木施工工項

土木施工工項可概略分為地質改良及基樁打設、外槽底板施工、外牆施工及臨時開口封閉等四個主要工序，其在施工過程會與機械及保冷施工有所介面，故會配合機械工項執行外襯板、槽頂結構、臨時開口封閉及保冷等，安排分段移交或同步協調作業工序規劃流程（如圖3）。

##### 1. 地質改良及基樁打設

大型低溫儲槽所占面積廣大，單一槽體而言其基礎底板直徑超過數十米，於臺灣地區常以臨海填海造陸之新生地進行建造，因建造完成後之沉陷量及土壤液化等條件對低溫儲槽使用壽命及安全性有重大影響，故於設計規劃階段除對低溫儲槽所處地質充分鑽探調查外，亦以地質改良工法進行必要改善，以確保日後所完成之低溫儲槽具備安全承載、側向地震力及土壤液化之完備抵抗能力。

以所舉案例而言，其對基樁外圈以動力

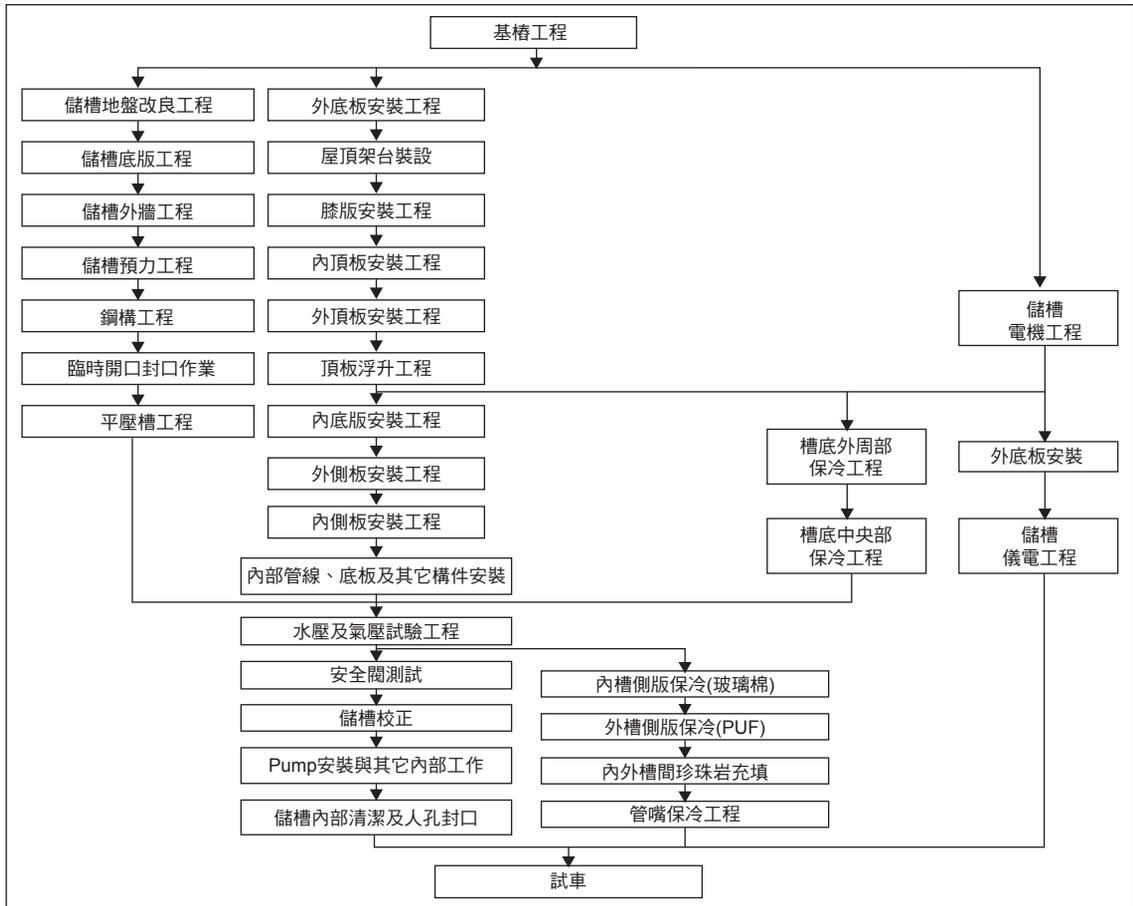


圖 2 低溫儲槽施工流程

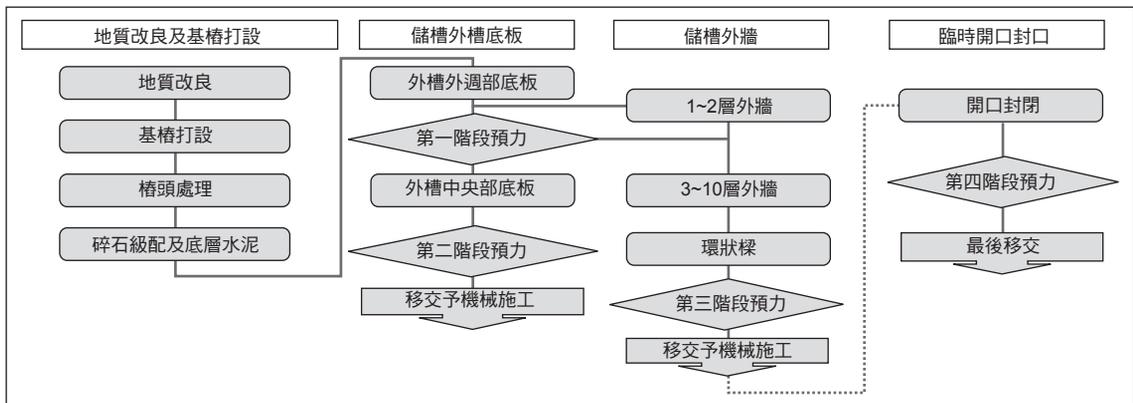


圖 3 土木施工工項

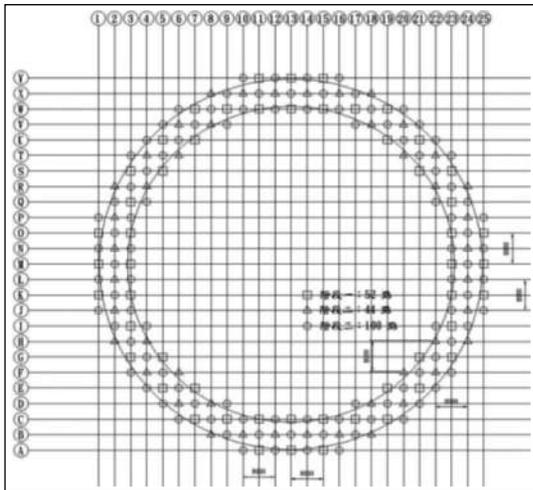


圖 4 動力夯實區夯實點配置

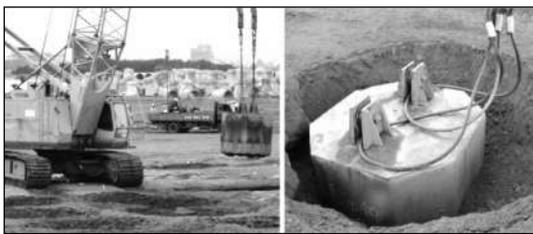


圖 5 動力夯實區夯實點施工

壓密法進行動力夯實地質改良（如圖4及圖5），使用大型夯錘、採高落距、設定夯點距離、每點多次夯擊、經由主搗實及搭配補強搗實於各次搗實點間靜置數日觀察，並進行驗證試驗至達到設計要求為止。

若基樁周圍施作無受影響之設備或設施，則可使用打擊式預力混凝土基樁工法，以所舉案例每座儲槽使用數百支以上大直徑之預鑄混凝土預力基樁打入深度近數十米之承載層，結合樁底承載力及樁身摩擦力達到



圖 6 基樁打設情形

基樁設計要求承載力（如圖6）。

## 2. 儲槽外槽底板施工

儲槽外槽底板施作分為外槽中央部底板及外周部底板（環繞於中央部底板外側），底板施工過程依序為碎石級配回填、無筋混凝土澆置、防水膜塗敷、樁頭處理、鋼筋綁紮、錨帶安裝、熱導管安裝、沉陷監測系統安裝、預力鋼鍵套管安裝、預埋件安裝、模板組立最終進行混凝土澆置（如圖7）。

## 3. 儲槽外牆施工

案例儲槽是採用系統模板進行牆身施工，區分為數層及環狀樑進行施工，系統模板以每層依設計規劃之方式進行漸次升模（如圖8），當外牆施工至頂層時會與頂層預埋件及襯板結構進行連結，以利做為外槽槽頂結構之固定及組立銲接，其會在最頂層牆身綁筋前進行安裝（如圖9）。

## 4. 臨時開口封閉

儲槽臨時開口主要作為施工期間之材料、機具、人員及槽頂升頂之出入及設備架設之臨時預留通道，對建造施工而言有其重要及便利之功能，其封閉時機為內槽機械施工完成及夾層保冷施工開始之前，亦是土庫

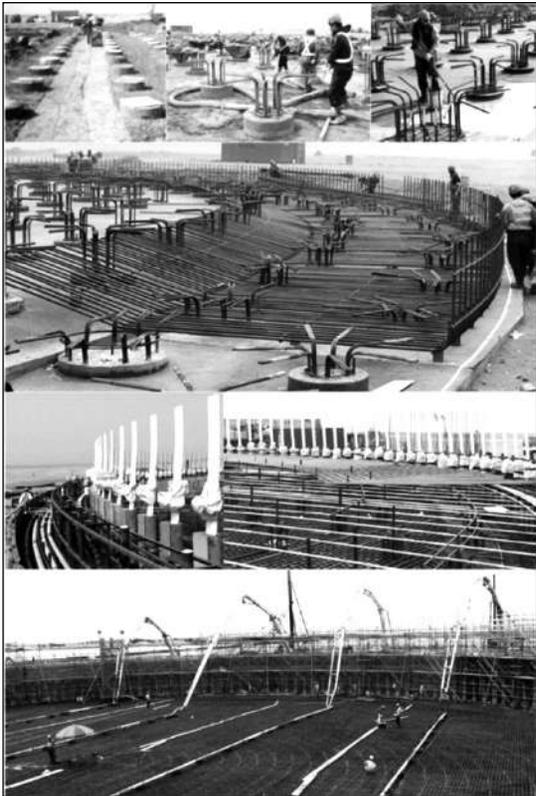


圖 7 儲槽外槽底板施工



圖 8 外牆系統模板升模施工

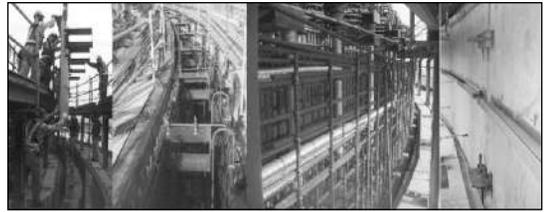


圖 9 頂層預埋件及襯板結構安裝及綁筋



圖 10 臨時開口封閉

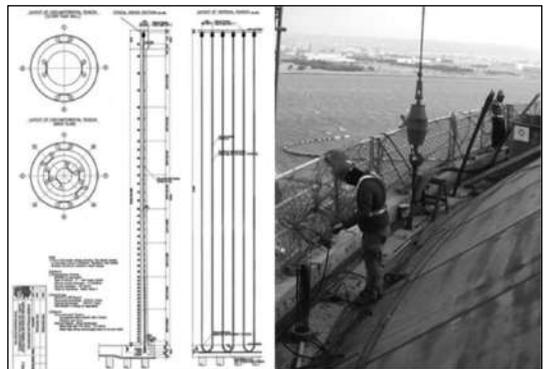


圖 11 預力鋼鍵佈置作業

施工之最後施工收尾階段，封閉臨時開口時一樣需安裝外牆碳鋼內襯板、預力套管及以續接器進行鋼筋連結，然後再進行組模及混凝土灌漿，臨時開口封閉施工狀況如圖10所示。

### 5. 儲槽外牆預力作業

外槽底板及牆身完成後會對牆身進行預力施加作業，主要對牆身進行混凝土之水平及垂直方向施行預力，首先進行鋼鍵佈置（如圖11），再行預力施加，水平預力為將鋼鍵錨定於外槽4座扶牆上施行預力，垂直預力則是將鋼鍵穿過底板U型套管後錨定於牆身環樑之頂部，並於施作預力後以砂漿注入套



管內封填（如圖12）。

## （二）機械施工工項

低溫儲槽之機械施工工項可概略區分為四項，即內槽槽體、外槽襯板及屋頂結構、



圖 12 垂直及水平預力與封填作業

保冷及內部管線/泵浦/儀表/電機/底板加熱系統等附屬設備施工，其中保冷施工會另外交由專業保冷施工團隊執行，於工序中土木、保冷及內外槽體機械工項會交錯執行，例如土木之外槽臨時開口與頂層預埋件須配合機械工項進行，而外槽底部襯板施作完成交予底部環狀部保冷施工，然後再接續執行內槽環狀板安裝…等，各工種間於施工公差要求及保護措施有極重要及密切關聯性，任一環節失誤可能導致儲槽無法達到設計要求，彼此間之作業要求重點及協調溝通必須正確及緊密流暢，如圖13為機械施工流程。

另在執行儲槽機械工項施工時，銲接作業有其極重要角色，亦是低溫儲槽建造管制重心所在，因此對於銲接作業執行前之規劃、材料選用、檢試驗計畫、銲接設備配置、銲接程序檢定、銲接人員訓練及資格檢定、銲接中之銲接作業管制及銲接後之檢驗

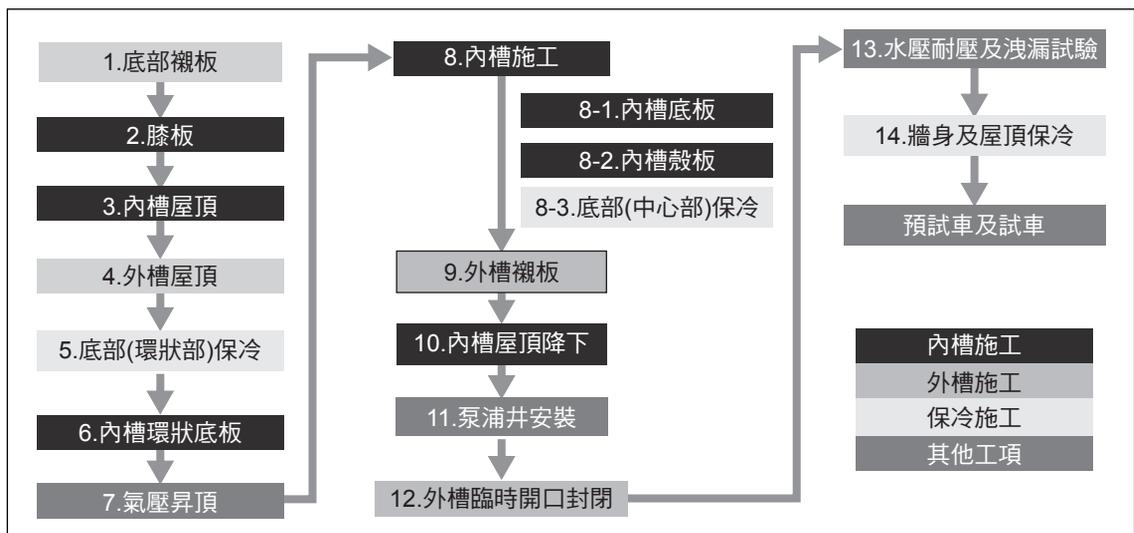


圖 13 機械施工流程

與文件驗證控管等，皆必須詳細規劃、確實執行。低溫儲槽之銲接作業要求重點及標準於內外槽間各有不同要求，外槽部位之銲接主要在提供混凝土外槽之底板牆及身內面襯板之水氣隔絕與氣密功能，及預埋件與槽頂結構之製作安裝，主要以碳鋼構件為主，雖為碳鋼構件，但因外槽構件於正常操作時須具備氣封氣密功能，且萬一內槽洩漏時將成為臨時阻絕洩漏之防液堤，因此在母材及銲材選用上可能會有別於一般碳鋼設計考量，故於銲接規劃時仍須留意有無特殊銲接要求，至於內槽銲接則是整個低溫儲槽銲接控管重點，目前常見超低溫儲槽內槽選用材質為不銹鋼或鎳鋼，其中鎳鋼銲接因具有異材質及高強度淬火回火鋼銲接特性，銲接技術要求及管制難度較高，需有更完整嚴謹之規劃、驗證及執行控管。

以下所述為低溫儲槽機械施工基本執行程序及工項：

### 1. 銲接程序檢定及銲工及銲接操作員檢定

#### (1) 銲接程序規劃及檢定

進行銲接程序規劃時，須參照規範、法規、設計圖面、技術資料等規定，依材料特性、成功經驗及適用銲接設備，進行規劃、送審及測試驗證，下圖為雙穹頂地上超低溫儲槽鎳鋼內槽之槽頂、膝板、殼板、環狀板及底板之銲接規劃（如圖14）。

以內槽銲接管理而言，有必要對各部位接頭之施工特性做詳實規劃及充分考量，依循ASME Section IX法規所發展出之銲接程序部份摘錄，實際執行所需控管銲接程序遠多於此，主要是須將所有執行銲接接頭之銲

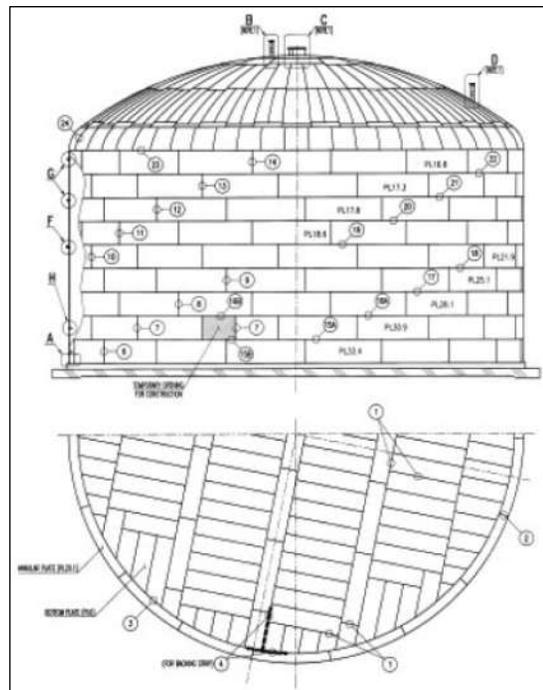


圖 14 內槽主要銲接規劃

接方法定義清楚，因銲接程序不僅是對銲接製程進行驗證，更重要的是須讓第一線之銲接領班及銲工，清楚明瞭相關細節並落實遵循。

銲接程序規劃完成後須再經程序檢定予以驗證銲道實際性能，以確認銲道非破壞檢驗完整性及機械性能皆符合設計要求，鎳鋼銲接具異種材質特性，且將銲道衝擊值及母材淬火回火性能維護列入考量時，則銲接入熱量控制就顯得非常重要，以下（圖15）所示為以立銲進行程序檢定之銲接與測試過程，及程序檢定機械性能測試過程。

