

一、前言：

FCA 鋼材是“疲勞裂紋擴展抑制之鋼材”(Fatigue Crack Arrestor Steel)的簡稱，此鋼材的特殊能力在於延緩疲勞裂紋之成長速度，所以是一種具備高疲勞強度的鋼材。

因為船舶航行在海上時，波浪持續地起伏，導致船體結構不斷承受反覆負荷的作用，在應力集中的地方(通常是結構不連續及焊接的地方)，其應力不斷地變化，雖然最大應力並不會很大，但是變化頻繁，次數也不斷累積，若應力幅度(stress amplitude)較高時，當應力變化累積的次數超過結構可以承受之能力時，在這些應力集中點上，就會產生初始裂紋(initial crack)，當船舶繼續營運航行，這些變化負荷仍舊持續作用，裂紋就會不斷成長擴大，最終導致結構大幅度破裂或斷裂，這就是所謂船體結構疲勞的現象，所以疲勞強度是大型船舶結構設計之重要考量。

為了避免疲勞現象導致結構破裂而危及船舶安全，在船體結構設計階段，必須利用船級法規與有限元素法(finite element method, FEM)分別進行結構強度計算與分析，通常會以增加局部結構板厚或改善結構形狀等方式，來降低應力集中處的應力值。所以部分船體結構會出現面積不大的插入板(inserted plate)設計，其板厚高於相鄰結構板厚，可能同時將結構做成圓弧形，尤其位於結構不

連續或角落處，這些設計多數與疲勞強度有關。

IMO 及船級法規對於船舶結構之要求越加嚴格，全球暖化所導致之節能減碳議題也對海運業不斷提高要求，就長期而言，原料與原油價格及人工成本亦可能逐漸上揚，所以結構輕量化是個非常重要的造船趨勢，對於大型船舶尤其需要考量如何降低鋼料量，所以如果鋼板的疲勞強度能夠提高，又能達成結構輕量化目標，必然有利於船體結構設計與施工，而 FCA 鋼板就是在這種需求下發展出來。

二、FCA 鋼材的組成：

FCA 鋼材主要是肥粒鐵(Ferrite)與變韌鐵(Bainite)混合體的微結構，其中“肥粒鐵”又稱為 α 鐵(α -Fe)，其性質和純鐵相似，強度與硬度都是鋼鐵組織中最軟的，但是富於延展性。而“變韌鐵”的組織較細且非層狀，是由沃斯田鐵(Austenite)在波來鐵(Pearlite)溫度範圍以下和麻田散鐵(Martensite)轉變開始的溫度以上的範圍內分解而成的肥粒鐵和雪明碳鐵(Cementite)的混合體，因為其組織中之肥粒鐵的錯位(dislocation)較為豐富，使得變韌鐵的硬度提高許多，圖 1 為利用穿透式顯微鏡觀察“變韌鐵束”組織[1]，圖中顯示在變韌鐵束中(由左下往右上)，有肥粒鐵基質及雪明碳鐵分布其中，而變韌鐵四周為麻田散鐵。

