貨櫃船主要船級社結構設計規範體系比較與前沿趨勢綜述

A Comprehensive Review of Structural Design Rule Systems Across Major Classification Societies and Emerging Frontiers for Container Ships

蔡奇呈[1]、陳嘉陵[2]

摘要

隨著全球海運貿易規模化發展，超大型貨櫃船(ULCV)在結構大開口與尺度效應下，面臨極限扭轉與水彈性效應(Hydroelasticity)等嚴峻力學挑戰。本文立足於技術綜述與評論(Review Paper)視角，系統性梳理國際船級社協會(IACS)統一要求及主要船級社(CR、LR、DNV、ABS、BV、ClassNK 與 CCS)之入級技術規範體系。文章深入解析波浪載荷計算、剖面模數、疲勞強度評估及三維有限元素分析(FEA)等關鍵要素之技術哲學分歧，並輔以中型後巴拿馬船型之工程示意性估算，闡明規範算式之敏感度差異，釐清其與超大型船型力學機制之尺度邊界。此外，本文探討了 IACS UR C6/C7 驗證準則、港內淺水下沉(Squat)與突風載荷等操船邊界條件，並評述替代燃料與數位孿生技術之規範演進，為船舶設計人員與船東提供全生命週期結構安全與規範選用之全面技術參考。

關鍵詞：超大型貨櫃船、船級社規範、結構強度、水彈性效應、技術綜述

Abstract

Driven by the economies of scale in global maritime trade, Ultra-Large Container Vessels (ULCVs) encounter severe structural mechanics challenges, particularly limit torsional loads and hydroelastic responses (whipping and springing) induced by large deck openings and scale effects. From the perspective of a state-of-the-art review, this paper systematically examines the technical classification framework established by the International Association of Classification Societies (IACS) and major classification societies (CR, LR, DNV, ABS, BV, ClassNK, and CCS). It thoroughly analyzes the technical philosophies governing wave load formulations, midship section modulus criteria, fatigue strength evaluations, and three-dimensional finite

[1] 蔡奇呈 Chi-Cheng Tsai，中央警察大學水上警察學系專任助理教授，E-mail：oceanjerry@gmail.com

[2] 陳嘉陵 Chia-Ling Chen，中央警察大學水上警察學系專任助理教授，E-mail：chiaclloyd@gmail.com

element analysis (FEA). Using a post-Panamax benchmark vessel as an illustrative engineering estimation, the sensitivity of rule formulation transfers is clarified while strictly delimiting these results from ULCV-scale hydroelastic behaviors. Furthermore, this review integrates operational boundary conditions—such as IACS UR C6/C7 verification frameworks, shallow-water squat effects, and gust wind loads—alongside rule evolutions concerning alternative fuel containment and digital twins, thereby providing naval architects and shipowners with a comprehensive technical reference for structural safety and rule appraisal across the vessel lifecycle.

Keywords: Ultra-Large Container Vessels, Classification Rules, Structural Strength, Hydroelastic Response, Technical Review

壹、前言

近年來，在極致化規模經濟效益與大幅降低單位貨運成本(Slot Cost)的強烈驅動下，全球貨櫃船隊的營運規模不斷突破實體極限 (Container News, 2026)。目前，全球頂尖航商營運之超大型貨櫃船(Ultra-Large Container Vessel, ULCV)其裝載容量已一舉超越 24,000 TEU 大關 (Container News, 2026)。然而，此類巨型船舶在幾何尺寸與結構型式上的劇烈變革，使得船體結構設計面臨了遠超傳統經驗範疇的物理與工程挑戰。由於 ULCV 為極大化甲板集裝效率，普遍採用甲板大開口(Large Deck Openings)之雙殼結構，導致船體抗扭剛度(Torsional Rigidity)大幅下降。傳統基於一維或二維梁理論(Euler-Bernoulli / Timoshenko Beam Theories)的經驗公式與經驗外推法，已無法精準捕捉並評估極限海況下複雜的扭轉應力集中(Torsional Stress Concentration)與剪力滯後效應(Shear Lag Effects)。

更為棘手的是，當超大型船體的低頻固有振動頻率降至與海洋波浪能量頻域重疊時，波浪引發的非線性水彈性效應(Hydro-elastic Responses)包括高頻激振(Whipping)與持續共振(Springing)將顯著加劇船體總縱彎矩與疲勞損傷，成為威脅結構安全的關鍵因素 (Chen, Zhang, Chen, & Magee, 2024; Chen, Zhang, & Wang, 2024; Corigliano et al., 2024; Hirdaris et al., 2023; Jiao et al., 2021)。為了精確量化與評估此類水彈性響應，學界與工業界持續透過縮尺全彈性船體模型(Fully Elastic Ship Models)進行波浪水槽試驗 (Chen, Zhang, Chen, & Magee, 2024; Chen, Zhang, & Wang, 2024; Grammatikopoulos, 2023; Marón & Kapsenberg, 2014)，並結合局部板結構在流體接觸下的自振與水彈性振動解析 (Cho et al., 2015; Neogi et al., 2026; Yildizdag et al., 2019)。此外，近年基於長短期記憶神經網路(LSTM Encoder-Decoder)與物理引導代理模型(Physics-Guided Surrogate Models)的先進演算法，亦被導入於船體全方位激振響應即時預測與數位孿生(Digital Twin)架構中 (Deo et al., 2026; Liu et al., 2024)。

在此一技術變革的背景下，國際船級社協會(International Association of Classification Societies, IACS)及其核心成員船級社，包括財團法人驗船中心(CR)、勞氏船級社(Lloyd's Register, LR)、挪威船級社(DNV)、美國驗船協會(American Bureau of Shipping, ABS)、法國船級社(Bureau Veritas, BV)、日本海事協會(ClassNK)及中國船級社(CCS)等扮演著極其關鍵的技術把關者角色 (ABS, 2024; BV, 2024; DNV, 2025; IACS, 2015; LR, 2025; ClassNK, 2023)。船級社規範(Classification Rules)不僅是船舶結構強度、疲勞壽命與材料選用的重要入級技術基準，更是確保船舶在全生命週期(Full Lifecycle)極限環境下營運安全的核心基石。

然而，受限於各船級社各自累積之實船應變監測數據庫(Full-scale Strain Gauging Data)、計算流體力學(CFD)與水彈性數值模擬演算法之發展側重，以及背後風險哲學(Risk Tolerance)的微幅差異，各機構在貨櫃船結構規範中的剖面模數要求、波浪載荷計算模型及疲勞評估基準上，仍呈現顯著的技術分歧與特色 (Hirdaris et al., 2023)。

基於此，本文立足於技術綜述與體系評論視角，系統性地比較與剖析各大主要船級社在貨櫃船結構設計規範上的核心差異，特別聚焦於波浪載荷計算機制、非線性水彈性回應之規範化處理、疲勞強度評估流程(如 S-N 曲線選用與 Hot-Spot 應力導出法)等關鍵領域。本研究不僅深入整理現行規範之異同，更前瞻性地結合國際船級社協會最新發布並生效之 IACS 統一要求，例如針對貨櫃船縱向強度評估之 UR S11A (IACS, 2015)以及貨櫃綁紮軟體與固定系統認證之 UR C6/C7 修訂架構 (IACS, 2025)，並納入航運業因應 IMO 脫碳時程而引發的替代燃料(如 LNG、氨、氫燃料艙裝設)對船體局部與整體結構強度之衝擊 (DNV, 2025)。透過此一多維度的比較與前沿趨勢探討，期能為船舶工程師、驗船師及船東在進行新型 ULCV 結構優化設計、鋼材配置效益評估與全生命週期安全管理時，提供具深刻學術價值與實務指導意義之新穎參考。

貳、 主要船級社貨櫃船結構規範體系概述

貨櫃船(特別是超大型貨櫃船 ULCVs)的結構設計與安全性評估，涉及極為複雜的連續介體力學、流固耦合與大開口薄壁梁扭轉等力學問題。在法理位階上，必須嚴格區分國際海事組織(IMO)國際公約(如 SOLAS)及船旗國法規所屬之「法定強制要求(Statutory Requirements)」，與驗船機構為維持船舶結構入級完整性所制定的「船級規範(Classification Rules)」。船級規範並非國際公法下的法定強制標準，而是確保船舶全生命週期(Full Lifecycle)結構強度、疲勞壽命與營運安全的重要技術基準。

2.1 三層次結構規範體系架構

為系統性解析國際各大船級社於貨櫃船結構規範之技術差異，本文構建清晰的「三層次比較架構」進行橫向剖析：

1. 第一層：IACS 統一要求(最低技術基準)

