

國立交通大學
土木工程學系碩士班
碩士論文

鋁結構容許應力設計規範之研究

A Study of Specification for Aluminum Structures

—Allowable Stress Design

研究生：朱致潔

指導教授：陳誠直博士

中華民國九十九年七月

鋁結構容許應力設計規範之研究

A Study of Specification for Aluminum Structures

—Allowable Stress Design

研究生：朱致潔

Student : Chih-Chieh Chu

指導教授：陳誠直博士

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen

國立交通大學
土木工程學系碩士班

碩士論文



A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Civil Engineering

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

鋁結構容許應力設計規範之研究

研究生：朱致潔

指導教授：陳誠直 博士

國立交通大學土木工程學系碩士班

摘要

鋁合金之應用於土木建築結構，國外已有完整之設計規範，且已有設計例，然而國內對於鋁結構之研究甚為缺乏且尚無鋁結構之設計規範。本研究目的為探討鋁結構容許應力設計法規範。首先回顧國外鋁結構設計規範，進而探討美國鋁結構容許應力設計法規範之設計方法，包括受拉構材、受壓構材、撓曲構材、受軸力與彎矩共同作用之梁柱構材、以及接合設計等，並與國內鋼結構容許應力設計法規範比較其差異性。研究結果顯示，鋁結構容許應力設計法規範之設計原理與鋼結構甚為相同，惟因鋁結構材料性質與斷面特性而於部分設計規範上有其特別考量。未來國內研擬鋁結構設計規範時，可參考美國鋁結構設計規範之設計架構。

關鍵詞：鋁合金、鋁結構、容許應力設計法

A Study of Specification for Aluminum Structures

—Allowable Stress Design

Student : Chih-Chieh Chu

Adviser : Dr. Cheng-Chih Chen

Department of Civil Engineering

National Chiao-Tung University

ABSTRACT

Foreign countries have complete design specifications and design cases for the application of aluminum alloy in civil and architectural structures. However, the research for aluminum structures in Taiwan is very few and currently there is no design specification for aluminum structures. This study aims to investigate the specification of allowable stress design for aluminum structures. The design specifications of foreign countries were first reviewed and the design philosophy of the allowable stress design for aluminum structures used in the United States was further studied, including tension members, compression members, flexural members, members subject to bending and axial force, and joints design. A comparison of the design specification of aluminum structures and steel structures in Taiwan was made to identify the discrepancy. The results indicate that the design philosophy of the aluminum structures is very similar to that of the steel structures, except in part of the design specification due to the characteristic of the aluminum properties and cross sections. The aluminum design specification used in the United

States can be referred to for the aluminum design specification development in Taiwan in the future.

Keywords: aluminum alloy, aluminum structure, allowable stress design



誌謝

本論文承蒙恩師 陳誠直博士之悉心指導，於研究過程中，對於研究方向之掌握與論文寫作技巧之指導，給予學生直接且正確之指引，並訓練學生獨立思考及解決問題的能力，使我受益良多，在此致上由衷的敬意與謝忱。

文稿初成，承蒙交通大學 鄭復平教授與黃炯憲教授，於百忙之中撥冗指正，並提供諸多寶貴意見，使得論文之內容更為充實完善，特別在此致上最誠摯之謝意。

在論文完成期間，特別感謝學長南交、政億、煒銘、俞燐、璿至、學姊嘉儀的提點與建議；同學孟輝、岳勳的鼓勵與協助；學弟錦輝、顯嘉、學妹霈琳的支持。

同時，感謝好友羽青、羽珊於研究所求學期間的勉勵與打氣，謝謝妳們給予我極大的協助與支持，有妳們的陪伴使我感到無比的溫暖，感謝妳們這些年來的相挺，一路走來有妳們真好；感謝男友裕傑於論文撰寫期間給予我莫大的支持、鼓勵以及無私的付出，每當我喪失信心之際，使我充滿活力面對困難，讓我能堅持到最後，順利完成論文；感謝家人全力的支持、包容以及無限的關懷疼愛，謝謝你們總是給我最大的體諒，讓我能毫無顧慮的完成學業，在此獻上我最衷心的感激。

國立交通大學土木工程學系碩士班

朱致潔 謹誌於交大工程二館 2010 年 7 月

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	ii
誌謝.....	iv
目錄.....	v
表目錄.....	viii
圖目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究目的.....	4
1.3 研究方法.....	4
1.4 論文內容.....	5
第二章 鋁合金材料.....	6
2.1 鋁合金材料特性簡介.....	6
2.2 鋁合金之分類.....	7
2.3 鋁合金之應力－應變行為.....	14
第三章 鋁結構設計規範.....	16
3.1 美國鋁結構設計規範.....	16
3.2 歐洲鋁結構設計規範.....	18

3.3	澳洲紐西蘭鋁結構設計規範.....	18
第四章	鋁結構構材設計規範.....	19
4.1	受拉構材	19
4.1.1	鋁結構受拉構材.....	19
4.1.2	鋁結構與鋼結構受拉構材設計規範之比較	23
4.1.3	鋁結構受拉構材之計算例.....	24
4.2	受壓構材	26
4.2.1	鋁結構受壓構材.....	26
4.2.2	鋁結構與鋼結構受壓構材設計規範之比較	34
4.2.3	鋁結構受壓構材之計算例.....	37
4.3	撓曲構材	42
4.3.1	鋁結構撓曲構材.....	43
4.3.2	鋁結構與鋼結構撓曲構材設計規範之比較	51
4.3.3	鋁結構撓曲構材之計算例.....	53
4.4	受軸力與彎矩共同作用之構材	60
4.4.1	鋁結構受軸力與彎矩共同作用之構材	60
4.4.2	鋁結構與鋼結構受軸力與彎矩共同作用構材設計規範 之比較.....	63
4.4.3	鋁結構受軸力與彎矩共同作用構材之計算例	65

4.5	接合設計	70
4.5.1	鋁結構接合設計	70
4.5.2	鋁結構與鋼結構接合設計規範之比較	85
第五章	結論與建議	87
5.1	結論	87
5.2	建議	88
	符號說明	89
	參考文獻	95



表目錄

表 2.1 鋁合金與鋼主要性質之比較(Mazzolani 1995).....	6
表 2.2 鋁合金之鍛造用合金分類	8
表 2.3 鋁合金之鑄造用合金分類	8
表 2.4 鋁合金鍊度符號定義表(taiwell.com.tw).....	12
表 4.1 安全係數(AA 2005).....	20
表 4.2 係數 k_t (AA 2005).....	20
表 4.3 鋁合金之機械性質表(AA 2005).....	21
表 4.3 鋁合金之機械性質表(AA 2005) (續).....	22
表 4.4 鋁結構與鋼結構受拉構材設計規範之比較	23
表 4.5 鍊度符號編號為 O、H、T1、T2、T3、T4 之挫屈常數表(AA 2005)	29
表 4.6 鍊度符號編號為 T5、T6、T7、T8、T9 之挫屈常數表(AA 2005)	29
表 4.7 鋁結構柱構件肢材局部挫屈之容許應力(AA 2005).....	32
表 4.8 鋁結構柱構件肢材彈性局部挫屈應力(AA 2005).....	33
表 4.9 鋁結構與鋼結構受壓構材設計規範之比較	36
表 4.10 鋁結構梁構件容許撓曲拉應力(AA 2005).....	43
表 4.11 鋁結構梁構件整體側向挫屈之容許應力(AA 2005).....	46
表 4.12 鋁結構梁構件肢材局部挫屈之容許應力(AA 2005).....	47

表 4.13 鋁結構梁構件剪力之容許應力(AA 2005).....	50
表 4.14 鋁結構與鋼結構受軸力與彎矩共同作用構材設計規範之比較	64
表 4.15 鉚釘之設計應力(ksi)(AA 2005)	71
表 4.15 鉚釘之設計應力(MPa)(AA 2005) (續).....	71
表 4.16 螺栓之設計應力(ksi)(AA 2005)	73
表 4.16 螺栓之設計應力(MPa)(AA 2005) (續).....	73
表 4.17 銲接鋁合金之機械性質(ksi)(AA 2005)	78
表 4.17 銲接鋁合金之機械性質(MPa)(AA 2005) (續).....	79
表 4.18 各銲材之強度表(ksi)(AA 2005)	80
表 4.18 各銲材之強度表(MPa)(AA 2005) (續).....	80



圖目錄

圖 1.1 Arvida 鋁合金橋梁(Das and Kaufman 2007).....	2
圖 1.2 “Spruce Goose”圓頂空間結構(Mazzolani 2006).....	2
圖 1.3 “Spruce Goose”圓頂空間結構(theaviatorhh.com).....	3
圖 1.4 Hatogrande 俱樂部游泳池(Valencia 2001).....	3
圖 2.1 (a)結構鋼之應力－應變圖；(b)應力－應變放大圖(Logan 1991)	14
圖 2.2 鋁合金之典型應力－應變圖(Logan 1991)	15
圖 3.1 載重與強度分佈圖(AA 2005).....	17
圖 4.1 受拉構材例(Kissell 2002).....	24
圖 4.2 鋁結構受壓構材三種階段之容許壓應力示意圖	27
圖 4.3 鋼柱挫屈強度示意圖(McCormac 1992).....	34
圖 4.4 鋁合金標準型材 I 12×11.7.....	37
圖 4.5 梁斷面上之受力示意圖(陳生金 2001).....	42
圖 4.6 簡支梁受中點之集中載重	53
圖 4.7 鋁合金標準型材 I 5×3.7.....	53
圖 4.8 梁柱構材例	65
圖 4.9 鋁結構銲接方法(Mazzolani 1995).....	75
圖 4.10 開槽銲示意圖(AA 2005).....	76

圖 4.11 填角銲有效銲喉之示意圖(AA 2005).....81

圖 4.12 塞槽銲之平面示意圖(AA 2005).....82



第一章 緒論

1.1 前言

鋁合金材料因其具有輕質、可塑性好、耐腐蝕、耐久性好、施工方便、易於維護等特點，因此廣泛的被應用與發展；雖然鋁合金之彈性模數相對鋼材為低，使用於結構上之鋁合金結構(Aluminum alloy structures)易受變形控制，亦造成一定程度的影響其應用之範圍，但是鋁合金結構擁有良好的延展以及消能性質，因此實需探討研究。

就土木工程領域而言，鋁合金結構在國外較先進之國家，如美國、歐洲、澳洲等皆有完整之設計規範，以確保工程品質，大部份應用於橋樑及橋面板，包括人行橋、鐵路橋、公路橋，世界上第一座全鋁合金鐵路橋建造於西元 1946 年美國紐約附近的格拉斯河上，跨度為 30.48 m (Arrien et al. 2001)。

西元 1950 年，在加拿大魁北克省 Arvida 的 Saguenay 河上則建造了世界上第一座全鋁合金高速公路橋，總長為 150 m 之拱橋，主跨徑為 88 m，總重為 200,000 kg，全部結構由 2014-T6 鋁合金製成(Das and Kaufman 2007)，如圖 1.1 所示。

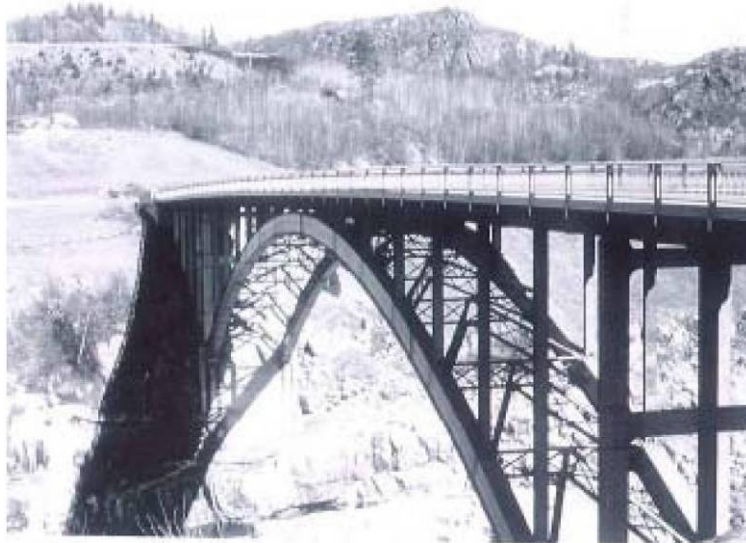


圖 1.1 Arvida 鋁合金橋梁(Das and Kaufman 2007)

同時，鋁合金也應用於空間結構與屋頂結構，其中最典型的是 1983 年在美國加州的長海灘，用於保存著名的“Spruce Goose”水上飛機所建造的網殼空間結構，圓頂直徑為 445 ft，也是世界上最大的鋁合金機庫(Mazzolani 2006)，如圖 1.2 與 1.3 所示。



圖 1.2 “Spruce Goose”圓頂空間結構(Mazzolani 2006)



圖 1.3 “Spruce Goose”圓頂空間結構(theaviatorhh.com)

1994 年在哥倫比亞 Bogota 建造的 Hatogrande 俱樂部游泳池，則使用鋁合金管組成跨度為 30 m 的屋頂結構，且管與管間是採用螺栓連接(Valencia 2001)，如圖 1.4。除上述較典型的實例以外，國外類似的結構尚有很多，由此可見國外將鋁合金應用於土木工程之領域已有將近 70 年的歷史，且有較多相關研究成果，故發展也較成熟。



圖 1.4 Hatogrande 俱樂部游泳池(Valencia 2001)

目前國內鋁合金材料較多使用於門窗及邊框等需求上，但在結構方面的應用尚處於起步階段，工程經驗及相關研究甚為缺乏，問題來源除了設計者未能深入瞭解鋁結構之力學特性等外，最重要的因素在於國內尚無指導之鋁合金結構設計規範，故本研究預期提供未來研擬國內鋁結構設計規範時之方向與建議。

1.2 研究目的

目前國內對於鋁結構相關研究甚為缺乏，為了使設計者了解鋁結構設計方法，故本研究目的將深入探討美國鋁結構容許應力設計法規範，範圍包括受拉構材、受壓構材、撓曲構材、受軸力與彎矩共同作用之構材、接合設計等，以提供日後國內擬定鋁結構設計規範之參考依據。

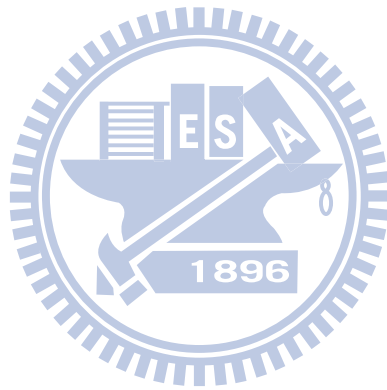


1.3 研究方法

為更切確了解國外鋁合金結構之使用，首先蒐集國外鋁合金結構設計規範並瞭解其設計方法。本研究主要將深入了解美國鋁結構設計規範，針對鋁結構構件之設計方法進行探討，並與國內鋼結構設計方法比較差異性。

1.4 論文內容

本論文主要內容如下。第一章說明本研究之目的與研究方法。第二章為介紹鋁合金材料，第三章介紹國外鋁結構設計規範，第四章說明美國鋁結構容許應力設計法規範，並與國內鋼結構設計規範討論比較其差異性。最後第五章則為本研究之結論。



第二章 鋁合金材料

2.1 鋁合金材料特性簡介

鋁合金為銀白色金屬，其優點為重量輕、可塑性良好、富延展性、耐久性佳、無磁性、無毒、不易燃、便於施工等，密度為 $2,700 \text{ kg/m}^3$ ，約為鋼材密度的三分之一。就化學性質而言，由於鋁合金的表面會形成一層保護性的氧化膜，可防止進一步的氧化，因此有較佳之耐蝕性。與鋼材相比鋁合金最大的優點為鋁合金可採用擠壓成型，利用擠壓成型之技術可生產各種管、棒、線等型材。鋁合金經回收後仍可重新使用，故消耗性低。鋁合金與鋼主要性質比較如表 2.1。

