

殘留應力不再是鋼結構的痛

吳威德

國立中興大學 材料科學與工程學系教授

在鋼結構的施工過程中，從鋼板的取得到結構件的完成，共會經歷了鋼板的熱軋、熱軋後的空冷、切割、銲接、鑽孔、機械力矯直、熱整、噴砂、組裝等製程。此些製程均會導入不一樣型態的殘留應力，有溫度梯度造成的熱應力、高低溫相轉變的相變應力、由液態凝固的凝固收縮應力、由外力或機械加工所造成的塑性加工應力等。這些均會對鋼結構件產生程度不同的傷害，如最不能接受的銲接龜裂，和最常看到的組立後發生的變形與後來的應力腐蝕行為，以及大家最害怕發生的因為延性、抗拉強度與耐疲勞性的降低而導致的公安意外。在鋼結構設計時我們均知道殘留應力的危害是不可輕忽的，但因為殘留應力是看不見的，在它還沒有被釋放時我們是感受不到它的存在。但是我們的設計人員為了安全起見也均會將殘留應力的消除與降低列入施工的要項，但因為看不到、測不到，故也無法有效的追蹤與控管，也就隨它而去。

經與現場工程人員多方接觸與了解後，即使工程設計者與施工者皆了解殘留應力的重要性，但因受限於監督與管控的不易，故一直留於道德上的勸說。然而眾所皆知，此了然於心而不行之於外的狀態，會因趕工或降低成本上的考量，讓我們的品質與公共安全一直暴露於危險之中，此不是吾等有識之士與有良知之人當為者，也不應再以不知或增加些微成本當藉口，故以此文為前導鼓勵鋼結構的相關從業人員自我砥礪與提升自身能力與標準，將國內的鋼結構工程帶入更高標準與安全的境界。

一、殘留應力的消除

施工後殘留應力的消除可分為熱的方式與力的方式。熱的方式在鋼結構業大多以鐸後將保溫毯包覆鐸道使之徐冷，此方式廣為大家所採用並認同。另外有更慎重者會採用加熱片的方式，此應力消除的效果當然會較保溫毯來的好，但是其加熱的溫度會影響殘留應力消除的效果，加熱溫度愈高殘留應力消除的量愈多，但從材料觀點而言，溫度愈高愈會造成材料元素擴散、化合物析出的發生，也會影響材料的機械性質，甚至會有回火脆化的情形發生，另外加熱片包覆區域有限，故會有加熱不均的現象發生，也因其施行不易故於施工現場使用的並不普遍。

另外以力的方式施行有敲擊和振動兩種，而一般以敲擊方式最為普遍也最方便施行，但其效果也最不明顯且也可能因為敲擊力道太大而造成工件受傷。另一最有效且安全的是振動法，如圖一所示，其能在控制中快速的將殘留應力去除，且不會影響材料的機械性質與顯微組織，另外也不會造成工件的變形，是一種可以採用兼具快速與方便的殘留應力消除法。

二、殘留應力的量測與分析

殘留應力的量測可分為從應變量的量測再反推到應力值的方式，以及應力對鐵磁材料的磁性或透光性材料的折射造成的影響三種方式，進而演變出多種量測方法。其量測可為非破壞與半破壞之應力量測，可做定量與定性的應力量測與應力分析，可進行局部區域的定量分析與大面積的快速定性分析，也可瞬間進行全區域的應力集中分析。

現僅就本實驗室較常用與熟悉的設備做一簡單介紹：

1. X光應力量測儀，其乃顛覆傳統巨大、不可移動、高輻射之X光繞射儀器印象，轉變為一可攜式設備，藉由收集Debye環上的2D繞射訊號，量測出材

料晶格應變，再利用所測得的晶格變形量推算出當點的應力值，待測物不限形狀、大小、重量皆可測，搭配不同的燈管替換可適用於各類金屬。此儀器乃屬低功率之設備，其低電壓 30KV，低電流 1mA，測量速度依照材料種類不同約 90 秒~5 分鐘間，可量測表面深度約 10 μm ，採用單一入射角，不需要高精度的定位控制，可快速量到單點之絕對應力值，如圖二到四所示。