國際船級社協會(IACS)制定的統一要求(Unified Requirements, URs)構成全球船級社規範的基石與最低合規門檻(Minimum Compliance Baseline)。其中，UR S11A 明確規範貨櫃船在極限海況下縱向彎矩、剪切力與扭轉效應的最低設計基準；UR S33 則強制要求超大型貨櫃船艙口圍板頂板與上甲板帶板採用極厚高張力鋼(如 YP47 級)時，必須配置具備高止裂韌性(K_{ca})的脆性裂紋止裂鋼(BCAS)；UR S34 則對全船及貨艙段三維有限元素分析(FEA)設定了統一的網格尺寸與校核標準。

2. 第二層：各大船級社基本建造規範(Prescriptive Rules)

在 IACS 最低門檻之外，各大船級社立基於各自獨立的學術研究、實船監測資料庫與驗船歷史，發展出包含專屬軟體套件在內的基本建造規範與尺寸推算算式(Prescriptive Rules)：

(1) 英國勞氏船級社(LR)：以系統化的經驗公式與嚴格的結構細部構造(Structural Details)規範見長，強調以風險為基準的結構可靠性評估。

(2) 挪威船級社(DNV)：代表高度計算力學驅動的體系，深度仰賴三維有限元素分析(Direct 3D FEA)與基於概率可靠性(Probability-based Reliability)的疲勞評估方法。

(3) 美國驗船協會(ABS)：規範深度融合美洲工業標準(如 ASTM/AWS)，著重於極限強度與動態載荷響應(Dynamic Loading Approach, DLA)，對極限浪況下的防扣屈(Anti-buckling)設計具備強烈工程實務取向。

(4) 日本海事協會(ClassNK)：立基於日本造船實務與北太平洋海況(North Pacific Wave Data)長期監測數據，在其 PrimeShip 系統中針對疲勞 S-N 曲線選用與扭轉箱(Torsion Box)應力場導出展現高度嚴密之規範偏好。

(5) 法國船級社(BV)：專注於流體動力學傳遞與甲板/艏側拍擊載荷(Slamming Loads)的數值模擬，並量化垂直、水平與扭轉載荷的極限相位組合。

(6) 財團法人驗船中心(CR)：其《鋼船建造規範》深度融合 UR S11A 導則與遠

洋工程經驗，在淨厚度法(Net Scantling Approach)實施、高張力鋼(YP36/YP40/YP47)應力集中評估及現場檢驗工藝彈性上，高度貼合造船實務需求。

(7) 中國船級社(CCS)：在其《鋼質海船入級規範》中導入亞洲至歐美航線之波浪譜動態載荷組合法(Dynamic Load Cases)，強化貨艙大開口角隅與雙層底結構之受力校核。

3. 第三層：附加船級符號與技術指引(Class Notations & Guidelines)

針對超大型貨櫃船(ULCV)低固有振動頻率所誘發的極限動態響應，各大船級社發展出專屬之附加標記(Notations)與非強制性指引(Guidelines)：

(1) 水彈性效應(Hydroelasticity)：DNV 推出 WHS 船級符號與指引；LR 導入 WHA 驗算導則；BV 採用專屬三維水彈性流固耦合程式 HOMER；ClassNK 則發布 PrimeShip-Hydroelasticity 時域分析指南。

(2) 動態橫搖風險：如 LR 之 RDA/PRR(Parametric Roll Risk)參數共振橫搖評估指引。

(3) 繫固系統與綁紮驗證：依據最新 IACS UR C6/UR C7 要求，船級社對船載綁紮計算軟體之統一功能與性能測試驗證準則(Verification Framework)進行認證，並針對繫固橋基座與船體結構介面進行強度與疲勞評估。

2.2 規範比較方法論與對照矩陣

為確保橫向評析之學術客觀性與對稱性，本文確立規範版本依據與基準同質化方法：

1. 規範版本界定：本文選取各大船級社截至 2024–2025 年生效之正式規範版本進行比對，包括 DNV (July 2025)、LR (July 2025)、ABS (2024)、BV NR467 (2024)、ClassNK (2023/24)、CR (2024) 及 CCS (2023)。

2. 基準同質化(Normalization)：所有極值波浪載荷均對齊至 10^{-8} 超越機率基準與北大西洋海況散佈圖；構件幾何特性與應力計算均統一扣除名義腐蝕裕量 t_c，建立在「淨厚度(Net Scantlings)」基準上進行客觀比對。

表 1 各大船級社貨櫃船結構規範核心條文對照矩陣								
評估維度/核心要求	IACS 統一要求 (UR)	DNV (2025)	LR (2025)	ABS (2024)	ClassNK (2023/24)	BV (2024)	CR (2024)	CCS (2023)
總縱彎矩與剪力強度	UR S11A	Pt.3 Ch.4 Sec.3	Pt.3 Ch.4	Pt.3 Ch.2 Sec.1	Pt.C Ch.3 Sec.2	NR467 Pt.B Ch.5	Part 1 Ch.3	Part 2 Ch.2
止裂鋼 (BCAS) 要求	UR S33	Pt.3 Ch.2 Sec.4	Pt.3 Ch.2 Sec.2	Pt.2 Ch.1 Sec.1	Pt.C Ch.1 Sec.1	NR467 Pt.B Ch.4	Part 1 Ch.2	Part 2 Ch.1
有限元素分析 (FEA) 準則	UR S34	Pt.3 Ch.7 (Direct Calc.)	ShipRight SDA	Pt.3 Ch.1 Sec.2 (DLA)	PrimeShip-HULL	NR467 Pt.B Ch.7	Part 1 Ch.3 App.	Part 2 Ch.2 App.
疲勞熱點應力外推法	-	Pt.3 Ch.9 Sec.3 (S-N/FEA)	ShipRight FDA	Guide for Fatigue (Part 5C)	Guidelines for Fatigue (PrimeShip)	NR467 Pt.B Ch.10	Part 3 Ch.2 Sec.4	Part 2 Ch.8 Sec.4
水彈性評估 (Whipping/Springing)	-	Class Notation WHS (Pt.6 Ch.2)	Class Notation WHA (ShipRight)	Guide for Dynamic Loading (DLA)	PrimeShip-Hydroelasticity Guide	Notation HOMER (NR467 Pt.E)	專案實船審查認可機制	貨櫃船結構水彈性評估指南
綁紮軟體與繫固結構介面	UR C6 / UR C7	Pt.3 Ch.13 Sec.2	Class Notation LASHING	Pt.5C Ch.5 Sec.3	Pt.C Ch.14 Sec.3	NR467 Pt.B Ch.11	-	-
本研究整理								

參、 結構設計關鍵要素比較

貨櫃船(特別是超大型貨櫃船 ULCV)的結構設計涉及多個極為複雜的連續介體力學、流固耦合與材料失效問題。由於甲板具有大開口特性，船體結構在海浪中承受著複雜的複合載荷作用。本節將從波浪載荷計算方法、結構構件剖面模數與厚度要求、疲勞強度評估體系及有限元素分析(FEA)評估標準四個核心維度，深層比較主要船級社的技術規範差異與工程實務哲學。

3.1 波浪載荷計算方法與組合效應

波浪載荷是決定船體整體縱向強度、中橫剖面構件尺寸(Scantlings)與結構安全餘量的核心設計輸入。各船級社在評估設計波浪彎矩(Wave Bending Moment, WBM)時，採用的基本參數(如船長 L、船寬 B、型深 D、方形係數 C_b 及航速 V)框架基本一致，均建立於國際船級社協會(IACS)的基礎之上，但在非線性修正係數、流體動力學傳遞函數(Transfer Functions)及載荷組合係數(Load Combination Factors)的設定上存在顯著差異。

1. 縱向垂直彎矩(VBM)與非線性修正：

LR 與 DNV 在計算縱向中拱(Hogging)與中垂(Sagging)波浪彎矩時，均引入了針對超大型貨櫃船流線型船首與寬大艉部淺水效應的非線性修正係數。DNV 規範更為強調高

海況下波浪非線性抬升對中垂應力的影響，其計算出的極端中垂彎矩通常略高於其他船級社；LR 則結合其經驗數據庫，針對高長寬比(L/B)與高細長比船型，提出了額外的動態彎矩修正增量。

2. 水平彎矩(HBM)與扭轉載荷(TM)的耦合：

對於貨櫃船而言，斜浪航行時產生的水平波浪彎矩與扭轉彎矩是導致貨艙角隅與上甲板縱總絞接處失效的主因。ClassNK 與 BV 在其規範中提供了極為詳盡的扭轉載荷譜分析導則：

(1) ClassNK 強調在特定的極端海況組合下，扭轉載荷相位差對船體交叉剖面(Cross Sections)產生的峰值扭轉角與剪應力分佈；

(2) BV 則在其貨櫃船專用規範中明確量化了垂直彎矩、水平彎矩與扭轉彎矩之間的相互作用係數(Combination Factors)，要求設計師在進行剖面強度驗算時必須考慮三者相位同步疊加的最不利工況。