表 2.1 鋁合金與鋼主要性質之比較(Mazzolani 1995)

	Aluminium	Steel	Stainless steel
Average weight density (kg m^{-3})	2700	7850	7900
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	658	1450-1530	1450
Linear thermal expansion coefficient ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	24×10^{-6}	12×10^{-6}	17.3×10^{-6}
Specific heat (cal g^{-1})	0.255	0.12	0.12
Thermal conductivity ($\text{cal cm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{^{\circ}C}^{-1}$)	0.52	0.062	0.035
Electrical resistivity ($\mu\Omega \text{ cm}$)	2.84	15.5	70
Young's modulus (N mm^{-2})	68 500	206 000	206 000

於結構工程上，若使用鋁合金作為橋樑的上部結構，如此一來不僅可降低結構物之靜載重，並且對於工期之進度亦可大幅提升。此外，鋁合金具有優良耐蝕性，因此較一般建築使用之鋼筋混凝土結構或鋼結構可抵禦因氯離子、氣候所延伸之問題，選擇使用鋁合金則可大大改善此問題，並可確保結構之耐久性；鋁合金在低溫之狀態下，材質相較一般碳鋼為穩定，不會因長時間處於低溫而產生脆性問題，隨著溫度降低其強度反而增加。

相反的，鋁合金之彈性模數約為 70 GPa，僅為鋼的三分之一，因此使用於結構上的鋁合金結構所產生變形的問題，往往成為設計中的控制因素，其次，鋁合金之熱膨脹係數約為 $0.000023/^\circ\text{C}$ ，是鋼材之兩倍，因此鋁結構對溫度之敏感度較鋼結構高許多，於設計上必須加以重視。

2.2 鋁合金之分類

為了提高鋁合金延展性、耐腐蝕性等性能，因此在生產的過程會添加其他合金元素如鎂、矽、鋅、銅、錳等，藉由添加元素之不同所得到的性能也不同，主要可分為鍛造用合金(板、擠製型材)與鑄造用合金(砂模鑄件、金屬模鑄件、壓鑄件)兩大類，按主要合金成份可分類如表 2.2 與表 2.3。

表 2.2 鋁合金之鍛造用合金分類

	鋁合金系	鋁合金編號
非熱處理合金	純鋁	1xxx
	Al-Mn 系合金	3xxx
	Al-Si 系合金	4xxx
	Al-Mg 系合金	5xxx
	Al-Cu 系合金	2xxx
熱處理合金	Al-Mg-Si 系合金	6xxx
	Al-Zn-Mg 系合金	7xxx

表 2.3 鋁合金之鑄造用合金分類

非熱處理合金	鋁合金系
	純鋁
	Al-Si 系合金
	Al-Mg 系合金
熱處理合金	Al-Cu-Mg-Si 系合金
	Al-Mg-Si 系合金

美國鋁業協會(Aluminum Association of America)、日本工業規格(Japanese Industrial Standards)等依照國際鋁合金命名法，以四位數表示各種鍛造用鋁合金，各數值所代表的鋁合金系如下：

1xxx 純度 99% 以上的純鋁

2xxx Al-Cu 系合金

3xxx Al-Mn 系合金

4xxx Al-Si 系合金

5xxx Al-Mg 系合金

6xxx Al-Mg-Si 系合金

7xxx Al-Zn-Mg 系合金

8xxx 含有其他元素的鋁合金

9xxx 備用的編號

第一位數表示主要添加合金元素，第二位數表示原合金中主要添加合金元素之含量，或成分含量經修改的合金，數字 0 為原合金，數字 1 為原合金經第一次修改，數字 2 為原合金經第二次修改，第三及第四位數表示個別合金之代號。鋁合金各系合金之特性與適用範圍，分別介紹如下：

1xxx 純度 99% 以上的純鋁

純鋁之加工性、熱傳導性、導電性、耐蝕性佳，但因強度不足，故不適用於結構用材，一般使用於配電用材、化工設備等。

2xxx Al-Cu 系合金

此系合金以杜拉鋁(duraluminium)為代表，其切削性佳、強度高、惟耐蝕及焊接性差，主要使用於飛機、汽機車油壓零件等。

3xxx Al-Mn 系合金

在純鋁中添加 2% 之 Mn 可增加其強度與耐蝕性，此類合金易於加工與熔接，在工業上常用作耐蝕性材料。



4xxx Al-Si 系合金

鋁藉由添加 Si 來提高耐熱性，並增加耐磨耗性，一般使用於活塞構件、汽缸蓋等。

5xxx Al-Mg 系合金

含 Mg 0.3~5%，屬於中強度合金且耐蝕、熔接性良好，使用於裝飾、容器等用途。

6xxx Al-Mg-Si 系合金

此系合金即具有良好的強度與耐蝕性，被視為鋁合金中具代表性的結構用材，一般較常使用 6061 及 6063 兩種合金，易於加工與焊接，適用鍛造複雜形狀之零件，一般供建築、運輸設備、及需焊接之結構使用。

7xxx Al-Zn-Mg 系合金

含 Zn 3~8%及少量的 Mg，經熱處理後強度甚高，且具有優良之可熔接性，最大優點是此類合金析出硬化效果對冷卻速率之敏感性不高，亦即焊接後硬度隨著時間而增高，惟耐蝕性差，常使用於飛機結構用材等。

8xxx 系合金

其他不屬上述各系之鋁合金均列入此系，用途較少。

此外，若添加合金元素仍不足於完全符合所需要的強度及性能，尚需藉由冷加工、淬水、時效處理及軟燒等處理，因此依照合金冶煉之階段，使用數字與字母組合加以分類，鍊度符號的表示方式如表 2.4。以 6061-T6 為例，6061 表示 Al-Mg-Si 系合金，T6 即為熱處理階段之固溶化處理與人工時效，T6 處理通常表示最佳強度與延性之組合。

表 2.4 鋁合金鍊度符號定義表(taiwell.com.tw)

鍊度符號	定 義
F	製造後未經任何處理之材質
O	軟燒鍊度，完全再結晶而且最軟狀態
W	淬火處理後自然時效進行中之材質，適用於要長時間自然時效之合金
H	<p>加工硬化的鍊度</p> <p>H1n：施以冷加工而加工硬化者</p> <p>H2n：經加工硬化後再施以適度的軟燒處理</p> <p>H3n：經加工硬化後再施以安定化處理</p> <p>n 以 1~9 的數字表示加工硬化的程度</p> <p>n=2：表示 1/4 硬質</p> <p>n=4：表示 1/2 硬質</p> <p>n=6：表示 3/4 硬質</p> <p>n=8：表示硬質</p> <p>n=9：表示超硬質</p>
T	<p>T1：高溫加工冷卻後自然時效 擠型從熱加工後急速冷卻，再經常溫十效硬化處理。亦可施以不影響強度的矯正加工，這種調質適合於熱加工後冷卻便有淬水效果的合金如：6063。</p> <p>T3：溶體化處理後經冷加工的目的在提高強度、平整度及尺寸精度。</p> <p>T36：T3 經 6% 冷加工者</p> <p>T361：冷加工度較 T3 大者</p> <p>T4：溶體化處理後經自然時效處理</p> <p>T5：熱加工後急冷再施以人工時效處理 人工時效處理的目的在提高材料的機械性質及</p>

	<p>尺寸的安定性，適用於熱加工冷卻便有淬水效果的合金如：6063。</p> <p>T6 : 溶體化處理後施以人工時效處理 此為熱處理合金代表性的熱處理，無須施以冷加工便能獲得優越的強度。於溶體化處理後為提高尺寸精度或矯正而施以冷加工，如不保證更高的強度時，亦可當作是 T6 鍊度。</p> <p>T61 : 溶體化處理後施以溫水淬水再經人工時效處理，溫水淬水的目的在防止發生變形。</p> <p>T7 : 溶體化處理後施以安定化處理(人工時效處理的溫度或時間較 T6 處理高或長)。其目的在改善耐硬力腐蝕裂及防止淬水時發生變形。</p> <p>T7352 : 溶體化處理後除去殘餘應力再施以過時效處理(人工時效處理的溫度或時間較 T6 處理長)。目的在改善耐硬力腐蝕裂。於溶體化處理後施以 1~5% 永久變形的壓縮加工，以消除殘餘應力。</p> <p>T8 : 溶體化處理後施以冷加工再施以人工時效處理，冷加工時斷面減少率為 3% 及 6% 各為 T83 及 T86。</p> <p>T9 : 溶體化處理後人工時效處理，最後施以冷加工，最後冷加工的目的在增加強度。</p>
--	---

2.3 鋁合金之應力－應變行為

根據拉伸或壓縮試驗可知材料應力－應變關係，就一般結構常使用的鋼材而言，彈性行為與塑性行為之轉換可清楚定義，如圖 2.1。圖中 O 點至 A 點，此一區域應力與應變成正比關係，稱之為線彈性；當應力持續增加至不再增加時，應變則繼續產生變形之應力值，稱之為降伏應力 σ_y (即圖 2.1 中 B 點)，此時所產生的變形稱為塑性變形，典型的結構用鋼之降伏應力範圍從 30 至 100 ksi (200 至 700 MPa)。圖 2.1(b) 從 C 到 D 之區域稱為降伏平台，亦為完全塑性區。

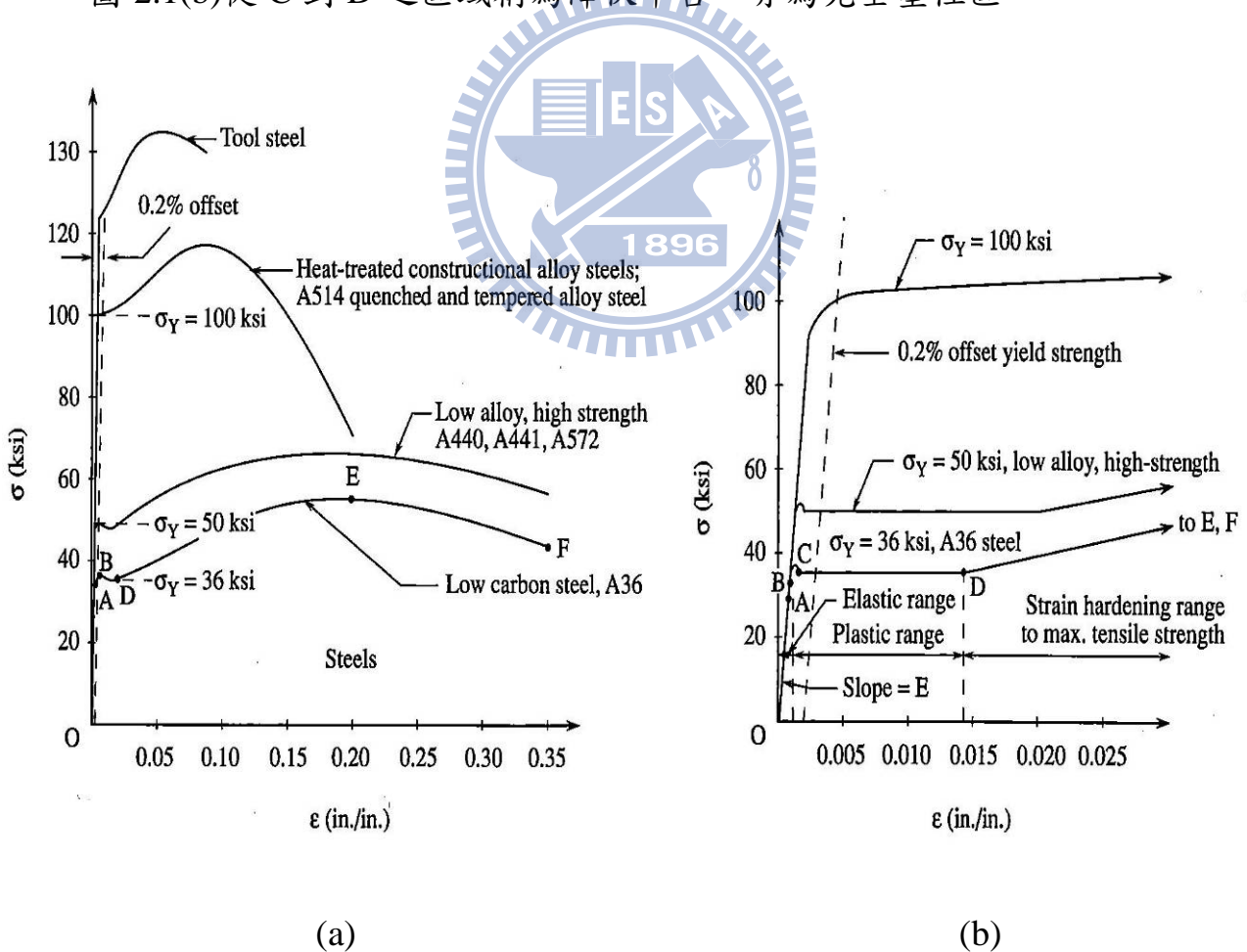


圖 2.1 (a) 結構鋼之應力－應變圖；(b) 應力－應變放大圖 (Logan 1991)

鋁合金屬於延性材料，其優點為可吸收衝擊或能量，故在破裂前可承受相當大的應變，亦即材料外觀會出現相當明顯之變形。鋁合金應力－應變關係如圖 2.2。當鋁合金材料超過彈性極限，則進入塑性行為，因此鋁合金材料並無明顯降伏點，故亦無降伏平台，但仍有線性區至非線性區逐漸變換之存在。因此定義鋁合金之降伏強度的標準作法即利用所謂的偏距法(offset method)，如圖 2.3 所示。在應力－應變圖上以應變軸上 0.002 (或 0.2%) 為基準，畫一直線與曲線線性部分平行，此偏距線與應力－應變曲線之交點(如圖 2.3 中 A 點)，即定出降伏應力 σ_y 。使用於結構上的鋁合金，其線性範圍為 10 至 60 ksi (70 至 410 MPa)，極限應力範圍為 20 至 80 ksi (140 至 550 MPa)。

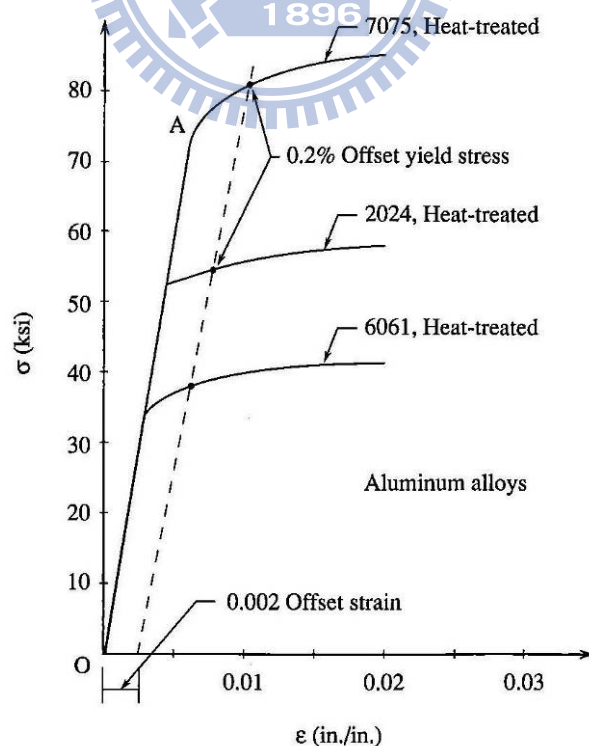


圖 2.2 鋁合金之典型應力－應變圖(Logan 1991)