2. 大面積應力分析儀，利用頻譜控制及響應的特性所發展的快速顯示系統，將電磁振動機能達到閉環控制的原理，並能針對各種結構應力產生的頻譜進行相對比較，故可測量大型鐵磁性材料工件的殘留應力，此儀器可快速掃描整個表面的應力分佈狀態，進而得知應力集中區域與各位置之相對大小。此設備如搭配自動控制機構則能進行線上產品應力的監控。
3. 盲孔法應力量測儀，是屬於半破壞的應力分析方式，盲孔法就是在工件上鑽一小孔，使被測點的應力得到釋放，並由事先貼在孔位的應變規測得釋放的應變量，再根據彈性力學原理計算出不同深度的殘留應力值，如圖五所示。根據彈性力學基本觀念，在垂直於任何自由表面的應力必自動歸零。由此觀點，欲量測試件表面下的殘留應力，我們可經由盲孔法獲得。理由是在試件表面鑽一圓柱形小孔，如果在試件表面具有應力場，那麼在沿著孔壁表面的應力勢必會釋放出來，由此種應力重新分配而產生新的應變，再反應到其釋放出的應力值。其優點是可以依鑽孔深度測量表面到深度 2mm 之殘留應力分佈，但其缺點有 1.操作非常繁雜且耗時；2.耗材昂貴；3.因屬半破壞性，故無法量測鄰近的小區域；4.容易受到人為影響產生而產生較大的誤差；5.工件表面的前處理要求較高。
4. 磁彈應力分析儀器，對鐵磁性材料外加一交變磁場，會使材料產生磁化作用。磁化過程中，材料內部磁矩急劇變化將會因磁彈反應而產生巴式噪音訊號(Barkhausen noise)，其單位為磁彈信號值 MP，巴式噪音訊號的變化會受到殘留應力或外加應力的影響，因此在可控制的狀況下藉由監測巴式噪音訊號，可對材料的應力狀況加以評估。此儀器之優點是測量速度快，每一量測點只需 5~10 秒，其量測深度可達約 0.01~1mm，且不受工件大小形狀的限

制，如圖六所示。但其缺點為僅適用於鐵磁性材料，且須為同一種組織狀態，若要將所量到的相對應力值定量化則必須要製作標準試片。

5. 光彈應力分析儀器，此設備主要提供為教學與研究用，讓學生了解與目睹材料受力時應力的分佈狀態。光彈法是一種利用光波的全域性應力量測方法，它是將具有雙折性的透光材料，製成與實際構件形狀相似之模型，置於偏振光場中，並施加外力於此模型，藉由偏振光的光程差所產生的干涉作用，形成明暗相間的條紋，這些條紋代表著模型內部的應力分佈情形，經由理論加以分析，便可確定模型內部各點的應力。近年來因光電科技及影像處理技術的快速進步，利用高畫數的影像攫取及影像處理系統提升光感度的敏銳判別力，將其與傳統光彈法結合，發展出數位光彈法，用以判讀小數級條紋級次，減少肉眼判讀所造成的人為誤差。

結語

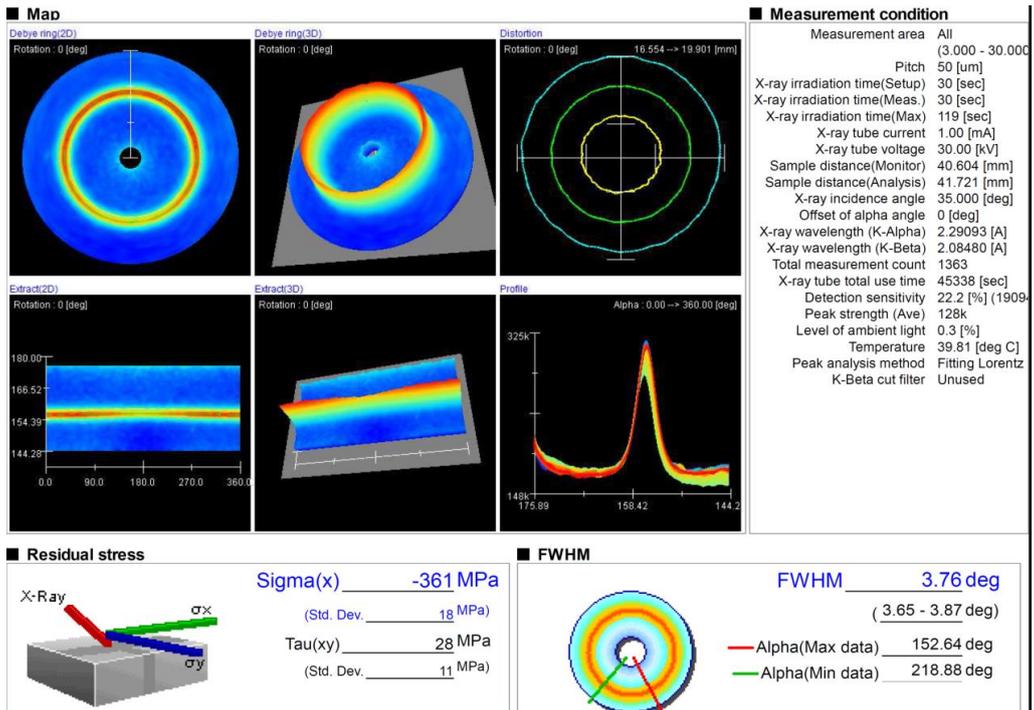
科技日新月異，工程人員須善用現今進步的技術將以往無法得知的應力值實際量測與呈現出來，也能將此技術輔助工程設計人員驗證其設計之正確性，更可協助電腦模擬工程以證實其理論模型之正確性，而不再需要像傳統處處製作大量的試片，以進行破壞性的試驗，致耗費大量的時間與成本。更重要的是能督促現場的施工人員採用正確的施工方式以確保施工的品質，因而將此工程所允許的最大應力值控制在一個更安全的範圍內，也保證最後能達到原先設計者的要求，並給予一個安全的施工品質，及給全民一個安心的生活環境。



