

高性能鋼材應用於建築結構之研究

The Study of High Performance Steel Adopted in Building Structure

主管單位：內政部建築研究所

潘吉齡

林新華

余志鵬

林政億

Pan, Chi-Ling Lin, Shin-Hua Yu, Chih-Peng Lin, Chang-Yi

台灣建築中心

摘要

近年來美、日等國均積極投入高性能鋼材的研發，並已實際應用於橋梁及高層建築工程及耐震、防火等特性之上。除了結構強度與承載能力的考量外，建築結構的安全如構材的變位與建築物的側向位移等服務功能亦為研發的考量，而橋梁結構則以疲勞與斷裂要求為重要的設計訴求。由於高性能鋼材具有穩定的材料強度，良好的銲接性能，較大的延展性與相對韌性特性，及良好的抗蝕性，皆為使得高性能鋼材研究在近年來得以大力發展的主要因素。本研究之主要目標即在於探討高性能鋼材應用於國內建築與橋梁結構之可行性及經濟性，藉由蒐集及分析國內外高性能鋼材研究現況及相關之應用實例，以研析相關課題、對策與研發方向重點。

關鍵詞：高性能鋼材、設計規範、鋼結構

Abstract

Recently, high performance steels have been internationally applied to constructions of bridges and buildings with their aseismic and fireproof properties. In addition to considerations of strength demanding, the serviceability and constructability are two other important issues to be taken into account. Based on experiences obtained in Japan and US, high performance steels provide much better alternatives than most other building materials. Thus related researches regarding building technology and material development are hot topics. It is intended in this research to investigate the feasibility of applying high performance steels to domestic buildings and bridges. This study was carried out through collecting and analyzing information of related researches and current practices. Based on both foreign and domestic data, this paper draws certain potential topic, suggests corresponding strategies, and finally proposes developing priorities.

Keywords: High Performance (HPS), Design Specification, Steel Structure

一、研究背景與內容

目前台灣正走向已開發國家的行列，人工價錢高漲，人力資源短缺乃時所必趨，再加上水泥的開採設限與設廠製造對環境的衝擊，以及砂石的短絀，面對民眾環保意識的不斷提高的時代，顯示出使用具環保且可回收的鋼材做為建築材料，似乎是台灣未來建築發展的一個重要趨勢。再者，未來二氧化碳排放量的管制，水泥在製造生產與用於營

建時所產生的環保問題，以及 RC 建築物在拆除重建時的困難，目睹現今政府正規劃推動「綠建築」的同時，採用鋼結構似乎是一種時代趨勢。因此世界各國皆不斷地發展以鋼材為建築物的基本原料，針對市場的需求之下，近二十年來鋼結構已漸漸地在世界各國成為建築與橋梁所使用的主流，為因應推陳出新的鋼材，世界各先進國家皆持續的修正與修訂鋼構造之相關規範與施工標準。除了考量上述所提的種種因素外，臺灣地區又因地理環境特殊，不但位於太平洋颱風路徑的要衝，且位於「環太平洋地震帶」上，處於「歐亞大陸板塊」與「菲律賓海板塊」相互衝撞的地區，對於身處地震帶的台灣，建地缺乏，山坡地的限建及如何增加建築物結構體抗震力等則是另一些議題。因此除了制定完整之鋼構造相關規範外，藉由外國的經驗與知識，並透過本國的相關研究不斷的修正既有的規範，以期讓設計者與業界可以實際應用，並可與世界其他先進國家在建築領域上同步。

高性能鋼材在美國、日本等國發展多年，並已實際將相關驗證之結果編制或修正於相關規範內，雖然本國已有「鋼構造建築物鋼結構設計技術規範」的制訂，但目前尚未針對高性能鋼材的適用性納入規範內。因此，本研究之目的即在於探討高性能鋼材應用於國內建築與橋梁結構之可行性及經濟性，藉由蒐集分析國內外高性能鋼材研究現況及相關之應用實例，除了界定高性能鋼的定義，並研析相關課題、對策與研發方向重點，並嘗試研擬相關之現行技術設計規範及施工規範的修正建議。另外，考量銲接對鋼材本體的機械性質的影響，應是在高性能鋼定義的前提之下一項可探討研究的課題，因此本研究亦以 A992 與 A572 兩種鋼板所組成的箱型斷面，進行銲接對材料性質的影響，以初步驗證高性能鋼材與一般結構用鋼在銲接方面的差異性及其適用性。

二、文獻探討

2.1 鋼材的發展

為探討高性能鋼材的相關研究與推廣，深入瞭解其發展的過程則是首要的功課。在 1990 年代之前 A36 鋼材一直是結構用鋼最熱門的鋼材，因為 A36 鋼較以往 A7 與 A9 鋼具有較低的碳含量與較佳可銲性，但在高強度低合金(HSLA, high-strength low alloy)的 A572 鋼材(ASTM, 1997)出現之後，至今結構用鋼材大部分則採用此類的產品，而 A572 鋼最常用的種類為最小降伏應力達 350 MPa 以上者。與 A572 鋼應用的同期，一種耐候鋼也隨之發展出來，也就是被 ASTM 歸類的 A588 鋼材(ASTM, 1997)，而大多數的 A588 鋼與 A572 鋼有相同的材料機械性質。