(3) CCS 在縱向與扭轉複合載荷計算中，亦逐步導入了基於波浪譜導出的動態載荷組合法(Dynamic Load Cases)，以反映亞洲至北美/歐洲航線的實際海況統計特徵。

上述載荷計算邏輯的差異，直接決定了船體中後段甲板帶板(Deck Strake)、舷頂擋浪板(Sheer Strake)與縱向雙層殼結構的構件厚度分佈。

3.2 結構構件剖面模數與淨厚度法要求

剖面模數(Section Modulus)是衡量船體抗彎剛度與縱向強度的指標。各船級社為了確保船舶在全生命周期內(通常為 20 至 25 年)應對腐蝕磨損與結構老化，採用了不同的厚度評估哲學：

1. 「毛厚度法」與「淨厚度法」的演進：

傳統上，LR 與 ABS 部分經驗公式採用「毛厚度法」(Gross Scantling Approach)，即在設計強度計算中直接使用包含腐蝕餘量(Corrosion Addition, t_c)的原始板厚。然而，近年來在 IACS 的推動下，ClassNK、DNV、BV 及 CCS 等船級社全面推行「淨厚度法」(Net Scantling Approach)。

(1) 淨厚度法要求所有強度計算(包含縱向強度、局部屈服與屈曲強度)必須嚴格建立在扣除名義腐蝕餘量後的「淨結構尺寸」(Net Scantlings)基礎上；

(2) 建造時則必須在淨厚度之上增加規定的腐蝕防護裕量(t_c)。這種方法能更真實地反映船舶營運末期(結構薄弱化後)的實際受力狀態。

2. 腐蝕餘量的差異化設定：

各船級社對不同艙區的腐蝕防護要求呈現差異化。由於貨櫃船上甲板與艙口圍板(Hatch Coaming)長期暴露於鹽霧、紫外線及貨櫃綁紮作業的機械碰撞中，LR 與 ABS 對甲板區域要求的腐蝕餘量補償相對較高；對於貨艙內部(Cargo Hold Region)，DNV 與 ClassNK 則根據壓載水艙的防腐蝕塗層系統(如符合 IMO PSPC 標準)以及是否裝載危險品貨櫃，提供更為靈活且細緻的腐蝕裕量扣減規則。

3.3 疲勞強度評估體系與失效控制

貨櫃船在長週期波浪循環載荷作用下，極易在應力集中區域發生疲勞開裂。各船級社在疲勞強度評估上主要分為設計波法(Design Wave Method)與譜分析法(Spectral Fatigue Analysis, SFA)兩大體系：

1. 譜分析法(Spectral Method)的應用差異：

譜分析法是評估全船關鍵節點疲勞累積損傷最為嚴謹的手段。該方法結合海況散佈圖(Wave Scatter Diagram)、水動力傳遞函數與材料的 S-N 曲線(應力幅-循環次數曲線)，並基於帕姆格倫-邁納線性累積損傷理論(Palmgren-Miner's Rule)計算總損傷值($D \leq 1.0$)。

(1) DNV 在疲勞評估中採用極為嚴格的 S-N 曲線族，特別是在焊縫根部與未消除殘餘應力的幾何結構處，設定了較高的安全係數；

(2) ClassNK 與 BV 則針對北大西洋海況散佈圖(North Atlantic Scatter Diagram)的選用與波浪向位角分佈(Wave Directional Spectrum)提供了獨特的權重修正，以精確模擬長期營運航線下的動態應力譜。

2. 設計波法與局部細節(Fatigue Details)分類：

設計波法透過統計學確定極端設計波浪參數以計算應力範圍(Stress Range)。

(1) LR 在其疲勞導則中，針對貨櫃船艏部拍擊區域、艙口角隅(Hatch Corner)及繫固橋(Lashing Bridge)支座等關鍵區域，設定了多套極端海況組合波(Deterministic Design Waves)；

(2) ABS 則在其規範中建構了詳盡的局部疲勞敏感細節分類庫(Structural Detail Catalog)，針對不同焊接接頭形狀、打磨處理(Grinding)及焊趾止裂孔等工藝，給予差異化的應力集中係數(SCF, Stress Concentration Factor)修正。

3.4 有限元素分析(FEA)評估標準與網格精度

隨著超大型貨櫃船規模大幅邁向 24,000 TEU 以上，傳統經驗公式已無法滿足結構安控要求，三維全船有限元素分析(3D Full-Ship FEA)已成為各船級社審圖與驗收的 mandatory(強制性)標準。

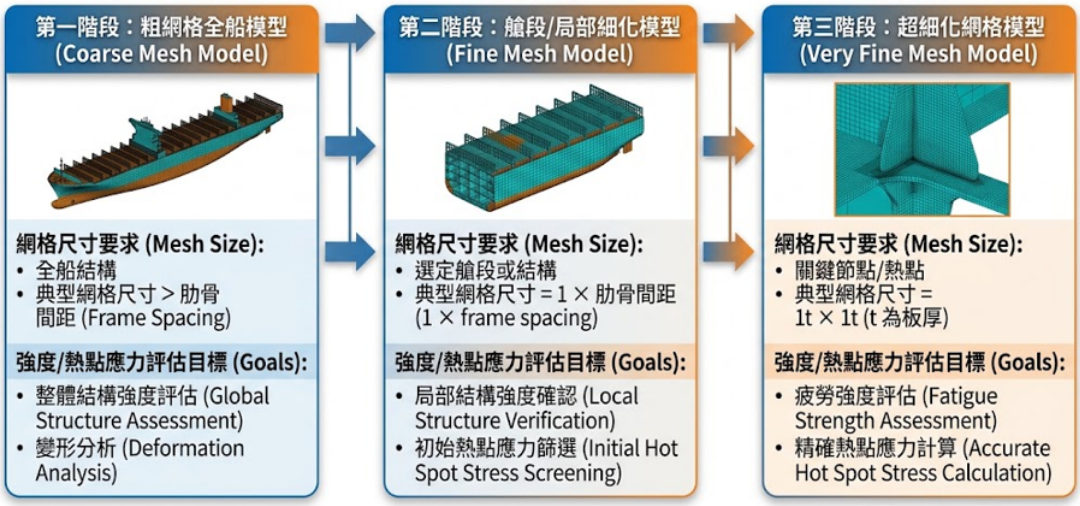


圖 1 超大型貨櫃船有限元素分析(FEA)多層級網格評估流程圖

1. 網格劃分與邊界條件控制：

(1) DNV 作為推動 FEA 標準化的先驅，其規範對三維艙段模型(Cargo Hold Model)與全船模型的網格劃分尺寸(Grid Size)有著極嚴格的約束，要求主結構採用 1 倍縱骨間距(1 × frame spacing)的板單元，並對邊界約束強度進行了標準化程式編寫；

(2) LR 特別強調 FEA 模型中必須精確還原貨櫃固定點、甲板繫固橋與船體主結構之間的非線性接觸與載荷傳遞，避免因邊界條件簡化而低估局部點的真實應力。

2. 許用應力限值與熱點應力(Hot Spot Stress)評估：

在 FEA 驗收標準方面，各船級社對於薄膜應力(Membrane Stress)與彎曲應力(Bending Stress)的分離許用限值各有偏好。

(1) BV 與 ClassNK 在進行局部高應力區(如橫艙壁與雙層底交接處、縱骨穿艙孔)評估時，嚴格規範了超細化網格(Very Fine Mesh，網格尺寸達板厚 $1t \times 1t$)的使用條件，並採用網格外推法(Stress Extrapolation)導出熱點應力；

(2) ABS 則在 FEA 評估中結合了非線性屈曲分析(Non-linear Buckling Analysis)，確保高強度鋼(如 YP36, YP40 甚至 YP47 級高張力鋼)在大範圍使用時不致發生局部失穩。

理解並掌控這些 FEA 建模導向與驗收極限的差異，是船舶設計團隊在前期優化鋼材佈置、控制空船重量(Lightweight)並順利通過審圖認證的技術核心。

肆、 貨櫃船特有結構問題比較

貨櫃船(Container Ships)因應高效率裝卸與極致化載貨容積的需求，採用了極其特殊的結構形態。與散裝船或油輪不同，貨櫃船具有極大的艙口開口與高層甲板堆疊特性，這使其在真實海況下面臨著多種特有的力學失效模式與工程挑戰。本節將針對扭轉載荷與開啟式甲板效應、貨櫃繫固結構設計、水彈性效應(Hydroelastic Response)及貨艙區域應力集中問題，深層比較主要船級社的規範機制與評估指引。

4.1 扭轉載荷與開啟式甲板的幾何效應

貨櫃船最顯著的結構特徵是其連續的寬大貨艙開口，這使得船體中後段橫剖面呈典型的「開啟式薄壁梁(Open Thin-Walled Beam)」形態。這種結構形式極度缺乏封閉式箱型梁的抗扭剛度(Torsional Stiffness)：