#### (2) 銲工及銲接操作員檢定

銲工及銲接操作員檢定須依據檢定核准



圖 15 程序檢定及機械性能測試過程



圖 16 焊工及銲接操作員訓練及檢定

完成之銲接程序執行，所須檢定之材質、厚度、姿勢及人員數量，須依實際施工需求及人員穩定性進行考量，鎳鋼銲接操作難度及技能要求較高，於檢定考試之前通常會執行先期訓練及評量，對應試之銲工進行鎳鋼特性解說、訓練及技能評估，若於訓練階段無法達到評量標準即予以汰除，以維持鎳鋼銲工基本技能水準及服從管理與穩定性，鎳鋼之外之不銹鋼及碳鋼亦須依程序進行妥善管制，通過檢定之合格銲工須對其正式銲接過程之穩定度進行考核，以目視及非破壞檢驗結果進行銲道品質追蹤，違規或不良率過高之銲工應立即取消銲工資格，如圖16。

## 2. 銲接作業管制措施

銲接作業的成功與否，除程序及人員檢定外，銲接管制扮演著極重要角色，自母材準備、下料、治具選用、組立、變形防止、機具配置、人員管制、天候控管、防護措施、清潔、銲材管制、銲接參數控制、缺陷管制及鏟修、檢試驗、紀錄文件…等，舉凡與銲接前、中、後相關及確保銲接施工所有步驟皆符合既定程序規劃要求之管制，皆屬於銲接作業必要管制措施。為達到完善管制目的，亦可能發展出許多必要管制程序書，例如銲接作業管制程序書、銲材管制程序書、施工作業及品質管制程序書、檢驗程序書、檢試驗計畫書、安全管制程序書…等，以做為銲接作業管制必須遵循之依據。

除了相關規定之制定外，有經驗合格之足夠管制人員配置與落實執行，更是銲接作業管制成敗與否的關鍵，因此有適當經驗之銲接專家、銲接工程師、銲接檢驗師、非破壞檢驗人員、監工、銲接領班、銲材管理員甚至安衛環人員，皆是銲接作業成功與否的重要管制成員，需以團隊的方式緊密結合運作，進行必要訓練、聯繫溝通及對實際銲接作業狀況評量討論。

## 3. 底部襯板施工

於土木外槽基礎底板完成後，隨即進行外槽底部襯板鋪設施工，如圖18為底部襯板鋪設及銲接概況，施工過程中較須注意之事項為銲接變形及殘留應力防範，須妥善規劃銲接工序，例如由中心開始、由內向外、平衡銲法、跳銲等，使銲道均勻收縮避免橫向收縮變形，及使用配重塊與拘束治具壓制銲接角變形產生，以期讓底部襯板銲道熔合完整及伏順平貼，而於銲道交錯處應使其完整



圖 17 底部襯板鋪設、銲接及檢驗

熔合與平順疊銲，銲接完成後則依相關規定執行目視及相關非破壞檢驗，如圖17。

#### 4. 槽頂組立及施工

雙層穹頂儲槽槽頂施工工法，會將內外槽槽頂先行於槽外預製及槽內組裝，於組裝、銲接及檢驗完成後，再以氣壓吹浮方式將整體槽頂結構浮升至混凝土外槽頂部，與外槽頂預埋件進行銲接固定，升頂完成後槽內施工作業可不再受天候影響。內槽頂結構可大致區分成膝板（Knuckle Plate）、槽頂結構模組（Roof block）及槽頂中心頂冠（Top Crown）三大部分，設計上彼此可獨立進行預製再行連結，為爭取時間及降低槽內現場施工負荷量，基本上會先行於其他適當場地進行預製，再移至內槽做最後組銲。

##### (1) 內槽膝板預製、組裝及銲接

內槽槽頂膝板因位於槽頂最下端之與殼板接合轉折處，厚度最厚且形狀複雜具急遽應力受力變化特性，由於材質、厚度及形狀的特殊條件，致其板材成型及加工須於國外完成再運至國內組銲，為槽體組裝及銲接施工難度最高之構件，以全滲透雙邊開槽對接

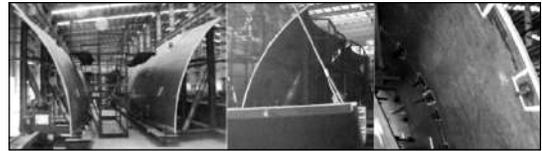


圖 18 內槽頂膝板預製組銲

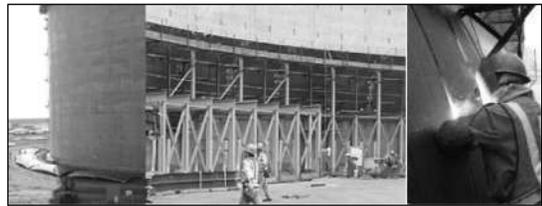


圖 19 內槽膝板於現場進行組銲

方式接合成一圈，內側銲道又屬4G（仰銲）銲接姿勢，銲接完成後執行100% RT，其耗費組立、銲接與檢驗最多人力與時間，膝板之預製組銲接會選擇於天候遮蔽良好之室內預製場地進行，將已成型之膝板以三片一組之方式進行組銲（如圖18），降低於現場槽內組立難度及減少現場銲道數量，以穩定品質及增加施工效率。

預組銲完成之膝板，會於外槽襯板施作完成後運至現場進行槽內組裝，組裝前須先於槽內架設整圈支撐架台，以利膝板置於架台上進行組立銲接，圖19所示為內槽膝板於現場組立及銲接概況。

##### (2) 內槽中心頂冠預製及組裝

中心頂冠位於內槽頂最高位置，做為槽頂結構頂部連結支撐，故安裝施工時會於內槽中央處先架設槽頂中心頂冠支撐架台，以利頂冠安裝及進行槽頂結構模組聯結，圖20

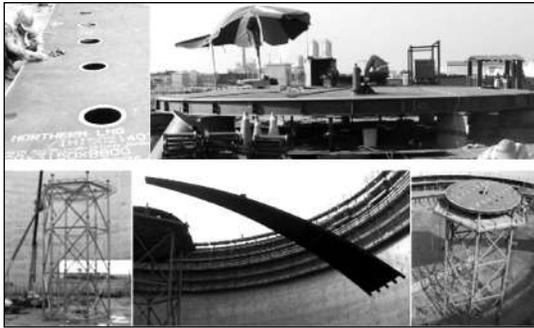


圖 20 內槽中心頂冠預製及安裝

為中心頂冠預製、支撐架台安裝及與槽頂結構模組聯結概況。

### (3) 槽頂結構模組預製、組裝及銲接

槽頂結構模組亦須依吊裝時程完成預製，於頂冠及膝板於內槽安裝組銲完成後，以對稱平衡方式進行模組連結安裝固鎖，及完成模組間結構連結與頂板鋪設銲接，圖21為槽頂結構預製、安裝、連結及組銲概況。

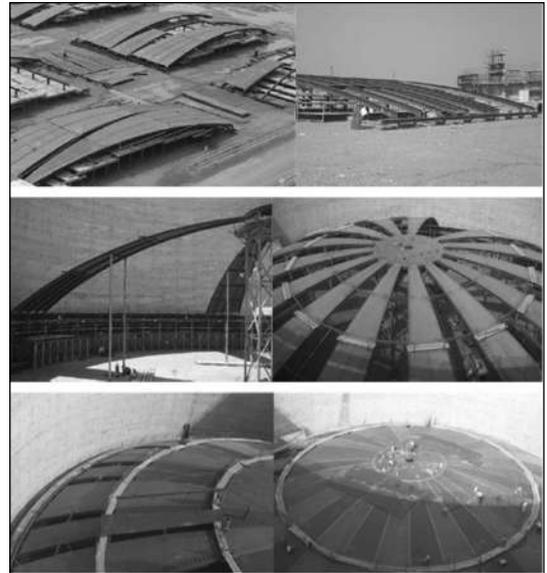


圖 21 內槽槽頂預製、安裝及銲接

### (4) 外槽頂結構預製及組裝

外槽槽頂於內槽槽頂施工完成後同樣以模組方式進行組立安裝，於內外槽間以臨時支撐予以連結固定以利同時進行升頂，其施作方式較內槽容易，於此同時亦安裝夾層吊具單軌軌道及內頂板降下支撐（圖22）。

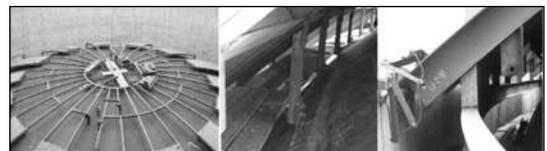


圖 22 外槽頂及附屬結構組立及銲接

## 5. 底板環狀部保冷施工

底板保冷施作會先自最外緣環狀部開始施工，依序為材料驗料及施工準備、外槽襯板底漆及接合面處理、鋼絲網配置、輕質珍珠岩水泥澆置、玻纖鋪設、珍珠岩水泥塊、隙縫填塞、防水層、保護材、耐火板…等保溫材安裝，施工過程中對於材料之拌合比、

坍度及試體取樣、混凝土塊定位、縫隙填塞、介面層、保護層施做及檢試驗等皆須依核准之程序執行，圖23為底板環狀部保冷施工概況。

## 6. 環狀底板（Annular Plate）施工

底板環狀部保冷施作完成後即可接續內槽環狀底板組立及銲接，環狀板為單邊開槽全滲透銲接，安裝過程借用膝板組立之架台結構將環狀底板架高，待銲道全滲透銲接及RT檢驗完成後再將之降下坐於底部環狀保冷



圖 23 底板環狀部保冷施工概況

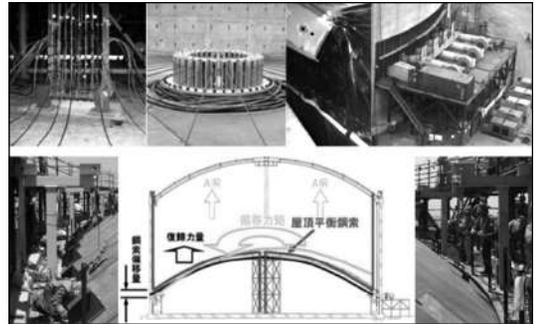


圖 25 槽頂升頂之力量復歸機制及配置



圖 24 環狀底板安裝及銲接

材之上，施工概況如圖24。

### 7. 槽頂氣壓升頂

為確保升頂順利完成，有許多準備事項須事先規劃確認完成，例如實際建造重量分佈與重心偏移數據取得、平衡及舉升力量計算、平衡塊及平衡鋼索設計、平衡力量監控規劃、緊急應變計畫、施工材料及機具撤離、平衡裝置及鋼索架設、開口封閉、風機架設、人員訓練編組、吹浮前模擬測試及修正、正式吹浮執行監控、到達定位之固定…等，這些一連串程序及執行事項須經不斷訓練、溝通、模擬及驗證。

欲舉升儲槽槽頂，須考慮自重平衡壓力及上浮須提供之需求壓力，依槽頂結構總重、外槽內徑等條件，可估算出平衡壓力，

而上浮需求壓力會略高於此，再將舉升速度、允許洩漏量、總升程等列入計算則可算出送風機需求，除計算所須提供之風壓及風量外，仍須藉助輔助平衡機構及平衡力量監控系統，來維持屋頂上浮之穩定性，以防槽頂重心傾倒及位置偏移，確保整個槽頂能穩定上升至設計位置，待上升至目標位置時立即以臨時固定塊將槽頂進行銲接定位，概略設施及過程如圖25所示。[3]

### 8. 底板中心部位保冷施工

底板中心部保冷於槽頂升頂完成後執行，其與底板環狀部保冷所使用之材料有相當差異，例如於底部輕質珍珠岩水泥層完成後，將安裝發泡玻璃保冷材、珍珠岩板、保護材、防火材…等材料，與環狀部保冷有明顯不同，且每層鋪設之工法亦有不同要求標準，雖然在材料及程序上有所差異，但對程序之控管及檢試驗的嚴謹度仍須嚴格遵循，底板中心部位保冷施工概況如圖26所示。

### 9. 內槽底板組立及銲接施工

內槽底板組立接續於底板中心部位保冷施作完成後執行，以有背襯開槽對接方式進



圖 26 底板中心部位保冷施工



圖 27 內槽底板組立、銲接及檢驗

行安裝及銲接，內槽底板厚度較薄施工過程中之保護須更加謹慎，以確保完銲後之銲道及母材品質完整性，在鋪設過程中亦須對底下之保冷材做完善保護，而底板面積龐大且無任何剛性支撐，與外槽底部襯板一樣須進行銲接變形防止，防範變形措施類似但必須更小心執行，圖27為內槽底板組立、銲接及檢驗概況。

#### 10. 內槽殼板安裝及銲接

內槽殼板組立及銲接配置，以所舉案例其垂直立銲、環狀底板接頭、殼板施工臨時開口及最後兩層周向橫銲接頭，採用手工銲接（SMAW）外，其餘之周向橫銲接頭則以自動潛弧銲接進行，如圖28所示。

殼板組立時由臨時開口將板件運入，再

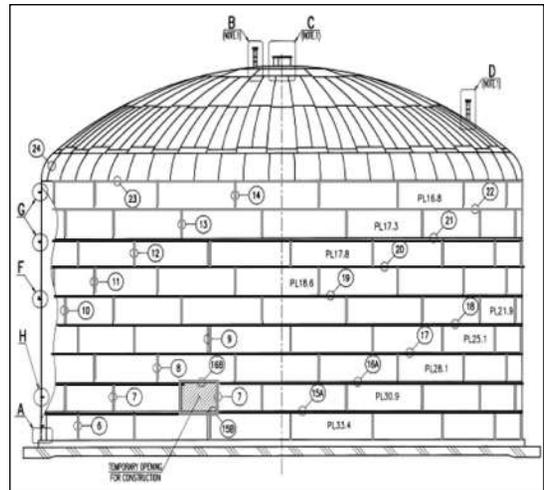


圖 28 內槽殼板銲接方式規劃



圖 29 內槽殼板組立及銲接

由槽內單軌吊車吊掛至安裝位置，進行定位組立，再由銲工或銲接操作員執行銲接，自動SAW銲接於每層殼板之立銲手工銲接完成後執行，過程中配合使用自動背剷及研磨機進行背剷及研磨工作，施工概況如圖29所示。

對於內槽第一層殼板而言，其直接組立於環狀底板之上，與環狀底板之銲道因位於

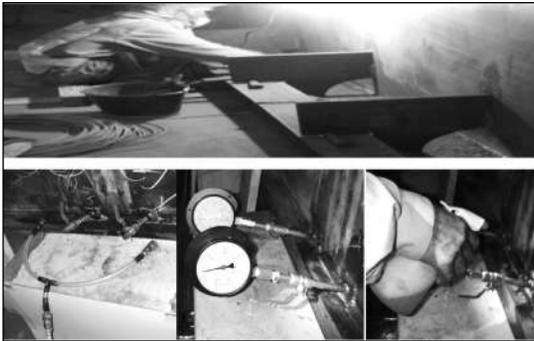


圖 30 內槽第一層殼板銲道及氣密測試



圖 31 外槽襯板安裝及銲接



圖 32 內槽頂降下、組立及銲接

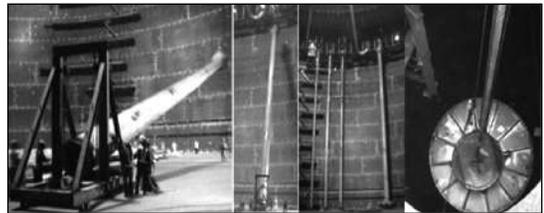


圖 33 內部泵浦井及大型管件舉升安裝

角隅，銲接完成後不易甚至無法以RT或UT進行銲道完整性檢測，但此銲道完整性對槽體洩漏防止相當重要，因此於殼板底緣中央部位有開一連續測試導氣溝槽，以利銲道完成後進行氣密測試，測試過程如圖30所示。

#### 11. 外槽襯板安裝及銲接

於組銲內槽殼板的同時即可同時安裝外槽襯板，外槽襯板由外槽臨時開口吊升入內，固定貼合於外槽壁內側預埋板上，再行搭疊銲接，安裝概況如圖31所示。

#### 12. 內槽頂降下及內部管件安裝

內槽殼板銲接完成後，須將內槽槽頂降下以利進行殼板與膝板連結及銲接，此一接合介面會受內槽膝板下緣及內槽殼板上緣之實際製造高程及周長所影響，故在膝板及殼

板組銲過程就須留意控制，尤其殼板最後一層組銲為最後調整之機會，須精準控制其總周長、高程及水平度，以確保接合順利。內槽頂降下須先於內槽全周連結下降支撐調整器，再切斷內外槽臨時支撐後緩慢均勻將內槽頂降至最後一層殼板上緣，再進行調整組立銲接，如圖32所示。

待槽頂降下且與殼板組立銲接完成後，則進行內部管件安裝，部分槽頂內部管件於升頂前即已安裝完成，此時主要針對如底部入料管、泵浦井等大型直立管線安裝，安裝過程吊車於槽外放入鋼索，槽內以特殊台車進行下端支撐及移位牽引，逐步將置放於槽底支大型管件進行舉升至定位，再將其固定，如圖33所示。



### 13. 內槽槽體試壓

本文所介紹之超低溫LNG儲槽屬微壓槽，內槽試壓時槽體將同步進行水壓及氣壓測試，內槽體試壓時將水位注水至設計測試液位，注水過程中須對所注入之水進行取樣化驗，到達水位後將槽體密封並自槽頂插管打入空氣體加壓至設計測試壓力，由於灌滿大型儲槽之水量相當可觀，若遇枯水期有可能會面臨水公司無法提供大量潔淨水源之窘境，因此須及早做好規劃及協調確認。