第三章 鋁結構設計規範

國外鋁結構設計規範主要有美國鋁協會(Aluminum Association)之設計規範、歐洲標準委員會(European Committee For Standardization)所制定的鋁結構設計規範(Eurocode 9)、以及澳洲紐西蘭鋁結構設計規範(Australian/New Zealand Standard)等。

3.1 美國鋁結構設計規範

就結構設計而言，必須考慮安全性、使用性、經濟性等因素，其中最重要的即為安全性。目前美國鋁結構設計規範採用之方法分為容許應力法與載重與強度係數法，分述如下：

(一)容許應力法

此法又稱為工作應力設計法，乃為使用折減材料之強度作為設計理念之方法。由於容許應力法局限在彈性範圍內，因此容許應力可為降伏應力與安全係數之比值，隨各種構材之安全考量，選擇適當之安全係數。美國鋁結構容許應力設計規範將不同情況所需之安全係數，分為 n_y 、 n_u 與 n_a ，其分別之意義為降伏狀態之安全係數、極限狀態之安全係數以及發生面外變形之安全係數。

(二)載重與強度係數設計法

此法乃以可靠度為理論基礎之設計方法。實際上強度與載重並非定值，其為一分佈曲線，如圖 3.1 所示，故此法係依材料強度之變異性與載重之變異性，作為決定強度折減係數與載重係數之依據，使結構達到預期之安全性。如下式說明：

$$\phi R \geq \sum \gamma Q \quad (3-1)$$

其中 ϕ 為強度折減係數，其值須小於 1； R 為標稱強度； γ 為載重放大係數，其值須大於 1； Q 則為標稱載重，其中 ϕ 與 γ 皆以可靠度分析所決定。由於此法以載重與強度兩方面來考量安全性，故所得之設計更為合理且具經濟性。

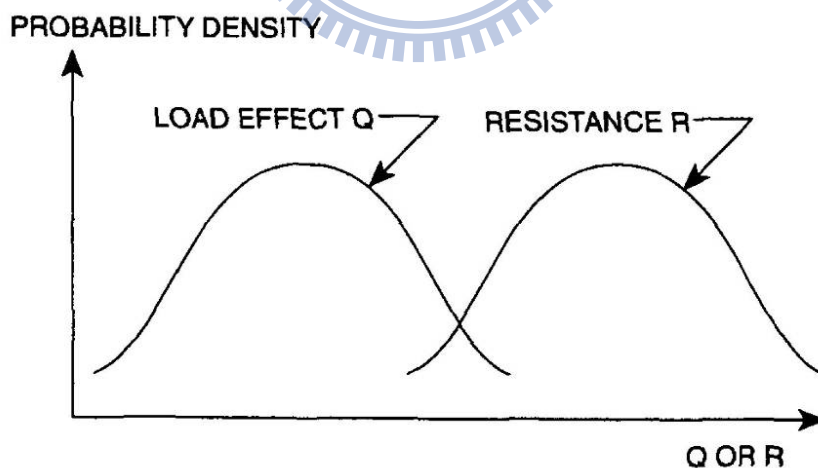


圖 3.1 載重與強度分佈圖(AA 2005)

3.2 歐洲鋁結構設計規範

早在 20 世紀 70 年代，歐洲已出版了歐洲鋁合金建議，到了 1998 年已有完整之歐洲鋁結構設計規範(Eurocode 9)。其設計方法並無明確區分容許應力法與極限設計法，但其設計方法較偏於載重與強度係數設計法。此外，歐洲鋁結構設計規範除了一般結構設計外，尚包括結構防火設計、結構疲勞設計以及薄殼設計等。歐洲鋁結構設計規範亦是國外鋁結構設計主要參考之一。

3.3 澳洲紐西蘭鋁結構設計規範

澳洲紐西蘭鋁結構設計規範，包括容許應力設計法與載重與強度係數設計法，其設計規範係參考美國鋁結構設計規範所制定，故設計邏輯幾乎與美國鋁結構設計規範相同。

第四章 鋁結構構材設計規範

本章將針對美國鋁結構設計規範之設計方法進行了解，探討受拉構材、受壓構材，撓曲構材、受軸力與彎矩共同作用之構材、接合設計等之設計規範，並與國內鋼結構規範比較探討其差異性，本章並以表列方式闡述美國鋁結構規範設計方法及其與國內鋼結構規範之差異性。

4.1 受拉構材

基本上，拉力構材屬於結構中較為單純之構材。就設計而言，一般假設拉應力均勻分佈在構材之斷面上，當其達到降伏應力時可視為彈性極限，設計上須同時考慮降伏與斷裂兩種極限狀態。

4.1.1 鋁結構受拉構材

美國鋁結構設計規範中，針對受拉構材之設計考量全斷面降伏以及淨斷面斷裂。全斷面降伏之設計容許應力不得大於 F_y/n_y ；淨斷面斷裂之容許應力不得大於 $F_{tu}/(k_t n_u)$ ，其中 n_y 為降伏狀態之安全係數， n_u 為極限狀態之安全係數， k_t 表示受拉構材之係數，依據不同結構型式，分類如表 4.1 與 4.2。此外，鋁合金之機械性質可參考表 4.3。

為了安全起見，構件設計或分析時會使用安全係數計算容許應力，以限制作用於構件之載重小於所能承受之載重，故安全係數即為

破壞載重與容許載重之比值，且值均需大於 1。美國鋁結構規範規定建築結構計算容許拉應力， n_y 、 n_u 分別取 1.65 與 1.95；若為橋樑結構， n_y 、 n_u 則分別取 1.85 與 2.2。由於鋁合金降伏強度之變異性較極限強度為低，且降伏破壞之預警性也較極限破壞之預警性佳，故降伏強度之安全係數較極限強度為低。

表 4.1 安全係數(AA 2005)

	Building and similar type structures	Bridge and similar type structures
n_u	1.95	2.20
n_y	1.65	1.85
n_a	1.20	1.35

表 4.2 係數 k_t (AA 2005)

Alloy and Temper	Non-welded or Regions Farther than 1.0 in. (25 mm) from a Weld	Regions Within 1.0 in. (25 mm) of a Weld
2014-T6, -T651, -T6510, -T6511 Alclad 2014-T6, -T651	1.25	—
6066-T6, -T6510, -T6511	1.1	—
6070-T6, -T62	1.1	—
All Others Listed in Table 3.3-1	1.0	1.0

表 4.3 鋁合金之機械性質表(AA 2005)

ALLOY AND TEMPER	PRODUCT	THICKNESS RANGE in.	F_u ksi	F_{ty} ksi	F_{cy} ksi	F_{su} ksi	COMPRESSIVE MODULUS OF ELASTICITY ² E (ksi)
1100-H12	(Sheet, Plate, Drawn Tube,)	All	14	11	10	9	10,100
-H14	Rolled Rod & Bar	All	16	14	13	10	10,100
2014-T6	Sheet	0.040 to 0.249	66	58	59	40	10,900
-T651	Plate	0.250 to 2.000	67	59	58	40	10,900
-T6, T6510, T6511	Extrusions	All	60	53	52	35	10,900
-T6, T651	Cold Finished Rod & Bar, Drawn Tube	All	65	55	53	38	10,900
Alclad							
2014-T6	Sheet	0.025 to 0.039	63	55	56	38	10,800
-T6	Sheet	0.040 to 0.249	64	57	58	39	10,800
-T651	Plate	0.250 to 0.499	64	57	56	39	10,800
3003-H12	Sheet & Plate	0.017 to 2.000	17	12	10	11	10,100
-H14	Sheet & Plate	0.009 to 1.000	20	17	14	12	10,100
-H16	Sheet	0.006 to 0.162	24	21	18	14	10,100
-H18	Sheet	0.006 to 0.128	27	24	20	15	10,100
-H12	Drawn Tube	All	17	12	11	11	10,100
-H14	Drawn Tube	All	20	17	16	12	10,100
-H16	Drawn Tube	All	24	21	19	14	10,100
-H18	Drawn Tube	All	27	24	21	15	10,100
Alclad							
3003-H12	Sheet & Plate	0.017 to 2.000	16	11	9	10	10,100
-H14	Sheet & Plate	0.009 to 1.000	19	16	13	12	10,100
-H16	Sheet	0.006 to 0.162	23	20	17	14	10,100
-H18	Sheet	0.006 to 0.128	26	23	19	15	10,100
-H14	Drawn Tube	0.025 to 0.259	19	16	15	12	10,100
-H18	Drawn Tube	0.010 to 0.500	26	23	20	15	10,100
3004-H32	Sheet & Plate	0.017 to 2.000	28	21	18	17	10,100
-H34	Sheet & Plate	0.009 to 1.000	32	25	22	19	10,100
-H36	Sheet	0.006 to 0.162	35	28	25	20	10,100
-H38	Sheet	0.006 to 0.128	38	31	29	21	10,100
-H34	Drawn Tube	0.018 to 0.450	32	25	24	19	10,100
-H36	Drawn Tube	0.018 to 0.450	35	28	27	20	10,100
Alclad							
3004-H32	Sheet	0.017 to 0.249	27	20	17	16	10,100
-H34	Sheet	0.009 to 0.249	31	24	21	18	10,100
-H36	Sheet	0.006 to 0.162	34	27	24	19	10,100
-H38	Sheet	0.006 to 0.128	37	30	28	21	10,100
-H131, H241, H341	Sheet	0.024 to 0.050	31	26	22	18	10,100
-H151, H261, H361	Sheet	0.024 to 0.050	34	30	28	19	10,100
3005-H25	Sheet	0.013 to 0.050	26	22	20	15	10,100
-H28	Sheet	0.006 to 0.080	31	27	25	17	10,100
3105-H25	Sheet	0.013 to 0.080	23	19	17	14	10,100
5005-H12	Sheet & Plate	0.017 to 2.000	18	14	13	11	10,100
-H14	Sheet & Plate	0.009 to 1.000	21	17	15	12	10,100
-H16	Sheet	0.006 to 0.162	24	20	18	14	10,100
-H32	Sheet & Plate	0.017 to 2.000	17	12	11	11	10,100
-H34	Sheet & Plate	0.009 to 1.000	20	15	14	12	10,100
-H36	Sheet	0.006 to 0.162	23	18	16	13	10,100
5050-H32	Sheet	0.017 to 2.000	22	16	14	14	10,100
-H34	Sheet	0.009 to 0.249	25	20	18	15	10,100
-H32	Cold Fin. Rod & Bar Drawn Tube	All	22	16	15	13	10,100
-H34	Cold Fin. Rod & Bar Drawn Tube	All	25	20	19	15	10,100

表 4.3 鋁合金之機械性質表(AA 2005) (續)

ALLOY AND TEMPER	PRODUCT	THICKNESS RANGE in.	F_u ksi	F_{ty} ksi	F_{cy} ksi	F_{su} ksi	COMPRESSIVE MODULUS OF ELASTICITY ² E (ksi)
5052-O	Sheet & Plate	0.006 to 3.000	25	9.5	9.5	16	10,200
-H32	(Sheet & Plate	All	31	23	21	19	10,200
-H34	(Cold Fin. Rod & Bar	All	34	26	24	20	10,200
-H36	Drawn Tube						
	Sheet	0.006 to 0.162	37	29	26	22	10,200
5083-O	Extrusions	up thru 5.000	39	16	16	24	10,400
-H111	Extrusions	up thru 0.500	40	24	21	24	10,400
-H111	Extrusions	0.501 to 5.000	40	24	21	23	10,400
-O	Sheet & Plate	0.051 to 1.500	40	18	18	25	10,400
-H116	Sheet & Plate	0.188 to 1.500	44	31	26	26	10,400
-H32, H321	Sheet & Plate	0.188 to 1.500	44	31	26	26	10,400
-H116	Plate	1.501 to 3.000	41	29	24	24	10,400
-H32, H321	Plate	1.501 to 3.000	41	29	24	24	10,400
5086-O	Extrusions	up thru 5.000	35	14	14	21	10,400
-H111	Extrusions	up thru 0.500	36	21	18	21	10,400
-H111	Extrusions	0.501 to 5.000	36	21	18	21	10,400
-O	Sheet & Plate	0.020 to 2.000	35	14	14	21	10,400
-H112	Plate	0.025 to 0.499	36	18	17	22	10,400
-H112	Plate	0.500 to 1.000	35	16	16	21	10,400
-H112	Plate	1.001 to 2.000	35	14	15	21	10,400
-H116	Plate	2.001 to 3.000	34	14	15	21	10,400
-H112	Sheet & Plate	All	40	28	26	24	10,400
-H32	Sheet & Plate	All	40	28	26	24	10,400
	Drawn Tube						
-H34	Sheet & Plate	All	44	34	32	26	10,400
	Drawn Tube						
5154-H38	Sheet	0.006 to 0.128	45	35	33	24	10,300
5454-O	Extrusions	up thru 5.000	31	12	12	19	10,400
-H111	Extrusions	up thru 0.500	33	19	16	20	10,400
-H111	Extrusions	0.501 to 5.000	33	19	16	19	10,400
-H112	Extrusions	up thru 5.000	31	12	13	19	10,400
-O	Sheet & Plate	0.020 to 3.000	31	12	12	19	10,400
-H32	Sheet & Plate	0.020 to 2.000	36	26	24	21	10,400
-H34	Sheet & Plate	0.020 to 1.000	39	29	27	23	10,400
5456-O	Sheet & Plate	0.051 to 1.500	42	19	19	26	10,400
-H116	Sheet & Plate	0.188 to 1.250	46	33	27	27	10,400
-H32, H321	Sheet & Plate	0.188 to 1.250	46	33	27	27	10,400
-H116	Plate	1.251 to 1.500	44	31	25	25	10,400
-H32, H321	Plate	1.251 to 1.500	44	31	25	25	10,400
-H116	Plate	1.501 to 3.000	41	29	25	25	10,400
-H32, H321	Plate	1.501 to 3.000	41	29	25	25	10,400
6005-T5	Extrusions	up thru 1.000	38	35	35	24	10,100
6061-T6, T651	Sheet & Plate	0.010 to 4.000	42	35	35	27	10,100
-T6, T6510, T6511	Extrusions	All	38	35	35	24	10,100
-T6, T651	Cold Fin. Rod & Bar	up thru 8.000	42	35	35	25	10,100
-T6	Drawn Tube	0.025 to 0.500	42	35	35	27	10,100
-T6	Pipe	All	38	35	35	24	10,100
6063-T5,	Extrusions	up thru 0.500	22	16	16	13	10,100
-T52	Extrusions	up thru 1.000	22	16	16	13	10,100
-T5	Extrusions	0.500 to 1.000	21	15	15	12	10,100
-T6	Extrusions & Pipe	All	30	25	25	19	10,100
6066-T6, T6510, T6511	Extrusions	All	50	45	45	27	10,100
6070-T6, T62	Extrusions	up thru 2.999	48	45	45	29	10,100
6105-T5	Extrusions	up thru 0.500	38	35	35	24	10,100
6351-T5	Extrusions	up thru 1.000	38	35	35	24	10,100
6351-T6	Extrusions	up thru 0.750	42	37	37	27	10,100
6463-T6	Extrusions	up thru 0.500	30	25	25	19	10,100
7005-T53	Extrusions	up thru 0.750	50	44	43	28	10,500

1. F_u and F_{ty} are minimum specified values (except F_{ty} for 1100-H12, H14 Cold Finished Rod and Bar and Drawn Tube, Alclad 3003-H18 Sheet and 5050-H32, H34 Cold Finished Rod and Bar which are minimum expected values); other strength properties are corresponding minimum expected values.

2. Typical values. For deflection calculations an average modulus of elasticity is used; this is 100 ksi lower than values in this column.