1. 扭轉與翹曲應力(Warping Stress)機制：

當船舶在斜浪(Oblique Seas)或橫浪中航行時，船首與船尾承受交變的方向相反波浪彎矩，產生巨大的剪切扭轉載荷。由於開啟式甲板的幾何限制，船體扭轉時會伴隨顯著的截面翹曲(Warping Deformation)。在貨艙角隅(Hatch Corner)、甲板邊板(Deck

Strake)與橫向箱型艙壁(Box-Shaped Transverse Bulkhead)的交接處，自由翹曲受到高度約束，進而引發極高的約束翹曲正應力與剪應力集中。

2. 各船級社的評估方法與規範差異：

(1) ClassNK 與 BV：在其貨櫃船專用規範中提供了基於水動力譜分析(Hydrodynamic Spectral Analysis)的扭轉載荷計算導則。要求設計師必須詳細演算相位同步下的「垂直彎矩 + 水平彎矩 + 扭轉彎矩」複合應力場，並採用三維全船 FEA 計算貨艙角隅的組合應力。

(2) LR：在傳統規範中引入了基於船長船寬比(L/B)與開口率(Opening Ratio)的幾何修正係數，用以簡化初階段的扭轉強度評估；然而針對超大型貨櫃船，LR 要求強制進行全船三維扭轉彈性變形分析。

(3) DNV：規範強調在三維 FEA 模型中，必須將艙口角隅區域細化至高精度網格，並專門設定斜浪工況以評估艙口圍板頂部(Hatch Coaming Top)與舷頂擋浪板交界處的動態剪切變形。

4.2 貨櫃繫固結構設計與載荷傳遞

隨著貨櫃船甲板堆疊層數(Deck Stacks)邁向 10 至 12 層以上，甲板繫固系統(Cargo Securing System)不僅需承受巨大風載與船體橫搖(Roll Movement)引發的慣性力，更將龐大的集中載荷直接傳遞至船體主結構。

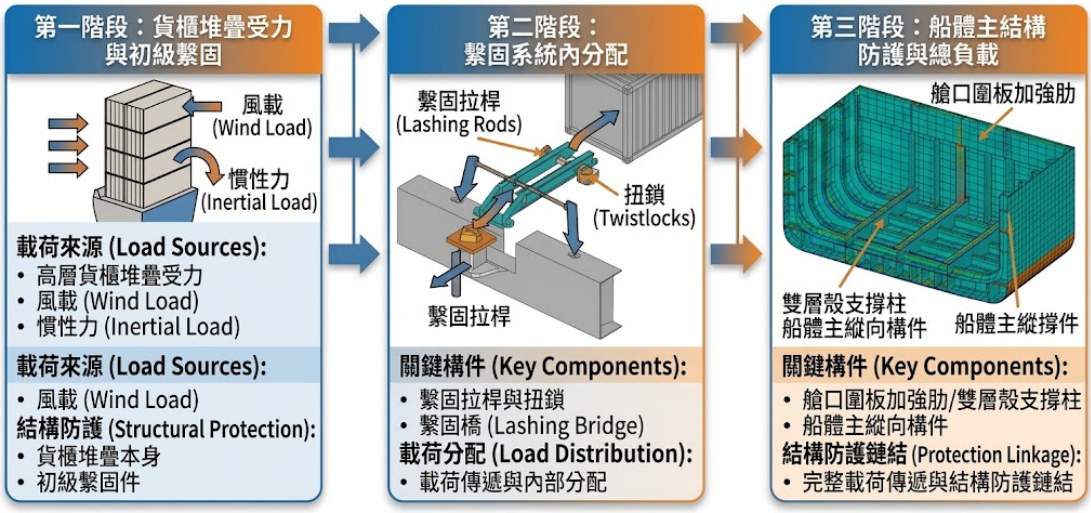


圖 2 貨櫃繫固系統至船體主結構之載荷傳遞路徑圖

1. 繫固介面與局部加強要求：

繫固橋(Lashing Bridge)、底座(D-rings / Sockets)與甲板下方的支撐結構(如艙口圍板加強肋 Coaming Stays、甲板縱桁 Deck Girders)構成了一套複雜的載荷傳送路徑。

(1) LR：長期推行 BoxMax 與 LASHING 類別標記，對繫固計算軟體的演算法精度、繫固橋與甲板介面的局部剪應力傳遞進行了標準化規範。

(2) ABS：強調繫固點、艙口圍板與雙層側殼(Double Side Structure)的整體有限元素強度分析，要求評估高層貨櫃傾瀉(Container Collapse)極限狀態下，繫固底座對甲板帶板產生的撕裂應力。

2. IACS UR C6/C7 統一規範之意涵與介面結構驗算：

國際船級社協會正式實施之 IACS UR C6(貨櫃綁紮計算軟體認證要求)與 UR C7(貨櫃固定系統認證規範)，全面建立了各大船級社於貨櫃繫固審查之統一基準：

(1) UR C6 軟體驗證體系：IACS UR C6 係針對船載貨櫃綁紮計算軟體訂立統一之功能性與性能測試驗證準則(Unified Functional Requirements and Test Procedures)，重點在於規範船體運動加速度矩陣、風載及動態邊界輸入之測試驗證標準，並非強制要求所有軟體開發商採用完全相同之底層演算法或原始程式碼。

(2) UR C7 介面結構強度評估：UR C7 明確定義了固定式(如 D-rings、繫固底座)與便攜式(如綁紮拉桿 Lashing Rods、扭鎖 Twistlocks)繫固件之認證流程；同時依據 UR C7 第 4.2 節之要求，規範繫固橋(Lashing Bridge)主結構、艙口圍板加強肋(Coaming Stays)及甲板縱桁等連接介面之載荷傳遞機制，強制執行局部結構之降伏強度(Yielding Strength)、極限承載力校核與高應力熱點之疲勞強度評估，顯著提升了甲板繫固結構之防護門檻。

4.3 水彈性效應(Hydroelasticity)與超大型船體動態響應

隨著超大型貨櫃船(ULCV, 18,000–24,000 TEU+)主尺度突破臨界點(船長 $L > 399$ m、型寬 $B > 61$ m)，船體縱向彎曲剛度(EI)相對下降，導致船體結構的固有振動頻率顯著降低其一階垂直彎矩固有頻率(1st Vertical Hull Girder Bending Natural Frequency)已降至 0.4 Hz ～ 0.6 Hz 的極低區間。當船舶在惡劣海況下航行時，高航速產生的波浪遇到頻率(Encounter Frequency, ω_e)與非線性高次諧波成分，極易與船體低頻固有頻率重疊，

致使船體在海浪中的動力學響應從傳統的「剛體(Rigid Body)」假設轉變為顯著的「彈性體(Elastic Body)」水彈性行為。水彈性效應主要分為以下兩類核心機制：

1. 彈振(Springing)與顫振(Whipping)機制：

(1) 彈振(Springing，高週期共振)：當海浪遇到頻率與船體低階縱向彎曲(或扭轉)固有頻率發生共振時，會誘發持續性的低頻高次諧波振動。這種 steady-state 的彈振現象雖不至於直接引發極限斷裂，但會在船體全生命週期中產生數百萬次額外的應力循環，顯著加速高應力熱點處的疲勞累積損傷，實船監測表明其通常佔總疲勞損傷的 20% ~ 40%。

(2) 顫振(Whipping，瞬態衝擊振動)：當 ULCV 在高海況下航行時，巨大的船首外飄(Bow Flare Slamming)與船底拍擊會產生極大的瞬態衝擊力，誘發船體產生高頻、高振幅且呈指數衰減的自由振動(Transient Decaying Vibration)。顫振產生的動態衝擊彎矩會直接疊加於靜水彎矩與傳統波浪彎矩之上，實船測量顯示其最大彎矩增量可達傳統剛體波浪彎矩的 20% ~ 50%，極易推動船體梁超出其極限縱向彎曲強度(Ultimate Hull Girder Strength)而引發失穩屈曲。

2. 三維流固耦合(3D FSI)數值演算架構：

為精確預測水彈性響應，各大船級社已建立高度成熟的三維流固耦合求解流程。流體側採用三維邊界元法(3D BEM)或計算流體力學(3D CFD, RANS/VOF)模擬波浪非線性抬升與船首入水拍擊現象；結構側則結合三維全船梁-殼混合有限元素模型(3D Full-Ship FEA)，透過模態疊加法(Modal Superposition Method)提取前幾階關鍵垂直彎矩與扭轉模態。在評估時，通常以頻域分析評估長期海況散佈圖下的彈振疲勞累積，並以非線性時域動態模擬(Nonlinear Time-Domain Simulation)精確計算極端拍擊工況下的顫振彎矩衰減歷程與極限強度安全餘量。