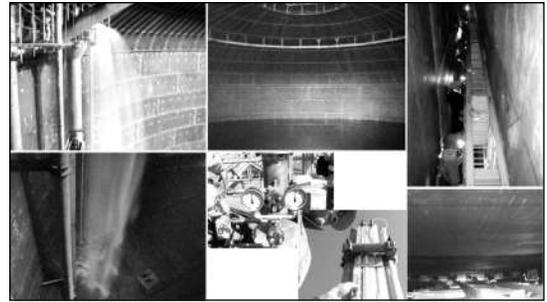


圖 34 內槽槽體試壓及目視檢查

試壓過程除壓力測試及洩漏檢視外，基礎沉陷觀測亦是驗證重點事項，須對儲槽自注水開始前至洩水完成進行完整沉陷觀測。試壓過程中當壓力達到需求壓力且穩定後，則派出足夠檢驗人員，依序對內槽殼板及槽頂板所有銲道與母材進行洩漏與異常變形觀察目視檢查，以如此巨大槽體欲於短時間內落實檢查完畢，對檢察人員會是一大挑戰，故適當之檢查輔助設施及安全防範為必要措施，以本文案例而言，於內外槽夾層間即架設一座可同時乘載十餘位檢查員之垂直檢查架台，架設於外槽槽頂單軌軌道，繞行整座槽體一周進行洩漏及變形檢視，圖34為內槽試壓及目視檢查概況。



圖 35 內外槽夾層間保冷施工

試壓完成後須盡速依核定作業程序，將水排空及對槽體表面進行清洗及保持乾燥，以避免或降低槽體銹蝕或受有害物質侵蝕風險。

### 14. 內外槽夾層間保冷施工

內外槽夾層及槽頂保冷施工，會於襯板鋼材表面進行表面處理、油漆塗層、噴塗PUF、鋪設玻纖毯，再將於現場進行珍珠岩

加熱發泡並填充於內外槽及槽頂夾層間，現場設有保冷材粒度、密度、熱傳導率…等量測機具及儀器，進行即時取樣測試，以利現場監控維護保冷材合格之品質及性能，待保冷材填充完畢及通過檢驗即行封閉所有外槽開孔，圖35為內外槽夾層間保冷施工概況。

因槽內施工環境不佳，槽內施工人員除須配置適當防護器材、通訊及偵測器外亦須接受完整槽內侷限空間作業訓練，同時架設

合乎規定之強制送風設施與看管人員，絕對確保作業人員安全及健康獲得最佳防護始得允許作業。

#### 四、結論

低溫儲槽建造工序繁雜且緊密連結，過程中任何失誤，對於品質、工期及成本皆可能造成重大衝擊，欲達到儲槽如期完工、符合設計要求與安全運轉目標，除須有周詳風險評估及縝密設計考量外，專業嚴謹的建造規劃與落實之程序管理，屬必要作為，然篇幅有限無法於此一詳述所有程序及要求細節，本文主要對其施工流程及管控重點進行概述，期望有助於對低溫儲槽建造及執行重點之初步認識。實際上業界對低溫儲槽建造工法仍一直在持續進化之中，更高品質、更有效率、更低成本及更安全的施工方法，是其不斷追求進步的目標，但因低溫儲槽屬危險性設備，無論如何發展進化，皆須基於能確保整個建造品質被充分掌握之前提下進行，因此唯有被驗證過且最穩定之材料與工法才會被列入採用考慮，也是該堅持的原則。

若以直覺觀察低溫儲槽建造工法或許會覺得無特別之處，但若究其細節及以看待危險設備的角度來看，則會感受到許多細膩之處須妥善處理，因此較優秀及具責任感之廠商會持續不斷改良建造技術，亦會對每座已完成之儲槽進行檢討改善探討，而讓技術得以不斷突破成長，其必須讓參與之專業人員充分了解執行及要求細節，並具備可精準控管相關建造流程及解決各類問題的能力，進而達成所設定品質目標。就以其銲接施工規

畫及管理為例，於ISO 3834即將銲接製程定義為「特殊製程 (Special Processes)」[4]，主要是因銲接一但完成後，其確切品質並無法單以最終檢驗來確認，因此須對所有銲接製程進行妥善規畫及控管，才能確保其品質，低溫儲槽一旦建造完成，再度開槽檢修將付出極大代價，所以不願也不會輕易嘗試，因此不只單就銲接製程，對其他相關重要工項以「特殊製程」的角度建立控管機制及執行態度就相對重要，也是該努力確保之目標。

低溫儲槽之建造必須有經過驗證之程序、核准過之機具、檢定過之人員、詳實記錄及持續評量及改善，才足以確保產出符合要求，他山之石可以攻錯，中鼎在執行許多低溫儲槽EPCC興建案的過程中，曾攜手過許多於此領域之國際頂尖公司進行合作，且自身亦持續投入研發及訓練，不斷提升同仁專業執行能力，培養出許多實力堅強並具豐富經驗之專案、設計及建造人員，後續亦會對此低溫儲槽領域相關先進技術持續進行研究及開發。

#### 參考文獻

1. Isaac Animah, Mahmood Shafiee, Application of risk analysis in the liquefied natural gas (LNG) sector: An overview, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 63, January 2020.
2. 賴清德，能源政策專案報告，立法院第9屆第5會期，4<sup>th</sup> May, 107年。
3. 林坤滄、施亮輝、李瑞墉，大型液化天然氣(LNG)儲槽昇頂技術案例研析，台灣世曦工程顧問有限公司，中華技術，No. 81, pp.179~187, January, 98年。
4. ISO 3834-1:2005, 2nd Ed., International Organization for Standardization, Dec. 2005.



# 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

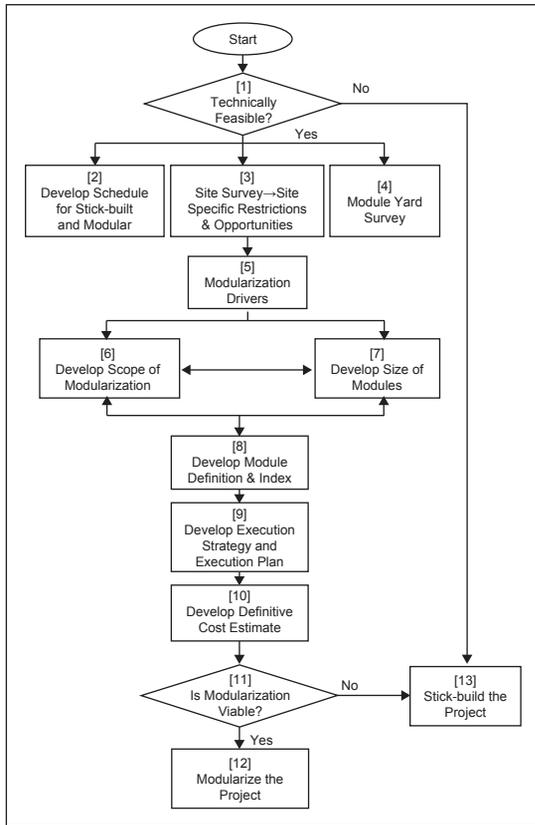


圖 1 模組化作業評估流程

(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

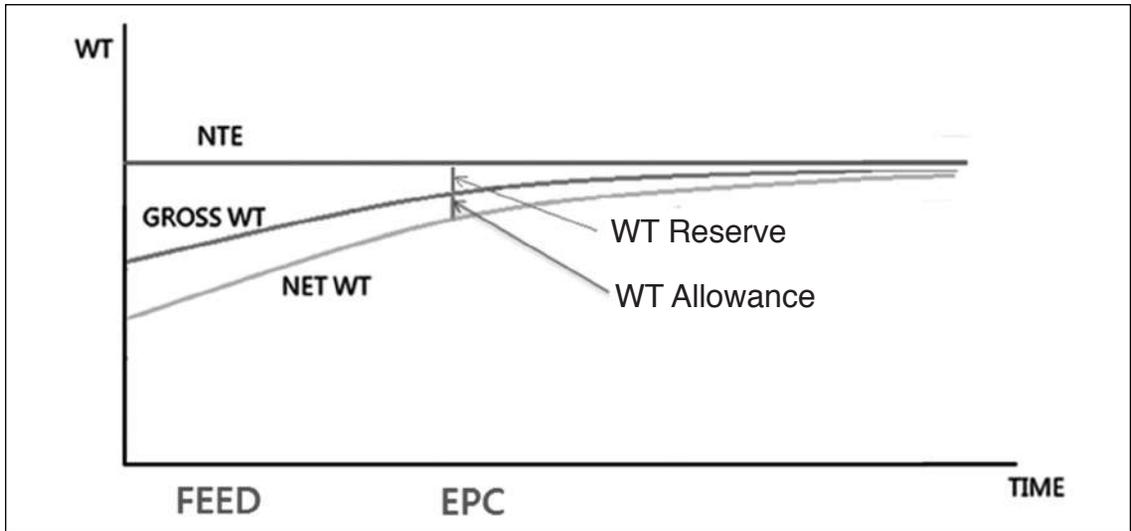


圖 2 模組重量圖

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/m<sup>2</sup>。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。

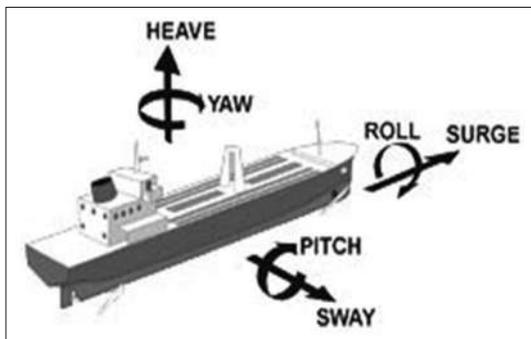


圖 3 船舶受力運動方向示意圖

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 <sup>[1]</sup> (m)	L/B <sup>[1]</sup>	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 <sup>[2]</sup> (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）

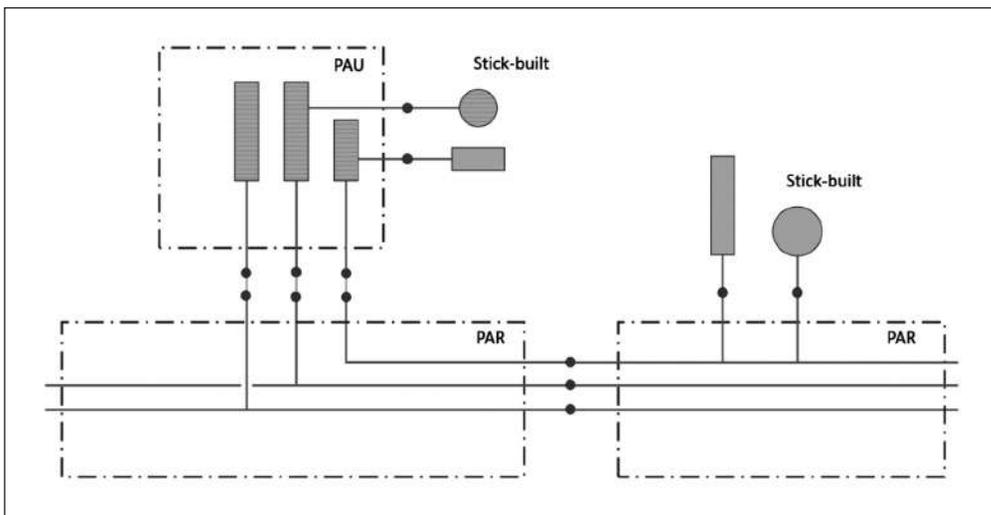


圖 6 模組間管線接合方式



## (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

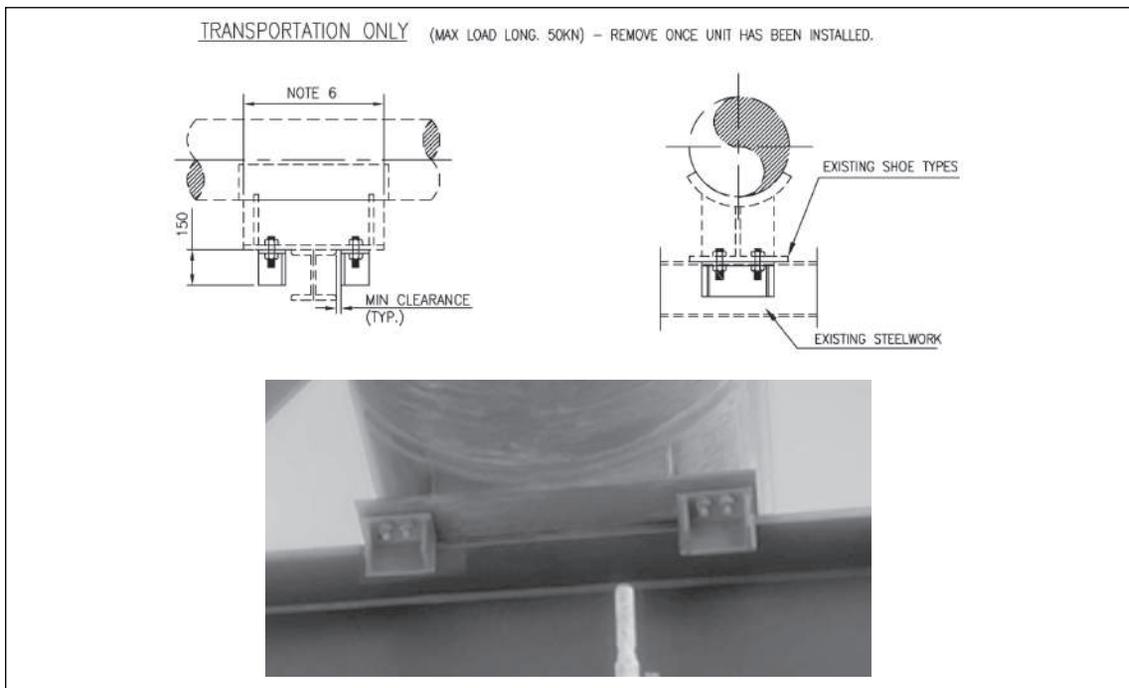


圖 7 管線臨時支撐



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



# 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

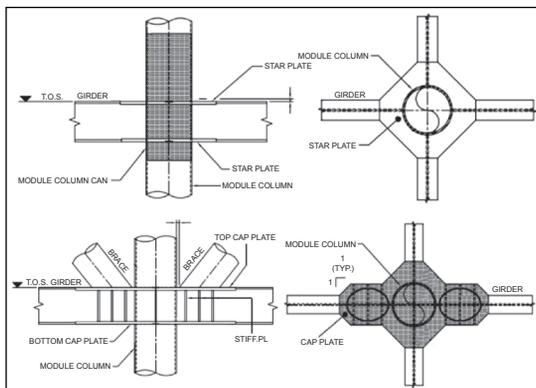


圖 1 圓柱與大梁之接頭



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。

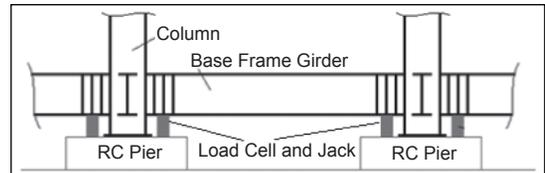


圖 2 模組預製廠秤重配置

## 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、坡度及承載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

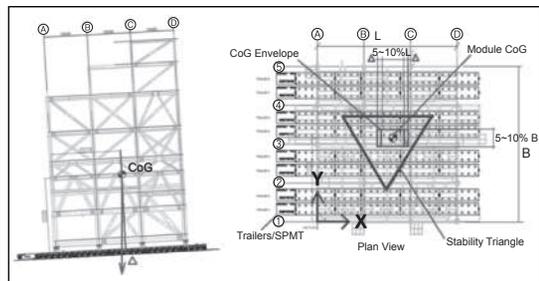


圖 3 模組陸運重心與穩定性

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

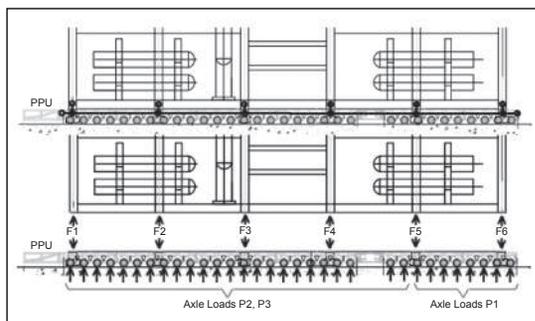


圖 4 模擬 SPMT 陸運荷載

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，船舳拱及舳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舳拱及舳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。

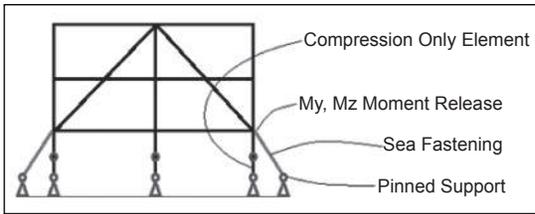


圖 5 模組海運結構支承條件

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

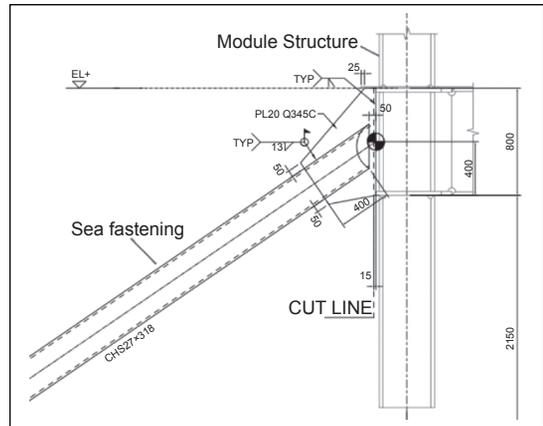


圖 6 海上繫固切割線圖示

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。繫固構件切割除後，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，仍可能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，並盡量在垂直向施力。

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，

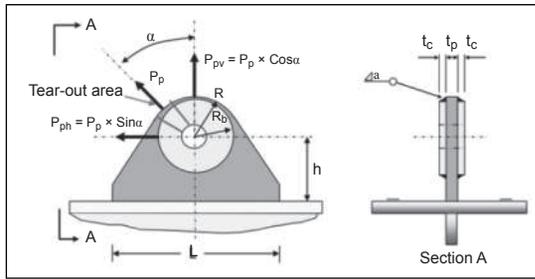


圖 7 吊耳之 Cheek Plate 補強

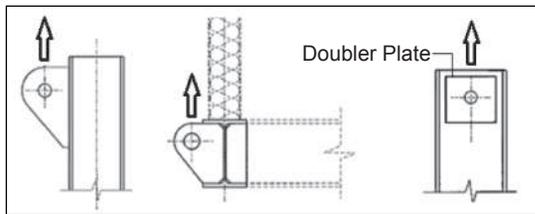


圖 8 不同型式的吊耳

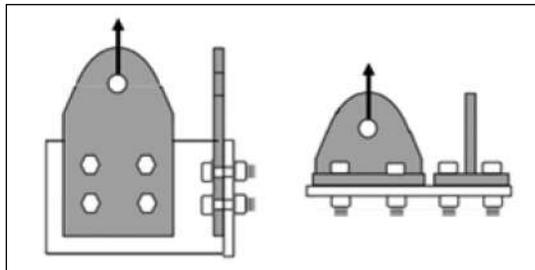


圖 9 栓接式吊耳

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.