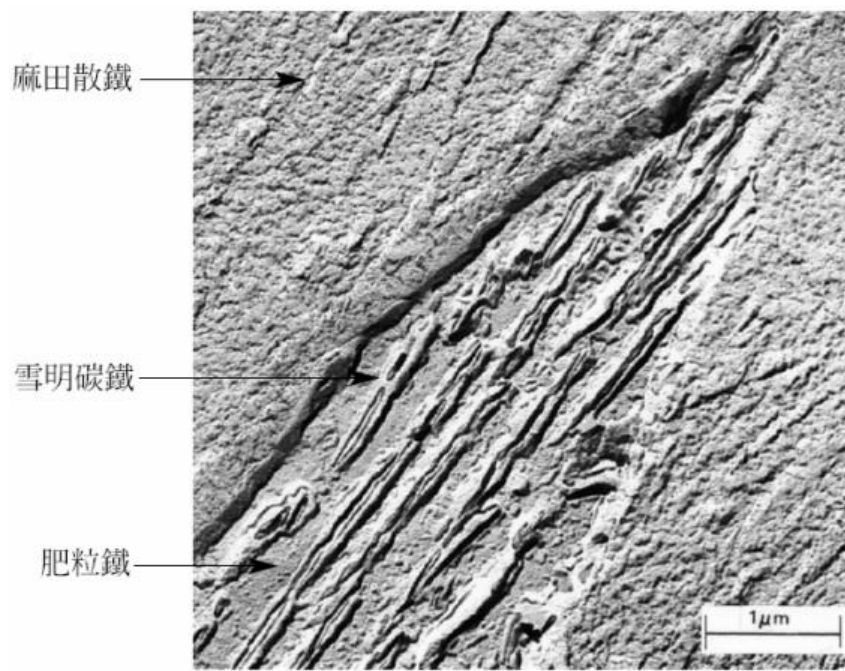


圖 1 利用穿透式顯微鏡觀察變韌鐵束之組織

三、FCA 鋼板提高疲勞強度之機制:

因為介於肥粒鐵與變韌鐵之相邊界(phase boundary)具備較高的抵抗裂紋成長能力，所以不論在未焊接或已焊接的部位，均具備優良的疲勞強度[2, 3]。FCA 鋼材這樣的特殊微結構提升了結構焊接處的熱影響區(heat-affected zone, HAZ)之抵抗初始疲勞的能力，而且當疲勞裂紋穿越雙相鋼(dual-phase steel)之晶格邊界，也就是從較軟的相(肥粒鐵)進入較硬的相(變韌鐵)時，可以減低裂紋成長率。如圖 2 之示意圖所示[4]，傳統鋼材之裂紋會直接穿越波來鐵，而裂紋發生在 FCA 鋼材中時，裂紋成長會遇到變韌鐵，此裂紋可能就停止在邊界上，或需要繞著邊界才能繼續成長，所以形成抑制裂紋成長之能力。對於疲勞裂紋而言，FCA 鋼板具備下列三種抑制效果：