3. 主要船級社的規範與標記體系(Class Notations)：

(1) 常規設計階段：在 IACS UR S11A 的基礎縱向強度框架下，傳統規範主要透過經驗修正係數對 ULCV 極限強度進行額外的拍擊安全裕量扣除。

(2) DNV：率先推出了 WHS (Whipping and Springing Assessment) 船級符號與指引，要求 15,000 TEU 以上船型必須進行全船三維水彈性動態分析，並根據實航波浪譜導出專屬的疲勞壽命折減係數。

(3) ClassNK：基於北太平洋惡劣海況之長期監測數據，於其 PrimeShip-Hydroelasticity 專用套件與技術導向中，提供了扭轉與垂直彎矩耦合水彈性響應的非線性時域計算標準。

(4) Lloyd's Register (LR) & Bureau Veritas (BV)：LR 導入 WHA (Whipping Assessment) 驗算導則，要求對靜水彎矩與顫振衝擊彎矩之疊加效應進行極限強度校核；BV 則結合專屬三維水彈性程式 HOMER，將流固耦合計算列為超大型貨櫃船審圖之強制性要求。

4.4 貨艙區域應力集中與局部結構優化

貨櫃船貨艙區域(Cargo Hold Region)承受著極其複雜的三維複合載荷系統，包含外部動態海浪水壓力、雙層底內部的壓載水壓力、艙內貨櫃的巨大集中重量，以及繫固拉桿傳遞的動態拉力。當 ULCV 艙口圍板(Hatch Coaming)及甲板帶板(Deck Strake)大量採用厚度達 80 ~ 100 mm 之 YP47 級(屈服強度 460 MPa)超高張力鋼時，極厚鋼板在低溫惡劣海況下面臨嚴峻的脆性斷裂風險。依據 IACS UR S33(脆性裂紋止裂要求)，設計與建造單位必須在艙口圍板頂部、舷頂擋浪板(Sheer Strake)與橫向箱型艙壁交界等高應力集中熱點，強制採用具備極高止裂韌性(Crack Arrest Toughness, $K_{ca} \geq 6{,}000$ N/mm$^{1.5}$)的脆性裂紋止裂鋼板(Brittle Crack Arrest Steel, BCAS)，或配置專用止裂切口(Crack Arrest Holes/Notches)與高韌性焊接技術(High-Toughness Welding Consumables)，以嚴格阻斷微裂紋發生鏈式擴展。

1. 應力集中熱點(Stress Hotspots)分析：

(1) 貨艙轉角(Hatch Corner)：如 4.1 節所述，此處為剪力與翹曲正應力(Warping Normal Stress)疊加的最嚴苛區域。為降低應力集中係數(SCF)，現代 ULCV 常採用雙圓弧形(Double-Bugle)、橢圓形(Elliptical)或多段流線型曲率開孔，並大幅提升角隅襯板(Insert Plate)之厚度與表面打磨等級。

(2) 橫艙壁與雙層底/雙層側殼交接處(Bulkhead-Double Bottom / Double Side Intersection)：該區域在貨艙重載與壓載水壓不平衡、或交變斜浪引起軀幹扭轉時，會產生極大的轉角彎矩與動態剪力，極易在肘板(Bracket)端點引發屈服失穩。

(3) 縱骨穿艙孔與加強肋切口(Stiffener Penetrations & Cutouts)：縱向構件穿過橫向強框架(Web Frame)處，局部應力場極度複雜，焊縫根部在數億次微幅應力循環下極易引發疲勞微裂紋。

2. 局部細化分析(Fine Mesh FEA)與熱點應力外推法(Hot Spot Stress Approach)：

針對上述熱點，各大船級社均訂定了嚴格的局部細化網格 FEA 與驗算標準：

(1) LR 與 ABS：要求在局部高應力區域建立網格尺寸達板厚等級 $1t \times 1t$(Very Fine Mesh)的局部實體或殼單元模型。為扣除有限單元法在幾何奇異點(Singularity)帶來的虛擬無限大應力，規範指定採用結構熱點應力法(Hot Spot Stress Approach)，即在距離焊趾(Weld Toe)$0.5t$ 與 $1.5t$(或 $0.4t$ 與 $1.0t$)處提取網格節點應力進行線性或二次外推(Linear/Quadratic Extrapolation)，導出真實熱點應力幅以精確評估疲勞累積損傷。

(2) ClassNK 與 DNV：特別針對貨艙頂部橫向結構(Top Wing Structure)與橫向箱型艙壁(Box Bulkhead)，提出了受極端衝擊載荷(Impact Loads)與非線性斜浪扭轉下的局部屈曲(Buckling)與塑性變形驗收門檻，要求結合彈塑性有限元素分析(Elasto-Plastic FEA)，確保局部構件在極限工況下不致發生鏈式結構失穩崩塌。

4.5 實務營運與操船邊界條件對結構受力之衝擊

傳統船級社結構規範多以開闊大洋之「設計波浪海況(Design Sea States)」為載荷輸入基準，然而在航運實務營運中，超大型貨櫃船(ULCV)於進出港口、通過淺水航道(如麻六甲海峽、蘇伊士運河港區)以及近岸靠離泊作業時，所承受之水動力與空氣動力邊界條件具有極高之特殊性，對船體結構之受力邊界形成不可忽視之衝擊：

1. 淺水效應(Squat/UKC)與縱傾對靜水彎矩(SWBM)之影響

ULCV 滿載吃水深達 15 至 17 米，在有限底隙(Under Keel Clearance, UKC)之淺水航道低速航行時，受流體文丘里效應(Venturi Effect)與阻力激增影響，船底與水底邊界間的流速加速、壓力驟降，將誘發顯著之船體下沉(Ship Squat)與動態縱傾(Dynamic Trim)改變。此一淺水水動力效應會劇烈重塑船體沿縱長方向之水下浮力分佈(Buoyancy Distribution)：若下沉主要發生於艉部或舯部，將造成全船靜水彎矩(SWBM)相較於開闊深水區產生不可忽略之增量偏移。操船實務上，港內裝卸貨載分佈若未能精確配載，疊加淺水下沉引發之浮力重組，可能使局部區域瞬態受力逼近甚至超出港內允許靜水彎矩極限值(In-port Permissible SWBM)，此為傳統遠洋純波浪載荷規範所無法涵蓋之關鍵營運風險。

2. 甲板高層貨櫃堆疊之高風阻與突風衝擊載荷

現代 ULCV 甲板貨櫃堆疊通常高達 10 至 12 層以上，舷側垂直受風高度超過 25 米，形成了極為龐大之側向阻風面積(Windage Area)。在遠洋航行中，繫固系統設計多側重於船體大角度橫搖引發之慣性加速度；但在近岸低速進出港、大角度轉向或靠離泊拖船作業過程中，船舶一旦遭遇局部狹管地形引發之強突風(Gust Wind)，龐大受風面所產生的瞬態側向傾覆力矩(Transient Overturning Moment)將瞬間爆發。此時，甲板最外側列(Outermost Stacks)貨櫃之拉桿與繫固底座將承受極高之瞬態剪力與局部拉拔力，其局部衝擊應力往往比遠洋週期性常規波浪更為直接且嚴苛。各大船級社在未來修訂繫固規範與審查甲板下支撐結構(如艙口圍板橫向支撐肋及舷側強骨)時，宜將近岸低速工況下的側向突風動態衝擊載荷進一步納入常規安全評估邊界之中。

伍、 最新規範發展趨勢

當前全球船舶工業正經歷由「脫碳化(Decarbonization)」與「數位化(Digitalization)」雙輪驅動的深度技術轉型。國際海事組織(IMO)逐步緊縮的 GHG 減排目標(如 FuelEU Maritime 與 IMO 淨零框架)，以及海事安全的實務需求，促使各大船級社(Classification Societies)打破傳統單一基於經驗與靜力學的範式，加速更新並推出具備前瞻性與風險基準(Risk-Based)的結構設計規範。

5.1 IACS UR C6/C7 統一要求之衝擊與實務影響

國際船級社協會(IACS)正式採納並實施了 UR C6(貨櫃綁紮計算軟體要求)與 UR C7(貨櫃固定系統與船體結構介面認證規範)兩項統一要求。這兩項規範的推行，是因應近年來超大型貨櫃船在惡劣海況下頻發貨櫃落海(Containers Lost at Sea)事故所發出的重大結構改革：

1. UR C6 軟體計算演算法之標準化：

以往各航商與船級社採用的綁紮計算軟體在動力學模型與加速度組合上存在計算偏差。UR C6 強制規定所有船載綁紮軟體必須採用統一的 dynamic 運動特徵矩陣與動態風載/波浪加速度組合算式，消除過去因軟體演算法差異導致的繫固力低估隱患。