# 模組運輸實務簡介

中鼎工程股份有限公司建造後勤支援部工程師 / 許家輔

關鍵字：重件船、穩定傾斜角度、海事保險鑑定

## 摘要

隨著全球經濟的急速流動及市場型態的變化多端，已開發國家之勞動成本已逐年提高，於當地執行之傳統工法（stick built）的建造管理模式已不符合現代之經濟趨勢與成本效益。為克服此產業之結構特性與追求客戶利潤最大化，建造工程之模組化的執行方式便於焉而生。模組需由模組預製廠（Module Fabrication Yard）先進行預製，之後藉由自走式模組化運輸車（Self-Propelled Modular Transporter, SPMT）及重件船（Heavy Transport Vessel, HTV）的運送至指定地點。此運輸過程需要大量的協調與確實的工程監督方能使整體運輸工作順利進行，本文就實務層面之角度切入，確切地說明模組運輸執行過程中需要考量的要素與可能的風險。

## 一、前言

模組運輸之實務層面可概分為內陸運輸及海洋運輸。再進一步地細分，模組的

內陸運輸涵蓋了模組預製廠運送至出貨港（Port of Loading, POL）及卸貨港（Port of Discharge, POD）運送至工廠或工地，而模組之海洋運輸的範圍則是從出貨港到卸貨港這段區間。各個運輸階段皆面臨不同的風險與危害考量，其中尤以海洋運輸期間的風險為最大，因此模組整體之施工品質監督便不能鬆懈馬虎。

本文針對模組在各段運輸區間中之實際運輸上應注意哪些工程考量及檢查重點做一簡介與經驗分享，以確保模組運輸在實務上能安全且如期、如質地運送至指定的地點。

## 二、模組之內陸運輸

### （一）模組於模組預製廠運送至出貨港

當一模組於預製廠完成組裝後，為了要越洋渡海到他國交貨，則必須讓該模組藉由內陸運輸的方式運送至出貨港的重件船（Heavy Transport Vessel, HTV）上。就現階段各模組預製廠的規模而言，其均備有專

屬之重件碼頭以利運送模組之重件船靠泊。因此在選定模組預製廠時，傾向以備有其專屬之重件碼頭的模組預製廠為第一優先。近年模組發展之重量動輒2000噸以上且尺寸特殊龐大，因此重件船之船型（如尺寸及吃水深等）也相對提高，所以重件船必須和模組預製廠之重件碼頭的容許停靠條件做詳細比對，以選擇能夠停靠之重件船舶。

模組預製完成後便利用SPMT執行內陸運輸之任務。對於不同尺寸的模組，其所對應的SPMT之組合也不盡相同。對於SPMT在內陸運送模組時可參考以下幾點做進一步地評估：

1. SPMT之軸荷重（Axle load）不得超過地面承載力（Ground Bearing Pressure，GBP）：

在規劃模組之內陸運輸路徑時，必須調查該路徑上之地面承載力大小以確保模組在內陸運輸時不會破壞地表面而影響運輸工作的進行。而軸荷重經計算後若發現大於運輸路徑上之地面承載力時，則可以利用SPMT兩併或三併等併接方式增加其受力面積以降低軸荷重值。若環境及機械因素仍未允許模組之內陸運輸乘載，則最終可藉由地質改良或是鋪設鐵板、鋼板墊材（Steel spreading mat material）、臨時橋板（Ramp）等材料以增強GBP的容許值。

2. 模組內陸運輸之穩度

模組內陸運輸必須考量運輸之穩度以避免運輸時翻覆。其主要有兩項因素需考量：

- (1) 穩定之傾斜角度（Tipping Angle）

當模組置放於SPMT上時，需先定義複合重心（Combined Center Of Gravity，

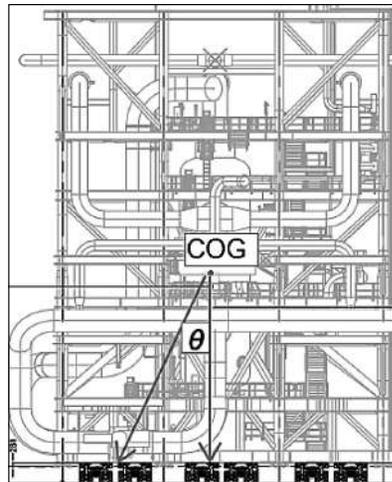


圖 1 模組運輸時之 Tipping Angle

COG) 之位置，也就是考慮模組重心及SPMT之重心兩者合成之重心位置。該點和SPMT之Axle line外側（外軸線）所連之線和垂線之夾角是為傾斜角度，如圖1所示。此角至少要大於7度，才能確保模組在內陸運輸的時候不會翻覆。

- (2) 油壓懸掛支撐系統（Hydraulic Suspension point support system）

SPMT承受載重之油壓懸掛支撐系統可依照運輸之需求與載重力學特性分為三點懸掛及四點懸掛兩者如圖2所示。依照模組之設計重心高度來決定其所使用之SPMT要用何種懸掛方式來做內陸運輸。

圖2下方之三點支撐可看出各油壓系統組的中心之連線可構成三角型，其中圓形為模組之重心投影，此三角形為油壓懸掛系統可調控之範圍，故模組重心之投影必須要在此三角形內。藉由不同品牌之SPMT及懸掛系統的選擇，會得到不同的內陸運輸之穩度

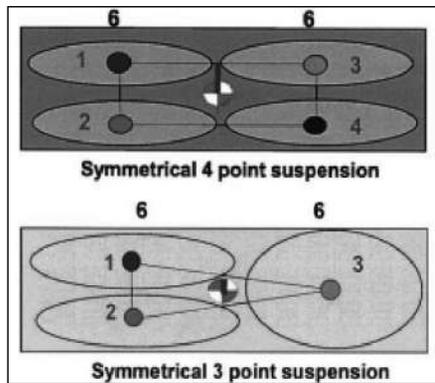


圖 2 SPMT 之三點懸掛與四點懸掛系統示意圖

面積 (Stability Area)，因此可觀察出四點懸掛系統之 Stability Area 較大，對模組運輸之重心而言較為穩定。但要注意的是，四點懸掛系統只適合於平坦之陸地運輸，若遇到地面崎嶇不平或是有陡坡之陸地時，四點懸掛在不平整之道路上可能會有一點是屬於懸空狀態，這時整個系統雖然設定為四點懸掛，但是卻只有三點受力，穩定面積便瞬間縮小成三角形，模組之運輸重心頓時可能已接近穩度面積的邊界點，此時極易造成模組的翻覆。因此要決定模組運輸的油壓懸掛系統必須考量模組之重心、力學系統之平衡特性及外在環境因素等等，以達成模組在內陸運輸時的穩度品質。

### 3. 模組之結構整體考量

一般傳統工法之建造方式為於固定之基樁往上搭建，並沒有結構整體運輸之移動問題。由於模組需要進行長途運送，因此結構設計必須考量模組運輸的設計規範。另外模組之重量極大，加諸於 SPMT 時也須考量 SPMT 本身受力的變位情形，以防止模組在運輸時 SPMT 發生破壞而無法繼續進行運

送。若部分構件於模組中有延伸出模組鋼構外之情況如管線膨脹迴管 (Expansion Loop) 或重件設備之突出部等情況，則需針對該設備或管線本身之延伸段做局部應力分析，判斷其在運送的過程中是否會因自身重量而造成撓曲 (deflection)，若其撓曲已超出容許值，則須設計臨時鋼構支撐 (bracing) 以增強結構整體在運輸時的強度 (strength) 與勁度 (stiffness)。

### 4. SPMT之一致性

由於模組尺寸極大，光用一併之 SPMT 來做內陸運送穩度不高。一般較常遇到的情形是採用多併之方式來運送模組。為了控制模組內陸運輸之協調及穩定，SPMT 應擇用同一廠家來做運輸使其風險降低，因為各個品牌之 SPMT 在油壓性能及電性系統皆不相同，選用同樣類型之 SPMT 做組裝能高度掌握潛在的風險。另外，在運送的過程中，須時刻保持縱向及橫向高程之一致性，若 SPMT 運送時之平面因油壓系統協調不當而導致超出允許傾斜度 (Allowable tilts) 時，則模組極易翻覆，不可不慎。

### 5. 模組運輸路線探勘 (Route survey)

模組從預製廠運送至出貨港之路線必須先做事先調查。模組之尺寸必須先做釐清與確認，並在計劃中之內陸運輸路線做勘查後決定運輸之長寬高限制，隨後發展模組之最終之尺寸 (module envelope)。若模組尺寸之重要性較高，則內陸運輸上之障礙物須予以拆除或改向，如路燈之高度若和模組尺寸有所衝突，則可藉由轉向或拆除的方式予以解除運輸限制，抑或是既有建築物及道路轉彎半徑之限制影響模組運輸，則可藉由拆除障



圖3 模組繫固於SPMT之實際情況(左前鋼構上)



圖4 模組藉由LOLO方式上船[1]

礙物及道路拓寬之土木施工讓模組內陸運輸順利進行。內陸運輸途徑上之道路平坦度也要予以調查，對於斜坡超過5度之路線須進行道路整平或更改路線。

#### 6. 模組與SPMT之間的綁紮繫固 (Lashing) 工作

模組裝載於SPMT後須安裝臨時固定之繫固材料，如圖3所示。模組的情況則利用臨時性之鍊條 (Chain block) 並施予應力將模組固定於SPMT上，以增強模組在內陸運輸時之穩定性。若經由運輸計算而需要其他繫固之補強工作，則要另外評估與施工。



圖5 模組藉由LOLO方式上船[1]

#### (二) 模組於出貨港上船

運送模組之重件船抵達模組預製廠之出貨港後，模組便要進行內陸運輸之任務。兩項作業的時間安排需要運輸單位密切聯繫與協調溝通方能使運輸作業在時程上進行順利，不造成任何延誤。由於重件船在其租船合約上有延滯費等費用問題，因此重件船抵達出貨港時，模組本身應已具備所有內陸運送條件進行運輸了。不可諱言地，模組於出貨港上船是整個模組運輸過程裡面最危險也

最容易發生意外的期間。而模組從重件船卸貨至卸貨港也可參考模組上船時之情況，因此模組運送上船的動作極為重要。一般模組運輸上船可以分為LOLO (Lift On-Lift Off) 及RORO (Roll On-Roll Off) 兩種情況：

##### 1. LOLO (吊裝)

其方式是利用重件船上之重件吊桿 (Geared crane) 進行吊裝模組至重件船上。操作方式為先藉由SPMT運送模組至LOLO重件船邊後，再進行吊掛之作業如圖4及圖5所示。



圖 6 模組藉由 RORO 方式裝貨上船（模組介於碼頭與重件船之介面中間，底下為 Ramp）



圖 8 出貨港海象不佳時之波浪起伏



圖 7 模組滾裝上船後之情形（Ramp 已移除）

## 2. RORO（滾裝）

其方式是為利用SPMT運輸模組及運用設計強度足夠之臨時橋板滾裝運送模組至船上或滾裝卸貨下船之工作方式，如圖6及圖7所示。

模組於出貨港上船時應注意以下幾點事項進行風險評估及運輸計算：

### 1. 天氣預測計劃（Weather Forecasting Plan）

在執行模組運送上船之任務前，需要先做好天氣預測計劃。若天氣預報所提供之風

速、風向與海象不符業主所規定之運輸規範時，則當日之模組運輸工作便不得進行。因為海象惡劣或出貨港之風速過大均會造成岸邊海浪起伏劇烈造成重件船隨著浪潮起伏而影響了模組運送時的安全與穩定度。海象不佳時之海面情況如圖8所示。

除了天氣預測計劃要做好準備以外，若是在風平浪靜的條件下運送也需要考量日落的時間與當日潮汐水位的時程與潮差。因為在運送的過程中需要隨時注意SPMT機具的運作是否故障及模組當下的結構情形，而夜間視線較為不良且操作人員精神較不易集中，所以夜間運送時容易發生事故危害。因此需先瞭解運送當日之日落時刻，由該時間點返回推算模組於白天運送上船的時間。另外，潮汐的時間點也至關重要，運送模組上船時之時間點要在漲至大潮的時候進行，並預估大潮之持續時間，模組需在該時間段內運至重件船上。若模組運送到一半時（如SPMT一半在重件船上的甲板，另外一半在岸邊的碼頭）遇到退潮的情況，則必須當機立斷是否要繼續上船或是把模組退回岸邊，若潮差的影響大於重件船之艙壓調節能力（Ballast

capacity)，則模組會在運送時失去平衡而翻覆。由此可見，模組運輸必須詳細考量自然天氣及時間環境等問題。

## 2. 重件船舶之吃水深度及出貨港之裝貨條件

在選定重件船時須考量其裝載模組後的吃水深度，並把該資料和模組預製廠出貨港的碼頭參數做相互比較，用以判斷能否停靠該港。而模組預製廠之出貨碼頭公司應定期檢查其港口自然情況，判斷其港底是否有淤積之垃圾或泥汙，並用以更新其出貨港裝貨條件的參數。一般模組之出貨港口之碼頭資料應於3年以內，用以符合現況之運輸條件。若重件船之吃水深度和出貨港的水深有所衝突時，須提前決定是否更換重件船之船型噸位或藉由模組預製廠之發包進行碼頭清淤（Dredging）之工作。另外，出貨港的港口水面要處於“Sheltered water”的狀態，也就是沒有過多的起伏，為一平穩海面之情形。

## 3. 重件船之靠泊計畫（Approaching Plan）

重件船駛進至模組預製廠之出貨港前須提供一整體的靠泊計畫，此計畫之具體內容包含了重件船要以什麼樣的方式進港，需要幾艘拖船（Tug boat）配合使重件船順利靠泊。以滾裝模組運送為例，若重件船到港時，模組之內陸運輸條件尚未建立，則重件船會以平靠的方式先行靠泊，待模組進行內陸運送時再改以尾靠的方式迎接模組上船。圖9顯示某一模組預製廠與重件船討論之靠泊計畫。圖10為兩艘拖船協助重件船進行尾靠之俯視照片。

## 4. 重件船之繫泊計畫（Mooring Plan）

模組靠泊後需要利用繫泊纜繩（Mooring

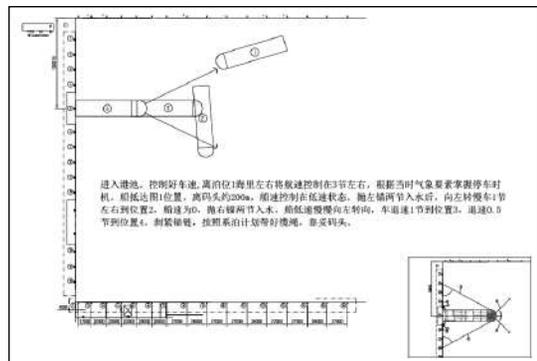


圖 9 重件船之靠泊計畫



圖 10 兩艘拖船協助重件船尾靠示意圖

line) 網綁於繫船柱（Bollard）上以固定重件船在港邊之位置。出貨港之繫船柱位置及數量需在運輸前做調查，因為港口繫船柱條件會影響到繫泊的配置方式，不同的繫泊角度對於重件船會有不同的拉力，尤其在模組上船的時候尤須注意該拉力是否會造成繫泊纜繩或繫船柱之降伏破壞。因此，繫船柱的降伏強度資料也是需要參考的項次，以免模組在運輸時超出其降伏強度而造成運輸風險。

考慮繫泊及繫船柱之計畫稱為繫泊計畫（Mooring Plan），而牽涉到繫船柱（Bollard）之結構計算則稱為繫船柱計算書（Bollard

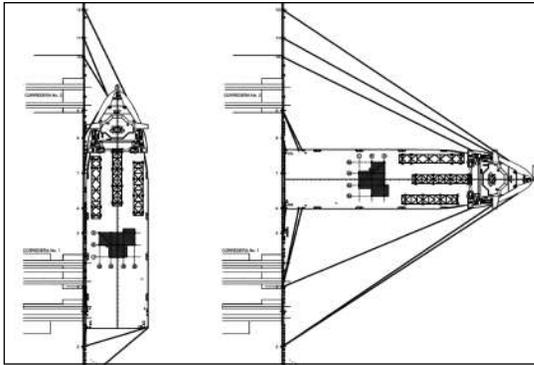


圖 11 重件船之繫泊計劃 (含平靠 (左) 及尾靠 (右) 兩種情況)



圖 12 岸邊之碰撞墊示意圖 (黑色部分)

calculation)。此兩項計畫均需於運輸前考量。圖11為某一重件船於模組預製廠之出貨港口的繫泊配置圖。

#### 5. 重件船之艙壓水計算 (Ballast Calculation)

模組經由SPMT運送至船上為模組運輸實務上最重要的階段。一般若無特殊情況，模組滾裝運輸至船上可以概括性地分為四個子階段，分別是模組及SPMT兩者依照艙壓步驟已25%上至船上、50%、75%及100%上至重件船上。

在重件船上配置有各個艙壓水空間，可以藉由艙壓泵浦 (Ballast Pump) 調整各艙壓之水位，藉以調整重件船的姿態。當SPMT上方之模組逐步地裝載到甲板上時，船的姿態必須適時地調整以改變整體之浮力中心，用以讓整體的靜力矩達成平衡，才不會造成單邊力道過高而翻覆。因此在實務操作上，當模組運上船25%的時候，將停止運輸，待運輸船之艙壓水調整完畢，達成穩定平衡後，遂再進行模組之運送。如此程序重複操作，直到模組及SPMT已經整體全部上到重件船的

甲板上。由此可見，模組運送至船上無法一氣呵成的，必須循序漸進，逐步調整。另外如先前所提，在模組滾裝運輸時也必須謹慎考量天氣預測計劃與潮汐水位，並於運輸前決定當重件船之船艙高程離碼頭岸邊多高時，模組滾裝作業方能開始進行。而當模組以吊裝的方式吊掛上船時，同樣也是需要艙壓水的調整以控制重件船在吊掛模組時的姿態以達成穩定平衡。而在操作艙壓水平衡的時候，船長會要求與此行動不相干之人員下船至岸邊以策安全。