在 1998 年一種新類型的鋼材-A992 鋼被歸類至 ASTM 規範內，其屬於 HSLA 的鋼材並適用於製作成寬翼板的結構型用鋼，同時 A992 鋼材的最小降伏應力為 350 MPa (ASTM, 1997)。除了擁有如高性能鋼材(HPS, high-performance steel)一般在強度與延展性的特色外，A992 鋼材具有優良的可銲性與嚴格控制的受拉機械性質，它也是第一種在美國規範上(或可說是在世界上)同時確立最小降伏應力和最大降伏應力、最大降伏與抗拉強度比(yield-to-tensile ratio)、最大 carbon equivalent (CE)值的鋼材(Bjorhovde, et al., 2001)。美國鋼構營建協會(American Institute of Steel Construction, AISC)於 1999 年將 A992 鋼納入規範(AISC, 1999)內，目前在美國鋼構建築市場上為最熱門的鋼材用料。除

了在建築結構上的應用，近來 A992 鋼常被引用成為橋梁的結構鋼材，由於美國 ASTM 規範在橋梁鋼材的斷裂韌性與銲接性適用上有較嚴格的要求，也因此 A992 鋼如其他高性能鋼一般地被歸屬於 A709 規定的範疇內。

高性能鋼之所以有如此優良的材料特性表現，其中很重要的即是特殊的製造技術—TMCP (Thermo Mechanical Control Process)，應用完善控制的滾軋溫度與冷卻溫度，得到較細較好的鋼體微結構，這也因此利用 TMCP 技術讓高性能鋼與傳統技術製造的鋼材有較佳的材料強度（如圖 1 所示）。

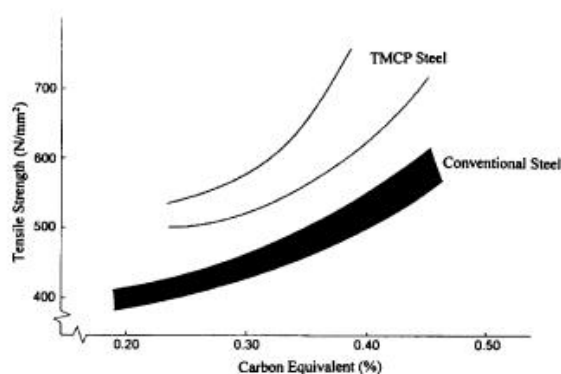


圖 1 TMCP 製程鋼材與傳統製程鋼材強度比較 (Miki, et al., 2002)

2.2 高性能鋼的特性

以往結構工程師在設計時常將焦點放在鋼材長向的降伏應力與抗拉強度，又各等級鋼材的彈性模數(E)皆被設定成為定值，而銲接性與延展性因規範上呈現的要求資料較少，也因此鋼材的服務功能性質往往較不被重視。但近年來因考量耐震因素時，一些過去所忽略的問題則一一產生，所以以往所能接受的要求或接合幾何方式也被提出質疑 (SAC, 2002a & 2002b)。一般鋼材的材料性質皆取決於受拉試片，事實上有些破壞模式似乎與面外方向(Z 方向)的強度特性有關，因此所謂的厚度方向上的材料強度 (through-thickness strength) 亦應以予重視才是。在前述的背景情形之下，大量的研究與實驗被進行以滿足鋼材在各方向上的材料性質與服務性能，因而此類的鋼材產品則被稱呼為高性能鋼(Bjorhovde, 2004)。

良好的延展性是成為高性能鋼的基本要求之一，在許多的高要求旋轉梁柱接合實驗中得知，利用高性能鋼材所進行的試驗皆有相當不錯的表現，事實上，試驗中得知高性能鋼材在長向上的伸長量皆能達 18%~30%，這也是其能滿足結構耐震要求的主因之一。高性能鋼的疲勞特性與普通鋼材一樣，受制於銲縫形式和應力區域的大小，疲勞特性與鋼種和強度無關。高性能鋼的試驗結果發現 AASHTO LRFD 規範第 6.6.1 節中有關疲勞所定的疲勞參數亦適用於高性能鋼所採用的銲縫形式。

高性能鋼斷裂韌性遠遠高於一般橋梁用鋼，在美國目前 AASHTO 的衝擊功的強度對鋼橋的要求則定於服務的最低溫度以上，以免出現脆裂，其服務溫度可劃分為 3 個區域。AASHTO 衝擊功的溫度在 AASHTO LRFD 規範中有詳細針對斷裂強度要求。對於

HPS 70W(485W)鋼的大量試驗顯示，僅在第 3 區(-51.11°C)出現了脆性。高性能鋼的重大發展研究成果及其高性能鋼脆性控制的優點就在於此。另外，有一定程度的鋼材斷裂韌性(fracture toughness)是對於建築結構安全的要求之一，而高性能鋼在破壞韌性最小需求則為：在攝氏 5 度時有 27 J 的表現(Charpy V-notch toughness requirement)，在美國 AASHTO 規範(AASHTO, 1998)與 AISC 規範(AISC, 1999)中皆有相關的要求。

2.3 高性能鋼的應用

美國州道與運輸官方協會(AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials)於 1994 年首度將降伏應力達 485 MPa 的高性能鋼 HPS 70W(HPS 485W)置入於橋梁設計與營造的規範當中，但因有較少的研究資訊可以提供，高性能鋼材的應用則有相當多的限制。在 1998 的 AASHTO 的設計規範，HPS 70W 鋼材在橋梁設計與應用上有大幅的提升。但在 1998 的版本中仍有些限制，如 (1) 對於連續板梁(continuous plate girder)上的負斷面(negative sections)而言，最大的彎矩承载力僅能以降伏彎矩(yield moment)設計，而不能與使用一般較低降伏應力鋼材般的可以用塑性彎矩(plastic moment)設計之；(2) 非彈性分析與設計方法不適用於大於或等於 485 MPa 降伏應力的高性能鋼材；(3) 對於複合板梁(composite plate girder) 在正斷面(positive sections)部分的延展性的要求尚未確立，因此高性能鋼材應用於正斷面的延展性相關檢覈無規範可考；(4) 同樣地，因對於高性能鋼材在受拉時的表現與其斷裂問題並無足夠的研究與資訊可以提供，在應用於如桁架拉力構件上仍有限制；(5) AASHTO 的設計規範雖然對於應用高性能鋼材於複合梁(hybrid girder)已有規範，但在計算其剪力承载力上還是有不少之限制；(6)1998 版的 AASHTO 的設計規範雖然已提出對於橋梁最大容許活載重位移的限制，但對於使用高強度的高性能鋼材斷面時，其斷面幾何與有效斷面的影響尚未納入規範並予以限制，未來此部分似乎應可藉由研究的成果來做進一步的修訂。