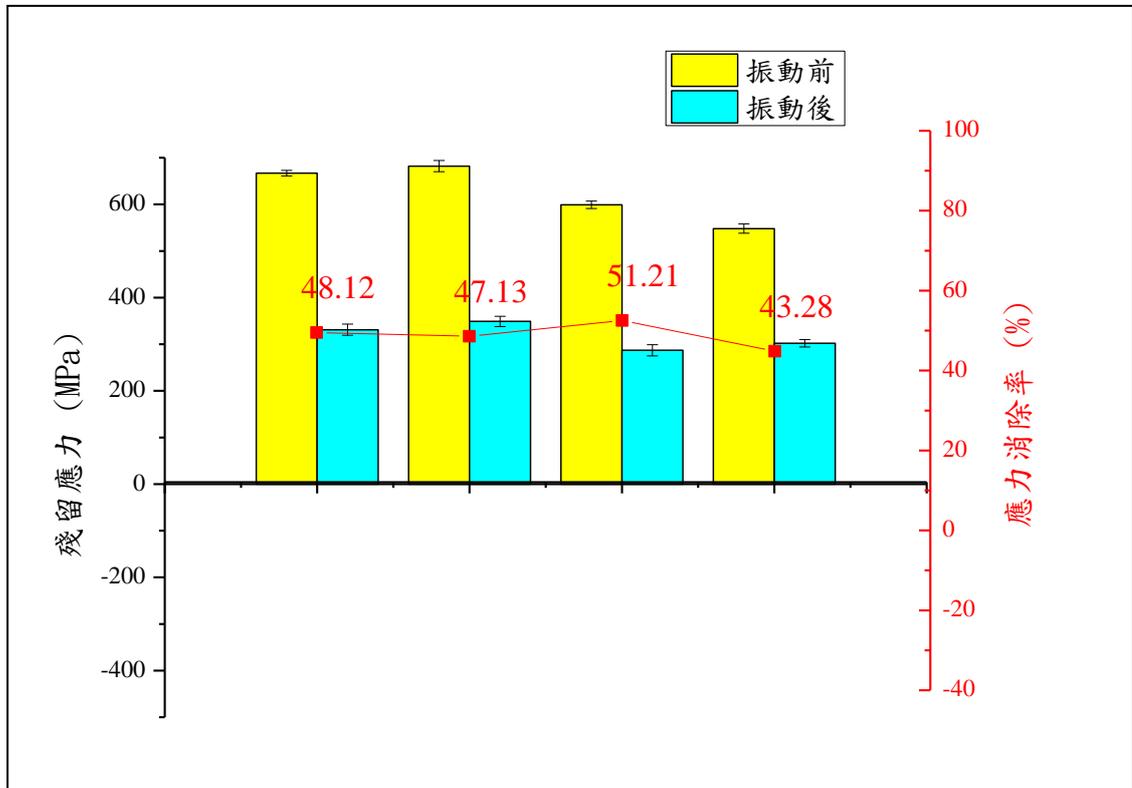
圖一、以振動方式消除鋼結構件之殘留應力



圖二、以 X 光進行現場之殘留應力量測



圖三、X 光量測殘留應力之結果



圖四、以 X 光量測振動消除殘留應力前後之比較



圖五、以盲孔法量測試片之應力縱深分佈



圖六、以磁彈方式量測鋼板不同位置之應力分佈