上述所提之艙壓水操作是依據艙壓水計算來做操作，此項目在模組運輸上扮演關鍵的角色。為了提高模組運輸時之效率及安全性，一艘重件船之艙壓泵浦的艙壓調節能力是考慮的要件。

#### 6. 模組運送上船之臨時橋板考量

出貨港與重件船之間是沒有直接接觸的，如果直接接觸則會造成模組船艙結構之損傷。因此在出貨港岸邊會設置碰撞墊 (Fender) 如圖12所示 (部分模組運送用之

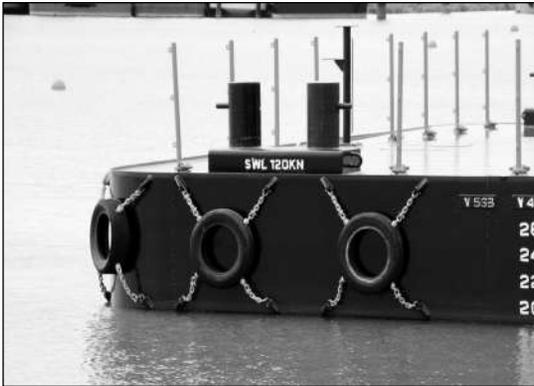


圖 13 駁船上配有碰撞墊示意圖



圖 15 臨時橋板置於港口岸邊並與重件船銜接之情形

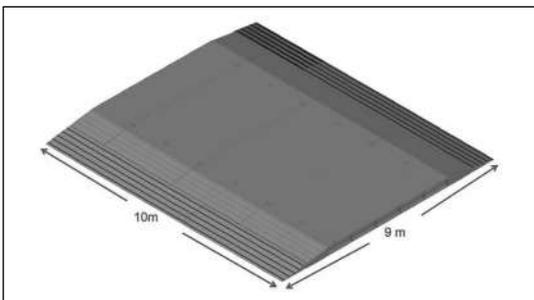


圖 14 臨時橋板示意圖 (L 10m x W 9m)

駁船 (Barge) 亦會在其船艙裝設Fender) 如圖13所示以消除兩者之間的碰撞力。但是如此設置則會造成重件船和岸邊碼頭有一定的間隙，因此在滾裝運輸模組上船的時候，必須要利用臨時橋板來彌補與克服此空隙如圖14所示。

模組運輸之臨時橋板不能隨便選用，必須考量其結構強度在運輸過程中是否足夠，該臨時橋板一端扣接於碼頭上，另一端則焊接在船的甲板上。此動作是要確保模組在臨時橋板上之運輸不會造成臨時橋板錯動而導致運輸失敗。依照預製成本之優劣來決定該臨時橋板是要由船公司或是模組預製廠來提

供，一般實際操作上在出貨港把模組運送上船後，臨時橋板會跟同著模組一起運送至卸貨港，其目的在於卸貨港卸貨模組時亦可重複使用。如此在卸貨港那端則可省去臨時橋板的製作成本。

由圖15可以觀察出，某些重件船上配備有可降式之臨時橋板提供SPMT滾裝上下船用。另外，部分碼頭之外緣段有可能會遇到為類似懸臂式之結構，底下並無樁基礎做支撐，因此其抗壓強度比有樁基礎之碼頭範圍來的低，這時則可藉由SPMT之併排方式或是增強臨時橋板的面積來降低模組對地載重值，以致於在運輸的途中能不破壞到碼頭本身的結構。

#### 7. 模組上船後之配艙計劃 (Stowage Plan)

若一艘重件船裝載兩個以上之模組，則模組在甲板上之配置就需要做進一步的規劃。例如較重之模組應置放於船體的中心，以減少艙壓調節時之負擔與風險，另外，由於模組運送至船上後需要進行海上繫固 (Sea fastening) 之工作，此海上繫固的設計需求須經由程式計算來決定繫固的位置點。若模

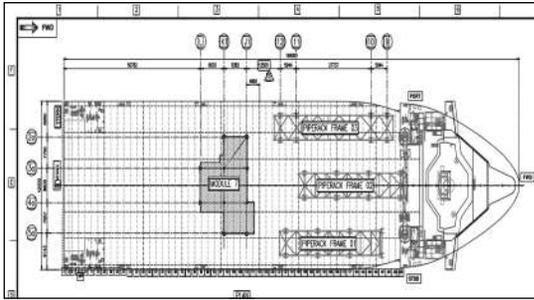


圖 16 某一重件船之配艙計劃圖

組置於甲板的位置太靠近船邊或彼此之間太過擁擠，則可能導致空間不足以施做海上繫固的工作，這時船公司則需要重新規劃模組的配艙計劃。

每艘重件船均有其龍骨結構，依據龍骨之主結構分配的位置來決定模組擺設的方位，以使載重能作用在主結構桿件上。由於配艙計畫顯示各模組於甲板上配置的位置與方向，因此SPMT在做內陸運輸時就需要先考量到運送的先後順序及模組的轉向，如此才能在出貨港節省許多不必要的調整時間，使得整體內陸運輸能夠做到一次到位。

由圖16之配艙計劃可以看出，置放於中間之模組是較重之化學製程模組，右側三座為管架模組，重量較輕，因此置放於側邊，也代表當SPMT進行內陸運輸的時候，右側三架管架模組要先上船。

### (三) 模組於卸貨港下船

藉由模組於出貨港之裝貨經驗，重件船於卸貨港之卸貨則較容易進行。但由於卸貨港的碼頭條件和出貨港不同，因此卸貨港之繫泊計劃和艙壓水計劃則需要依照卸貨港之條件限制進而重新提出計劃與計算。由於

出貨港及卸貨港相隔遙遠，甚至為不同的國度，因此在SPMT的使用上則需要確保裝貨時之條件與卸貨時之條件保持一致，其他相關操作如同模組於出貨港時之情況說明。另外，一般模組預製廠均備有其模組出貨碼頭，而卸貨港通常是靠近工地抑或是一些散貨港（Break Bulk port），此種情況可能需要於工地附近建造臨時性之碼頭卸載設施（Marine Offloading Facility, MOF）以供模組進行卸貨。其工程浩大，不在此贅述。因此模組運達MOF卸貨港的日期須盡早確認，並由此反推MOF碼頭要於何時開始動工。

### (四) 模組於卸貨港運送至工廠或工地

卸貨港的選定要考慮到模組卸貨後運送至工地之內陸運輸的便利性及可行性。卸貨港一般選在工地附近，且其位址須能夠進行模組之內陸運輸。通常必須進行模組專屬之運送道路（Heavy Haul Road, HHR）施工，若是既有道路則進行拓寬並夯壓，若無現有道路情況則進行混凝土灌漿及AC鋪設。若新增之模組運輸道路途經既有公路或是建築，則需進行道路使用申請及運輸計劃規劃，充分與當地政府溝通協調，並於半夜進行道路管制，運送模組至工地安裝（如圖17所示）。



圖 17 管架模組於夜間在 HHR 道路運輸實況



### (五) 現場模組內陸運輸執行策略實務

在模組內陸運輸之實際操作前需要先行定義「可行/不可行判斷標準 (Go/No Go Criteria)」。藉由此標準來決定當下之模組內陸運輸條件是否充足。判斷條件如：模組裝載於SPMT之前是否已進行秤重測試、當天之天氣情況是否能容許模組進行內陸運輸（如風速限制及能見度條件等）、模組預製廠內之碼頭潮汐情況、拖船之數量及業主是否同意等考量，如此繁瑣之程序之目的就是在確保整體內陸運輸之風險已降至最低。



圖 18 模組下方之格床支承實況

## 三、模組之海洋運輸

### (一) 出貨港之施工內容

當模組運送上重件船後，需要進行海上繫固之工作以確保模組在海上運輸時不會移動而造成損傷。模組之海上繫固的方式需要經過過程式的計算以設計其型式與繫固強度。不同規模的模組大小其海上繫固的方式也就不同，而此考量也進而影響重件船隻的選用。

#### 1. 模組之海上繫固

在模組運送至船上前，可視情況決定是否須先於重件船上之甲板安裝格床支承 (Grillage) 如圖18所示，可利用叉車 (Fork Lift) 先行把需要施作的格床支承放置於甲板上之設計位置，之後再進行定位與焊接的動作。重件船之甲板要平整，不能因為甲板平整度不夠而造成格床支承與甲板之間有所間隙，進而影響模組垂直載重力量的傳遞。

當SPMT運送模組至甲板船上，格床支承若先行安裝，則在設計上需要考慮到SPMT的



圖 19 模組於重件船上之海上繫固

運輸動線，若部分格床支承或是繫固材料和SPMT運送模組的路徑有所衝突時，格床支承應先予以暫停安裝，待SPMT運送模組至甲板後，再進行格床支承的安裝，只是因為甲板之空間已經擠滿模組的結構，因此施工較為不易。

當格床支承已安裝完畢後，SPMT便可藉由油壓系統降低其高度，把模組放置於格床支承上 (Jacking down)，當模組各乘載點均放置妥當後，SPMT便依照原來的路徑撤出。這時開始安裝海上繫固的工作，以確保模組在甲板船上已經繫固固定。海上繫固情形如圖19。



## 2. 非破壞性檢測

海上繫固之焊接工作完成後，需進行非破壞性檢測（Non-Destructive Testing，NDT），一般進行PT或MT探測，以檢驗各繫固點焊道上之品質，另外也需檢查焊道厚度是否符合圖面之要求。

## （二）出貨港運送至卸貨港

海運時之船舶穩定度（Vessel Stability）影響重件船在海運時之性能，如同在陸地運輸時之SPMT，亦須考量其穩定度對運輸之影響。穩定度計算必須依照IMO所提及之規範進行分析，在該航線下之海況及考量船舶結構之性能等情況下計算模組海運之穩定度。

模組之外在的繫固施工品質確保完成後，使得出航，但是模組之內在繫固若不完全，如模組內之管線或是閘體因沒有牢固在鋼構上或是平台隔柵板上，則可能會因海運時之加速度而造成鬆脫而破壞，因此模組之內在繫固固定（Internal Sea fastening）也是重要的一環。而重件船之船員需定期檢視模組於海運途中之情形，若有發現損傷及鏽蝕（因為海風或雨水的影響）等問題須予以回報，並盡快探討有無實際執行之策略以解決此問題。

## （三）卸貨港之施工內容

當重件船運送接近至卸貨港時，內陸運輸用之SPMT要準備齊全，並於重件船靠泊後駛至甲板上，準備裝載模組下船。為了節省使用卸貨港碼頭之時間，需先切除影響SPMT運輸動線及固定於模組之海運繫固構

件，而格床支承及其他較為次要之繫固構件可待模組運輸至岸邊後，再進行一次性的完整切割。或是整艘重件船運送至其他碼頭再進行最後的切除，把剩餘的格床支承及海運繫固構件移除，並把甲板恢復成之前之平整情況。

## 四、海事保險鑑定與模組運輸

### （一）國內與國外海事保險鑑定公司概况

由於模組之價值動輒幾百萬美元，亦是一個專案成敗之關鍵，因此需要把運輸上之風險降至最低，以減少巨大的損失。若重件船不幸沉入海底亦或是模組在運輸途中翻覆毀損，一個專案不光只是損失模組的價值，更會因為整體專案的進度而被罰以巨額的罰款，也影響了一家公司的名聲。因此模組的運送需要進行投保，而保險公司為了降低自己的風險，則會請第三方認證（Third Party）屬性的海事保險鑑定公司（Marine Warranty Survey Company，MWS）來做最後的工程評估與風險管控。以一個專案進行之模組運送為例，當內陸運輸公司及船公司都已經檢查其施工品質後，須藉由檢驗點之檢驗表（Check List of Check Point）進行最後確認，而最終之檢查則交由海事保險鑑定公司做逐步分析與授權。若有工程要素不符合海事保險檢查員（Marine Warranty Surveyor）之要求或其規範，則必須立刻修正完畢後請檢查員複檢。目前由於國內致力於發展綠色能源而拓展離岸風電市場，使得許多歐洲廠家紛紛進入我國規劃建設風力發電設備，使得國內保險業者及工程公司對於MWS相關資訊有進一步的認識與瞭解。



## (二) 海事保險鑑定執行策略與因應之道

由於模組運輸之時程向來緊迫，且碼頭時常需要排船，所以重件船之靠泊時間在商業條件下是有所限制的，另外，重件船之業務也相當繁重，如何讓所有關於模組運輸之工程條件均達成海事保險檢查員之同意允許出航的情況下亦是一大挑戰。因此，關於模組運輸之相關計算書及運輸計畫（Method Statement, or so called transportation plan）需適時提送給MWS公司以讓其檢查員審查並提供其意見，由於模組運輸的工作牽涉之工作單位範圍甚廣，因此需要整合檢查員對於不同工作單位之工程問題，並依序、依類別、依問題之輕重緩急尋求解決之道。而現場運輸工作前，需經由檢查員按照其經驗、國際規範及貨主要求做最後確認，因此檢驗點時間的安排便特顯需要管控的經驗。而船方、模組預製廠、貨主及內陸運輸公司之溝通協調也須得到檢查員之認可方能使模組運輸順利進行。

## (三) 常見海事保險鑑定應用於模組運輸時之要點

海事保險鑑定檢查員的任務就是要確保模組運輸整個環節都不能出錯，以防止模組運輸任務的失敗。從最一開始之重件船的選定，檢查員亦需要執行船之適航性（Suitability Check）予以認可該船是符合承載運模組的條件與性能，另外，模組結構與船舶結構於海運運輸時之應力分析亦是海事保險鑑定不可或缺的檢查要素之一，畢竟海事保險鑑定顧名思義，為著重在海洋運輸之層面，因此對於海運時模組之穩定性計算

與加速度對於結構的影響是極其看重的。另外，海上繫固的品質良窳亦關乎模組海運時是否會發生變位而損壞，因此MWS對於海上繫固的現場焊接品質之要求是極其嚴格的。

## 五、結論

以上所述為模組運輸在實際操作上之簡易說明。由此可見，模組運送對於一個執行之專案而言是至關重要的，若其成功執行，也就代表著此一專案已經完成一重要的里程碑。從先前之模組結構設計到商業層面之重件船安排，整個模組運輸牽扯到的範圍是極廣且極深的，如何整合、協調、溝通、釐清各個工程介面與各承包商間之關係是推動模組運輸之進度、提升模組運輸之品質不可或缺的要件。整個模組運輸的執行工作需要大量先前的準備與前瞻性的安排，才能滿足未來客戶之要求與工程團隊的期待，以提升專案之執行效率並創造工程之指標性成就。

## 參考文獻

1. Carmen Gonzalez, "Gigantic and meticulously organized overseas transport for Total's OPTARA project", p.2, Oct. 2014.



# 5G 安全自動化攻防框架

工研院能源與環境研究所前研究員 / 呂錫民

關鍵字：5G、安全、自動化攻防、框架

## 摘要

5G網路目前正在迅速發展，並致力於通過新技術、組件和服務，以連接互聯網的所有事物。由於5G的關鍵作用以及新的體系結構和設計，5G面臨著大量的安全威脅，並需要合適的安全技術。本文提出了針對5G安全的自動化攻防框架，旨在為5G安全研究提供探索性指導。我們首先從分層結構的角度回顧攻擊/防禦物件的安全挑戰，然後提出一種既支持單層安全又支持跨層安全的分層安全模型。根據分層模型，針對5G的已知和未知安全威脅，提出一種基於安全知識圖的自動化攻防框架，並為5G安全自動化建議可能的方向。

## 一、前言

由於移動設備的普及和移動無線通信技術的發展，出現了諸如移動互聯網和物聯網（IoT）之類的大量新的移動應用科技

[1]。根據思科VNI報告，2017年全球移動設備數量為86億，到2022年將達到123億。到2022年，每月移動流量將達到77.5艾位元組（exabytes）<sup>1</sup> [2]。將來，移動無線通信將成為主流通信技術之一，並提供具有不同需求的各種服務，例如大型物聯網設備、高速移動設備和高流量應用。截至目前為止，儘管現有的移動無線網路可以滿足設備使用和流量需求，但可能難以滿足未來的服務需求。因此，將出現下一代移動無線網路，即5G網路。

5G的主要服務可以分為三類 [3]：

- 具有高帶寬要求的增強型移動寬帶（eMBB），例如虛擬實境（VR）和擴增實境（AR）。
- 具有可靠性和延遲要求的超可靠低延遲通信（uRLLC），例如車聯網（IoV）、遠程控制和觸覺互聯網。

<sup>1</sup> 艾位元組（exabyte）= 2<sup>60</sup> bytes。



- 大規模的機器類型通信 (mMTC)，具有大量多樣的設備使用要求，例如 IoT。

為了支持多樣化的新應用和服務，5G 可以採用多種技術，從而可以實現「萬物互聯」的目標。5G 中使用的技術根據不同層的需求進行劃分。實體層可以提供高級通信功能，例如低延遲、高數據帶寬、高覆蓋率和大規模連接。為了獲得這些功能，可以採用多種技術，例如多重全雙工通信、超密集網路、大規模多輸入多輸出和毫米波。邏輯層旨在通過網路虛擬化和網路切片來支持多樣化、高效和低成本的服務。因此，可以採用諸如網路功能虛擬化 (NFV)、軟體定義的網路 (SDN)，新的轉發和路由模型[4]以及基於雲的網路等技術。

5G 的安全性源於新技術和新場景的使用，引起了人們的廣泛關注。5G 安全機制應在 5G 開始之初就考慮在內，並應集成到 5G 體系結構中。通過修補解決 5G 安全問題是不可行的，這可能會導致 5G 架構膨脹。集成的 5G 安全設計帶來兩個主要優點。首先，可以很大程度上避免修補解決方案。安全解決方案幾乎不會影響 5G 架構。其次，5G 的抗攻擊能力將得到增強，對 5G 的攻擊將大大減弱和減少。

儘管已經廣泛研究了 5G 的關鍵安全問題，但仍然存在以下挑戰：

- 缺乏有關跨層安全性的考慮。由於 5G 應用受每一層技術的支持，因此攻擊可能會跨越多層而不是單層。
- 對未知的安全威脅缺乏考慮。發現零日

(0-day) 漏洞<sup>2</sup>和發現未知攻擊(有助於處理潛在攻擊)在 5G 安全中起著重要作用。

- 缺乏有關安全自動化的考慮。手動安全方法不適用於各種複雜的 5G 場景。安全自動化被視為 5G 安全願景的原則之一 [5]。

為了解決上述挑戰，本文專門從自動化攻擊和防禦角度探討有關 5G 的安全框架。由於 5G 尚未廣泛部署，因此建議的框架是針對 5G 安全的探索性解決方案。本文的主要貢獻如下。