4.1.2 鋁結構與鋼結構受拉構材設計規範之比較

國內鋼結構設計規範設計受拉構材，規定降伏應力之安全係數為 1.67，而抗拉強度之安全係數則為 2.0，與美國鋁結構設計容許拉應力相當近似，且設計邏輯相同。鋁結構與鋼結構受拉構材設計規範之比較如表 4.4。

表 4.4 鋁結構與鋼結構受拉構材設計規範之比較

	鋁結構 ASD	鋼結構 ASD
受拉構材	【全斷面降伏】 $\frac{F_{ty}}{n_y} (= 0.606F_{ty})$	【全斷面降伏】 $0.6F_y$
	【淨斷面斷裂】 $\frac{F_{tu}}{(k_t n_u)} (= 0.513F_{tu})$	【淨斷面斷裂】 $0.5F_u$

4.1.3 鋁結構受拉構材之計算例

如圖 4.1 所示，鋁合金板寬為 4 in，厚為 1/4 in，螺栓直徑為 1/2 in，鋁合金為 5005-H32，試求其容許拉力。

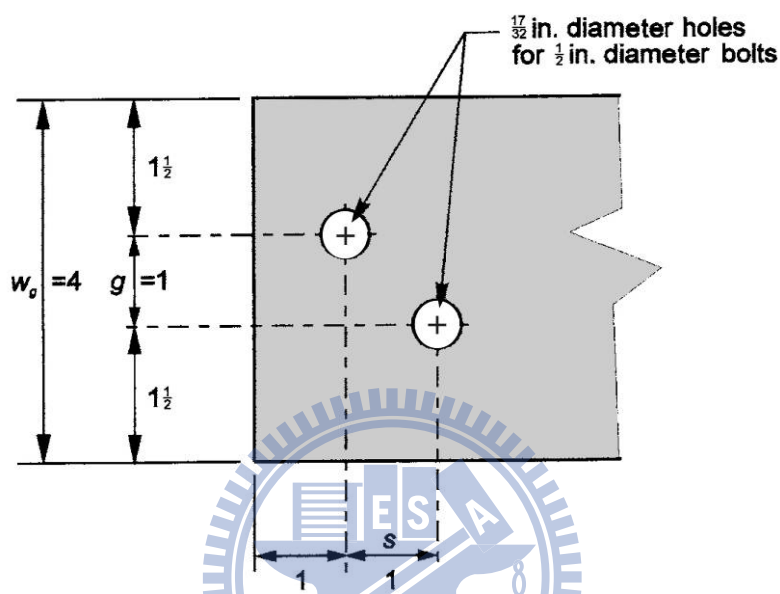


圖 4.1 受拉構材例(Kissell 2002)

查表 4.3 可知，鋁合金 5005-H32 之降伏強度與極限強度分別為

$$F_{ty} = 12 \text{ ksi}, F_{tu} = 17 \text{ ksi}。$$

1. 鋁合金板全斷面積

$$A_g = \left(\frac{1}{4} \text{ in}\right) \times (4 \text{ in}) = 1 \text{ in}^2$$

2. 鋁合金板淨斷面積(此計算方法與鋼結構相同)

(1)破壞面僅通過一螺栓孔

$$w_n = 4 \text{ in} - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{32}\right) = 3.47 \text{ in}$$

$$A_n = 3.47 \text{ in} \times \left(\frac{1}{4} \text{ in}\right) = 0.868 \text{ in}^2$$

(2) 破壞面通過兩螺栓孔

$$w_n = 4 \text{ in} - 2\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{32}\right) + \frac{1^2}{(4)(1)} = 3.19 \text{ in}$$

$$A_n = 3.19 \text{ in} \times \left(\frac{1}{4} \text{ in}\right) = 0.797 \text{ in}^2$$

由(1)(2)比較取小值可得 $A_n = 0.797 \text{ in}^2$

3. 容許拉力計算

(1) 全斷面降伏 $\frac{F_y A_g}{n_y} = \frac{(12)(1)}{1.65} = 7.27 \text{ kips}$

(2) 查表 4.2 可得 $k_t = 1.0$ ，故

淨斷面斷裂 $\frac{F_u A_n}{(k_t n_u)} = \frac{(17)(0.797)}{(1)(1.95)} = 6.95 \text{ kips}$

由(1)(2)比較取小值可得容許拉力為 6.95 kips

4.2 受壓構材

受壓構材泛指軸向壓力通過構件中心之構材，在工程上受壓構材之應用如桁架、斜撐以及柱等。由於受壓構材受力作用後，會因為構件真直度、受力型式以及殘留應力等影響，故不像受拉構材受力後會一直保持直線，因此探討受壓構材之穩定性就顯得相當重要，所以受壓構材除了考量軸向承載以外，尚需對挫屈能力加以檢核。

所謂的挫屈是指構材受外力持續增加至某一程度時，構材會突然發生極大側向彎曲變形與扭轉變形，此時構材已無法再承受載重。而影響受壓構材挫屈強度最主要的控制因素為細長比(kL/r)，其中 k 為構材之有效長度係數， r 為斷面迴轉半徑；且偏心載重、殘留應力等均會影響其效應。

4.2.1 鋁結構受壓構材

美國鋁結構規範中，以 S_1 與 S_2 作為判斷短柱、普通柱及長柱，亦為降伏、非彈性挫屈及彈性挫屈三種模式之分界點，當細長比小於等於 S_1 時，則為短柱，其偏心載重及殘留應力之影響均很小，故容許應力為

$$F_c = \frac{F_{cy}}{n_y} \quad (4-1)$$

即 $0.606F_{cy}$ ，與受拉構材相同；當細長比介於 S_1 與 S_2 之間時，其發生之挫屈為非彈性挫屈；若細長比大於等於 S_2 時，則為彈性挫屈。鋁結構受壓構材三種階段之容許壓應力如圖 4.2 所示。

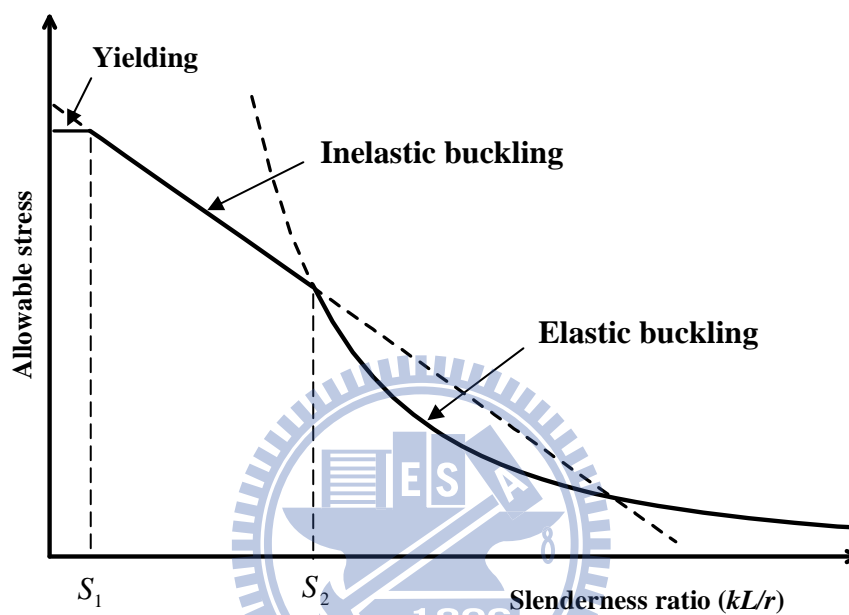


圖 4.2 鋁結構受壓構材三種階段之容許壓應力示意圖

彈性挫屈理論乃是根據 1757 年 Leonhard Euler 推導而得，為長柱分析與設計之基礎，其推導係假設構材為均質斷面、未受軸向承載前構材呈一直線、構材尚未彎曲前載重線通過柱軸線，且兩端為樞接以及無殘留應力等之情況下。彈性挫屈應力公式如(4-2)式，由式中可知彈性挫屈應力與材質無關，僅與細長比以及彈性模數 E 有關。

$$F_c = \frac{\pi^2 E}{n_u \left(\frac{kL}{r} \right)^2} \quad (4-2)$$

分析非彈性挫屈應力時，由於 Euler 公式應用範圍之限制，因此許多學者先後提出了修正公式，如利用正切模數理論分析非彈性挫屈應力等。美國鋁結構非彈性挫屈應力則使用直線公式，為較簡易之經驗柱公式，如下式：

$$F_c = \frac{B_c - \frac{D_c kL}{r}}{n_u} \quad (4-3)$$

其中， B_c 表示非彈性挫屈強度曲線相交於 y 軸之應力， D_c 表示非彈性挫屈曲線之斜率， B_c 、 D_c 之公式主要決定於降伏後應力-應變曲線發生之情況，使用此公式若細長比較小時，容許壓應力易過高，因此採用降伏公式；細長比較大時，容許壓應力又失之過低，則採用 Euler 公式。

美國鋁結構規範依據熱處理方式將鋁合金分為兩大類，鍊度符號為 O、H、T1、T2、T3、T4 歸為一類，T5、T6、T7、T8、T9 則歸為一類，此兩類降伏後所產生的應力-應變不同，因此 B_c 、 D_c 也不同，如表 4.5 與 4.6 所示。

表 4.5 鍊度符號編號為 O、H、T1、T2、T3、T4 之挫屈常數表(AA 2005)

Type of Member and Stress	Intercept ksi	Intercept MPa	Slope	Intersection
Compression in Columns and Beam Flanges	$B_c = F_{cy} \left[1 + \left(\frac{F_{cy}}{1000} \right)^{1/2} \right]$	$B_c = F_{cy} \left[1 + \left(\frac{F_{cy}}{6900} \right)^{1/2} \right]$	$D_c = \frac{B_c}{20} \left(\frac{6B_c}{E} \right)^{1/2}$	$C_c = \frac{2B_c}{3D_c}$
Axial Compression in Flat Elements	$B_p = F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{7.6} \right]$	$B_p = F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{14.5} \right]$	$D_p = \frac{B_p}{20} \left(\frac{6B_p}{E} \right)^{1/2}$	$C_p = \frac{2B_p}{3D_p}$
Axial Compression in Curved Elements	$B_t = F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/5}}{5.8} \right]$	$B_t = F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/5}}{8.5} \right]$	$D_t = \frac{B_t}{3.7} \left(\frac{B_t}{E} \right)^{1/3}$	C_t^*
Bending Compression in Flat Elements	$B_{br} = 1.3F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{7} \right]$	$B_{br} = 1.3F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{13.3} \right]$	$D_{br} = \frac{B_{br}}{20} \left(\frac{6B_{br}}{E} \right)^{1/2}$	$C_{br} = \frac{2B_{br}}{3D_{br}}$
Bending Compression in Curved Elements	$B_{tb} = 1.5F_y \left[1 + \frac{(F_y)^{1/5}}{5.8} \right]$	$B_{tb} = 1.5F_y \left[1 + \frac{(F_y)^{1/5}}{8.5} \right]$	$D_{tb} = \frac{B_{tb}}{2.7} \left(\frac{B_{tb}}{E} \right)^{1/3}$	$C_{tb} = \left(\frac{B_{tb} - B_t}{D_{tb} - D_t} \right)^2$
Shear in Flat Elements	$B_s = \frac{F_{ty}}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{(F_{ty}/\sqrt{3})^{1/3}}{6.2} \right]$	$B_s = \frac{F_{ty}}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{(F_{ty}/\sqrt{3})^{1/3}}{11.8} \right]$	$D_s = \frac{B_s}{20} \left(\frac{6B_s}{E} \right)^{1/2}$	$C_s = \frac{2B_s}{3D_s}$
Ultimate Strength of Flat Elements in Compression or Bending	$k_1 = 0.50, \quad k_2 = 2.04$			

*C_t shall be determined using a plot of curves of limit state stress based on elastic and inelastic buckling or by trial and error solution.

表 4.6 鍊度符號編號為 T5、T6、T7、T8、T9 之挫屈常數表(AA 2005)

Type of Member and Stress	Intercept ksi	Intercept MPa	Slope	Intersection
Compression in Columns and Beam Flanges	$B_c = F_{cy} \left[1 + \left(\frac{F_{cy}}{2250} \right)^{1/2} \right]$	$B_c = F_{cy} \left[1 + \left(\frac{F_{cy}}{15510} \right)^{1/2} \right]$	$D_c = \frac{B_c}{10} \left(\frac{B_c}{E} \right)^{1/2}$	$C_c = 0.41 \frac{B_c}{D_c}$
Axial Compression in Flat Elements	$B_p = F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{11.4} \right]$	$B_p = F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{21.7} \right]$	$D_p = \frac{B_p}{10} \left(\frac{B_p}{E} \right)^{1/2}$	$C_p = 0.41 \frac{B_p}{D_p}$
Axial Compression in Curved Elements	$B_t = F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/5}}{8.7} \right]$	$B_t = F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/5}}{12.8} \right]$	$D_t = \frac{B_t}{4.5} \left(\frac{B_t}{E} \right)^{1/3}$	C_t^*
Bending Compression in Flat Elements	$B_{br} = 1.3F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{7} \right]$	$B_{br} = 1.3F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{13.3} \right]$	$D_{br} = \frac{B_{br}}{20} \left(\frac{6B_{br}}{E} \right)^{1/2}$	$C_{br} = \frac{2B_{br}}{3D_{br}}$
Bending Compression in Curved Elements	$B_{tb} = 1.5F_y \left[1 + \frac{(F_y)^{1/5}}{8.7} \right]$	$B_{tb} = 1.5F_y \left[1 + \frac{(F_y)^{1/5}}{12.8} \right]$	$D_{tb} = \frac{B_{tb}}{2.7} \left(\frac{B_{tb}}{E} \right)^{1/3}$	$C_{tb} = \left(\frac{B_{tb} - B_t}{D_{tb} - D_t} \right)^2$
Shear in Flat Elements	$B_s = \frac{F_{ty}}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{(F_{ty}/\sqrt{3})^{1/3}}{9.3} \right]$	$B_s = \frac{F_{ty}}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{(F_{ty}/\sqrt{3})^{1/3}}{17.7} \right]$	$D_s = \frac{B_s}{10} \left(\frac{B_s}{E} \right)^{1/2}$	$C_s = 0.41 \frac{B_s}{D_s}$
Ultimate Strength of Flat Elements in Compression	$k_1 = 0.35, \quad k_2 = 2.27$			
Ultimate Strength of Flat Elements in Bending	$k_1 = 0.50, \quad k_2 = 2.04$			

*C_t shall be determined using a plot of curves of limit state stress based on elastic and inelastic buckling or by trial and error solution.