隨著 HPS 70W 鋼成功使用，橋梁工程師們提出了開發 HPS 50W 鋼的要求(Yang, 2005)，目前，HPS 50W 鋼及 HPS 70W 鋼已經供給市場，有 20 多種 HPS 70W 鋼已經在不同國家和地區得以使用。針對使用需求日益增加的情況下，美國的聯邦公路局(FHWA)已經完成高性能鋼材的設計手冊(Myint 2002)，此手冊主要集中在組合箱梁(built-up girder)的設計上，實際上的應用則是以複合營建(hybrid construction)的方式進行(如圖 2 所示)，也就是箱梁的翼板與腹板使用不同降伏應力的鋼材，如此可達經濟層面的效果。

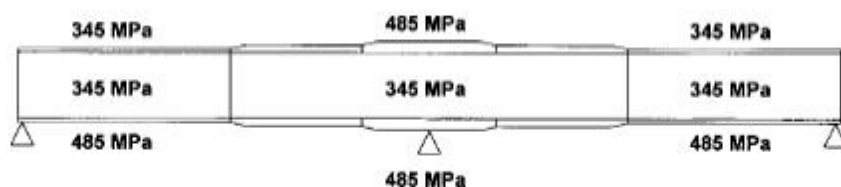


圖 2 TMCP 複合梁設計 (Azizinamini, et al., 2004)

早在 1960 年代初期，日本即以生產翼板厚度達 125 mm 之超厚 H 型鋼，但由於此

型鋼在常溫條件下具有脆性特性，以致無法廣泛的應用在建築結構。日本對於一般建築之鋼結構所使用之鋼材標準分別為軋制鋼材(JIS G3101:SS) 及銲接鋼結構鋼材(JIS G3106:SM)，此兩種標準規範主要是適用於鋼構材在彈性範圍內之鋼結構建築，對於在地震力作用下鋼構材需要更佳之彈塑性質和吸收大量外能時，則要使用更好性能的 SN 級建築結構專用優質鋼(JIS G3136:SN)，另外日本也對 STKR 級碳鋼鋼管制定了相關標準 JIS G3475。

三、國內相關規範之現況探討

由於國內重要規範『鋼構造建築鋼結構設計技術規範』，主要參考『美國 AISI 鋼構建築物規範』(Specification for Structural Steel Buildings)，而『公路橋梁設計規範』之鋼結構設計篇亦參考美國 AASHTO 公路鋼橋標準規範(AASHTO Specification)，美國於增列高性能鋼於規範中之相關做法值得我國借鏡。就地理位置與氣候條件而言，我國位於地震頻繁之版塊交界處，屬於溫熱潮濕的亞熱帶氣候。因此，日本針對抗震機制所研發之相關經驗特別值得我國借鏡，而美日兩國針對寒帶氣候所做之額外規定應適度取捨，或可考慮以更重要之符合國情需要的抗腐蝕規定取代之。

近十年美日兩國對於部分傳統鋼材於北嶺、阪神強震中未能發揮應有之設計韌性所做之系列研究，其重要結論包括；使用於抗震鋼構造結構之鋼材必須具有更明確之機械性質範圍，方能確保該結構物於強震中得以發揮其耐震設計中所賦予的耐震性能與機制。因此，使用於耐震設計之鋼材除應增列其降伏強度之範圍且該降伏強度範圍應越窄越有利於耐震行為之掌控，同時，鋼材之降伏比 (F_y/F_u) 應儘量控制於較低之比值，以確保所預期之結構韌性行為不會因所用鋼材延展性不足而無法達成。該重要結論近年已廣為工程界知悉並實踐於鋼構造設計與施工實務上。過去十年間，日本率先將“須符合耐震設計”鋼材的觀念逐漸增加與修訂於相關規範之中，美國因幅員廣未以耐震需求之嚴格標準全面要求鋼材規格，但其聯邦乃至於各州政府之建造規範對鋼構施工尤其是銲接細節之要求標準卻相對嚴格。國內規範向來與美日規範關係密切，今年新頒之新版鋼結構設計規範中，皆已針對耐震設計需求將國內常用鋼材列表進行相關修訂。由於引入安全合宜的耐震考量是國內鋼結構設計上不可或缺的一環，不論未來高性能鋼相關之定義如何演進變化，將“須符合耐震設計”鋼材的要求設定為高性能鋼所應具備的基本條件，似乎是無庸置疑且可獲得共識的論點。因此，能被定義為國內適用之高性能鋼之材料的通用敘述，應將已儼然成形的耐震設計用構材規格之標準納入，即應具有窄限降伏範圍、低降伏比值與碳當量描述等。