- 我們總結 5G 的分層框架，並審查每層的安全挑戰和解決方案。
- 研究跨層安全性，而不是專注於單層安全性。根據 5G 的層次結構，提出層次化的攻防模型。正式描述單層和跨層的安全威脅和解決方案。
- 根據設計模型，提出一種基於安全知識圖的自動化安全框架，以期為 5G 提供自動化攻擊和防禦功能。

本文其餘章節安排如下。首先調查國際組織與企業無線通訊安全框架，其次是國際自動化攻防技術調查，接著討論 5G 安全挑戰，然後設計了一款分層安全模型。其次，提出並討論一種基於安全知識圖的自動化安全框架，以及進行各類安全框架比較。在最

<sup>2</sup> 在電腦領域中，零日漏洞或零時差漏洞 (zero-day vulnerability、0-day vulnerability) 通常是指還沒有修補程式的安全漏洞，而零日攻擊或零時差攻擊 (zero-day exploit、zero-day attack) 則是指利用這種漏洞進行的攻擊。提供該漏洞細節或者利用程式的人通常是該漏洞的發現者。零日漏洞的利用程式對網路安全具有巨大威脅，因此零日漏洞不但是駭客的最愛，掌握多少零日漏洞也成為評價駭客技術水平的一個重要參數。



後一章中，我們總結了這篇文章。

## 二、國際組織與企業無線通訊安全框架

從全球蜂巢式網路（如GSM或2G）的出現開始，標準化就發揮了至關重要的作用。在此過程中，運營商和供應商就全球網路如何協同運作以及如何保護網路和用戶免受惡意攻擊者達成一致協議。網路供應商將商定的標準轉換為功能性的網路元件和系統。網路供應商執行的設計和開發是使最終網路產品成為高效且安全的關鍵元件。

在部署階段，網路還針對目標安全級別進行設計和配置，包括設置安全參數，並進一步增強網路的彈性。在操作階段，提升網路運作並提供目標安全級別的操作程序，高度依賴於網路的部署和操作SOP。

在實施和部署階段，規範中還包含有關虛擬化和雲部署的更多資訊。這些細節將於下文揭曉。

### （一）3GPP

5G 3GPP標準是不可不知的，因為它足夠靈活，以允許無線接入網路（RAN）和核心網路之間發生不同類型的實體和虛擬重疊，例如從遠端設備到核心網路。RAN和核心之間的功能分離引發有關競爭力 and 性能的問題。

3GPP標準化第四章專注於3GPP範圍內的安全機制，即功能元件和界面。下面框架則涵蓋與5G系統部署方案有關的其他安全注意事項，包括：

- 系統範圍的安全性（水平安全性）
  - 網路級
  - 切片
  - 應用程序級別的安全性
  - 機密性和完整性保護
  - 互連（例如，共享批次區（SBA））
- 5G 功能元件部署（垂直安全性）
  - 網路功能虛擬化（NFV）
  - 分佈式雲

3GPP的5G系統標準提供了安全機制，該機制係以4G安全機制為基礎，但也包括針對以下的新增功能：加密、身份驗證和用戶隱私。

儘管3GPP安全機制為非惡意不良無線電條件提供可靠鏈接，但它們不能防範所有可能威脅，例如DDoS<sup>3</sup>和無線電干擾。防範DDoS攻擊和無線電干擾是實施和部署階段工作，例如 如果發生網路擁塞，則通過其他基地台重新路由流量；如果是DDoS，則採用縮放機制<sup>4</sup>和選擇性丟棄/限制作法。

3GPP TS 33.501 V15.1.0（2018-06）是SA3為5G安全性發布的最新規範。它定義

<sup>3</sup> DDoS（Distributed Denial of Service）中文翻譯為分散式阻斷服務攻擊，為DoS（Denial of Service）（譯：阻斷服務攻擊）的延伸，通常會伴隨 Botnet（殭屍網路）進行。大量的殭屍電腦接收攻擊者控制命令，同時對同一目標發動特定類型攻擊，將被攻擊者網路資源及系統資源耗盡，導致無法提供真正的使用者服務，伺服器看似異常停擺，因此稱作阻斷服務攻擊。由大量殭屍電腦造成的阻斷服務攻擊則稱做分散式阻斷服務攻擊。

<sup>4</sup> 自動縮放機制（Scaling Mechanism）是DDoS的重要防線。使用自動縮放功能，可以在線方式添加和刪除機器，以響應不斷變化的負載。



了安全架構：5G系統和5G核心的安全功能和安全機制；以及在5G系統（包括5G核心和5G新無線電（NR））中執行的安全程序。3GPP強調，原本計畫凍結的Release 16 ASN.1和Open API規格將持續在2020年6月進行。但是由於COVID-19疫情，後續版本Release 17 ASN.1和Open API的發佈時間預計將延遲到2021年12月。

## （二）Ericsson

在Ericsson，電信網絡安全框架係由以下層次定義：

- 標準化；運營商、供應商和其他利益相關者通過此過程為全球網絡如何協同工作設定標準。這也包括如何最好地保護網絡和用戶，以免受惡意行為者的攻擊。
- 網絡設計；網絡供應商設計、開發和實施商定的功能性網絡元件和系統標準，這些標準在使最終網絡產品在功能和安全方面起著至關重要的作用。
- 網絡框架；在部署階段，網絡配置成目標性安全級別，這對於設置安全參數並進一步增強網絡的安全性和彈性至關重要。
- 網絡部署和運營；允許網絡運行並提供有針對性的安全級別的操作程序，係高度依賴於網絡本身的部署和操作 SOP。

## （三）Huawei

營運商的5G安全建議：除3GPP安全標準支撐外，運營商需要為網絡設備及網絡管理制定統一的端到端安全框架。在整個安全框架中，不僅要包括基地台、回傳網和核心網等網元，還必須考慮其他網元，如互聯閘

道、防火牆和IT服務器（如DHCP<sup>5</sup>、DNS<sup>6</sup>/RADIUS<sup>7</sup>、伺服器<sup>8</sup>等），保證網絡內部及網絡邊界的安全。基於端到端的管理邏輯，5G網絡安全需滿足以下幾個方面的要求：

- 網絡安全框架
- 網絡運營與運維
- 與外網（如互聯網）及內網相連的邊界安全防護。

監管機構的5G安全建議：制定法律法規，與所有公私合作夥伴進行討論，以確保安全框架的一致性。

其中網絡安全框架可分為應用層（Application Stratum）、歸屬層（Home Stratum）、服務層（Serving Stratum）與傳輸層（Transport Stratum），這四層間是安全隔離的：

<sup>5</sup> 動態主機配置協定（Dynamic Host Configuration Protocol, DHCP），是一個用於IP網絡的網絡協定，位於OSI模型的應用層，使用UDP協定工作，主要有兩個用途：用於內部網絡或網絡服務供應商自動分配IP位址給用戶，以及用於內部網絡管理員對所有電腦作中央管理。

<sup>6</sup> 網域名稱服務（Domain Name Service, DNS）主要目的地是在解決機器的網域名稱（Domain name）與IP address的對應問題。提供telnet、browser、ftp等常用工具的基本服務。

<sup>7</sup> 遠端用戶撥入驗證服務（RADIUS, Remote Authentication Dial In User Service）是一個AAA協定，通常用於網絡存取、或流動IP服務，適用於局域網及漫遊服務。

<sup>8</sup> 伺服器（Server）指：一個管理資源並為用戶提供服務的電腦軟體，通常分為檔案伺服器（能使用戶在其它電腦存取檔案）、資料庫伺服器和應用程式伺服器；或者，執行以上軟體的電腦，或稱為網絡主機（Host）。伺服器通常以網絡作為媒介，既可以通過內部網絡對內提供服務，也可以通過網際網絡對外提供服務。伺服器的最大特點就是其強大的運算能力，使其能在短時間內完成大量工作，並為大量用戶提供服務。



- 傳輸層：最底層的傳輸層安全敏感度較低，包含終端部分功能、全部的基地台功能和部分的核心網功能如 UPF<sup>9</sup>，基地台和這部分的核心網功能不接觸用戶敏感性資料，如使用者永久標識、使用者的根金鑰等，僅僅管理金鑰架構中的低層金鑰，如用戶接入金鑰。低層金鑰可以根據歸屬與服務層的高層金鑰進行推導、替換和更新，而低層金鑰不能推導出高層金鑰。
- 服務層：服務層安全敏感度略高，包括運營商的服務網路的部分核心網功能如 AMF（接入和移動性管理功能）、NRF（網路存儲功能）、SEPP（安全邊緣保護代理）、NEF（網元功能）等。這部分的核心網功能不接觸用戶的根金鑰，僅管理金鑰架構中的中層衍生金鑰，如 AMF 金鑰。中層衍生金鑰可以根據歸屬層的高層金鑰進行推導、替換和更新，而中層金鑰不能推導出高層金鑰。這一層的安全架構不涉及基地台。
- 歸屬層：歸屬層安全敏感度較高，包含終

端的 USIM 卡<sup>10</sup>和運營商的歸屬網路的核心網 AUSF（鑒定服務功能）、UDM<sup>11</sup> 功能，因此包含的資料有使用者敏感性資料如使用者永久標識，使用者的根金鑰和高層金鑰等。這一層的安全架構不涉及基地台和核心網的其他部分功能。

- 應用層：應用層與業務提供商強相關，但與運營商網路弱相關。和 4G 一樣，對安全性要求較高的業務，除了傳輸安全保障之外，應用層也要做端到端地安全保護；例如移動支付，即使 4G/5G 網路保障了傳輸的安全，應用層也要做端到端地安全保障，以確保資金轉移不會出現問題。

### 三、國際自動化攻防技術調查

許多調查性和知識性文章都對 5G 網路的安全性挑戰進行了回顧[6-8]。現有的 5G 安全性研究可以分為兩個方面：實體層安全性和邏輯層安全性。實體層安全性通過實體層各種技術，提供加密、認證、加密密鑰分發和管理等功能[6]。邏輯層安全性集中在 NFV 和 SDN 的安全性上，例如安全性隔離、切片間通信的安全性、配置錯誤、虛擬化威脅、虛擬機監控程序劫持等[7]。

根據層功能，邏輯層可以繼續劃分為多個層，包括虛擬層、服務（切片）層和應用

<sup>9</sup> 用戶平面功能（UPF）是 3GPP 5G 核心基礎系統架構的基本組成部分。UPF 表示控制和用戶平面分離（CUPS）策略的數據平面演變，該策略首先由 3GPP 在其第 14 版規範中作為對現有演進分組核心（EPC）的擴展引入。CUPS 使分組網關（PGW）控制和用戶平面功能解耦，從而使數據轉發組件（PGW-U）可以分散化。這允許在更靠近網路邊緣的地方執行數據包處理和流量聚合，從而在減少網路擁塞的同時提高帶寬效率。CUPS 的主要目標是支持 5G 新無線電（NR）實施，以實現早期的 IoT 應用和更高的數據速率。致力於控制和用戶平面分離的完整實現是一個複雜的主張，它針對採用 5G 用戶平面功能提供優勢子集，例如網路切片。用戶平面功能部署在動態雲本地計算基礎架構中，為基於服務的體系結構（SBA）提供了數據包處理基礎。

<sup>10</sup> USIM 卡（UMTS Subscriber Identity Module），是用於 UMTS 網路中的用戶身份識別模組。USIM 卡還可以儲存使用者資料、電話號碼、認證資料及為短訊提供儲存空間。USIM 卡通常被認為是 SIM 卡的升級。

<sup>11</sup> UDM（Unified Dimensional Model，統一維度模型）技術，以屬性（Attribute）為基礎，發展出由下而上的彈性維度架構，試圖提供最佳的存取效率和資料整合模式。



層。虛擬層採用虛擬化技術將不同的實體設備轉換為統一的虛擬資源，並將網絡功能從基於硬體的應用程序轉移到基於軟體的應用程序[8]。

對於無線信道，由無線電傳播的開放性[9]引起的竊聽攻擊和未經授權的訪問是兩個主要挑戰。加密和授權機制也可以用來解決這兩個挑戰。無線信道的固有安全屬性，包括唯一性、多樣性和互惠性，使第三方無法測量、重建和復制無線信道。基於這些屬性，可以通過使用竊聽編碼技術、安全的多天線技術、基於CSI<sup>12</sup>/RSS<sup>13</sup>/基於相位/代碼的密鑰生成技術、基於竊聽代碼的身份驗證、RF識別方法等，獲得增強的加密和身份驗證機制[10]。

在邏輯層上，對實體資源進行虛擬化和切片以支持服務。存在三個主要的安全挑戰。

(1) 共享資源引起的數據洩漏。儘管不同對象的資源在邏輯上是分開的，但它們可能屬於同一實體設備。資源的重新分配可能會將資源從一個用戶轉移到另一個用戶，並導致數據洩漏。同時，不良的隔離策略也可能導致數據洩漏或攻擊。VM/切片隔離、授權、數據擦除、加密和安全通信協議（TLS<sup>14</sup>、

<sup>12</sup> 信道狀態信息（CSI）是 WiFi 協議的一部分，其提供關於 WiFi 信號狀態的一般信息。

<sup>13</sup> Really Simple Syndication（非常簡單的聚合），它是一種用來分發和匯集網頁內容（例如：新聞標題、網誌 title 等）的 XML 格式。RSS 的使用，供應網頁內容的人可以很容易地產生並傳播新聞鏈結、標題和摘要等資料。簡單的說，其實就有點像是以 Email 的接收訊息之方式接收資訊。

<sup>14</sup> 傳輸層安全性（TLS）是一套加密通訊協定，可用於保護網際網路通訊安全。如果您在瀏覽器的網址列中看

SSH<sup>15</sup>）等方法是很有前途的解決方案[9]。

(2) 軟體和協議的漏洞。

自動化漏洞挖掘技術（Automated Vulnerability Mining Technology）<sup>16</sup>可自動從軟體或協議中查找漏洞。模糊技術與符號執行技術相結合，例如 AFL<sup>17</sup>，並且始終使用其改進方法[11]。

使用數據流拼接技術來劫持程序控制流的資料面向利用[12]是一種很有前途的技術，但成功率和通用性問題應得到解決。

由於物件眾多使得 5G 網路環境十分複雜，因此基於以前的評估方法來改進 5G 網路的風險評估是有其必要的。自動化漏洞修復技術為漏洞提供了自動化修復策略，例如，自動修補、基於搜索的程式修復、基於語義的程式修復[13]等等。

---

到一個鎖定圖示，且 URL 開頭是 `https://`，代表該連線使用 TLS。

<sup>15</sup> Secure Shell（安全外殼協定，簡稱 SSH）是一種加密的網路傳輸協定，可在不安全的網路中為網路服務提供安全的傳輸環境。SSH 通過在網路中建立安全隧道來實現 SSH 客戶端與伺服器之間的連接。SSH 最常見的用途是遠端登入系統，人們通常利用 SSH 來傳輸命令行界面和遠端執行命令。SSH 使用頻率最高的場合は類 Unix 系統，但是 Windows 作業系統也能有限度地使用 SSH。

<sup>16</sup> 目前，漏洞挖掘技術主要包括手動測試、模糊測試、靜態分析、diff 和 bindiff 技術以及運行時分析技術。

<sup>17</sup> American Fuzzy Lop 是一種免費軟體模糊測試工具，它採用遺傳算法來有效地增加測試用例的代碼覆蓋率。到目前為止，它有助於檢測數十個主要的免費軟件項目中的重大軟體錯誤。



#### 四、分層 5G 框架中的安全挑戰

目前有關5G安全的研究和概論文章[14]始終專注於特定安全問題的安全方法。與之前不同，此處5G安全框架被視為一個整體。我們首先總結5G架構的層次結構，然後根據層次結構回顧相應的安全挑戰和解決方案。

##### (一) 5G 的層次結構

不少學者已經提出多種5G方案[15]，但沒有統一的架構。通過這些方案的架構分析，可以提取5G的分層結構。圖1顯示了層次結構。5G的架構從下至上分為四個層：實體層、虛擬層、服務層和應用層。後三層可以統稱為對應於實體層的邏輯層。

實體層提供統一的實體資源以及上層的

相應通信技術。通過虛擬化實體資源，邏輯層可用於支持特定的5G應用。為了滿足5G場景的不同要求，通過結合SDN，網路切片以及相應的管理和編排，將虛擬化資源定制為各種服務（圖1的右側）。詳細過程如下。基於虛擬化技術，將統一的實體資源轉換為虛擬層上的虛擬資源，並且將傳統的硬體支持網路轉換為SDN[8]。通過管理和編排虛擬資源，可以獲得用於特定服務的網路切片（即，虛擬網路）。然後，網路切片為特定應用提供資源，例如，IoT服務可用於支持智慧工廠、智慧城市等。

#### 五、安全挑戰與解決方案

易受攻擊且需要保護的目標稱為攻擊/防禦物件。在這裡，我們從每一層的攻擊/防禦物件而不是特定技術的角度來回顧5G的安全

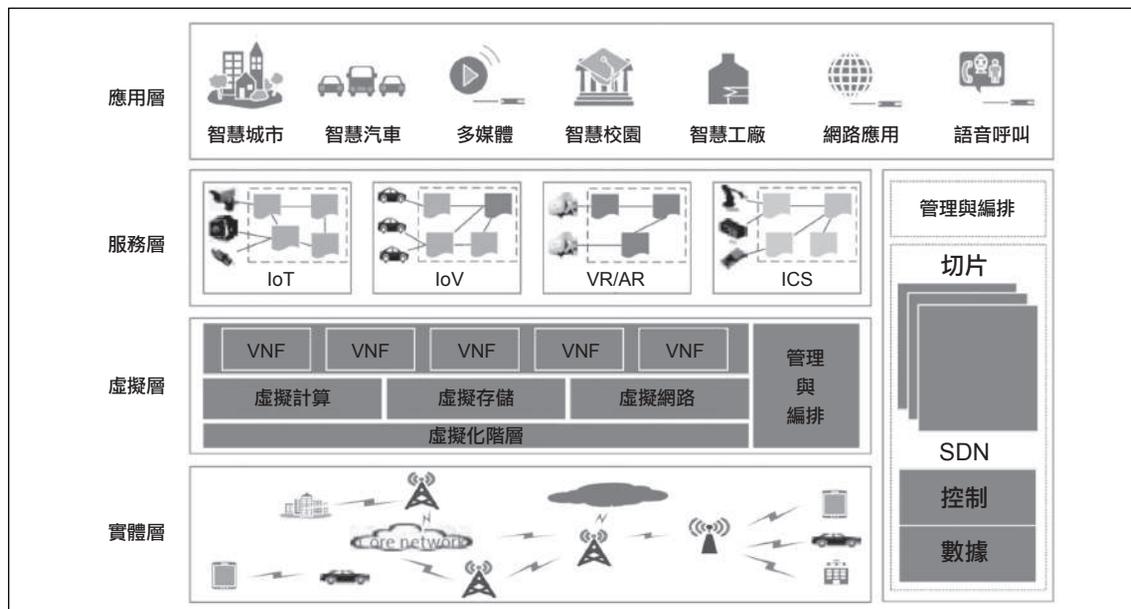


圖 1 5G 的層次結構

資料來源：本研究整理



挑戰。我們的安全框架也圍繞攻擊/防禦物件構建。表1粗略地總結5G的攻擊/防禦目標，並包含傳統物件（例如操作系統和應用軟體）以及與5G相關的物件（例如虛擬實體和控制軟體）。物件可以繼續被分割。例如，可以使用特定軟體供應商和軟體版本來詳細描述表中的控制軟體。