以上所述完全針對整體構材側向挫屈來考量，然而組成斷面之各肢材亦可能發生局部挫屈，影響整體構材之抗壓能力。因此，寬厚比 b/t 則與是否發生局部挫屈息息相關，寬厚比越大，構材越容易發生局部挫屈。

鋁結構規範之局部挫屈容許應力如表 4.7 所示。規範中將各肢材寬厚比進行檢核並計算其容許應力後，使用加權平均的方法計算總斷面局部挫屈之容許應力，如下：

$$F_{ca} = \frac{A_1 F_{c1} + A_2 F_{c2} + \dots + A_n F_{cn}}{A} \quad (4-4)$$

其中， F_{ca} 為加權平均容許應力， A_i 為肢材斷面積， F_{ci} 為肢材局部挫屈容許應力， A 為總斷面積。

其次，尚需檢核局部挫屈是否影響整體側向挫屈，使用下式判別：

$$\frac{F_{cr}}{n_y} < F_c \quad (4-5)$$

式中， $n_y=1.65$ ， F_c 為梁之整體側向挫屈應力， F_{cr} 為彈性局部挫屈應力，整理如表 4.8。若上式滿足則需考慮局部挫屈之影響，故容許應力則為

$$F_{rc} = \frac{F_{ec}^{1/3} F_{cr}^{2/3}}{n_y} \quad (4-6)$$

其中， F_{ec} 為彈性側向挫屈應力。規範中係將整體側向挫屈容許應力(公式 4-1、4-2, 4-3)、斷面加權平均容許應力(公式 4-4)以及局部挫屈影響之容許應力(公式 4-6)，取三者所計算之小值決定容許壓應力。



表 4.7 鋁結構柱構件肢材局部挫屈之容許應力(AA 2005)

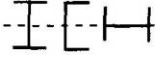
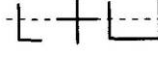
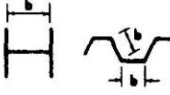

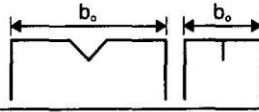
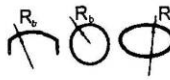
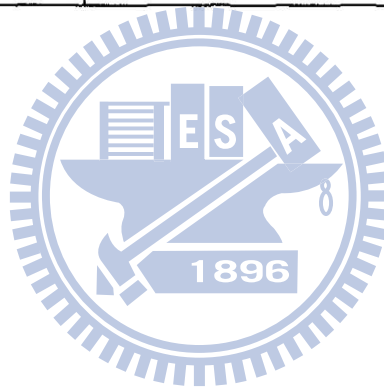
Type of Stress	Type of Member or Element	Sub-Sec.	Allowable Stress Slenderness $\leq S_1$	Slenderness Limit S_1	Allowable Stress $S_1 < \text{Slenderness} < S_2$	Slenderness Limit S_2	Allowable Stress Slenderness $\geq S_2$	
COMPRESSION IN COLUMN ELEMENTS, gross section	Flat elements supported on one edge—columns buckling about a symmetry axis 	8	$\frac{F_{cy}}{n_y}$	$\frac{b}{t} = \frac{B_p - \frac{n_u F_{cy}}{n_y}}{5.1 D_p}$	$\frac{1}{n_u} (B_p - 5.1 D_p \frac{b}{t})$	$\frac{b}{t} = \frac{k_1 B_p}{5.1 D_p}$	$\frac{k_2 \sqrt{B_p E}}{n_u (5.1 b/t)}$	
	Flat elements supported on one edge—columns not buckling about a symmetry axis 	8.1	$\frac{F_{cy}}{n_y}$	$\frac{b}{t} = \frac{B_p - \frac{n_u F_{cy}}{n_y}}{5.1 D_p}$	$\frac{1}{n_u} (B_p - 5.1 D_p \frac{b}{t})$	$\frac{b}{t} = \frac{C_p}{5.1}$	$\frac{\pi^2 E}{n_u (5.1 b/t)^2}$	
	Flat elements supported on both edges 	9	$\frac{F_{cy}}{n_y}$	$\frac{b}{t} = \frac{B_p - \frac{n_u F_{cy}}{n_y}}{1.6 D_p}$	$\frac{1}{n_u} (B_p - 1.6 D_p \frac{b}{t})$	$\frac{b}{t} = \frac{k_1 B_p}{1.6 D_p}$	$\frac{k_2 \sqrt{B_p E}}{n_u (1.6 b/t)}$	
	Flat elements supported on one edge and with stiffener on other edge 	9.1	See Section 3.4.9.1					
	Flat elements supported on both edges and with an intermediate stiffener 	9.2	See Section 3.4.9.2					
	Curved elements supported on both edges 	10	$\frac{F_{cy}}{n_y}$	$\frac{R_b}{t} = \left(\frac{B_t - \frac{n_u F_{cy}}{n_y}}{D_t} \right)^2$	$\frac{1}{n_u} (B_t - D_t \sqrt{\frac{R_b}{t}})$	$\frac{R_b}{t} = C_t$	$\frac{\pi^2 E}{16 n_u \left(\frac{R_b}{t} \right) \left(1 + \sqrt{\frac{R_b}{35 t}} \right)^2}$	

表 4.8 鋁結構柱構件肢材彈性局部挫屈應力(AA 2005)

Section	Local Buckling Stress, F_{cr}
3.4.8 and 3.4.15	$\frac{\pi^2 E}{(5.1b/t)^2}$
3.4.9 and 3.4.16	$\frac{\pi^2 E}{(1.6b/t)^2}$
3.4.9.1 and 3.4.16.2	$\frac{(n_y F_c)^2}{F_{cy}}$
3.4.18	$\frac{\pi^2 E}{(mh/t)^2}$ $\frac{\pi^2 E}{(0.65ht)^2}$ for $y_{NA} = h/2$
3.4.19	$\frac{\pi^2 E}{(0.29ht)^2}$



4.2.2 鋁結構與鋼結構受壓構材設計規範之比較

鋼結構規範因考慮殘留應力高達降伏應力之一半，故以 C_c 作為非彈性挫屈與彈性挫屈兩種不同挫屈模式之分界點，意即以 C_c 表示當挫屈應力等於 $0.5 F_y$ 時之柱長細比。鋁結構規範則以 S_1 與 S_2 作為降伏、非彈性挫屈及彈性挫屈三種模式之分界點，因此鋼結構規範並無區分壓力降伏，僅使用非彈性挫屈與彈性挫屈兩個公式，如圖 4.3 所示。

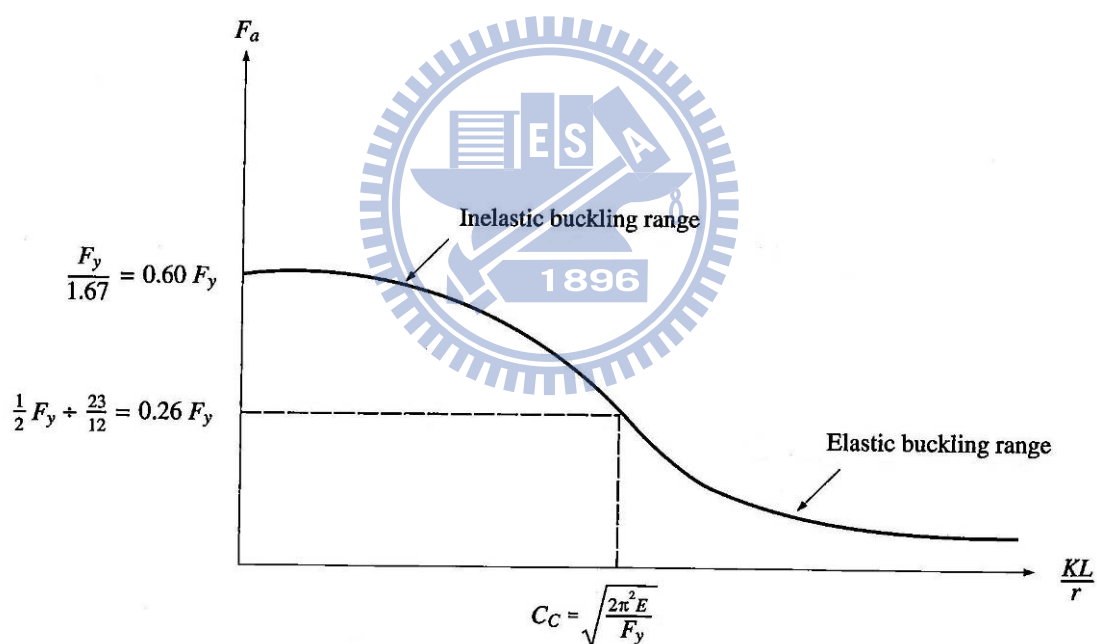


圖 4.3 鋼柱挫屈強度示意圖 (McCormac 1992)

另外，鋼結構受壓構材在非彈性挫屈階段採用了一個變化之安全係數來考慮鋼柱初始變位之影響，其變化範圍由 1.67 至 1.92，係隨著細長比而改變；鋁結構規範則在降伏階段採用安全係數 1.65，進入

非彈性階段時則採用安全係數 1.95 為定值。而彈性挫屈階段，鋼結構與鋁結構一樣是以 Euler 理論為設計基礎，鋼結構規範則係由 Euler 臨界挫屈應力除以安全係數($23/12=1.92$)而得，鋁結構則除以安全係數 1.95。事實上，鋁結構之 S_2 與鋼結構之 C_c 所代表的細長比 KL/r 甚為接近。鋁結構與鋼結構受壓構材設計規範之比較如表 4.9 所示。



表 4.9 鋁結構與鋼結構受壓構材設計規範之比較

	鋁結構 ASD	鋼結構 ASD
受壓構材	<p>【全斷面降伏】</p> <p>當 $\frac{kL}{r} \leq S_1$</p> $\frac{F_{cy}}{n_y} (= 0.606F_{cy})$	
	<p>【非彈性挫屈】</p> <p>當 $S_1 < \frac{kL}{r} < S_2$</p> $\frac{\left(B_c - \frac{D_c kL}{r} \right)}{n_u}$ <p>式中 $n_u = 1.95$</p>	<p>【非彈性挫屈】</p> <p>當 $\frac{KL}{r} < C_c$</p> $\frac{\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8} \left(\frac{KL/r}{C_c} \right) - \frac{1}{8} \left[\frac{(KL/r)^3}{C_c^3} \right]}$
	<p>【彈性挫屈】</p> <p>當 $\frac{kL}{r} \geq S_2$</p> $\frac{\pi^2 E}{n_u \left(\frac{kL}{r} \right)^2} \left[= \frac{0.513\pi^2 E}{\left(\frac{kL}{r} \right)^2} \right]$ <p>其中</p> $S_1 = \frac{B_c - \frac{n_u F_{cy}}{n_y}}{D_c}$ $S_2 = C_c$ <p>其中，B_c、D_c、C_c 計算參照表 4.5 與表 4.6 柱構材承壓之情況</p>	<p>【彈性挫屈】</p> <p>當 $\frac{KL}{r} \geq C_c$</p> $\frac{12 \pi^2 E_s}{23 (KL/r)^2} \left[= \frac{0.522\pi^2 E_s}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \right]$ <p>其中</p> $C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_s}{F_y}}$

4.2.3 鋁結構受壓構材之計算例

求長度 5.5 ft 柱之容許載重，斷面為標準型材 I 12×11.7，如圖 4.4 所示。柱兩端為鉸接，採用 6061-T6 之鋁合金。斷面性質： $r_x=5.07$ in， $r_y=1.65$ in， $A=9.92$ in²， $F_y=35$ ksi， $E=10100$ ksi。

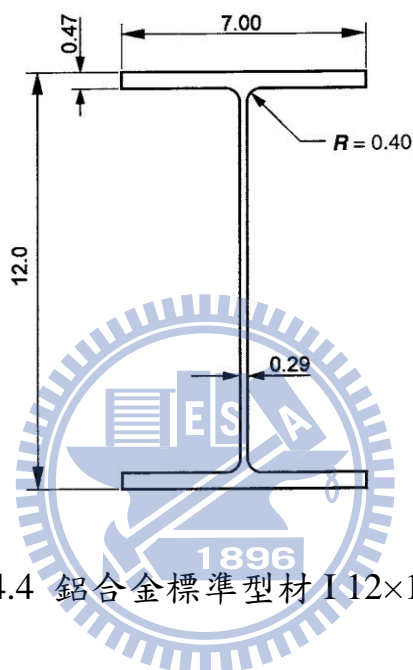


圖 4.4 鋁合金標準型材 I 12×11.7

1. 判斷整體側向挫屈容許應力

(1) 計算挫屈常數，參照表 4.6 柱構材承壓之情況

$$B_c = F_{cy} \left[1 + \left(\frac{F_{cy}}{2250} \right)^{1/2} \right] = 35 \left[1 + \left(\frac{35}{2250} \right)^{1/2} \right] = 39.37$$

$$D_c = \frac{B_c}{10} \left(\frac{B_c}{E} \right)^{1/2} = \frac{39.37}{10} \left(\frac{39.37}{10100} \right)^{1/2} = 0.246$$

$$C_c = 0.41 \frac{B_c}{D_c} = 0.41 \times \frac{39.37}{0.246} = 65.62$$

(2) 計算細長比限界 S_1 、 S_2

$$S_1 = \frac{B_c - \frac{n_u F_{cy}}{n_y}}{D_c} = \frac{39.37 - \frac{(1.95)(35)}{1.65}}{0.246} = 0$$

$$S_2 = C_c = 65.62$$

(3) 計算容許應力

$$k = 1.0$$

$$\frac{kL}{r_x} = \frac{(1)(66)}{5.07} = 13$$

$$\frac{kL}{r_y} = \frac{(1)(66)}{1.65} = 40 \quad (\text{控制})$$

$\therefore S_1 < \frac{kL}{r} < S_2$ ，故採公式(4-3)計算容許應力

$$F_c = \frac{B_c - \frac{D_c kL}{r}}{n_u} = \frac{39.37 - 0.246 \times 40}{1.95} = 15.14 \text{ ksi}$$

2. 計算斷面加權平均容許應力

(1) 分別計算肢材局部挫屈之容許應力，參照表 4.7

a. 首先，必須計算挫屈常數，參照表 4.6 肢材承壓之情況

$$B_p = F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{11.4} \right] = 35 \left[1 + \frac{(35)^{1/3}}{11.4} \right] = 45.04$$

$$D_p = \frac{B_p}{10} \left(\frac{B_p}{E} \right)^{1/2} = \frac{45.04}{10} \left(\frac{45.04}{10100} \right)^{1/2} = 0.3$$

$$C_p = 0.41 \frac{B_p}{D_p} = 0.41 \times \frac{45.04}{0.3} = 61.55$$

b. 計算翼板容許應力

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{n_u F_{cy}}{n_y}}{5.1D_p} = \frac{45.04 - \frac{1.95 \times 35}{1.65}}{5.1 \times 0.3} = 2.4$$

k_1 值查表 4.6 得 0.35，故

$$S_2 = \frac{k_1 B_p}{5.1D_p} = \frac{0.35 \times 45.04}{5.1 \times 0.3} = 10.3$$

$$b = \frac{7 - 0.29 - 2(0.4)}{2} = 2.955 \text{ in}$$

$$\frac{b}{t_f} = \frac{2.955}{0.47} = 6.29$$

$\therefore S_1 < \frac{b}{t_f} < S_2$ ，故容許應力為

$$F_c = \frac{1}{n_u} \left[B_p - 5.1D_p \frac{b}{t} \right] = \frac{45.04 - 5.1 \times 0.3 \times 6.29}{1.95} = 18.16 \text{ ksi}$$

c. 計算腹板容許應力

$$\frac{b}{t_w} = \frac{10.26}{0.29} = 35.38$$

$$S_1 = \frac{B_p - \frac{n_u F_{cy}}{n_y}}{1.6D_p} = \frac{45.04 - \frac{1.95 \times 35}{1.65}}{1.6 \times 0.3} = 7.66$$

$$S_2 = \frac{k_1 B_p}{1.6 D_p} = \frac{0.35 \times 45.04}{1.6 \times 0.3} = 32.84$$

$\therefore \frac{b}{t_w} > S_2$ ，故容許應力為

$$F_c = \frac{k_2 \sqrt{B_p E}}{n_u (1.6b/t)} = \frac{2.27 \sqrt{45.04 \times 10100}}{1.95 (1.6 \times 35.38)} = 13.87 \text{ ksi}$$

(2) 計算斷面加權平均容許應力，如公式(4-4)

$$A_f = 7 \times 0.47 = 3.29 \text{ in}^2$$

$$A_w = 0.29 [12 - 2(0.47)] = 3.21 \text{ in}^2$$

$$F_{ca} = \frac{2(18.16)(3.29) + (13.87)(3.21)}{2(3.29) + 3.21} = 16.75 \text{ ksi}$$

3. 檢核局部挫屈是否影響整體側向挫屈

(1) 計算局部挫屈容許應力，參照表 4.8

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(1.6b/t)^2} = \frac{\pi^2 (10100)}{[1.6(35.38)]^2} = 31.11 \text{ ksi}$$