2. UR C7 介面結構之強度與疲勞強制驗算：

UR C7 不僅規範了固定式(如 D-ring、繫固底座)與便攜式(如綁紮拉桿 Lashing Rods、扭鎖 Twistlocks)繫固件的材料強度，更要求對繫固橋(Lashing Bridge)主體結構、艙口圍板加強肋(Coaming Stays)及甲板縱桁等受力介面進行強制性的疲勞強度驗算(Fatigue

Assessment)。這將直接推動船舶設計單位重新進行甲板繫固點下方結構的局部分析與鋼材佈置優化。

5.2 針對參數共振之動態風險評估(Roll & Risk-Based Assessment)

隨著貨櫃船寬度與水線幾何特徵大幅改變，船舶在迎浪或後追浪航行時，極易因波浪通過船體引發水下幾何復原力矩(Restoring Moment)的週期態變性，進而誘發極其危險的參數共振橫搖(Parametric Rolling)。這種現象會在極短時間內產生超過 30° 以上的劇烈橫搖角度，導致貨櫃繫固系統受力劇增甚至結構破壞。

1. Lloyd's Register (LR) 與其他船級社的評估標記：

LR 引入了全新的 RDA(Roll Design Assessment)與相關動態橫搖風險評估體系(包含 PRR, Parametric Roll Risk 標記)。該規範要求設計師在初階設計階段即須透過非線性時域數值模擬(Nonlinear Time-Domain Simulations)，評估不同載況(Draft & GM)、船速及海況下船體的橫搖發散風險；

2. 結構強度餘量之要求：

這類規範要求船體甲板繫固結構與舷側外板(Side Shell)必須具備應對大角度橫搖引發動態慣性載荷的強度餘量。這標誌著船級社規範已由傳統「基於經驗規則的靜力學計算(Rule-Based Prescriptive Design)」朝向「基於動態風險與性能表現的綜合評估(Risk-Based / Performance-Based Assessment)」轉變。

5.3 替代燃料(LNG / Methanol / Ammonia / Hydrogen)對船體結構之衝擊

為了達成 IMO 碳強度指標(CII)與淨零排放要求，新造貨櫃船隊正大規模轉向雙燃料(Dual-Fuel)推進系統(如 LNG、甲醇、氨及氫燃料)。替代燃料儲存系統的引進，對船體結構設計提出了全新的力學與熱力學挑戰，如圖 3 所示。

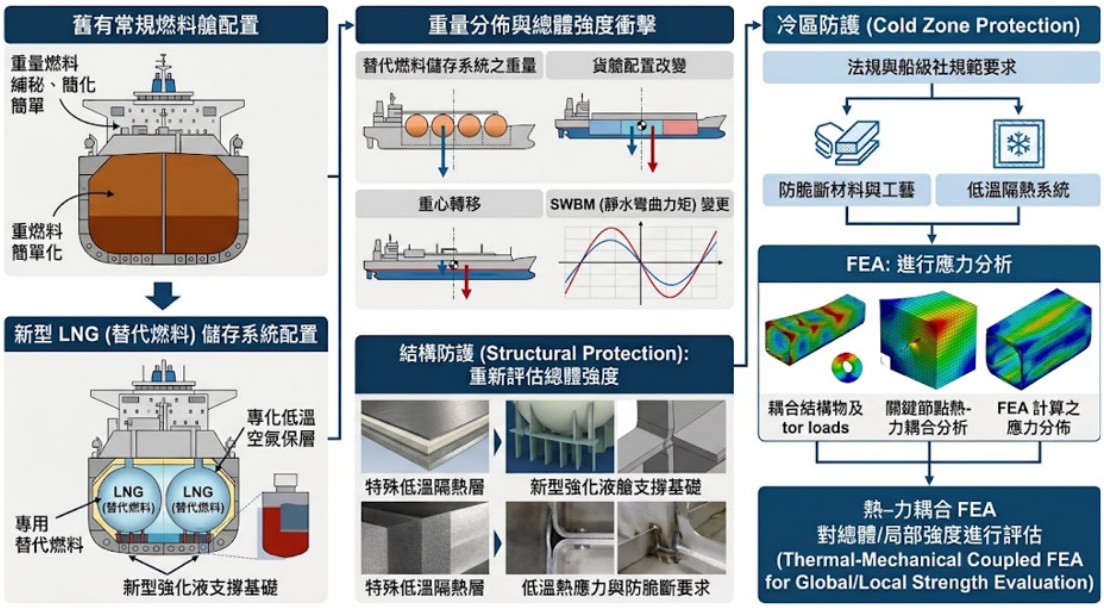


圖 3 替代燃料儲存系統對船體結構之影響與規範要求

1. 結構重量分佈與總體強度重新分佈：

替代燃料(特別是 LNG 與液氨)能量密度較傳統重油(HFO)低，需要更大的燃料艙體積。燃料艙(如 B 型、C 型獨立艙或 Membrane 膜式艙)通常佈置於貨艙中段或上建下方，這大幅改變了船體的空船重量分佈(Lightweight Distribution)與重心位置(VCG/LCG)，進而顯著改變靜水彎矩(Still Water Bending Moment)與剪力分佈(Shear Force Distribution)。

2. 低溫防護與防脆斷材料需求：

超低溫燃料(如 −162°C 的 LNG 或 −253°C 的液氫)儲存系統對船體支撐座(Tank Supports)產生巨大的局部集中載荷與熱應力。DNV 在其最新規範中，針對替代燃料艙底座結構(Saddles/Supports)的應力集中評估、防洩漏冷區(Cold Spot)二次阻隔層防護，以及採用低溫高鎳鋼或奧斯田鐵不鏽鋼(Austenitic Stainless Steel)的材料接合規範，訂定了極嚴格的熱-力耦合 FEA 分析要求。

5.4 數位孿生(Digital Twin)與數據驅動檢驗(DDV / SHMS)

數位化轉型正在重塑船級社全生命週期的結構安全維運模式。以 CR、BV、DNV 與 ClassNK 為首的船級社，已在其規範體系中正視結構健康監測系統(Structural Health Monitoring System, SHMS)與數位孿生的技術應用：

1. 預留感測器介面與數位雙生模型建立：

新一代貨櫃船結構設計規範鼓勵甚至要求在建造階段，即於高應力集中熱點(如貨艙角隅、艙口圍板頂部、船首拍擊區)預先敷設光纖應變感測器(Fiber Optic Strain Sensors)與加速度計。設計時建立的三維 FEA 模型將轉化為「數位孿生體(Digital Twin)」。

2. 基於數據驅動的狀態檢驗(Data-Driven Verification, DDV)：

營運過程中回傳的實測應力數據，可即時用於計算船體的真實疲勞累積損傷(Real-Time Fatigue Consumption)。船級社據此推行「基於條件的維修檢驗(Condition-Based Inspection)」，減少不必要的定期進塢拆檢，並能精確預測結構剩餘疲勞壽命(RUL)，實現了結構設計與運營維護的閉環反饋。

5.5 綠色能源轉型下的船體幾何演進與輕量化要求

海事脫碳亦直接驅動了船體幾何外形與材料應用的變革，進而反推波浪載荷與強度規範的更新：

1. 細長型船體與風阻優化設計(Wind Shield)：

為了降低流體阻力與風阻，新型貨櫃船趨向採用更大的長寬比(L/B)、更細長的船首線條，並在船首配備大型空氣動力學防風罩(Wind Shield / Wind Deflector)。船首防風罩增大了船首受風面積與波浪拍擊載荷，各大船級社正更新其船首局部結構(Bow Flare)的波浪衝擊計算公式。

2. 高張力鋼(High-Tensile Steel)的大量採用與屈曲/疲勞風險：

為追求結構輕量化以提高載貨效率，高張力鋼(如 YP36, YP40 乃至 YP47 級高強鋼)在超大型貨櫃船上甲板帶板與艙口圍板中的使用比例大幅上升。然而，鋼材強度的提升並不會增加其彈性模數(E)，這使得結構屈曲失穩(Buckling)與疲勞敏感度劇增。船級社規範近年針對高張力鋼結構的非線性屈曲極限(Nonlinear Buckling Limit)及焊縫疲勞細節，訂定了更為嚴格的彈塑性校核要求。

陸、 案例分析與規範敏感度探討

為具體說明不同船級社規範算式在數值傳遞上之敏感度與工程導向差異，本節選取一艘典型的 8,000 TEU 後巴拿馬型(Post-Panamax)貨櫃船作為工程示意基準(Illustrative Benchmark Example)。需特別聲明的是：本節所列之波浪彎矩增量、板厚調整、鋼重噸

位差異及百分比，係基於各船級社經驗公式、簡化構件幾何假設與常規工程參數導出之概略估算(Illustrative Estimation)，旨在橫向展示各規範之安全裕度配置傾向與演算法敏感度，讀者切勿將此中型船型之量化結果逕行外推至 18,000～24,000+ TEU 具顯著低頻水彈性(Whipping/Springing)與極限扭轉效應之超大型船舶(ULCVs)。該基準船型之核心主尺度參數如表 2 所示：