A. 相邊界對裂紋擴展速度的抑制

B. 循環軟化(cyclic softening)對裂紋開口的抑制

C. 循環軟化預應變後，延性斷裂抵抗力下降的抑制

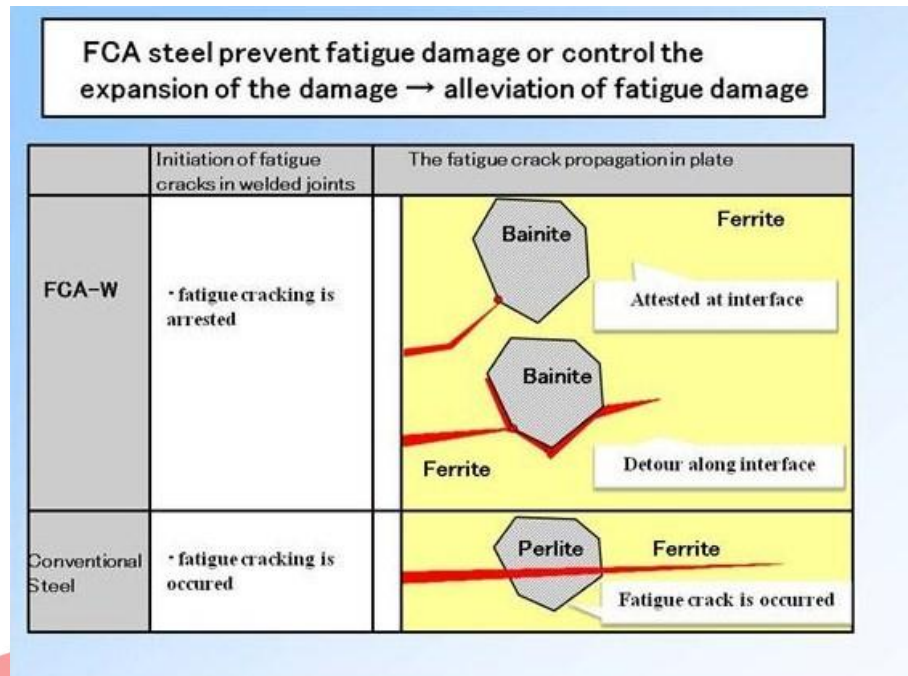


圖 2 FCA 鋼材抑制裂紋成長之機制示意圖

四、FCA 鋼的特性與應用：

FCA 鋼材由住友金屬(Sumitomo Metals)於 2001 年開發，依據“新日鐵住金”(新日本製鐵與住友金屬合併而成的公司)所提供的數據，在破壞力學上之 Compact tension test 所得的結果，比較 FCA 鋼材與傳統 KE36 鋼材之應力強度因子(stress intensity factor)，如圖 3 所示，FCA 鋼板的龜裂擴展速度約為傳統鋼板的一半。
[5, 6]

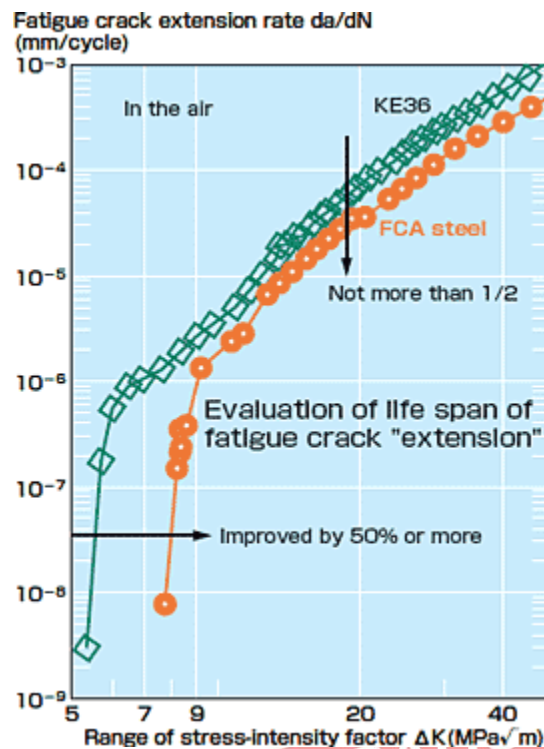


圖 3 FCA 鋼材與傳統 KE36 鋼材之應力強度因子之比較

Nakayama 曾對於 FCA 鋼材之 S-N 曲線(應力幅度與反覆次數之關係曲線)進行實驗研究[7]，實驗結果顯示在高應力(此指幅度)時，FCA 鋼材與傳統鋼材之疲勞壽命接近，而進入低應力區時，則 FCA 鋼材之疲勞壽命逐漸高於傳統鋼材，如圖 4 所示。並基於共同結構規範(CSR)之 F 設計曲線，以此結果推估符合 FCA 鋼材之 S-N 曲線，此曲線在循環次數高於 10^6 時，疲勞强度高於傳統鋼材，所以 FCA 鋼材之 F 設計曲線如圖 5 所示。Konda 等人所推估之其他焊接部位的 FCA 鋼材 S-N 曲線也有同樣趨勢，如圖 6 所示[8]。