3.1 國內建築物使用高強度與高性能鋼材之現況

國內主要鋼構建材供應商，如中鋼與東和鋼鐵，近年於研發及生產特定建築需求之具鋼鐵材料皆有相當之經驗與貢獻。以台北 101 大樓之興建為例，其高達 90 層樓高之主柱之建造為滿足耐震設計與銲接施工標準的需要，無法直接使用一般 ASTM A572 或 CNS SM570 標準之鋼板，因此由中鋼公司針對較高之鋼材強度、較佳韌性與銲接施工所需標準，生產出具量化規格的較高功能鋼板。該規格稱為 CNS SM 570M，其相較傳

統增訂之規格項目便是如前”須符合耐震設計”之觀念所述包括；窄限降伏強度、低降伏比值、壓延方向衝擊功、厚度方向斷面積縮減限制、碳當量限制與銲接冷裂敏感係數等。以 SM 570M 此種為因應特殊結構設計與施工需求，所發展出之較高性能特別鋼種，便滿足高性能鋼定義之精神，一旦開發出來也相當適合同類型同等級重要鋼構造工程進行仿效。以『鋼構造建築鋼結構設計技術規範』所列目前國內服役之耐震鋼種中，具顯著優勢之功能性或可逕選為符合高功能性鋼材者，似僅有 SNC 系列，該系列對於壓延方向與厚度方向皆有制式標準之規定，甚至較之於美國常用之 A992 鋼種之需求規格嚴謹。

高性能鋼之選定除依照設計與施工上需要的功能之外，毫無疑問亦受到特定鋼材於市面之可普及度，以及主要供應商之供給能力等市場因素的影響。因此，現行國內外市場較高強度之普及鋼種，若能加以上述額外之諸項規格限制，或可為高性能鋼適當之候選鋼種。以國內大宗生產外銷型鋼的東和鋼鐵公司為例，其 ASTM A992 型鋼之年產量超過 10 萬噸，加以中鋼公司之生產能量推論，未來工程界若需求此類鋼種進行鋼構建造，應無市場供需失調之虞。由於 A992 型鋼具優異的強度與韌性性能，其性質相當適合設定為需高強度之高性能鋼所需具有的基本條件。另一方面，既然耐震需求在國內之鋼構造結構是最重要的考量之一，特殊使用於鋼構造建築使產生較佳延展性之鋼種亦可考慮定義為高延展性高性能鋼，如中鋼所生產的 CSC LYS 100 系列因其低降伏強度之特性，通常用於耐震設計中形成塑性區之理想鋼材。而為了有效控制塑性設計之結構行為，LYS 100 鋼種亦具有窄限降伏範圍與極低降伏比值制式規格的特點。以其具有滿足特定鋼構造行為之能力，且係經由比一般鋼材更精準之規格標準要求達成的方式來看，類似 LYS 100 此種特殊功能鋼材似乎亦具備被定義為高性能鋼的候選鋼種。

由於國內主管單位尚未針對高性能鋼之涵蓋範疇加以定義，想當然爾截至目前為止，尚未有正式之法規與條文加以規範與高性能鋼有關的結構設計與施工實務細節等規定，也因此明確以高性能鋼為名義之鋼構材料研究相當有限。以目前國內主要之鋼材供應廠商所擁有的製造技術、市場供需考量與我國地理條件特性而言，國內針對高性能鋼之定義範疇宜針對下列三項特性進行通盤檢討訂定之：

- 鋼材是否仍具有優質之可銲性；包括明確訂定出鋼材適當之碳當量限制、相關配合材料(銲材與螺栓等)規格需求限制，以及相關之額外施工規定等。
- 鋼材是否具備符合耐震規定之基本條件；符合耐震相關規定應為國內高性能鋼須具備之基本條件。
- 厚板鋼材須對板厚方向之機械性質有更嚴謹之性質描述等；板厚度加大後，鋼材之板厚方向行為不確定性亦會提高，符合高性能鋼定義之鋼材應能針對厚度高之鋼材其板厚方向提出較完整物理特性數據。

3.2 建築物鋼構材料之選用

國內在高樓建築物鋼構的選用上，一般較偏向使用與日本一樣規格的鋼材，如 CNS 2947「熔接結構用軋鋼料」之規定主要沿用 JIS G3106「熔接構造用壓延鋼材」，而 CNS 13812「建築構造用軋鋼材」之規定主要沿用 JIS G3136「建築構造用壓延鋼材」。

日本於 1994 年推出 SN 系列鋼材的初期，因生產價格與鋼廠技術的緣故，在推廣上較不順利，直至 1995 年阪神地震發生之後，SM 鋼材則被公認無法適用於所有的建築耐

震構材。而在美國方面，因傳統的 A36 鋼材的實際強度與標稱強度的比值較高，導致在韌性設計上有較多的變異性，A36 則不建議使用，也因此較高強度的 A572 與 A588 鋼材則大量應用於建築結構用途上。自 1994 年北嶺地震發生後，在 AISC 的推動之下，開發了 ASTM A992 規格的型鋼，因具有降伏強度的限制與降伏比的要求，A992 已取代了 A36 與 A572 型鋼，成為美國區域鋼構建築物的主流，但目前本國的『鋼構造建築鋼結構設計技術規範』尚未將 A992 鋼納入考量。

針對鋼構材規格與特性，目前國內主要相關規範之描述概況如下：

- 鋼構造建築物鋼結構設計技術規範之第三章與十三章明列材料性質定義章節，但無與美、日及 CNS 通用規格對照表，建議可進一步之詳細比較或歸類。
- 鋼結構設計手冊之鋼材性質，將 CNS、JIS 及 ASTM 一併列出，並建議可先行條列近年美國新開發高性能鋼規格，且陸續條列國內可量產之高性能鋼種類。
- 公路橋梁設計規範第七章鋼構造篇，目前之鋼構材描述則無 CNS 規格，完全以 AASHTO 及 ASTM 規格列表說明。
- 鋼結構施工規範第三章材料之說明，與鋼結構設計技術規範之規定相同。