(2) 利用公式(4-5)判別，

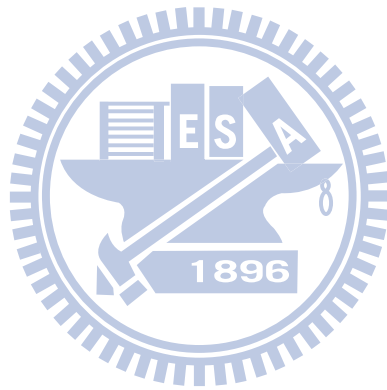
$$\frac{F_{cr}}{n_y} = \frac{31.11}{1.65} = 18.85 > F_c = 15.14$$
，故不須計算 F_{rc}

4. 計算容許載重

整體側向挫屈容許應力 15.14 ksi < 斷面加權平均容許應力 16.75

ksi，故容許壓應力取 15.14 ksi

容許壓力為 $P = F_c A = 15.14 \times 9.92 = 150.19$ kips



4.3 撓曲構材

一般而言梁構件即為撓曲構材，主要為承受彎矩與剪力作用之構材，由於載重方向與構材之軸線成垂直，因此使梁構件發生彎矩，故梁斷面上、下則分別承受拉力與壓力，如圖 4.5。且其拉、壓應力將隨著中性軸位置而變化，不如前述受拉構材與受壓構材承受均佈應力，因此受力情形較受拉構材與受壓構材為複雜。

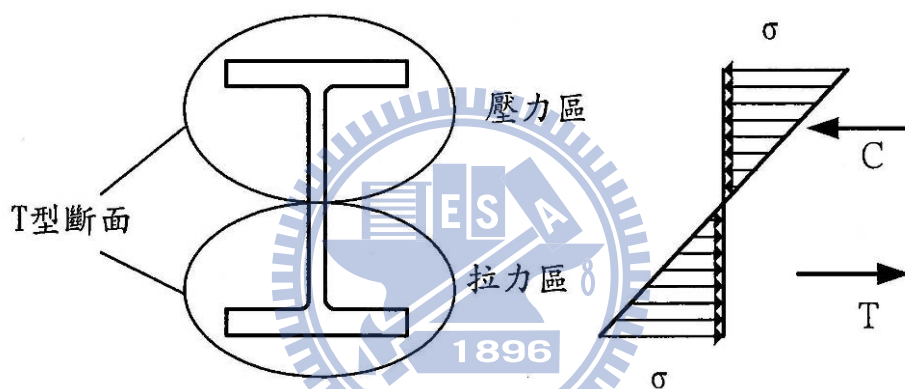


圖 4.5 梁斷面上之受力示意圖(陳生金 2001)

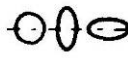
在設計上適合梁所使用之斷面有 I 型、L 型、槽型、T 型、圓管、方管或矩形斷面等，其中最常使用的斷面為 I 型，由於 I 型梁構件較多材料集中於上、下翼版，側向穩定度高且具經濟性，因此為較佳之梁構材型式。幾乎所有梁構材設計皆由所承受之彎矩來選擇斷面，除非承載很大且接近梁構件支撐處或者跨度很短時，方由剪力來控制斷面之選擇。

撓曲構材之破壞模式同時包括受拉構材與受壓構材之破壞模式，如局部挫屈、彈性扭轉挫屈、非彈性扭轉挫屈。而影響梁構件強度之主要因素為構材之降伏應力、斷面性質、寬厚比、深厚比、側向支撐間距及殘留應力等。

4.3.1 鋁結構撓曲構材

美國鋁結構規範撓曲構材之設計考慮撓曲拉應力、撓曲壓應力以及剪應力。容許撓曲拉應力之計算根據不同斷面，分類如表 4.10。表中容許撓曲拉應力取兩式之小值，與受拉構材主要差異為撓曲拉應力僅考慮淨斷面積，所謂淨斷面積即為各肢材之厚度與淨寬之乘積，而受拉構材則分為全斷面積與淨斷面積。

表 4.10 鋁結構梁構件容許撓曲拉應力(AA 2005)

TENSION IN BEAMS, extreme fiber, net section	Flat elements in uniform tension (flanges)	2	$F = \frac{F_{ty}}{n_y}$ or $F = \frac{F_{tu}}{k_t n_u}$
	Round or oval tubes 	3	$F = \frac{1.17F_{ty}}{n_y}$ or $F = \frac{1.24F_{tu}}{k_t n_u}$
	Flat elements in bending in their own plane (webs)	4	for symmetric shapes: $F = \frac{1.3F_{ty}}{n_y}$ or $F = \frac{1.42F_{tu}}{k_t n_u}$ for unsymmetric shapes see Section 3.4.4

容許撓曲壓應力首先判斷側向挫屈應力，其計算亦根據不同斷面分別計算，分類為四種：(1)單一腹板斷面，包括 I 型、T 型及槽型，(2)圓管或橢圓型管，(3)矩形與圓形實心斷面，(4)管狀斷面，如表 4.11。以下介紹單一腹板斷面容許應力判斷方式，其類似壓力構材，以 $L_b / (r_y \sqrt{C_b})$ 比值決定， L_b 為梁構材之未支撐長度(側向支撐間距)， r_y 為斷面對 Y-Y 軸之迴轉半徑， C_b 為撓曲修正係數，可視為強度放大因子， C_b 計算如下：

$$C_b = \frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_c} \quad (4-7)$$

其中 M_{\max} 為未支撐段之最大彎矩載重， M_A 為 1/4 點處彎矩值， M_B 為終點彎矩值，而 M_c 則為 3/4 點處彎矩值。 C_b 亦可保守取為 1.0。隨著 $L_b / (r_y \sqrt{C_b})$ 由小至大分成三種情況，第一種情況為尚未發生側向挫屈，當 $L_b / (r_y \sqrt{C_b})$ 小於等於下式時，

$$S_1 = \frac{1.2(B_c - F_{cy})}{D_c} \quad (4-8)$$

其容許應力為 $0.606F_{cy}$ 。

隨著 $L_b / (r_y \sqrt{C_b})$ 增大，第二種情況如同受壓構材之普通柱，故當 $L_b / (r_y \sqrt{C_b})$ 介於 S_1 與 S_2 時，則產生非彈性側向挫屈， S_2 即為非彈性側向挫屈與彈性側向挫屈之分界，計算如下：

$$S_2 = 1.2C_c \quad (4-9)$$

其容許應力為

$$F_c = \frac{B_c - \frac{D_c L_b}{1.2r_y \sqrt{C_b}}}{n_y} \quad (4-10)$$

第三種情況則為彈性側向挫屈，即當 $L_b / (r_y \sqrt{C_b})$ 大於 S_2 時，其容許應力近似 Euler 公式，如下：

$$F_c = \frac{C_b \pi^2 E}{n_y \left(\frac{L_b}{1.2r_y} \right)^2} \quad (4-11)$$

因此，可知側向挫屈與未支撐長度 L_b 有極大關係，未支撐長度越大越易發生側向挫屈，容許應力越低； r_y 越大則不易發生側向挫屈，容許應力則高。

再者，撓曲構材與受壓構材相同仍須檢核局部挫屈，故美國鋁結構規範將局部挫屈容許應力分為兩類，第一類為肢材受均勻壓力，第二類為肢材受彎曲，如表 4.12 所示。規範乃係將側向挫屈容許應力(公式 4-8、4-10、4-11)，與前述斷面加權平均法所計算之容許應力(公式 4-4)以及局部挫屈影響之容許應力(公式 4-6)，取三者所計算之小值決定容許撓曲壓應力。而最後決定之容許撓曲應力即為容許撓曲拉應力與容許撓曲壓應力兩者之小值。

表 4.11 鋁結構梁構件整體側向挫屈之容許應力(AA 2005)


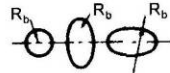
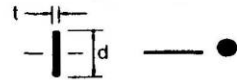
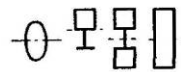
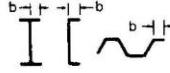
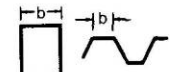

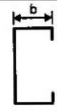
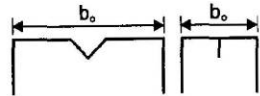

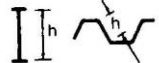
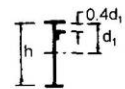
Type of Stress	Type of Member or Element	Sub-Sec.	Allowable Stress Slenderness $\leq S_1$	Slenderness Limit S_1	Allowable Stress $S_1 < \text{Slenderness} < S_2$	Slenderness Limit S_2	Allowable Stress Slenderness $\geq S_2$
COMPRESSION IN BEAMS, extreme fiber, gross section	Single web shapes 	11	$\frac{F_{cy}}{n_y}$	$\frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} = \frac{1.2(B_c - F_{cy})}{D_c}$	$\frac{1}{n_y} \left(B_c - \frac{D_c L_b}{1.2 r_y \sqrt{C_b}} \right)$	$\frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} = 1.2 C_c$	$\frac{\pi^2 E C_b}{n_y \left(\frac{L_b}{1.2 r_y} \right)^2}$
	Round or oval tubes 	12	$\frac{1.17 F_{cy}}{n_y}$	$\frac{R_b}{t} = \left(\frac{B_{tb} - 1.17 F_{cy}}{D_{tb}} \right)^2$	$\frac{1}{n_y} \left(B_{tb} - D_{tb} \sqrt{\frac{R_b}{t}} \right)$	$\frac{R_b}{t} = \left[\left(\frac{n_y B_{tb} - B_c}{n_y} \right) \left(\frac{n_y D_{tb} - D_c}{n_y} \right) \right]^2$	Same as Section 3.4.10
	Solid rectangular and round sections 	13	$\frac{1.3 F_{cy}}{n_y}$	$\frac{d \sqrt{L_b}}{t \sqrt{C_b d}} = \frac{B_{br} - 1.3 F_{cy}}{2.3 D_{br}}$	$\frac{1}{n_y} \left[B_{br} - 2.3 D_{br} \frac{d \sqrt{L_b}}{t \sqrt{C_b d}} \right]$	$\frac{d \sqrt{L_b}}{t \sqrt{C_b d}} = \frac{C_{br}}{2.3}$	$\frac{\pi^2 E C_b}{5.29 n_y \left(\frac{d}{t} \right)^2 L_b / d}$
	Tubular shapes 	14	$\frac{F_{cy}}{n_y}$	$\frac{L_b S_c}{0.5 C_b \sqrt{I_y J}} = \left(\frac{B_c - F_{cy}}{1.6 D_c} \right)^2$	$\frac{1}{n_y} \left(B_c - 1.6 D_c \sqrt{\frac{L_b S_c}{0.5 C_b \sqrt{I_y J}}} \right)$	$\frac{L_b S_c}{0.5 C_b \sqrt{I_y J}} = \left(\frac{C_c}{1.6} \right)^2$	$\frac{\pi^2 E}{2.56 n_y \left(\frac{L_b S_c}{0.5 C_b \sqrt{I_y J}} \right)}$

表 4.12 鋁結構梁構件肢材局部挫屈之容許應力(AA 2005)

Type of Stress	Type of Member or Element	Sub-Sec.	ALLOWABLE Stress Slenderness $\leq S_1$	Slenderness Limit S_1	Allowable Stress $S_1 < \text{Slenderness} < S_2$	Slenderness Limit S_2	Allowable Stress Slenderness $\geq S_2$	
COMPRESSION IN BEAM ELEMENTS, (element in uniform compression), gross section	Flat elements supported on one edge 	15	$\frac{F_{cy}}{n_y}$	$\frac{b}{t} = \frac{B_p - F_{cy}}{5.1D_p}$	$\frac{1}{n_y} [B_p - 5.1D_p \frac{b}{t}]$	$\frac{b}{t} = \frac{k_1 B_p}{5.1D_p}$	$\frac{k_2 \sqrt{B_p E}}{n_y (5.1b/t)}$	
	Flat elements supported on both edges 	16	$\frac{F_{cy}}{n_y}$	$\frac{b}{t} = \frac{B_p - F_{cy}}{1.6D_p}$	$\frac{1}{n_y} [B_p - 1.6D_p \frac{b}{t}]$	$\frac{b}{t} = \frac{k_1 B_p}{1.6D_p}$	$\frac{k_2 \sqrt{B_p E}}{n_y (1.6b/t)}$	
	Curved elements supported on both edges 	16.1	$\frac{1.17F_{cy}}{n_y}$	$\frac{R_b}{t} = \left(\frac{B_t - 1.17F_{cy}}{D_t} \right)^2$	$\frac{1}{n_y} (B_t - D_t \sqrt{\frac{R_b}{t}})$	$\frac{R_b}{t} = C_t$	$\frac{\pi^2 E}{16n_y \left(\frac{R_b}{t} \right) \left(1 + \frac{\sqrt{R_b/t}}{35} \right)^2}$	
	Flat elements supported on one edge and with stiffener on other edge 	16.2	See Section 3.4.16.2					
	Flat elements supported on both edges and with an intermediate stiffener 	16.3	See Section 3.4.16.3					
COMPRESSION IN BEAM ELEMENTS, (element in bending in own plane), gross section	Flat elements supported on tension edge, compression edge free 	17	$\frac{1.3F_{cy}}{n_y}$	$\frac{b}{t} = \frac{B_{br} - 1.3F_{cy}}{3.5D_{br}}$	$\frac{1}{n_y} [B_{br} - 3.5D_{br} \frac{b}{t}]$	$\frac{b}{t} = \frac{C_{br}}{3.5}$	$\frac{\pi^2 E}{n_y (3.5b/t)^2}$	
	Flat elements supported on both edges 	18	$\frac{1.3F_{cy}}{n_y}$	$\frac{h}{t} = \frac{B_{br} - 1.3F_{cy}}{mD_{br}}$	$\frac{1}{n_y} [B_{br} - mD_{br} \frac{h}{t}]$	$\frac{h}{t} = \frac{k_1 B_{br}}{mD_{br}}$	$\frac{k_2 \sqrt{B_{br} E}}{n_y m h / t}$	
	Flat elements supported on both edges and with a longitudinal stiffener 	19	$\frac{1.3F_{cy}}{n_y}$	$\frac{h}{t} = \frac{B_{br} - 1.3F_{cy}}{0.29D_{br}}$	$\frac{1}{n_y} [B_{br} - 0.29D_{br} \frac{h}{t}]$	$\frac{h}{t} = \frac{k_1 B_{br}}{0.29D_{br}}$	$\frac{k_2 \sqrt{B_{br} E}}{n_y (0.29h/t)}$	

此外，當載重較大且靠近支撐處或跨距甚小時，尚須檢核剪應力，否則一般來說仍以撓曲強度設計為主。通常剪應力在斷面之分佈，離中性軸越遠應力越小，以工型鋼為例，翼板所承受之剪力較小，腹板則承受較大之剪力，故美國鋁結構採腹板平均剪應力來定義剪應力，如下：

$$f_s = \frac{V}{A_w} \quad (4-12)$$

式中 f_s 為剪應力， V 為剪力， A_w 則為腹板面積 $=ht_w$ ， h 為兩翼板間之淨深度減去 2 倍角隅半徑之距離， t_w 為腹板厚。

美國鋁結構將容許剪應力分為兩類，第一類為腹板未加勁，第二類為腹板加勁，如表 4.13 所示。以下僅簡述腹板未加勁情況之容許剪應力判斷方式，若

$$\frac{h}{t} \leq \frac{B_s - F_{ty} / \sqrt{3}}{1.23D_s} = S_1 \quad (4-13)$$

則容許剪應力為

$$\frac{F_{ty}}{\sqrt{3}n_y} = 0.35F_{ty} \quad (4-14)$$

，若

$$S_1 < \frac{h}{t} < \frac{C_s}{1.25} = S_2 \quad (4-15)$$

容許剪應力為

$$\frac{1}{n_y} \left[B_s - 1.25 D_s \frac{h}{t} \right] \quad (4-16)$$

其中 B_s 、 D_s 及 C_s 參照表 4.4 與 4.5 計算之。若

$$\frac{h}{t} \geq S_2 \quad (4-17)$$

近似 Euler 公式，容許剪應力則如下

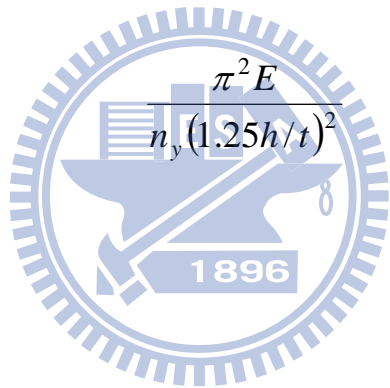
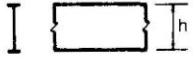