表 2 8,000 TEU 貨櫃船主尺度與結構設計參數表

參數名稱 (Parameter)	符號 (Symbol)	數值與單位 (Value & Unit)
總長 (Length Overall)	*LOA*	294.0 m
舯間長 (Length Between Perpendiculars)	*LBP*	282.0 m
型寬 (Moulded Breadth)	*B*	40.0 m
型深 (Moulded Depth)	*D*	24.0 m
設計吃水 (Design Draft)	T_{design}	12.0 m
結構吃水 (Scantling Draft)	$T_{scantling}$	14.5 m
主要結構鋼材規格 (Steel Grade Specification)	-	上甲板與艙口圍板採用 YP36 / YP40 高張力鋼

資料來源：本研究整理

表 3 主要船級社對 8,000 TEU 基準船型結構設計評估傾向比較表(示意性估算)

評估維度 / 船級社	DNV	LR	ABS	ClassNK	BV	CR	CCS
設計波浪垂直彎矩 (VBM)	基準最高(較基準高約 3% ～ 5%，強調惡劣海況中垂非線性波浪抬升與艏部拍擊)	基準平穩(基於經驗公式，針對細長比提供額外動態增量)	基準平穩(重視極限海況動態響應與船體梁極限承載力)	基準居中(強調垂直、水平與扭轉載荷之相位差同步疊加)	基準居中(導入三維流體傳遞函數，量化多向波浪複合效應)	基準標準(深度結合 IACS UR S11A 基準與遠洋實船數據)	基準標準(導入亞洲至歐美航線海況動態載荷組合)
中橫剖面模數與板厚要求	要求較高(上甲板帶板與強縱桁示意增厚約 1.0～1.5 mm)	要求標準至偏高(依細部構造分類嚴格校核局部防扣屈)	要求偏高(艙口圍板與雙層側殼之防扣屈安全餘量設定保守)	嚴格淨厚度法(依不同艙區防腐蝕塗層細緻扣減名義腐蝕餘量)	嚴格淨厚度法(強化甲板大開口剪應力與翹曲正應力校核)	實務彈性(嚴格執行淨厚度法，並貼合船廠現場建造工藝容差)	實務標準(側重高張力鋼板厚折減後之非線性屈曲極限)
疲勞強度評估方法	全船 3D FEA 結合概率可靠性模型，焊縫根部 S-N 曲線較嚴格	設計波法 (Design Wave) 搭配細部構造專用應力集中係數(SCF)	動態載荷法 (DLA)輔以局部疲勞細節庫校核應力範圍	譜分析程序 (SFA)，結合北太平洋海況散佈圖精確預測扭轉熱點	專用三維譜分析軟體，嚴格規定熱點應力網格外推法 (1t×1t)	採熱點應力外推法，著重評估 YP36/YP40 大開口角隅之抗裂性	波浪譜動態分析法，強化貨艙角隅與雙層底交接之熱點應力驗算
全船空船鋼重影響 (估算)	較基準增加約 +1.5%～+2.5%(示意鋼重增約	較基準增加約 +1.0%～+2.0%(局部板厚與防扣	較基準增加約 +2.0%～+4.0%(示意鋼重增約	基準對照組 (精準優化之結構鋼材配置 Baseline)	接近基準對照組(流固載荷計算精確，鋼材配	接近基準對照組(兼顧結構安全性與國內船廠建	接近基準對照組(基於動態載荷組合精準配置主

表 3 主要船級社對 8,000 TEU 基準船型結構設計評估傾向比較表(示意性估算)							
評估維度 / 船級社	DNV	LR	ABS	ClassNK	BV	CR	CCS
	350 ～ 600 噸)	屈裕量提升)	500 ～ 1,000 噸)		置貼近極限值)	造經濟性)	體鋼材)
設計哲學與營運權衡	強調極限海況縱向安全餘量與全動態載荷抵禦能力	側重結構細部標準化與長年累積之實務營運經驗安全裕度	強調結構高冗餘度，特別著重抗局部失穩與衝擊損害承載力	側重特定航線(如北太平洋)環境譜之精確疲勞壽命匹配	強調水動力數值仿真精確度與多軸複合應力之精準控制	著重法規符合性、現場建造檢驗工藝與營運維護實務彈性	著重大宗航線波浪譜適應性與結構輕量化設計平衡
註：本表數據與評估結果係基於經驗算式導出之示意性概略估算(Illustrative Estimation)，旨在橫向對比各規範之技術導向，不可視為確定性實船施工數據或直接外推至 ULCVs。							

6.1 波浪載荷與縱向強度剖面模數差異

在縱向波浪載荷計算方面，將該船主尺度輸入各船級社算式後顯示，DNV 規範計算出的極端設計垂直波浪彎矩(VBM)整體比 LR 規範高出約 3% 至 5%。其力學主因在於 DNV 針對中垂(Sagging)工況採用了更為保守的非線性水動力修正係數，以考量惡劣海況下船首舷外飄(Bow Flare)撞擊引發的動態彎矩增量。

在相同的設計安全因子與許用應力限值下，這一彎矩計算差異直接反應於中橫剖面(Midship Section)構件尺寸：

1. 船底板與上甲板縱骨剖面模數(Section Modulus)：DNV 要求的中橫剖面模數略高於 LR ；

2. 鋼板厚度調整：採用 DNV 規範時，該船上甲板帶板(Deck Strake)與強縱桁(Deck Girder)的局部板厚需增加約 1.0 至 1.5 mm，進而提升了全船的縱向彎曲極限強度裕量。

6.2 疲勞強度評估與熱點應力(Hot Spot Stress)預測

在疲勞強度評估方面，針對該船疲勞最敏感的貨艙角隅(Hatch Corner)與橫艙壁與雙層底交接處進行對比：

1. LR 設計波法(Design Wave Method)：在初期評估中，若採用 LR 的標準設計波法，貨艙角隅之疲勞累積損傷值(D)顯示符合 25 年營運壽命($D < 1.0$)的要求；

2. ClassNK 譜分析程序(Spectral Fatigue Analysis, SFA)：若採用 ClassNK 基於北大西洋海況散佈圖與全波向傳遞函數(RAO)的疲勞譜分析程序，計算結果則揭示該船在特定斜浪動態扭轉工況下，貨艙角隅頂部與縱骨穿艙孔(Stiffener Penetrations)的熱點應力範圍顯著放大，導致預測疲勞壽命低於 25 年。

改善策略：為滿足 ClassNK 的疲勞驗收標準，設計團隊必須將貨艙角隅局部板厚由 45 mm 提升至 50 mm，或將焊接接頭修補為全滲透圓弧焊縫(Full-Penetration Welds)並進行焊趾打磨(Grinding Treatment)，以降低應力集中係數(SCF)。這突顯了譜分析法在發現局部疲勞隱患上的卓越精確度。

6.3 結構重量、建造成本與工程可靠度權衡

在局部強度評估與結構重量方面，不同船級社對防扣屈裕量與局部構件尺寸之要求呈現顯著之工程實務取向差異：

1. 構件尺寸與鋼材用量差異之估算：以 ABS 規範為例，其在雙層底側殼、艙口圍板橫向加強肋及壓載艙內部構件之局部防扣屈與降伏強度校核上，採用了相對審慎之經驗安全因子；計算估算顯示，若全船主要構件均依其偏保守之尺寸上限進行配置，該 8,000 TEU 基準船型之空船鋼材用量相較於優化基準組約有 2% 至 4% 之增長(示意鋼材重增加約 500 至 1,000 噸)。

2. 工程可靠度與營運效益之客觀權衡：針對此類鋼材重量差異對船舶全生命週期經濟性之影響，宜以審慎之工程可靠度觀點進行全面評述。雖然較為保守之構件尺寸設定能顯著提升局部結構之抗失穩能力與疲勞安全冗餘度，有助於降低長期營運期間結構開裂或局部凹陷之維修機率；然而，在未進行嚴密之全生命週期成本分析(LCC)與可靠度模型驗證前，不應逕行斷定其必然能降低全壽期營運支出(OPEX)。空船重量(Lightship Weight)的增加將直接造成船舶有效載重噸損失(Payload Penalty)，並在 20 至 25 年營運期間引發額外的航行油耗與推進碳排放負擔。因此，船舶設計單位與船東在進行船級社選定時，必須在初始建造材料成本、結構抗災冗餘度、營運油耗及特定航線之維護策略之間，進行精細之綜合技術與經濟權衡。