3.3 現有鋼構造規範之相關內容增訂建議

針對前節所述之高性能鋼相關現況，本節針對國內現行規範分為材料定義與設計施工規定兩部份進行建議：

(1) 材料定義方面

由於高性能鋼之使用原因多為配合特定結構物之興建包含異於傳統建造技術之故，其應用層次常取決於設計者與施工者之經驗程度，亦可能包含新穎獨到的創見，加以鋼構造材料之研發技術日新月異。鋼構規範若僅以正面表列的方式規定可資應用的鋼材種類，難免有侷限設計者創造能力之虞。

因此，建議鋼構規範內之材料章節可增列一節，明訂可定義為高性能鋼之鋼材符合鋼性能鋼之鋼材，其認定之方式有二；其一為通用規定，明訂高性能鋼鋼材起碼應具有之制式規格描述有哪些項目，如須具備窄限降伏範圍、低降伏比(0.8 或 0.85 以下)及碳當量限制等。其二為市面已存在鋼種之認定，針對國內外之市面上已具高性能鋼資格之鋼種，如前述中鋼 SM 570M、LYS 100 與或 ASTM A992 等，則予以列舉。另一方面，解說中亦可針對美日及國內建造經驗上已成功使用之鋼材，或可將之列於解說表中。如此，明訂鋼構造高性能鋼基本定義一節，將有助於未來相關於鋼構造高性能鋼研發之進行並提供設計、施工、與生產者共同語言以及依循的準則。

(2) 設計施工方面

由於鋼構設計規範多依循美國經驗，我國於設計規範納入高性能鋼建造具體作法可參考第三章所述美國對於高性能鋼橋梁建造的方式進行。美國基本上是採“過渡期逐年修定”的做法，在正式將高性能鋼全面於主要法規範中明文規範各細節前。先將欲推動的高性能鋼設計與施工規定，使用補充規定或設計者指南的方式推廣或加以限制，並依據相關研究成果與工程應用經驗的累積逐年修訂，如此，以外加正式鋼構造規範的補充內容方式，可免除頻繁修訂正式規範所造成之不變與衝擊，值得國內相關單位借鏡採用。

至於國內施工規範中是否需針對高性能鋼之施工細節進行專節規定，亦或仿照上述

以補充規定或施工指南先行進行推廣，似乎仍需進一步評估。明訂與高性能鋼相關的施工規範章節，其困難度在於鋼構造施工細節繁多，若目標構材本身非單一鋼種而為機械性質被量化的變異群體，一則具通用性之規則不易明訂，再者任何針對性的施工規定皆顯得過於枝微細節而不恰當。反之，國內施工細節(如銲接規定)之依循多以日本相關經驗為主，國內工程經驗亦以“避免”同時採用寬鬆美規構材+寬鬆日系施工規定”為原則。因此，若考量到需要使用高性能鋼構造之結構物本來就具相當之重要性，加上未來國內主管部門欲推廣高性能鋼建造工程或規範其建造安全性時，恐確有限制使用較高施工品質步驟與措施之需要。

3.4 美國經驗之參考

美國歷經近十年研究，才由官方提出 HPS 於鋼構造橋梁上之相關補充規定。這些補充規定之形成有賴於鋼構材料性質確立以及實際施工經驗之回餽，始能逐步完成。國內相關規範既然與美國日本規範相關性密切具平行參考價值，引用兩國之相關經驗在時效及推動性上皆有相當之適用性。

參照第三章之美國經驗敘述，目前美國在橋梁規範上針對高性能鋼之設計與施工，外加兩份設計指南加以明訂其各項額外之限制與規定。其一為 FHWA 之『高性能鋼設計者指南』(HPS Designer's Guide)，現階段版本為 2002 年四月之第三版，其二為 AAHSTO 之『HPS70W 高性能鋼公路橋梁建造規定』(Guide Specification For Highway Bridge Fabrication With HPS 70W(HPS 485W) Steel)，現階段的版本為 2003 六月第二版。所有鋼橋之設計與施工除遵守 AASHTO(公路)或 AREMA(鐵路)規範之條文外，尚需滿足此兩份外加規定所約束之個別條款。至於鋼構造建築法規針對高性能鋼使用上，則仍未見明文規範之做法。FHWA 之設計者指南，旨在將最新之建造經驗所獲致之結論，以說明但非強制條文方式要求使用者(設計者、建造者及業主)加以考量，AASHTO HPS 70W 規範則相當詳細，以規範解說之方式將主流 HPS(目前為 70W)建造過程中之相關細節及現有技術特點加以闡釋，其內容主要分為：(1)HPS 建造規範適用時機；(2)材料性質說明；(3)銲接規定；(4)建造技術資訊；(5)修復規定；(6)經驗效益考量等六大部分。針對 HPS 70W 之使用，此兩補充規範亦提出詳細之 HPS 70W 建造特別規定(Special Provisions: Fabrication With HPS 70W Steel)以條文式規範材料、施工細節乃至成本估算等因使用 HPS 致基本規範內所可能衍生出之相關條款修訂說明。

四、高性能鋼材實驗

依先前所探討高性能鋼的界定，成為高性能鋼的條件應為：對於強度較高的鋼材是否具有優質的可銲性；是否具備符合耐震規定之基本條件，如低降伏比；厚板須對板厚方向之機械性質有更嚴謹之性質。