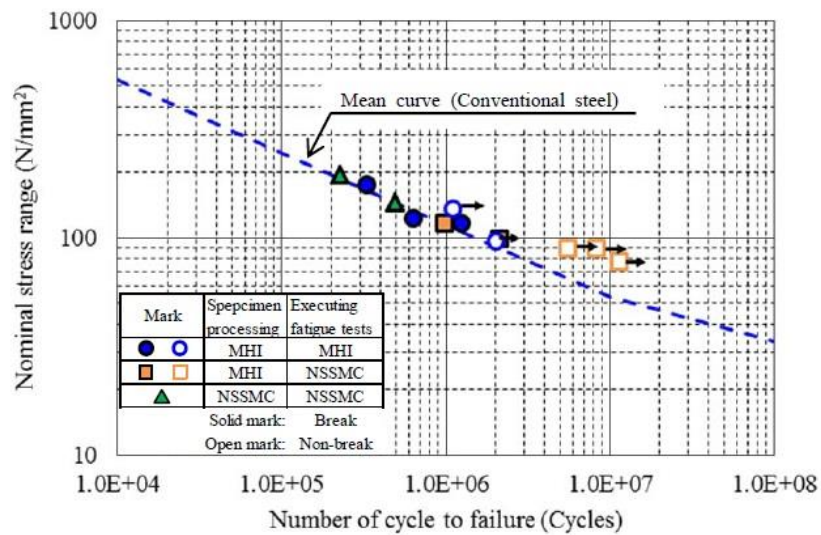


圖 4 FCA 鋼材實驗結果與傳統鋼材之 S-N 曲線比較

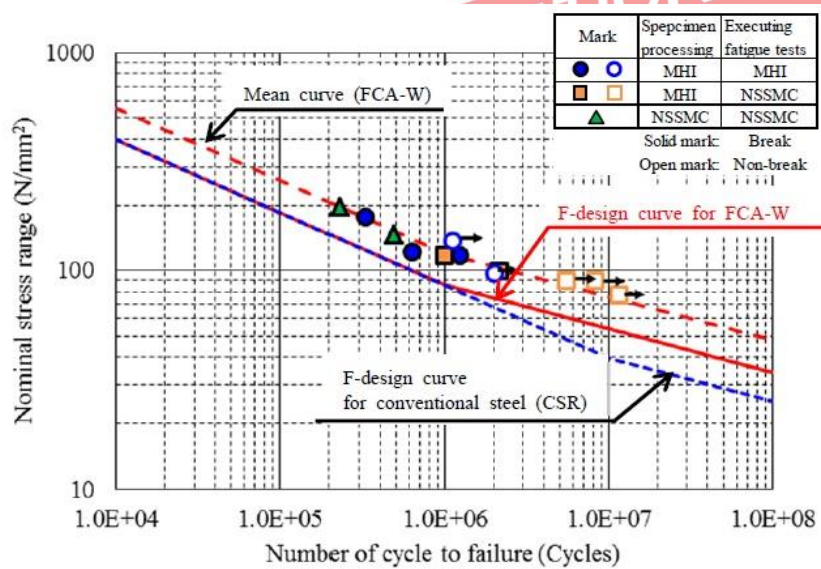


Fig. 5 Comparison of fatigue strength curve

圖 5 FCA 鋼材 F 設計之 S-N 曲線

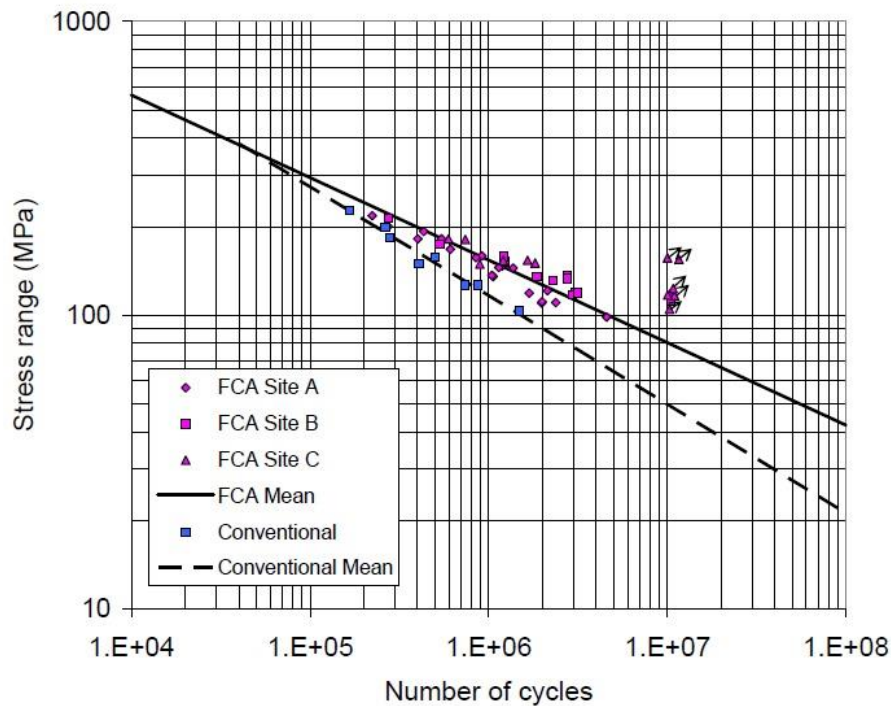


圖 6 Konda 等人所推估之 FCA 鋼材 S-N 曲線

以共同結構規範為基準，Nakayama 等人將 FCA 鋼板應用於 30 萬噸 VLCC 雙重底設計，在底肋板垂向加強材與縱向骨材交會處，進行應力集中評估，該部位如圖 7 所示。其研究結果顯示損壞因子(damage factor)會減低 20%以上，如圖 8 所示，而 20%的降低值相當於船樑縱向應力減低 4%左右，所以船殼重量得以因此減少[7]。