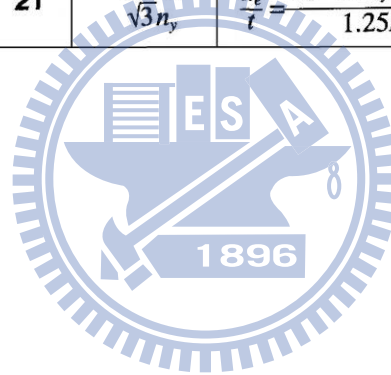
$$\frac{\pi^2 E}{n_y (1.25h/t)^2} \quad (4-18)$$


表 4.13 鋁結構梁構件剪力之容許應力(AA 2005)

Type of Stress	Type of Member or Element	Sub-Sec.	Allowable Stress	Slenderness Limit S_1	Allowable Stress $S_1 < \text{Slenderness} < S_2$	Slenderness Limit S_2	Allowable Stress $\text{Slenderness} \geq S_2$
SHEAR IN ELEMENTS, gross section	Unstiffened flat elements supported on both edges 	20	$\frac{F_{ty}}{\sqrt{3}n_y}$	$\frac{h}{t} = \frac{B_s - F_{ty}/\sqrt{3}}{1.25D_s}$	$\frac{1}{n_y} \left[B_s - 1.25D_s \frac{h}{t} \right]$	$\frac{h}{t} = \frac{C_s}{1.25}$	$\frac{\pi^2 E}{n_y (1.25h/t)^2}$
	Stiffened flat elements supported on both edges 	21	$\frac{F_{ty}}{\sqrt{3}n_y}$	$\frac{a_e}{t} = \frac{B_s - n_a F_{ty} / (n_y \sqrt{3})}{1.25D_s}$	$\frac{1}{n_a} \left[B_s - 1.25D_s \frac{a_e}{t} \right]$	$\frac{a_e}{t} = \frac{C_s}{1.25}$	$\frac{\pi^2 E}{n_a (1.25a_e/t)^2}$



4.3.2 鋁結構與鋼結構撓曲構材設計規範之比較

鋼結構規範之容許撓曲應力檢核工型斷面若滿足結實斷面條件且構材有充分側向支撐時，構材斷面之承載能充分發揮，已超過受拉構材承受降伏應力之狀態，故容許撓曲應力對強軸可較容許拉應力提高 10%，即 $0.66F_y$ ，而弱軸則可提高至 25% 達 $0.75F_y$ ；若不具充分側向支撐且為結實或半結實斷面時，則容許撓曲應力由 $0.66F_y$ 減至 $0.6F_y$ 。鋁結構容許撓曲拉應力對強軸則與受拉構材相同，即 $0.606F_y$ ，而弱軸彎曲時，由於其不致於發生側向挫屈，且形狀因子較主軸高，因此提高 30% 達 $0.788F_y$ 。

關於撓曲修正係數 C_b 值，國內鋼結構計算如下：

$$C_b = 1.75 + 1.05 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 0.3 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \leq 2.3 \quad (4-19)$$

式中構材側向未支撐段兩端彎矩小者為 M_1 ，大者為 M_2 ；若側向未支撐段內任一點之彎矩大於或等於 M_2 ， $C_b = 1.0$ 。其計算式與鋁結構計算 C_b (公式 4-7)，主要差異為對未支撐段若其彎矩為非線性之變化，鋁結構使用之計算式可得較精準之側向挫屈強度，相同的，計算上亦較鋼結構為複雜。

設計程序上，鋁結構規範與鋼結構頗為不同，鋼結構並無區分容

許撓曲拉應力與容許撓曲壓應力，規定若滿足結實斷面且有充分側向支撐時，其受拉與受壓之最大容許應力皆為 $0.66F_y$ ；若不具充分側向支撐且為結實或半結實斷面時，其容許撓曲應力由 L/r_T 決定且不得大於 $0.6F_y$ 。由前述章節可知，鋁結構並未檢核側向支撐長度以及是否滿足結實斷面，僅以 $L_b/(r_y\sqrt{C_b})$ 之比值決定是否發生整體側向挫屈。

另外，容許剪應力之檢核亦不同，鋼結構以 $100/\sqrt{F_y}$ 為分界，若小於等於 $100/\sqrt{F_y}$ ，容許剪應力為 $0.40F_y$ ；若大於 $100/\sqrt{F_y}$ ，容許剪應力則為 $F_y(C_v)/2.89 \leq 0.40F_y$ ，其中 C_v 值計算依鋼結構規範 7.5 節計算之。而鋁結構主要採區分鋁合金熱處理類型為設計基礎，但相同的是皆以深厚比 h/t 決定。



4.3.3 鋁結構撓曲構材之計算例

如圖 4.6 所示，簡支梁受中點之集中載重，於端點及載重處皆有側向支撐，梁長為 8 ft，採用 6061-T6 之鋁合金，忽略梁自重。試求其可承受之最大工作載重。斷面為標準型材 I 5×3.7，如圖 4.7。斷面性質： $S_x=5.58 \text{ in}^3$ ， $r_y=0.853 \text{ in}$ ， $t_f=0.32 \text{ in}$ ， $t_w=0.19 \text{ in}$ ， $A=3.15 \text{ in}^2$ ， $F_{ty}=35 \text{ ksi}$ ， $F_{tu}=42 \text{ ksi}$ ， $E=10100 \text{ ksi}$ 。

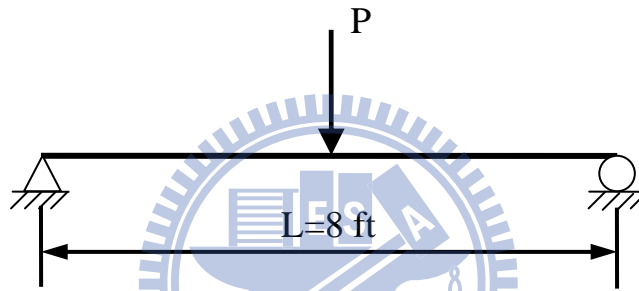


圖 4.6 簡支梁受中點之集中載重

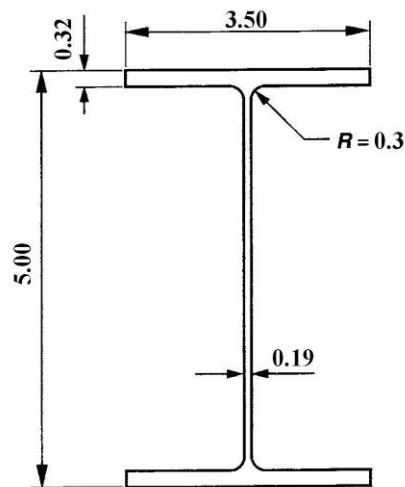


圖 4.7 鋁合金標準型材 I 5×3.7

1. 計算容許撓曲拉應力，參照表 4.10

(1) 肢材受均勻拉力(翼板)

$$F = \frac{F_{ty}}{n_y} = \frac{35}{1.65} = 21.21 \text{ ksi}$$

or

$$F = \frac{F_{tu}}{k_t n_u} = \frac{42}{(1.1)(1.95)} = 19.58 \text{ ksi}$$

(2) 肢材受彎曲(腹板)

$$F = \frac{1.3F_{ty}}{n_y} = \frac{(1.3)(35)}{1.65} = 27.58 \text{ ksi}$$

or

$$F = \frac{1.42F_{tu}}{k_t n_u} = \frac{(1.42)(42)}{(1.1)(1.95)} = 27.8 \text{ ksi}$$

由(1)(2)比較取小值可得容許撓曲拉應力為 19.58 ksi

2. 計算容許撓曲壓應力

(1) 判斷整體側向挫屈之容許應力，參照表 4.11 單一腹板梁構件

承壓之情況。 C_b 值保守取 1.0，故

$$\frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} = \frac{8 \times 12}{0.853} = 112.54$$

挫屈常數 B_c 、 D_c 同第 4.2.3 節之計算，故

$$S_1 = \frac{1.2(B_c - F_{cy})}{D_c} = \frac{1.2(39.37 - 35)}{0.246} = 21.32$$

$$S_2 = 1.2C_c = (1.2)(65.62) = 78.74$$

$\therefore \frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} > S_2$ ，故容許應力為

$$F_c = \frac{C_b \pi^2 E}{n_y \left(\frac{L_b}{1.2 r_y} \right)^2} = \frac{(1.0) \pi^2 (10100)}{(1.65) \left(\frac{8 \times 12}{1.2 \times 0.853} \right)^2} = 6.87 \text{ ksi}$$

(2) 計算斷面加權平均容許應力

a. 分別計算肢材局部挫屈之容許應力，參照表 4.12

$$b = \frac{[(3.5) - (0.19) - 2(0.3)]}{2} = 1.355 \text{ in}$$

$$\frac{b}{t_f} = \frac{1.355}{0.32} = 4.23$$

挫屈常數 B_p 、 D_p 同第 4.2.3 節之計算，故

$$S_1 = \frac{B_p - F_{cy}}{5.1 D_p} = \frac{45.04 - 35}{5.1 \times 0.3} = 6.56$$

$\therefore \frac{b}{t_f} < S_1$ ，故容許應力為

$$F_c = \frac{F_{cy}}{n_y} = \frac{35}{1.65} = 21.21 \text{ ksi}$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{5 - (2)(0.32) - (2)(0.3)}{0.19} = 19.79$$

$$B_{br} = 1.3F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{7} \right] = (1.3)(35) \left[1 + \frac{(35)^{1/3}}{7} \right] = 66.76$$

$$D_{br} = \frac{B_{br}}{20} \left[\frac{6B_{br}}{E} \right]^{1/2} = \frac{66.76}{20} \left[\frac{(6)(66.76)}{10100} \right]^{1/2} = 0.665$$

$$S_1 = \frac{B_{br} - 1.3F_{cy}}{mD_{br}} = \frac{66.76 - (1.3)(35)}{(0.65)(0.665)} = 49.18$$

$\therefore \frac{h}{t_w} < S_1$ ，故容許應力為

$$F_c = \frac{1.3F_{cy}}{n_y} = \frac{(1.3)(35)}{1.65} = 27.57 \text{ ksi}$$

b. 計算斷面加權平均容許應力，如公式(4-4)

$$A_f = 3.5 \times 0.32 = 1.12 \text{ in}^2$$

$$A_w = 0.19[5 - 2(0.32)] = 0.83 \text{ in}^2$$

$$F_{ba} = \frac{2(1.12)(21.21) + (0.83)(27.57)}{2(1.12) + 0.83} = 22.93 \text{ ksi}$$

(3) 檢核局部挫屈是否影響整體側向挫屈

a. 計算局部挫屈容許應力，參照表 4.8

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(0.65h/t)^2} = \frac{\pi^2 (10100)}{[0.65(19.79)]^2} = 391.58 \text{ ksi}$$

b. 利用公式(4-5)判別，

$$\frac{F_{cr}}{n_y} = \frac{391.58}{1.65} = 237.32 > F_c = 6.87, \text{ 故不須計算 } F_{rc}$$

比較(1)整體側向挫屈之容許應力 6.87 ksi 與(2)斷面加權平均容許應力 22.93 ksi，兩者取小值，容許撓曲壓應力由整體側向挫屈之容許應力控制為 6.87 ksi。

3. 計算容許剪應力

$$\frac{h}{t_w} = \frac{5 - (2)(0.32) - (2)(0.3)}{0.19} = 19.79$$

$$B_s = \frac{F_{ty}}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{(F_{ty}/\sqrt{3})^{1/3}}{9.3} \right] = \frac{35}{\sqrt{3}} \left[1 + \frac{(35/\sqrt{3})^{1/3}}{9.3} \right] = 26.13$$

$$D_s = \frac{B_s}{10} \left(\frac{B_s}{E} \right)^{1/2} = \frac{26.13}{10} \left(\frac{26.13}{10100} \right)^{1/2} = 0.133$$

$$S_1 = \frac{B_s - F_{ty}/\sqrt{3}}{1.25D_s} = \frac{26.13 - 35/\sqrt{3}}{(1.25)(0.133)} = 35.63$$

$\therefore \frac{h}{t_w} < S_1$ ，故容許剪應力為

$$F_s = \frac{F_{ty}}{\sqrt{3}n_y} = \frac{35}{\sqrt{3}(1.65)} = 12.25 \text{ ksi}$$

4. 計算容許載重

(1) 容許撓曲應力

容許撓曲應力取 1.容許撓曲拉應力與 2.容許撓曲壓應力兩者

最小值為 6.87 ksi，故容許彎矩為

$$M = FS = 6.87 \times 5.58 = 38.33 \text{ in-kips}$$

容許之工作載重為

$$\frac{PL}{4} = 38.33 \text{ in-kips}$$

$$P = \frac{38.33 \times 4}{96} = 1.6 \text{ kips}$$

(2) 容許剪應力

由 3. 計算得容許剪應力 $F_s = 12.25 \text{ ksi}$ ，故容許剪力為

$$V = F_s A_w = 12.25 \times 0.83 = 10.17 \text{ kips}$$

容許之工作載重為

$$\frac{P}{2} = 10.17 \text{ kips}$$

$$P = 10.17 \times 2 = 20.34 \text{ kips}$$

由(1)(2)可知梁構材之強度由撓曲強度控制，其容許之工作載重為

1.6 kips。



4.4 受軸力與彎矩共同作用之構材

實際結構物中之構件單純承受軸向拉力、壓力或彎矩者實不多見，本章所述之構材為同時承受軸力、彎矩，須同時考慮兩者之效應，故將其視為梁柱構材。梁柱構材可視為撓曲構材與軸力構材兩者之組合，因此梁柱構材除了包括撓曲構材與軸力構材之行為外，尚須考量兩者相互制之行為。

梁柱構材之破壞模式綜合撓曲構材與軸力構材之破壞模式，諸如降伏、撓曲挫屈、側向扭轉挫屈、局部挫屈以及斷裂等。

4.4.1 鋁結構受軸力與彎矩共同作用之構材

鋁結構規範對梁柱構材之設計，假設構材 X-X 軸與 Y-Y 軸承受最大彎矩 M_x 、 M_y 及軸向載重 P ，則構材斷面之應力為

$$\frac{P}{A} + \frac{M_x}{S_x} + \frac{M_y}{S_y} \leq f_{\max} \quad (4-20)$$

或

$$f_a + f_{bx} + f_{by} \leq f_{\max} \quad (4-21)$$

其中， P 為軸向載重， M_x 與 M_y 分別為對 X-X 軸、Y-Y 軸之彎矩， S_x 與 S_y 分別為對 X-X 軸、Y-Y 軸之斷面模數， f_a 為軸向應力， f_{ax} 與 f_{by} 為 X-X 軸及 Y-Y 軸之撓曲應力， f_{\max} 則為斷面最大容許應力。

(一)軸壓力與彎矩共同作用

由於鋁結構容許撓曲應力與容許壓應力之規定不同，故將(4-21)式修正為

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4-22)$$

上述公式必須滿足 $f_a/F_a \leq 0.15$ 之規定，其中 F_a 為容許軸壓應力，應依 4.2 節之計算， F_{bx} 與 F_{by} 則為 X-X 軸及 Y-Y 軸之容許撓曲應力，應依 4.3 節之計算。