考量銲接對鋼材本體的機械性質的影響，應是在高性能鋼定義的前提之下一項可探討研究的課題，因此本計畫擬以高性能鋼材 A992 與結構用鋼 A572 兩種鋼板所組成的箱型斷面，進行銲接對材料性質的影響，其中銲接方法分別採用潛弧銲與 CO₂ 實心銲線銲接兩種。350 mm × 350 mm 的箱型斷面試體乃透過東和鋼鐵公司委託製造，如圖 3 所

示，並於銲接完成後進行鋼板切割，分別依距離銲接區的位置以予編號（編號定義如圖 4 所示），並進行材料拉力實驗，以瞭解鋼材性質受銲接的影響。

4.1 實驗結果與分析

本實驗之試體主要由兩種不同的鋼材與兩種不同的銲接方法所組成，共 4 個鋼箱體。並委託 SGS 台灣檢驗中心將試體裁切與試片加工（如圖 5），每一個鋼箱體分別裁切成 16 片試片，共 64 片拉伸試片，並利用 MTS-UH 500 kN 加載機做鋼材試片拉伸試驗。

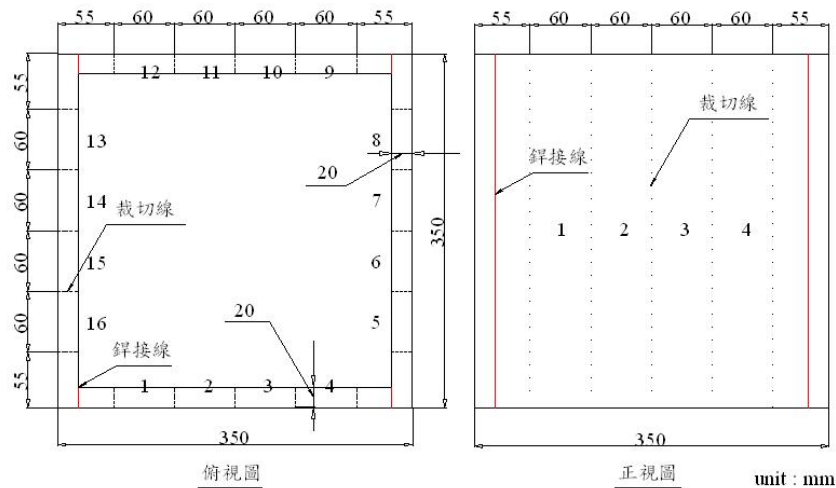


圖 3 箱型鋼斷面規劃圖

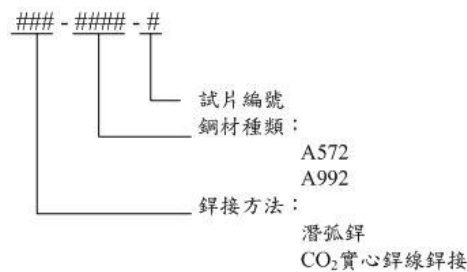


圖 4 試片符號定義

A572 拉伸試片鋼材需符合 ASTM A572/A572M 之相關規定，A572 鋼箱體以潛弧銲接並裁切加工成標準拉伸試片，其試驗的平均降伏強度為 395.4 MPa，平均抗拉強度則為 522.3 MPa，平均試片伸長率約為 28.4%；A572 鋼箱體以 CO₂ 實心銲線銲接製成的拉伸試片，其試驗平均降伏強度為 395.8 MPa，平均抗拉強度為 521.3 MPa，平均試片伸長率約為 28.1%。而 A992 鋼材拉伸試片則需符合 ASTM A992/A922M 之相關規定，A992 鋼受潛弧銲接並裁切加工的試片，其拉伸試驗平均降伏強度為 407.1 MPa，平均抗拉強度則為 527.4 MPa，平均試片伸長率約為 28.6%；A992 鋼箱體以 CO₂ 實心銲線銲接製成的拉伸試片，其試驗平均降伏強度為 409.7 MPa，平均抗拉強度為 524.4 MPa，平均試片伸長率約為 28.2%。

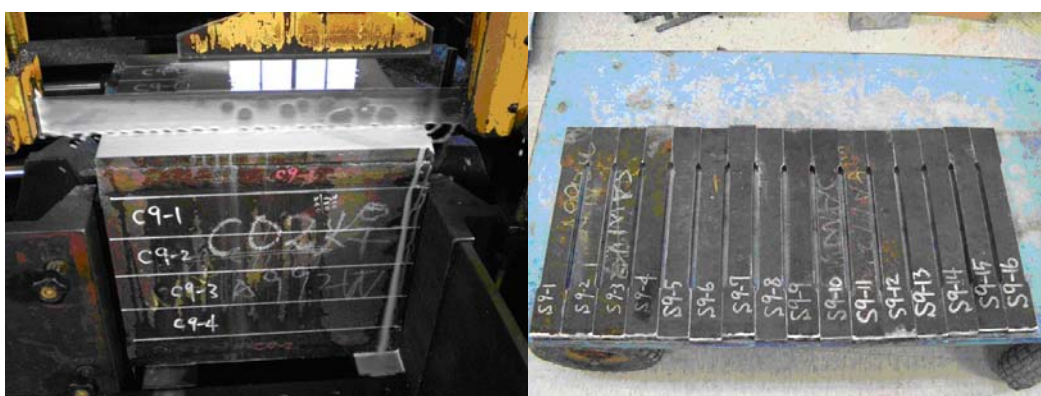


圖 5 鋼材裁切與試片加工

4.2 比較與分析

由圖 3 得知試片接近銲接區的編號為 1、4、5、8、9、12、13 和 16，其餘編號試片較不受銲接影響。為比較鋼材受到銲接後與不同銲接方法是否造成強度之影響，則請參考表 1 與 2。由表 2 得知較接近潛弧銲接區的拉伸試片平均降伏強度為 394.1 MPa，抗拉強度為 522.3 MPa；受 CO₂ 實心銲線銲接試片平均降伏強度為 396 MPa，抗拉強度為 521.5 MPa，其較遠離銲接區試片平均降伏強度分別為 396.6 和 395.6 MPa，抗拉強度分別為 522.3 和 521.1 MPa，由實驗結果可發現 A572 鋼材受銲接與未銲接之強度影響不大，且鋼材受不同銲接方法亦沒有出現相當的差異。