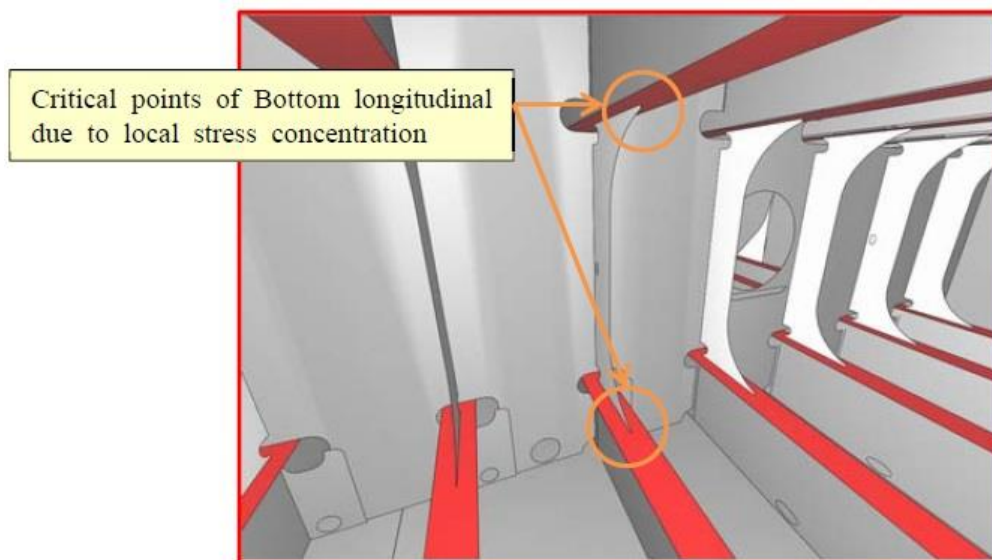


圖 7 雙重底底肋板垂向加強材與縱向骨材交會處

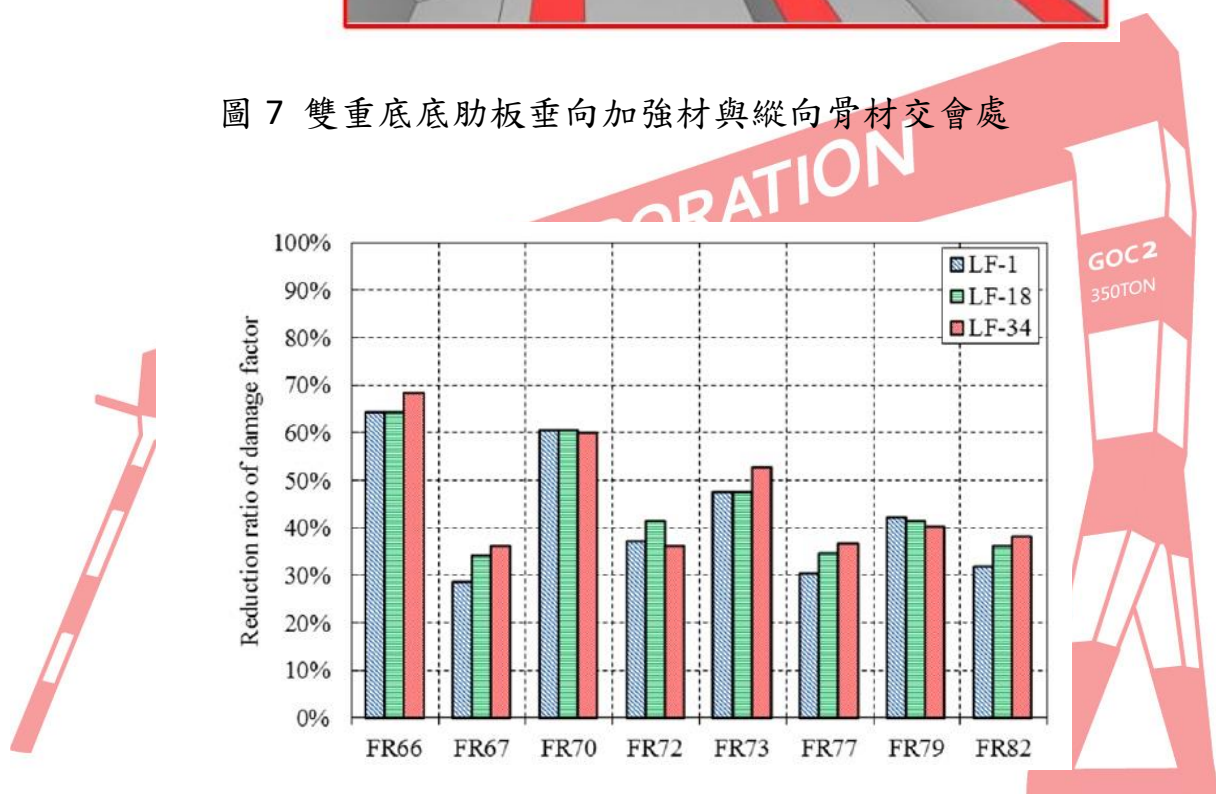


圖 8 雙重底不同位置骨材交會處之損壞因子降低值

而依據“新日鐵住金”所提供之訊息顯示 FCA 鋼材實際使用於散裝貨輪之 hopper、lower stool、艙口角落，VLCC 與 LPG tanker 之橫向結構與船側、底板縱向骨材交會之加強材等[6]。

五、結論:

FCA 鋼材為“疲勞裂紋擴展抑制之鋼材”，是一種具備高疲勞強度的鋼材。因為 FCA 鋼材具備特殊微結構，讓裂紋成長速率得以下降，所以具備抑制疲勞裂紋擴展之能力，不論在未焊接或已焊接的部位，均具備優良的疲勞強度。實驗結果顯示 FCA 鋼板的龜裂擴展速度約為傳統鋼板的一半，實驗結果也顯示 FCA 鋼材於高應力時，疲勞壽命優於傳統鋼材。如果應用於共同結構規範之船舶結構設計，預估可以得到相當於船樑縱向應力 4%的減少量，所以船殼重量得以因此減少。

參考文獻:

- [1] <http://blog.ncut.edu.tw/userfile/2819/CH11.pdf>
- [2] N. Konda, K. Arimochi, K. Hirota, E. Watanabe, M. Tada, H. Kitada, T. Fukui, M. Yamamoto, Y. Kho and H. Yajima, “Development of Structural Steel With Superior Resistance Against Fatigue Crack Growth”, ASME 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.3, pp.35-44, Cancun, Mexico, June 2003.
- [3] K. Macdonald, “Fracture and Fatigue of Welded Joints and Structures”, Elsevier, 2011.
- [4] http://www.nssmc.com/en/news/old_smi/2012/news2012-06-19.html
- [5] <http://www.engineerdir.com/product/catalog/13738/index1.html>
- [6] http://classnk-rd.com/pdf/katsudou201405_A.pdf
- [7] S. Nakayama, “Enhanced Safety of a VLCC by Employing Fatigue Crack Arrestor Steel”, TSCF 2016 Builders Meeting, Korea, October 2016.
- [8] N. Konda, A. Inami, K. Arimochi, Y. Takaoka, T. Yoshida and I. Lotsberg, “A Proposed Design S-N Curves for Steels with Improved Fatigue Resistance (FCA Steels)”, PRADS, in Proceedings, pp.1233-1242, Rio de Janeiro Brazil, September 2010.