表1前兩列中的物件（硬體設備和無線頻道）屬於實體層。對於硬體設備，偽造設備、旁頻道攻擊和惡意破壞是主要的安全挑戰，可能導致欺騙、數據洩漏和設備不可用。為了解決這些安全威脅，可以使用安全管理、授權和加密機制。安全管理使設備與攻擊者隔離。授權和加密機制可用於識別攻擊者並防止數據被破壞和洩漏。由於無線電傳播的開放性[9]，無線頻道面臨兩個主要挑戰：未經授權的使用和竊聽攻擊。為了解決這兩個挑戰，必須防止攻擊者測量、複製和重建無線頻道。根據5G的獨特性、互惠性和多樣性，提出一些新的5G相關安全技術來滿足要求，例如射頻識別方法、竊聽編碼技

術、使用隨機特徵（例如頻道狀態信息、接收信號強度、相位信息）、安全的多天線技術等等[10]。

表1中的其餘物件屬於邏輯層。主要的安全挑戰如下。

1. 數據洩漏：通過使用NFV和網路切片，5G的實體資源在不同服務之間共享。使用差的隔離方法，攻擊者可能會破壞隔離，從而非法使用其他服務的數據。另外，由於實體資源總是從一個服務重新分配給另一服務，因此來自先前服務的殘留數據可能會洩漏給後者。因此，一些有前途的方法被研究，例如VM/切片隔離、數據擦除、數據加密和安全通信[9]。
2. 硬體、軟體和協議的漏洞：5G的關鍵組件之一是控制器，即管理和編排軟體。控制器的漏洞可被利用並用於對網路切片和相應服務發起攻擊。除了控制器漏洞之外，5G鼓勵使用新的軟體和協議，但是它也提供了未知的軟體或協議漏洞，這些漏洞對5G構成了新的威脅。
3. 外部安全威脅：Dos、DDos和MITM<sup>18</sup>等外部對5G關鍵組件的攻擊可能會導致嚴重問

表 1 5G 網路的物件

類別	物件
硬體設備	基地台、轉發器、路由器、交換機、伺服器、智慧設備等
頻道	無線頻道、光纖、電纜等
虛擬實體	Openstack、VMWare、虛擬機管理程序、泊塢窗、vSwitch、虛擬機（VM）、虛擬資源等
操作系統（OS）	Enea OSE、C/OS、Linux、Windows 等
控制軟體	SDN 控制器、切片控制器等
應用軟體	網路瀏覽器、數據庫、智慧手機應用軟體等
協議	通信協議、網路協議、授權協議、API 等

<sup>18</sup> 中間人攻擊（Man-in-the-middle attack, MITM）在密碼學和電腦安全領域中是指攻擊者與通訊的兩端分別建立獨立的聯絡，並交換其所收到的資料，使通訊的兩端認為他們正在通過一個私密的連接與對方直接對話，但事實上整個對話都被攻擊者完全控制。在中間人攻擊中，攻擊者可以攔截通訊雙方的通話並插入新的內容。在許多情況下這是很簡單的（例如，在一個未加密的 Wi-Fi 無線存取點的接受範圍內的中間人攻擊者，可以將自己作為一個中間人插入這個網路）。



表 2 各種自動化攻擊和防禦框架比較

名稱	架構層次	安全機制	關鍵元件
3GPP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水平系統範圍(網路級、切片、應用程式級別、機密性和完整性保護、互聯)</li> <li>• 垂直 5G 功能元件部署 (網路功能虛擬化、分佈式雲)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 加密</li> <li>• 身份驗證</li> <li>• 用戶隱私</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水平層：無線電接入單元、光學設備、以太網橋、IP/MPLS 路由器 SDn 控制器</li> <li>• 垂直層：eMBB、mMTC、URLLC</li> </ul>
Ericsson	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 標準設定</li> <li>• 網路設計</li> <li>• 網路部屬</li> <li>• 網路運營</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 基地台重新路由流量</li> <li>• 縮放機制</li> <li>• 選擇性丟棄 / 限制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 硬體：CPE、OLT、BNG、ONOS、UE</li> <li>• 界面：API、路由、服務開道</li> </ul>
Huawei	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 應用層</li> <li>• 歸屬層</li> <li>• 服務層</li> <li>• 傳輸層</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 營運商的 5G 安全：使用者永久標識和使用者根金鑰</li> <li>• 監管機構的 5G 安全規範與協定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 基地台、回傳網、核心網、互聯開道、防火牆和 IT 服務器</li> </ul>
本研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 實體層</li> <li>• 邏輯層 (包括：虛擬層、服務層和應用層)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 安全管理、授權和加密機制</li> <li>• 射頻識別方法、竊聽編碼技術、使用隨機特徵、安全多天線技術</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 基地台、轉發器、路由器、交換機、伺服器、智慧設備</li> <li>• 虛擬實體、操作系統、OS、控制與應用軟體、協議</li> </ul>

題，例如服務不可用和偽造數據。

型與5G之間的關係。

表2表示本章設計框架與第二章所示的國際組織企業框架(3GPP、Ericsson、Huawei) 四者之間的匯總比較。

### (一) 層次模型

## 六、分級攻防模型

先前回顧的安全威脅特定於每個層。但是，對5G的大多數威脅是由攻擊組合而不是單個攻擊引起的。多種攻擊的組合可以稱為攻擊鏈。與傳統的攻擊鏈定義不同[16]，這裡的攻擊鏈著重於如何跨多個物件構建指向一個物件的攻擊路徑，而不是發起攻擊的詳細步驟。但是，5G的攻擊鏈缺乏關注。此外，針對5G的攻擊鏈不限於單層。跨層攻擊也是5G的關鍵面向。在此，首先提出一種分層的攻防模型，從而可以表達單層和跨層的攻擊鏈以及相應的防禦策略。然後，討論模

層次模型是以攻擊/防禦物件為基礎。在本節中，對象不是粗略的劃分，而是具有特定廠商和版本的特定攻擊/防禦物件。根據5G的層次結構和相應的安全性挑戰，攻擊/防禦物件分佈在每一層。對於同一層中的兩個物件，兩個物件之間可能存在關係。基於圖層中的物件關係，可以構建出相關圖式。如圖2a所示，共有四層，每層包含一個圖形。在圖中，節點表示攻擊/防禦物件。邊緣由兩個節點之間的關係確定。如果兩個節點之間存在一個或多個關係，則存在一條邊。節點之間的關係被視為邊緣屬性，並由攻防要求決定。例如，對於實體層上的兩個物件，可以使用連接關係。對於邏輯層上的兩個物件，可以使用函數關係。

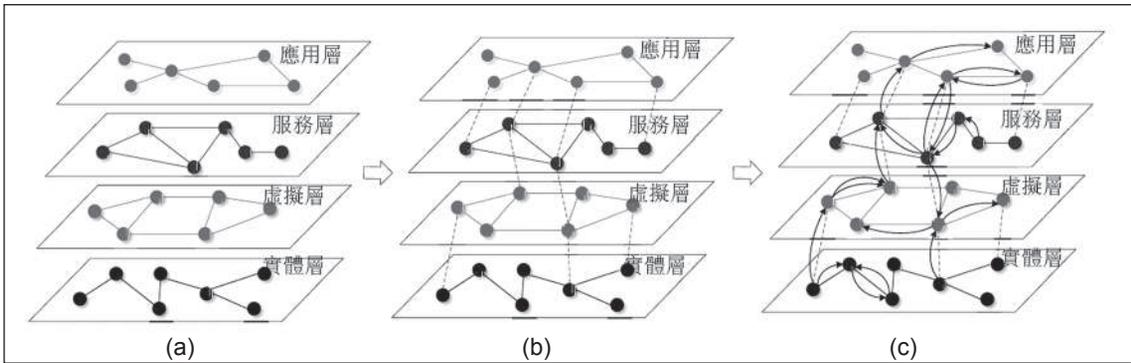


圖 2 分層攻擊和防禦模型

資料來源：[17]

物件關係不限於一層。兩層之間可能存在垂直邊緣。諸如管理、業務流程、功能支持和資源共享之類的多個關係可以用作邊緣屬性。基於垂直邊緣，獲得層次圖。圖2b顯示層次圖。虛線表示垂直邊緣，並連接所有單獨圖形。注意，切片的服務層可以具有多個切片，並且選擇一個切片來表示該層。

以層次圖為基礎，對攻擊/防禦物件的攻擊可以用三元組 $\langle obj, atk, atk\_rst \rangle$ 表示。 $obj$ 表示相應的物件。 $atk$ 是一個元組，包含兩個元素：攻擊條件和攻擊方法。 $atk$ 表示為 $\langle cdt, mtd \rangle$ 。 $atk\_rst$ 是與受 $atk$ 影響的另一個物件相對應的結果列表。它可以表示為一個元組列表，每個元組包含兩個元素：受影響的物件 $aft\_obj$ 和攻擊結果 $per$ 。根據獲取的權限，攻擊結果包含多個權限，例如禁用、可讀、可寫、可執行等。因此，攻擊結果表示為 $\langle \langle aft\_obj1, per1 \rangle, \langle aft\_obj2, per2 \rangle, \langle aft\_objk, perk \rangle \rangle$ 。基於形式化的攻擊 $\langle obj, atk, atk\_rst \rangle$ ，在受攻擊物件和受影響物件之間建立有向邊。如果多個物件受到影響，則會建立多個有向邊。例如，三元組

$\langle Obj1, \langle Cdt, Akt \rangle, \langle \langle Obj2, Readable \rangle, \langle Obj3, Executable \rangle \rangle \rangle$ 表示物件 $Obj1$ 在攻擊條件 $Cdt$ 下受到攻擊方法 $Akt$ 的攻擊。兩個物件 $Obj2$ 和 $Obj3$ 受到影響，並且獲得可讀和可執行權限。因此，從 $Obj1$ 到 $Obj2$ 和 $Obj3$ 建立兩個有向邊。

根據三元組 $\langle obj, atk, atk\_rst \rangle$ ，獲得從受攻擊對象到層次圖上受影響物件的有向邊。圖2c顯示層次結構圖，其中有向邊由黑色箭頭線表示。因此，分層圖變為分層有向圖。有向邊緣分佈在一層或兩層之間。基於有向圖，多個相鄰的有向邊緣可以形成攻擊鏈。在給定初始物件和目標物件的情況下，攻擊鏈提供兩個節點之間的攻擊路徑，並且可以逐步發起攻擊。但是，並非所有定向路徑都可以用作攻擊鏈。攻擊鏈上的每次攻擊都應滿足其攻擊條件。對於任意兩個相鄰的邊，如果通過對第一條邊的攻擊獲得的攻擊結果滿足最後一條邊的攻擊條件，則兩個相鄰邊形成一條攻擊鏈。

防禦策略也可以用三元組 $\langle cost, mtd, \dots \rangle$



dfs\_rst>表示。每個三元組對應於一次攻擊（有向邊緣），並且可以是邊緣的屬性之一。cost表示該策略所需的防禦資源。mtd表示詳細的防禦方法。dfs\_rst表示防禦效果。響應攻擊鏈，可以實現一系列防禦策略。但是，並非所有防禦策略都需要執行。我們只需要根據安全性要求選擇一些特定的防禦策略或針對攻擊鏈進行關鍵攻擊的防禦策略，就可以打破攻擊鏈的連通性。

## （二）層次模型的討論

分層攻防模型不僅可以支持單層威脅的安全描述，還可以支持跨層威脅的安全描述。例如，將來5G可以用於智慧工廠。可能會對工業控制過程造成一些攻擊，例如篡改監視或控制數據。攻擊過程可能會跨越多個層次。首先使用輪渡攻擊來使用實體服務器，然後可以使用NFV管理器漏洞來找到相應的工業控制服務切片。基於切片資源，確定智慧工廠的邏輯拓撲，並根據具體應用進行數據篡改攻擊。整個攻擊過程跨越所有層次。根據5G架構的分層特性，從一層開始並傳播到其它層或同一層中的物件的攻擊將是5G的主要威脅之一。

分層安全模型具有三個優點：

- 可以正式表示並深入分析複雜的安全威脅，以便可以採用有效的策略來應對安全威脅。
- 基於定向路徑，可以發現未知的安全威脅，從而在可能時避免安全風險。
- 層次模型本質上是一個圖，並且適合於支持自動化攻擊和防禦。但是，分層模型只是5G的理論模型。如何應用該模型解決特

定的安全問題仍然是有待解決。在下一章中，我們將通過使用此模型來介紹一個自動化的攻擊和防禦框架。

## 七、自動化的攻擊和防禦框架

大多數5G安全性研究都是依賴專家的知識，因此需要人工干預。難以滿足解決安全威脅的可伸縮性、準確性和效率的要求。因此，自動化攻防成為5G安全的關鍵研究領域之一。提出的分層攻防模型實質上是一個包含所有層中的物件及其關係圖形。相應地，它可以通過安全知識圖來實現。基於這種知識圖，可以將特定物件、漏洞、攻擊、防禦策略等相互關聯。因此，給定攻擊/防禦物件，可以根據安全知識圖上的關係自動化進行攻擊或防禦。

以安全知識圖為基礎構建自動化攻防框架，如圖3顯示的框架結構為例，該框架由四個組件組成：安全知識圖、自動化攻擊技術、自動化防禦技術和5G安全測試平台。以大量安全數據為基礎，首先構建知識圖，並通過使用已知知識，來將其用於支持自動化攻擊和防禦。然後，為了探索未知的安全威脅和有效的防禦策略，研究自動化攻擊技術和自動化防禦技術，以便向知識圖提供反饋。為了驗證新的安全技術，需要5G安全測試平台。

### （一）安全知識圖

安全知識圖基於分層的攻防模型，從大量分散的安全知識中識別出多個實體（物件），並提取相應的屬性和關係。圖4顯示安

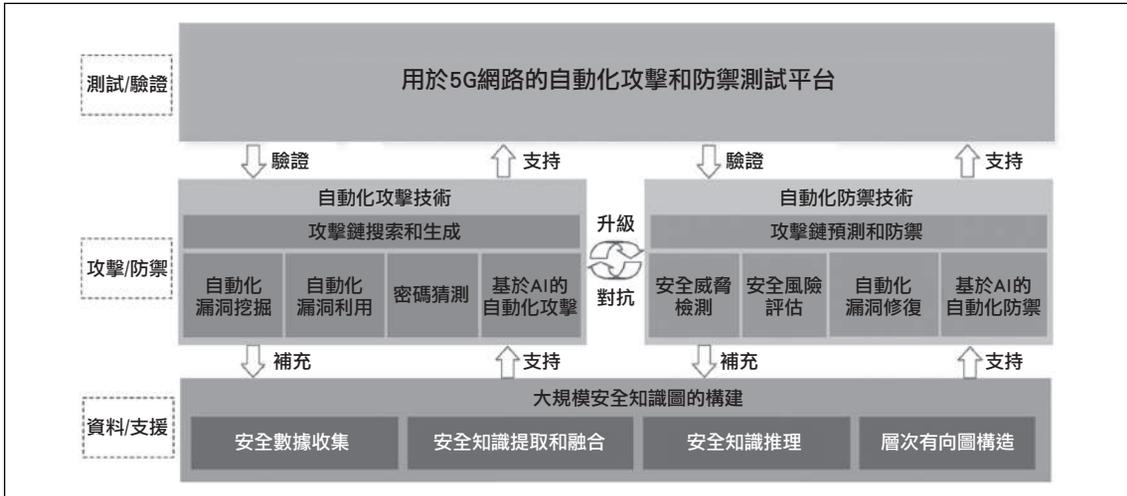


圖 3 自動化的攻擊和防禦框架

資料來源：本研究綜整

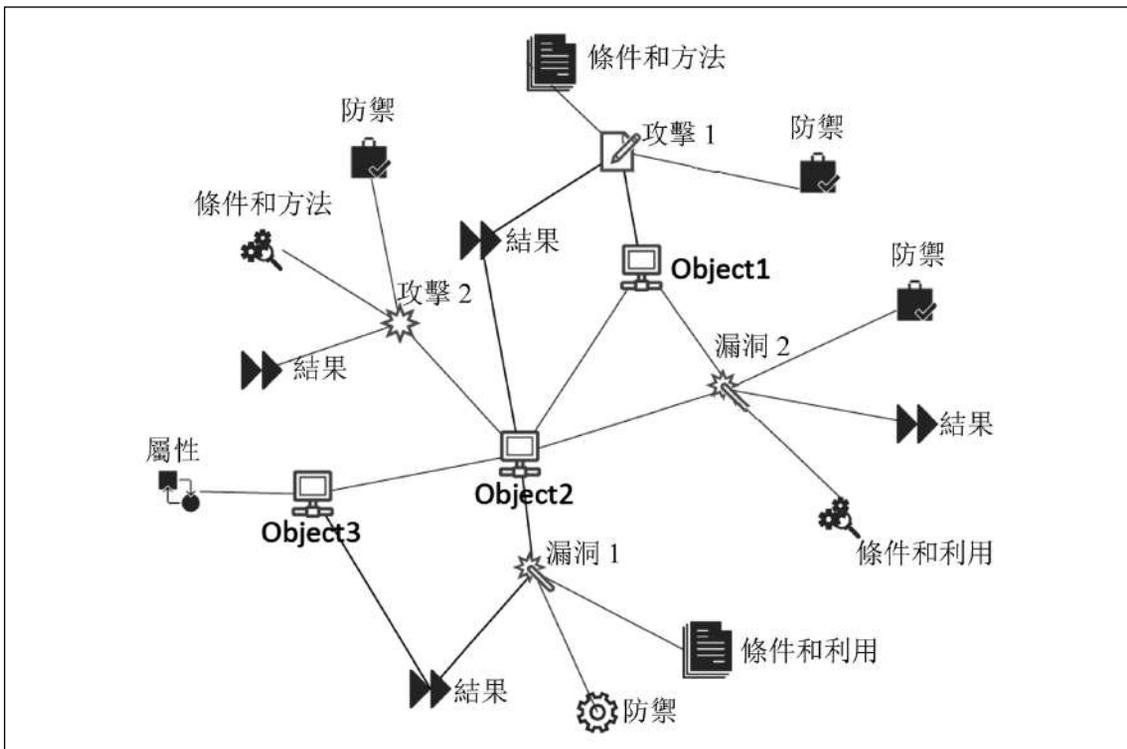


圖 4 安全知識圖的示例

資料來源：[17]