上述案例分析深刻證明：選擇不同的船級社，不僅是技術認證流程的選擇，更是建造成本、結構安全餘量與營運維護策略之間的深層博弈。

柒、 結論與建議

貨櫃船(特別是超大型貨櫃船 ULCV)的結構設計是一個集高等流體力學、連續介體力學、材料疲勞學與動態風險評估於一體的複雜工程領域。不同船級社的規範差異，本質上反映了各自在歷史經驗積累、統計數據庫選用、風險控制哲學及技術創新上的獨特性。本文透過系統性的比較分析，導出以下核心結論與實務建議：

7.1 核心結論

1. 規範哲學與計算方法的實質分歧：

各船級社在波浪彎矩(VBM/HBM/TM)計算、剖面模數要求(淨厚度法 vs. 毛厚度法)及疲勞評估(設計波法 vs. 譜分析法)上存在顯著技術差異。對於超大型貨櫃船的扭轉載荷與水彈性效應(Hydroelasticity)，傳統經驗公式已無法滿足安全需求，必須依靠三維全船有限元素分析(3D FEA)與流固耦合(FSI)模擬進行深層驗證。

2. IACS UR C6/C7 新規建立綁紮與結構強度的強制性門檻：

2025 年正式生效的 IACS UR C6/C7 統一要求，標誌著貨櫃綁紮計算軟體演算法的國際高度統一，並將貨櫃固定系統與甲板介面結構的強度與疲勞驗算提升至強制性規範層面，直接改變了甲板繫固橋與艙口圍板的結構設計範式。

3. 綠色能源轉型與數位化深層重塑結構規範：

雙燃料(LNG、甲醇、氨、氫)儲存系統的引進改變了船體重量分佈與低溫材料需求；而數位孿生(Digital Twin)與結構健康監測系統(SHMS)的結合，則推動船級社審圖與檢驗體系由「靜態經驗審查」邁向「動態數據驅動檢驗(DDV)」。

4. 結構安全性與經濟效益之動態平衡：

中型基準船型之示意性估算顯示，不同船級社規範在數值傳遞上可導致鋼材用量產生約 2%–4% 之敏感度差異(惟此工程估算不應直接外推至具顯著水彈性效應之 ULCV)。設計團隊與船東必須在初始建造成本、結構安全冗餘度與載重損失(Payload Penalty)之間尋求最適工程平衡點。

7.2 實務建議

1. 對船舶設計單位的建議：

設計團隊應突破「經驗公式套用」的傳統思維，建構高度模組化的三維 FEA 與水動力學計算平台。在初階設計階段即須預估不同船級社規範對中橫剖面構件厚度的影響，並及早更新符合 IACS UR C6/C7 標準的繫固結構計算軟體與熱點應力外推資料庫。

2. 對造船廠與施工團隊的建議：

針對高張力鋼(YP36/YP40/YP47)的大量採用，船廠應強化高應力集中區域(如貨艙角隅、繫固橋底座)的焊接工藝與品質管制(如實施全滲透焊接與焊趾打磨處理)。同時應在船體建造過程中，積極導入 SHMS 感測器敷設技術，為後續數位化交付奠定基礎。

3. 對船東與船舶營運商的建議：

船東在選擇船級社時，不應僅以認證費用或審圖速度為單一考量。應綜合評估各船級社在特定船型(如 24,000 TEU 超大型貨櫃船或替代燃料雙燃料船)上的技術深度、水彈性研究能力及風險管理體系；將船級社定位為全生命週期資產保護的戰略技術夥伴，以確保船舶在極端海況下的營運安全與永續經濟效益。

參考文獻

1 Container News. (2026). "How Container Ships Are Getting Bigger, Smarter, and Harder to Classify". *Container News*. https://container-news.com/how-container-ships-are-getting-bigger-smarter-and-harder-to-classify-2/，檢索日期：2026 年 8 月 11 日。

2 Chen, Y., Zhang, S., Chen, W. K., & Magee, A. (2024). Design, construction and testing of a fully elastic ship model for investigating hydro-elastic responses of container ships. *Marine Structures, 98*, 103663. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2024.103663

3 Marón, A., & Kapsenberg, G. (2014). Design of a ship model for hydro-elastic experiments in waves. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 6*(4), 1130–1147. https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0235

4 Grammatikopoulos, A. (2023). A review of physical flexible ship models used for hydroelastic experiments. *Marine Structures, 90*, 103436. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103436

5 Neogi, I., Jaiman, R. K., & Jelovica, J. (2026). Wave-induced hydroelastic vibration and underwater radiated noise of partially submerged marine panels. *Ocean Engineering, 365*(Part 2), 127182. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.127182

6 Chen, Y., Zhang, X., & Wang, L. (2024). Design, construction and testing of a fully elastic ship-shape model for hydroelastic response of container ships. *Ocean Engineering*, 293, 116638. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116638

7 Cho, D. S., Kim, B. H., Vladimir, N., & Choi, T. M. (2015). Natural vibration analysis of rectangular bottom plate structures in contact with fluid. *Ocean Engineering*, 103, 171–179. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.053

8 Corigliano, P., Frisone, F., Chianese, C., Altosole, M., Piscopo, V., & Scamardella, A. (2024). Fatigue overview

of ship structures under induced wave loads. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(9), 1481. https://doi.org/10.3390/jmse12091481

9 Deo, I. K., Venkateshwaran, A., & Jaiman, R. K. (2026). A physics-guided probabilistic surrogate modeling framework for digital twins of underwater radiated noise. *Ocean Engineering*, 358, 125461.

10 Hirdaris, S., Parunov, J., Qui, W., Iijima, K., Wang, X., Wang, S., Brizzolara, S., & Guedes Soares, C. (2023). Review of the uncertainties associated to hull girder hydroelastic response and wave load predictions. *Marine Structures*, 89, 103383. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103383

11 Jiao, J., Huang, S., & Guedes Soares, C. (2021). Viscous fluid–flexible structure interaction analysis on ship springing and whipping responses in regular waves. *Journal of Fluids and Structures*, 106, 103354. https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2021.103354

12 Liu, R., Li, H., Ong, M. C., & Zou, J. (2024). Prediction of global whipping responses on a large cruise ship under unknown sea states using an LSTM based encoder-decoder model. In *Proceedings of the ASME 2024 43rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* (OMAE2024-126186). ASME.

13 Yildizdag, M. E., Ardic, I. T., Demirtas, M., & Ergin, A. (2019). Hydroelastic vibration analysis of plates partially submerged in fluid with an isogeometric FE-BE approach. *Ocean Engineering*, 172, 316–329. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.012

14 International Association of Classification Societies (IACS). (2015). *IACS UR S11A: Longitudinal Strength Standard for Container Ships (Rev.1)*. IACS Unified Requirements.

15 Lloyd's Register (LR). (2025). *Rules and Regulations for the Classification of Ships — Part 3: Ship Structures, and Part 4: Special Ship Types (Container Ships), with ShipRight Procedure (FDA/WHA)*. LR Class Publications. https://www.lr.org/en/knowledge/class-news/10-25/，檢索日期：2026 年 8 月 16 日。

16 Bureau Veritas (BV). (2024). *NR467 Rules for the Classification of Steel Ships — Part B: Hull and Stability, Chapter 5: Longitudinal Strength, and Part E: Service Notations, Chapter 2: Container Ships*. BV Marine & Offshore Publications. 檢索日期：2026 年 8 月 16 日

17 American Bureau of Shipping (ABS). (2024). *Rules for Building and Classing Marine Vessels — Part 5C: Specific Vessel Types, Chapter 5: Container Carriers*. ABS Publications.

18 International Association of Classification Societies (IACS). (2025). *IACS UR C6: Requirements for Container Lashing Calculation Software & UR C7: Requirements for Container Securing Systems*. IACS Unified Requirements.

19 DNV. (2025). *Rules for Classification: Ships (RU-SHIP) — Part 3: Hull, Chapter 4: Longitudinal Strength, Chapter 7: Finite Element Analysis, and Part 6: Additional Class Notations, Chapter 2: Whipping and Springing Assessment (WHS)*. DNV Rules & Standards. https://www.dnv.com/rules-standards/，檢索日期：2026 年 8 月 16 日。

20 Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK). (2023). "Structural Strength and Torsional Assessment Rules Applied to Ultra-Large Container Ships". *ClassNK Technical Journal*, 07(E05), 1-15. https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/research/rd/2023/07_e05.pdf，檢索日期：2026 年 8 月 16 日。

21 中國船級社(CCS)。(2023)。《鋼質海船入級規範》(Rules for Classification of Sea-Going Steel Ships)，第 2 篇「船體結構」第 2 章「縱向強度」及第 8 章「貨櫃船」。北京：人民交通出版社。

22 財團法人驗船中心(CR)。(2024)。《鋼船建造規範》(Rules for the Construction and Classification of Steel Ships)，第 1 篇「通則」第 3 章「縱向強度」及第 3 篇「專門用途船舶」第 5 章「貨櫃船」。臺北：財團法人驗船中心。