表 2 為 A992 鋼材拉伸試驗比較，從該表中得知較接近潛弧銲接區平均降伏強度為 407 MPa，抗拉強度為 528 MPa；受 CO₂ 實心銲線銲接試片平均降伏強度為 408.8 MPa，抗拉強度為 525.1 MPa。其較遠離銲接區試片平均降伏強度分別為 407.3 和 410.6 MPa，抗拉強度分別為 526.9 和 523.8 MPa。因此發現 A992 鋼材受到銲接所造成的強度影響不大，且鋼材受不同銲接方法也沒有影響。綜合以上兩種鋼材與兩種不同銲接方法的實驗結果與比較，可發現鋼材銲接前與銲接後之強度並沒有太明顯的變化。

表 1 A572 鋼材拉伸試驗比較

試片編號	降伏點 (MPa)	抗拉強度 (MPa)	試片編號	降伏點 (MPa)	抗拉強度 (MPa)
SAW-A572-2	397	520	SAW-A572-1	388	520
SAW-A572-3	400	520	SAW-A572-4	388	521
SAW-A572-6	401	520	SAW-A572-5	402	521
SAW-A572-7	398	522	SAW-A572-8	396	520
SAW-A572-10	394	519	SAW-A572-9	388	520
SAW-A572-11	390	519	SAW-A572-12	388	520
SAW-A572-14	392	528	SAW-A572-13	403	526
SAW-A572-15	401	530	SAW-A572-16	400	530
平均	396.6	522.3	平均	394.1	522.3

CO2-A572-2	395	518	CO2-A572-1	384	518
CO2-A572-3	396	519	CO2-A572-4	394	520
CO2-A572-6	393	519	CO2-A572-5	400	519
CO2-A572-7	394	519	CO2-A572-8	395	520
CO2-A572-10	396	528	CO2-A572-9	401	526
CO2-A572-11	403	527	CO2-A572-12	402	529
CO2-A572-14	392	519	CO2-A572-13	395	518
CO2-A572-15	396	520	CO2-A572-16	397	522
平均	395.6	521.1	平均	396	521.5

表 2 A992 鋼材拉伸試驗比較

試片編號	降伏點 (MPa)	抗拉強度 (MPa)	試片編號	降伏點 (MPa)	抗拉強度 (MPa)
SAW-A992-2	409	527	SAW-A992-1	406	527
SAW-A992-3	403	526	SAW-A992-4	406	529
SAW-A992-6	411	528	SAW-A992-5	408	530
SAW-A992-7	405	528	SAW-A992-8	411	529
SAW-A992-10	404	528	SAW-A992-9	401	527
SAW-A992-11	411	527	SAW-A992-12	406	528
SAW-A992-14	411	526	SAW-A992-13	410	527
SAW-A992-15	404	525	SAW-A992-16	408	527
平均	407.3	526.9	平均	407	528
CO2-A992-2	412	521	CO2-A992-1	410	522
CO2-A992-3	407	520	CO2-A992-4	410	525
CO2-A992-6	411	524	CO2-A992-5	413	526
CO2-A992-7	408	524	CO2-A992-8	410	524
CO2-A992-10	409	525	CO2-A992-9	408	526
CO2-A992-11	409	524	CO2-A992-12	407	526
CO2-A992-14	414	527	CO2-A992-13	403	525
CO2-A992-15	415	525	CO2-A992-16	409	527
平均	410.6	523.8	平均	408.8	525.1

五、結論與建議

由於目前各國如美國、日本與中國大陸在高性能鋼的發展皆較偏向橋梁的應用，也因此高性能鋼規範的制訂上，也大都侷限於橋梁設計與施工方面，有關建築結構上的相關規範隨之較少。美國歷經近十年研究，才由官方提出 HPS 於鋼構造橋梁上之相關補充規定。這些補充規定之形成有賴於 HPS 鋼構材料性質之正確建立以及實際施工經驗之回餽，始能逐步完成。國內相關規範向來與美國規範相關性密切，具平行參考價值，因此，引用美國之相關經驗在時效及推動性上皆有相當之適用性。

本研究在推動上為了取得鋼材上游生產廠商的資訊，並釐清國內鋼材生產廠商對於高性能鋼材的定義，特別造訪了中國鋼鐵公司與東和鋼鐵公司。另外為了瞭解國內鋼結

構專家與學者對於高性能鋼材的定義，與對於本計劃在推動上的建議，亦特別舉行了專家學者座談會，有關訪談紀錄與會議紀錄則參考內政部建築研究所 96 年度委託研究報告(潘吉齡等，2007)。在透過本研究的推動之後可歸納出下列的結論：