全知識圖的一部分。為了區分對攻擊/防禦物件的不同攻擊，安全威脅（例如攻擊、漏洞等）也被視為物件，而防禦策略被用作相應的屬性。圖中的紅線表示從Object1到Object3的攻擊鏈。除了所呈現的物件之外，還存在在其他物件、關係和屬性。這些未在圖中顯示。

安全知識圖的構建包括三個步驟：數據收集、知識提取和融合以及知識推理。儘管成熟的技術可以直接用於構建，但應考慮5G的特殊環境。對於數據收集，應滿足大規模和動態的要求。可以通過許多現有方式獲取安全數據，例如漏洞數據庫、exploit-DB<sup>19</sup>、GitHub<sup>20</sup>、暗網<sup>21</sup>、安全競賽和安全事件分析。為了支持5G安全，需要一個集中式5G安全數據平台。數據提取和融合面臨準確性和完整性的挑戰。由於存在多源和非結構化數據，一個實體的兩種表示形式可能會被識別為不同的實體，因此很難準確、完整地提取關係。多源知識融合以及半結構化和非結構化數據處理應進一步研究。安全知識推理可用於發現隱藏的關係，而效率是主要挑戰。考慮到大規模知識圖，基於子圖的知識

推理或基於AI的知識推理可能是有前途的方法。

如果知識圖中存在從一個物件到另一個物件的攻擊鏈，則可以自動化獲取攻擊或相應的防禦策略。否則，應添加新的條件和關係。為了支持未知的安全威脅，需要自動化攻擊和防禦技術。

## （二）自動化攻擊技術

對自動化攻擊的研究集中在兩個面向。首先研究自動化攻擊的關鍵技術，例如漏洞挖掘和利用、密碼猜測、基於AI的自動化攻擊等。其次研究攻擊鏈的搜索和生成，以找到現有的和潛在的攻擊鏈。

漏洞挖掘可自動化挖掘硬體、軟體和協議中的漏洞。其中，模糊技術結合符合執行一直被使用。自動化漏洞利用技術自動地定位程式堆疊器的可跳轉位址，然後使用配置記憶體將可跳轉位址替換為shellcode<sup>22</sup>位址，從而可以執行該shellcode。由於5G中的物聯網設備數量眾多，物聯網硬體和新協議的漏洞需要進一步研究。對於密碼猜測，用於密碼庫中基於AI密碼生成是一種很有前途的技術。基於密碼庫，密碼猜測工具（例如HashCat和John the Ripper）用於猜測密碼，它們可能起著重要作用，尤其是在處理5G

<sup>19</sup> Exploit-DB 是一介面向全世界駭客的漏洞提交平台，該平台會公佈最新漏洞的相關情況，這些可以說明企業改善公司的安全狀況，同時也以幫助安全研究者和滲透測試工程師更好的進行安全測試工作。Exploit-DB 提供一整套龐大的歸檔體系，其中涵蓋了各類公開的攻擊事件、漏洞報告、安全文章以及技術教程等資源。

<sup>20</sup> GitHub 是一個商業網站，是目前全球最大的 Git Server。在這邊，你可以跟其它厲害的開發者們交朋友，你可以幫忙貢獻其它人的專案，其它人也可以回饋到你的專案，建立良性循環。

<sup>21</sup> 暗網 (Dark Web) 只能用特殊軟體、特殊授權、或對電腦做特殊設定才能存取，不能夠被正常網路搜尋引擎（如 Google、雅虎等）索引。

<sup>22</sup> shellcode 是一段用於利用軟體漏洞而執行的代碼，shellcode 為 16 進位之機械碼，以其經常讓攻擊者獲得 shell 而得名。shellcode 常常使用機器語言編寫。可在暫存器溢出後，塞入一段可讓 CPU 執行的 shellcode 機械碼，讓電腦可以執行攻擊者的任意指令。



IoT設備時。為了繞過安全檢測，進而研究一種基於AI的自動化攻擊，例如，通過使用AI技術動態更改設備使用的特性和規則，可以繞過基地台的DDoS攻擊檢測。

以上技術用於向知識圖提供反饋知識。為了利用知識圖，可以研究攻擊鏈搜索技術和攻擊鏈生成技術來發現現有的威脅和潛在的威脅。

由於現有的攻擊鏈已經記錄在知識圖中，因此可以通過攻擊鏈搜索技術獲得從某個物件開始或針對某個物件的攻擊鏈。給定一個物件，可以根據某些條件（例如最小成本和最大威脅）獲得具有從該物件開始的樹結構的多個攻擊鏈。同樣，也可以找到針對物件的攻擊鏈。從總體上看，效率是攻擊鏈搜索技術的主要重點之一。在大圖上的路徑搜索可能是一種有前途的技術。

可以使用攻擊鏈生成技術以現有知識為基礎來預測和建構未知攻擊鏈。基於AI的技術（例如圖神經網路）是一種很有前途的技術。首先通過訓練AI模型來學習現有的攻擊鏈，然後將訓練後的AI模型用於預測潛在的攻擊鏈。基於潛在攻擊鏈，探索每個邊緣的特定攻擊以確定潛在攻擊鏈是否有效。

### （三）自動化防禦技術

與自動化攻擊技術類似，對自動化防禦技術的研究也包括兩個面向：

- 相互關聯的關鍵自動化防禦技術，包括安全威脅檢測、風險評估、漏洞修復和基於AI的自動化防禦。

- 攻擊鏈的預測和防禦，可以預測攻擊鏈並選擇相應的防禦策略。

為了檢測相關5G攻擊/防禦物件的攻擊，因此採用安全威脅檢測技術，並且安全態勢感知被認為是一種很有前途的檢測方法。但是，由於跨層安全威脅，傳統的態勢感知變得有限。所以，檢測實體層的變化並支持NFV、SDN和網路切片是進一步研究的主要重點。為了保證防禦策略的有效性，因此採用安全風險評估技術對安全威脅進行定量評估。由於物件數量眾多且5G環境複雜，以前的評估方法不再適用於5G，因此需要改進的方法。動態檢測可能是一種有前途的方法[18]。針對漏洞，可以採用自動化漏洞修復技術[13]。與基於AI的攻擊技術相對應，可以採用從現有防禦或攻擊方法中學習動態防禦方法的基於AI的防禦技術。除上述防禦技術外，還可以應用傳統的防禦技術，例如加密、認證和密鑰管理[19]。

基於以上技術，可以實現攻擊鏈的預測和防禦技術。當檢測到對某一物件的攻擊時，可以預測攻擊鏈路徑和潛在的最終目標。因此，可以獲得相應的防禦策略。由於攻擊和防禦的動態特性，攻擊鏈的預測和防禦策略的選擇可以採用基於博弈論的方法。此外，強化學習也有助於選擇防禦策略。最好的獎勵措施可以通過反覆試驗來學習。因此，兩種技術的結合可能是一種有前途的方法。

### （四）5G 安全測試平台

5G測試平台在5G安全中起著重要作用。



它為攻擊和防禦實驗提供一個平台，並為新的安全技術提供一種驗證方法。通過使用5G安全測試平台，對現有安全問題進行廣泛而深入的研究，可發現未知的安全威脅並對其進行快速有效的響應。

目前已經存在幾個5G測試平台，但是仍然缺乏安全測試平台，尤其是對於自動化攻擊和防禦技術而言。在這裡，我們不關注特定的技術細節，而是討論實現5G安全測試平台的一些有希望的方向。根據5G安全測試平台的規模，可以從三個面向進行進一步研究：

- 可以構建具有所有層的集成測試平台，以進行大規模安全測試。
- 可以研究用於單層的水平測試平台的相應層的安全性，例如，實體層的測試平台和虛擬層的測試平台。
- 還可以構建垂直服務的測試平台。

## 八、5G 自動化攻擊和防禦框架

自動化攻擊和防禦框架不是5G安全的萬能框架。該框架並非旨在完全解決5G安全問題，而是為5G安全自動化提供可能的指導和一些有用的想法。

自動化攻防框架有助於應對5G中單層和跨層的綜合攻擊威脅。自動化攻擊和防禦框架還可以應對5G的已知和未知安全威脅。由於現有的攻擊鏈和防禦策略都存儲在安全知識圖中，因此可以在知識圖中自動化地找到它們。相對而言，通過使用自動化攻擊技術和自動化防禦技術，可以發現對5G的未知威脅並將其記錄在知識圖中。

該框架採用基於安全知識圖的開放架構。對於攻擊或防禦技術，它可以由安全知識圖支持，並用於發現新知識以向知識圖提供反饋知識。技術之間的關係大多是鬆散耦合的。因此，框架中使用的技術不限於現有技術。還可以對符合5G特性的新技術進行進一步研究，並將其集成到框架中。面向5G的現有安全技術和針對5G的新安全技術都值得研究。

## 九、結論

本文重點介紹5G安全性，並探討5G的潛在方向。提出了針對5G安全的自動化攻防框架。通過回顧5G的架構和挑戰，提出一種既支持單層安全又支持跨層安全的分層安全模型。安全模型對應於安全知識圖。基於這樣的安全知識圖，可以獲取5G安全框架，並將其用於應對已知和未知的5G安全威脅。

### 參考文獻

1. Du X., and H. Chen, "Security in Wireless Sensor Networks," 2008, IEEE Wireless Commun., 15(4), 60–66.
2. Cisco, 2017, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast update (2016-2021)," Cisco White Paper, Feb. 2017.
3. Ji H., Park S., Yeo J., Kim Y., Lee J., and Shim B., 2018, "Ultra-Reliable and Low-Latency Communications in 5G Downlink: Physical Layer Aspects," IEEE Wireless Communications, 25(3), 124–130, doi: 10.1109/MWC.2018.1700294.
4. Tian Z., Gao X., Su S., and Qiu J., 2020, "Vcash: A Novel Reputation Framework for Identifying Denial of Traffic Service in Internet of Connected Vehicles," IEEE Internet of Things Journal, 7(5), 3901–3909, doi: 10.1109/JIOT.2019.2951620.
5. Alliance N. G. M. N., 2015, "NGMN 5G White Paper," Next Generation Mobile Networks, White paper, Feb. 2015, 1–125.
6. Wu, Y. et al., 2018, "A Survey of Physical Layer Security Techniques for 5G Wireless Networks and



- Challenges Ahead,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*.
7. Ahmad, I. et al., 2018, “Overview of 5G Security Challenges and Solutions.” *IEEE Communications Standards Magazine* 2.1, 36-43.
  8. Hawilo H., Shami A., Mirahmadi M., and Asal R., 2014, “NFV: state of the art, challenges, and implementation in next generation mobile networks (vEPC),” *IEEE Network*, 28(6), 18-26, doi: 10.1109/MNET.2014.6963800.
  9. Wang X., Hao P., and Hanzo L., 2016, “Physical-layer authentication for wireless security enhancement: current challenges and future developments,” *IEEE Communications Magazine*, 54(6), 152-158, doi: 10.1109/MCOM.2016.7498103.
  10. Liu Y., Chen H., and Wang L., 2017, “Physical Layer Security for Next Generation Wireless Networks: Theories, Technologies, and Challenges,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(1), 347-376, doi: 10.1109/COMST.2016.2598968.
  11. Klees G., et al., 2018, “Evaluating Fuzz Testing,” *Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, ACM.
  12. Hu, H. et al., 2015, “Automatic Generation of Data-Oriented Exploits,” *USENIX Security Symposium*.
  13. Mechtaev S., Yi J., and Rovchoudhury A., 2016, “Angelix: Scalable Multiline Program Patch Synthesis via Symbolic Analysis,” *Proc. 38th Int’l. Conf. Software Engineering*, 691–701.
  14. Wu Y., Khisti A., Xiao C., Caire G., Wong K., and Gao X., 2018, “A Survey of Physical Layer Security Techniques for 5G Wireless Networks and Challenges Ahead,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 36(4), 679-695, doi: 10.1109/JSAC.2018.2825560.
  15. Agiwal M., Roy A., and Saxena N., 2016, “Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(3), 1617-1655, doi: 10.1109/COMST.2016.2532458.
  16. Hutchins E. M., Cloppert M., and Amin R., 2011, “Intelligence-Driven Computer Network Defense Informed by Analysis of Adversary Campaigns and Intrusion Kill Chains,” *Proc. 6th Int’l Conf. Information Warfare and Security*, 1(1), 113–125.
  17. Sun Y., Tian Z., Li M., Zhu C., and Guizani N., 2020, “Automated Attack and Defense Framework toward 5G Security,” *IEEE Network*, 1-7, doi: 10.1109/MNET.011.1900635.
  18. Qiu J., Du L., Zhang D., Su S., and Tian Z., 2020, “Nei-TTE: Intelligent Traffic Time Estimation Based on Fine-Grained Time Derivation of Road Segments for Smart City,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(4), 2659-2666, doi: 10.1109/TII.2019.2943906.
  19. Mungara R., Rao K. V., and Pallamreddy V. S. R., 2009, “A Routing-Driven Elliptic Curve Cryptography based Key Management Scheme for Heterogeneous Sensor Networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 8(2), 1223–1229.



# 工程師宣言 敬請力行廣宣

聯合國教科文組織（UNESCO）通過世界工程組織聯盟（WFEO）提案，公布自2020年開始每年3月4日訂定為世界工程日。本學會為響應各國肯定工程及工程師對世界貢獻的呼籲，同時為提升大眾認同有關工程技術可改善人類生活及推動永續發展的重要，首由秘書處研擬「工程師宣言」草案提送理監事討論，決議先擴大邀請委員會共同參與研討。

依本學會工程倫理委員會規程任務，由該委員會邀請各委員會就原草案充分討論提出修訂案，續提報並經109年7月17日第71屆第9次理監事聯席會議討論通過，決議納入「中國工程師信條」之附件，以增加信條之熱忱及動力。「工程師宣言」內容組成分為5項：「認知」、「態度」、「專業」、「目標」及「榮譽」，呈現出正能量和清新士氣的認知，強化工程師認真紮實態度、積極增進工程技術專業、勇於負責、展現自信、表達價值、贏得信賴。

## 「工程師宣言」

109年7月17日第71屆  
第9次理監事聯席會議通過

身為工程師，我充分瞭解「工程」是應用科學知識與專業以促進人類社會福祉的技術活動。

我將運用所學，尊重自然環境、專業倫理，守法守分，敬業奉獻，並與團隊分工合作、互信互利，以最真誠的服務態度，完成每一項任務。

我將不斷充實自我，與時俱進，追求創新，並樂意分享所知，讓工程專業承先啟後，世代傳承。

我將努力運用工程技術，追求環境永續發展，創造良好生活品質，造福全人類。

我是工程師，我以身為工程師為榮。



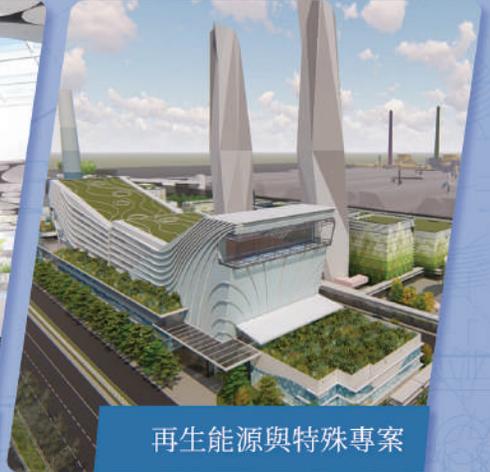
# 泰興工程顧問

台灣領先的工程設計、施工、及專案管理公司，  
為客戶創造卓越的價值，為員工創造美滿的職業生涯

## 5大 事業群



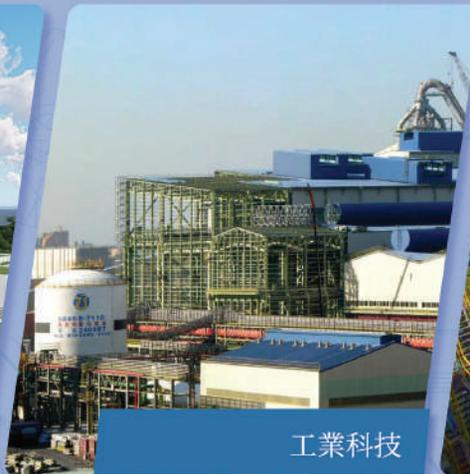
交通與通訊



再生能源與特殊專案



電力



工業科技



化工與環保

### 服務 項目

工程設計 / 計畫採購 / 營運管理 / 試車運轉 / 專案管理

泰興工程顧問股份有限公司  
台北市敦化南路二段333號14樓

<https://www.pecl.com.tw>  
TEL:(02)2376-8000 | FAX:(02)2738-2000

# 成為綠色產業的卓越企業 致力資源永續及創新價值



國家品質獎  
NATIONAL QUALITY AWARD

高爐水泥、高爐石粉  
飛灰爐石粉、HSC處理劑  
廢棄物污染場址清理  
土壤及地下水污染整治  
有害事業廢棄物固化處理  
氣冷轉爐石及高爐石  
資源回收利用



打造城市天際線的**最佳選擇**

大跨距廠房結構的完美搭配

中龍熱軋型鋼及窄幅鋼板

- ✓ SM570 超強結構鋼
- ✓ 六國產品認證
- ✓ 強韌耐震鋼材
- ✓ 技術整合服務



陶朱隱園



遠雄 THE ONE



中鋼總部大樓



台積電廠房



中龍鋼鐵  
DRAGON STEEL



CSC GROUP

中鋼集團

電話：(04) 2630 6088 #3219 (業務服務)、#8810(技術服務)



瞭解更多



電子型錄