- (1) 美國基本上是由官方主導資助學界與產業界合作，研究高性能鋼材用於橋梁建造之各項優點與諸多限制。在正式將高性能鋼全面納入主要法規中明文規範前，採“過渡期逐年修定外加條款”的作法，將學術研究成果與實務技術驗證之新發現，研議成新增之修正規定以“使用者須知”方式，要求相關人員將之套用於使用高性能鋼為建材之橋梁的原始設計中與施工規範上。
- (2) 由於引入安全合宜的耐震考量是國內鋼結構設計上不可或缺的一環，不論未來高性能鋼相關之定義如何演進變化，將“須符合耐震設計”鋼材的要求設定為高性能鋼所應具備的基本條件，似乎是無庸置疑且可獲得共識的論點。
- (3) 以目前國內主要之鋼材供應廠商所擁有的製造技術、市場供需考量與我國地理條件特性而言，國內針對高性能鋼之定義範疇宜針對下列三項特性進行通盤檢討訂定之：(1)較高強度的鋼材是否仍具有優質之可銲性；(2)鋼材是否具備符合耐震規定之基本條件，如窄限降伏範圍與較低的降伏比；(3)鋼材須對板厚方向之機械性質有更嚴謹之性質描述等。
- (4) 日本所生產的 SN490B 與 SN490C 應可納入為高性能鋼的範疇，目前國內『鋼構造建築鋼結構設計技術規範』亦將此系列的產品列入。然而美國所生產的 A992、HPS 50W、HPS 70W，與日本所生產的 NSGH(新型結構用重型 H 型鋼)、橋梁結構用高性能鋼 HT780 是否符合高性能鋼的要求，則需進一步的研究與探討。
- (5) 中鋼所生產的 CSC LYS 100 系列因其低降伏強度之特性，通常用於耐震設計中形成塑性區之理想鋼材。而為了有效控制塑性設計之結構行為，LYS 100 鋼種亦具有窄限降伏範圍與極低降伏比值制式規格的特點。以其具有滿足特定鋼構造行為，且係經由比一般鋼材更精準之規格標準要求達成的方式來看，類似 LYS 100 此種特殊鋼材似乎亦具備被定義為高性能鋼的候選鋼種。
- (6) 如果高強度的特性不需要成為高性能鋼材定義的基本要求之時，高性能鋼材分為高強度高性能鋼與低強度高性能鋼兩類，應是一種可行的定義方法。
- (7) 綜合本研究針對兩種鋼材(A572 與 A992)與兩種不同銲接方法(潛弧銲與 CO₂ 實心銲線銲接)的實驗結果，可發現 A992 高性能鋼材銲接前與銲接後之強度，與結構用鋼 A572 同樣的並沒有出現明顯的變化，因此 A992 高性能鋼材除了有較佳的可銲性外，其在銲接上可能產生之殘留應力亦可以予忽略。

本研究乃為高性能鋼初期之研究，對於下階段高性能鋼所需要進行研討的課題與推動的方向，可參考以下的建議：

- (1) 建議「鋼結構設計規範及解說」規範內之材料章節可增列一節，明訂可定義為高性能鋼之鋼材起碼應具有之制式規格描述有哪些項目，如窄限降伏範圍、低降伏比、良好的可銲性等，解說中可針對美日及國內建造經驗上已成功使用之鋼材，或可將之列於解說之表中。同時，在耐震設計章節中有明訂使用材料之細節，也因此此章節亦需以予修正之。

- (2) 傳統結構用鋼考量殘留應力的影響，在設計時往往將應力以予打折以求保守，而講究嚴管的高性能鋼材於結構設計時，應可較實際的考量鋼材的殘留應力，所以未來可針對高性能鋼材用於結構型鋼或組合型鋼進行殘留應力的相關研究。
- (3) 以往為了達成梁柱接頭能具有 3% 旋轉角，衍生出切削斷面在結構梁上的應用，應用高性能鋼材的梁柱接頭是否可以達成這樣的要求，應可進行實驗研究之。
- (4) 具有良好耐震特性的高性能鋼材，其在相關配合接合材料如鋸材與螺栓等在規範制訂的同時亦需以予明訂，因此相關文獻蒐集與探討，以及相關的結構證實試驗應及早規劃並執行以確認結構性能。

參考文獻

- American Society for Testing and Materials, ASTM (1997) *Selected ASTM standards for structural steel fabrication*, Philadelphia, PA.
- American Association for State Highway and Transportation Officials, AASHTO (1998) *LRFD bridge design specification, 2nd ed.*, Washington, DC.
- American Institute of Steel Construction, AISC (1999) *Seismic provisions for structural steel buildings*, Chicago, IL.
- Azizinamini, A., Barth, K., Dexter, R., Rubeiz, C. (2004) High performance steel: research front – historical account of research activity, *J. Bridge Engineering*, Vol.9, No.3: 212-217.
- Bjorhovde, R. (2004) Development and use of high performance steel, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.60: 393-400.
- Bjorhovde, R., Engestrom, M.F., Griffis, L.G., Kloiber, L.A., Malley, J.O. (2001) Structural steel selection consideration, *American Society of Civil Engineering (ASCE) and American Institute of Steel Construction (AISC)*, Reston, VA and Chicago, IL.
- SAC Joint Venture (2002a) State of the art report on base metals and fracture, *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*, Report No. FEMA-355A, Washington, DC.
- SAC Joint Venture (2002b) State of the art report on connection performance, *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*, Report No. FEMA-355D, Washington, DC.
- Myint, M.L. (2002), High performance steel designers' guild, 2nd edition, *American Institute of Steel Construction (AISC)*, Western Conshohocken, IL.
- Yang, Weiping (2005) Exploitation of High Performance Steel in the U.S., *Steel Construction*, Vol.20, No.80.
- 李志明 (2004) 〈鋼結構發展對高性能鋼材的需求〉《Advanced Materials Industry》, Total No. 131。
- 潘吉齡, 林新華, 余志鵬, 林政億 (2007) 〈高性能鋼材應用於建築結構之研究〉, 內政部建築研究所委託研究報告, PG9603-0239。