鋁結構規範規定當 $f_a/F_a > 0.15$ 時，則必須考慮次要彎矩之影響，因此將 f_{bx} 與 f_{by} 乘以一放大係數如下：

$$\frac{1}{1 - \frac{f_a}{F_e}} \quad (4-23)$$

其中 F_e 為 Euler 公式除以安全係數 1.95，得 $0.513\pi^2 E/(kL/r)^2$ 。且為了避免高估次要彎矩之影響，亦採用 C_m 為折減係數加以修正， $C_m = 0.6 - 0.4(M_1/M_2)$ ，其中 M_1/M_2 為構材未支撐段兩端最小與最大彎矩之比值，若為單曲率之情況 (M_1/M_2) 取負，雙曲率之情況 (M_1/M_2) 則取正；或者構材端可側移， $C_m = 0.85$ 。

經由放大係數與折減係數修正後，得

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{F_{bx} \left(1 - \frac{f_a}{F_{ex}}\right)} + \frac{C_{my} f_{by}}{F_{by} \left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right)} \leq 1.0 \quad (4-24)$$

且須同時滿足下式

$$\frac{f_a}{F_{ao}} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4-25)$$

式中 F_{ao} 為構材容許軸壓應力，為 4.2 節利用加權平均法所計算之容許應力。

(二) 軸拉力與彎矩共同作用

若為軸拉力與彎矩共同作用則應符合如下規定

$$\frac{f_a}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (4-26)$$

其中 F_t 為構材僅受軸拉力之容許拉應力，依 4.1 節規定計算，而 f_a 、 f_b 及 F_b 定義同上。

4.4.2 鋁結構與鋼結構受軸力與彎矩共同作用構材設計規範之比較

設計邏輯方面，鋼結構規範與鋁結構規範均採用相同之規定，惟折減係數 C_m 有些微不同，國內鋼結構除了規定 $C_m = 0.6 - 0.4(M_1/M_2)$ 以及可側向位移之構材 $C_m = 0.85$ 外，尚針對兩端支承間有橫向載重時， C_m 值則可採用下列規定：(1) 構材兩端有束制時， $C_m = 0.85$ ；(2) 構材兩端無束制時， $C_m = 1.0$ 。鋁結構與鋼結構受軸力與彎矩共同作用構材設計規範之比較如表 4.14。



表 4.14 鋁結構與鋼結構受軸力與彎矩共同作用構材設計規範之比較

	鋁結構 ASD	鋼結構 ASD
受軸力與彎矩共同作用之構材	(一)軸壓力與彎矩共同作用	(一)軸壓力與彎矩共同作用
	當 $f_a / F_a > 0.15$ 時	當 $f_a / F_a > 0.15$ 時
	$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{F_{bx} \left(1 - \frac{f_a}{F_{ex}}\right)} + \frac{C_{my} f_{by}}{F_{by} \left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right)} \leq 1.0$	$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_{mx} f_{bx}}{F_{bx} \left(1 - \frac{f_a}{F_{ex}}\right)} + \frac{C_{my} f_{by}}{F_{by} \left(1 - \frac{f_a}{F_{ey}}\right)} \leq 1.0$
	$\frac{f_a}{F_{ao}} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$	$\frac{f_a}{0.6F_y} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$
	當 $f_a / F_a \leq 0.15$ 時	當 $f_a / F_a \leq 0.15$ 時
	$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$	$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$
(二)軸拉力與彎矩共同作用	(二)軸拉力與彎矩共同作用	
$\frac{f_a}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$	$\frac{f_a}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0$	

4.4.3 鋁結構受軸力與彎矩共同作用構材之計算例

如圖 4.8 所示之梁柱構材受端點工作載重，且在端點有足夠之側向支撐，梁長為 8 ft，梁斷面為標準型材 I 12×11.7，如圖 4.4。採用 6061-T6 之鋁合金，試以規範檢核其安全性。假設此構件之有效長度係數分別為 $k_x = 1.0$ ， $k_y = 0.8$ 。斷面性質： $r_x = 5.07$ in， $r_y = 1.65$ in， $A = 9.92$ in²， $S_x = 42.6$ in³， $S_y = 7.69$ in³， $F_y = 35$ ksi， $E = 10100$ ksi。

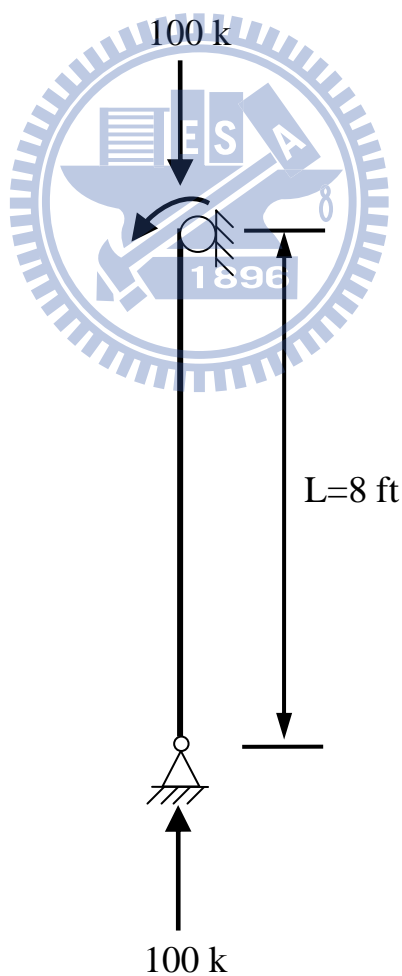


圖 4.8 梁柱構材例

1. 檢討柱效應

(1) 判斷整體側向挫屈之容許應力

$$\frac{k_x L}{r_x} = \frac{(1)(8)(12)}{5.07} = 18.93$$

$$\frac{k_y L}{r_y} = \frac{(0.8)(8)(12)}{1.65} = 46.54 \quad (\text{控制})$$

$\therefore S_1 = 0 < \frac{kL}{r} < S_2 = 65.62$ ，故採公式(4-3)計算容許應力

$$F_a = \frac{B_c - \frac{D_c kL}{r}}{n_u} = \frac{39.37 - 0.246 \times 46.54}{1.95} = 14.32 \text{ ksi}$$

(2) 計算斷面加權平均容許應力

參照第 4.2.3 節所計算為 16.75 ksi。

比較(1)整體側向挫屈之容許應力與(2)斷面加權平均容許應力兩者

取小值，容許壓應力由整體側向挫屈之容許應力控制為 14.32 ksi。

$$f_a = \frac{P}{A} = \frac{100}{9.92} = 10.08 \text{ ksi}$$

$$\frac{f_a}{F_a} = \frac{10.08}{14.32} = 0.7 > 0.15$$

2. 檢查梁效應

(1) 計算容許撓曲拉應力

此例採 6061-T6 之鋁合金，故可參照第 4.3.3 節容許撓曲拉應力之計算，為 19.58 ksi。

(2) 計算容許撓曲壓應力

a. 判斷整體側向挫屈之容許應力，參照表 4.11 單一腹板梁

構件承壓之情況。 C_b 值保守取 1.0，故

$$\frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} = \frac{(8)(12)}{(1.65)(1)} = 58.18$$

$\therefore S_1 = 21.32 < \frac{L_b}{r_y \sqrt{C_b}} < S_2 = 78.74$ ，故採公式(4-10)計算

$$F_b = \frac{B_c - \frac{D_c L_b}{1.2 r_y \sqrt{C_b}}}{n_y} = \frac{39.37 - \frac{(0.246)(8)(12)}{(1.2)(1.65)(1)}}{1.65} = 16.63 \text{ ksi}$$

b. 計算斷面加權平均容許應力

$$b = \frac{7 - 0.29 - 2(0.4)}{2} = 2.955 \text{ in}$$

$$\frac{b}{t_f} = \frac{2.955}{0.47} = 6.29$$

挫屈常數 B_p 、 D_p 同第 4.2.3 節之計算，故

$$S_1 = \frac{B_p - F_{cy}}{5.1 D_p} = \frac{45.04 - 35}{5.1 \times 0.3} = 6.56$$

$\therefore \frac{b}{t_f} < S_1$ ，故容許應力為

$$F_c = \frac{F_{cy}}{n_y} = \frac{35}{1.65} = 21.21 \text{ ksi}$$

$$\frac{h}{t_w} = \frac{12 - (2)(0.47) - (2)(0.4)}{0.29} = 35.38$$

$$B_{br} = 1.3F_{cy} \left[1 + \frac{(F_{cy})^{1/3}}{7} \right] = (1.3)(35) \left[1 + \frac{(35)^{1/3}}{7} \right] = 66.76$$

$$D_{br} = \frac{B_{br}}{20} \left[\frac{6B_{br}}{E} \right]^{1/2} = \frac{66.76}{20} \left[\frac{(6)(66.76)}{10100} \right]^{1/2} = 0.665$$

$$S_1 = \frac{B_{br} - 1.3F_{cy}}{mD_{br}} = \frac{66.76 - (1.3)(35)}{(0.65)(0.665)} = 49.18$$

$\therefore \frac{h}{t_w} < S_1$ ，故容許應力為

$$F_c = \frac{1.3F_{cy}}{n_y} = \frac{(1.3)(35)}{1.65} = 27.57 \text{ ksi}$$

$$A_f = 7 \times 0.47 = 3.29 \text{ in}^2$$

$$A_w = 0.29[12 - 2(0.47)] = 3.21 \text{ in}^2$$

$$F_{ba} = \frac{2(3.29)(21.21) + (3.21)(27.57)}{2(3.29) + 3.21} = 23.29 \text{ ksi}$$

比較(1)容許撓曲拉應力(2)容許撓曲壓應力兩者取小值，容許撓曲

應力由整體側向挫屈之容許應力控制為 16.63 ksi。

$$f_{bx} = \frac{(20)(12)}{42.6} = 5.63$$

$$\frac{f_{bx}}{F_{bx}} = \frac{5.63}{16.63} = 0.34$$

3. 檢查梁柱效應

$$C_m = 0.6 - 0.4 \frac{M_1}{M_2} = 0.6$$

$$F_{ex} = \frac{\pi^2 E}{n_u (kL/r)^2} = \frac{\pi^2 E}{1.95(18.93)^2} = 142.65 \text{ ksi}$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m}{1 - \frac{f_a}{F_{ex}}} \frac{f_{bx}}{F_{bx}} = 0.7 + 0.65 \times 0.34 = 0.921 \leq 1.0, \text{ ok}$$

$$\frac{f_a}{F_{ao}} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} = \frac{10.08}{16.75} + 0.34 = 0.941 \leq 1.0, \text{ ok}$$

4.5 接合設計

前述章節已依序介紹受拉構材、受壓構材、撓曲構材、以及梁柱構材等基本構材，然而構材與構材間尚需藉由接合連接，故接合設計亦是重要的一環。鋁結構接合方式有鉚釘、螺栓、螺絲釘以及鐸接等型式，隨著接合方式的不同，產生之破壞模式也不同，因此接合設計即為防止破壞發生並發揮傳遞載重為目的，本章節將分別對鋁結構接合方式之基本設計作介紹。

4.5.1 鋁結構接合設計

美國鋁結構之接合設計主要分為鉚釘接合、螺栓接合、自攻螺絲接合(Tapping Screw connections)以及鐸接接合，依序簡述如下：

(一)鉚釘接合

就鋁結構而言，早期以鉚釘接合為主，但由於施工易產生噪音且施工品質難以控制，故鉚釘接合已漸漸被淘汰，而由螺栓或鐸接等取代，但有些結構仍使用鉚釘接合。常用於鉚釘的材料有鋁合金、碳鋼、不銹鋼等，其具有良好之塑性以便鉚合。美國鋁結構尚保留鉚釘接合之規定，其規定容許剪應力為 $F_{su} / (1.2n_u)$ ， F_{su} 為極限剪力強度，如表 4.15 所示。

表 4.15 鉚釘之設計應力(ksi)(AA 2005)

Designation Before Driving	Minimum Shear Ultimate Strength ¹ F_{su} (ksi)	Building Type Structures	Bridge Type Structures
		Design Shear Stress on Effective Area ² (ksi)	Design Shear Stress on Effective Area ³ (ksi)
2017-T4	33	14	12.5
2024-T42	37	16	14
2117-T4	26	11	10
2219-T6	30	13	11.5
6053-T61	20	8.5	7.5
6061-T6	25	10.5	9.5
7050-T7	39	17	15
7075-T6	42	18	16
7075-T73	41	18	16
7178-T6	46	20	17

1. From ASTM B316/B316M for heat treated alloys.

2. $SF = 2.34$

3. $SF = 2.64$

表 4.15 鉚釘之設計應力(MPa)(AA 2005) (續)

Designation Before Driving	Minimum Shear Ultimate Strength ¹ F_{su} (MPa)	Building Type Structures	Bridge Type Structures
		Design Shear Stress on Effective Area ² (MPa)	Design Shear Stress on Effective Area ³ (MPa)
2017-T4	225	95	85
2024-T42	255	110	95
2117-T4	180	75	70
2219-T6	205	90	80
6053-T61	135	60	50
6061-T6	170	75	65
7050-T7	270	115	100
7075-T6	290	125	110
7075-T73	280	120	105
7178-T6	315	135	120

1. From ASTM B316/B316M for heat treated alloys.

2. $SF = 2.34$

3. $SF = 2.64$

(二)螺栓接合

自螺栓發明後，結構物除了使用銲接以外大部分皆使用螺栓接合。目前美國鋁結構所採用之螺栓材料主要為鋁合金、碳鋼以及不銹鋼，若使用鋁合金材料應符合 ASTM F468 且為 2024-T4、6061-T6 或 7075-T73 之合金。

螺栓接合可能產生之破壞模式，基本上有三類：(1)拉力破壞(2)剪力破壞以及(3)支承破壞。當螺栓受拉力時應考慮螺牙處發生應力集中之影響，故美國鋁結構規範規定容許拉應力為 $F_{tu} / (1.2n_u)$ ，如表 4.16。而容許拉力即容許拉應力乘以其有效面積，有效面積為 $\pi/4(D - 1.191/n)^2$ ，其中 D 為螺栓之標稱直徑(英吋)， n 為每英吋之螺紋數。

若構材搭接時載重超過螺栓之容許應力，且構材接觸面發生剪斷之情況，稱為剪力破壞。為避免發生剪力破壞，故規定容許剪應力為 $F_{su} / (1.2n_u)$ ，如表 4.16。另外，計算容許剪力時，應注意螺紋在剪力面與螺紋不在剪力面之差異，螺紋在剪力面須計算有效面積，若螺紋不在剪力面則使用螺栓斷面標稱面積計算即可。

表 4.16 螺栓之設計應力(ksi)(AA 2005)

Alloy and Temper	Minimum Shear Ultimate Strength ¹ F_{su} (ksi)	Minimum Tensile Ultimate Strength ¹ F_{tu} (ksi)	Building Type Structures		Bridge Type Structures	
			Design Shear Stress on Effective Area ² (ksi)	Design Tensile Stress on Root Area ² (ksi)	Design Shear Stress on Effective Area ³ (ksi)	Design Tensile Stress on Root Area ³ (ksi)
2024-T4	37	62	16	26	14	23
6061-T6	25	42	10.5	18	9.5	16
7075-T73	41	68	18	29	16	26

1. From ASTM B316/B316M and F468
2. $SF = 2.34$
3. $SF = 2.64$

表 4.16 螺栓之設計應力(MPa)(AA 2005) (續)

Alloy and Temper	Minimum Shear Ultimate Strength ¹ F_{su} (MPa)	Minimum Tensile Ultimate Strength ¹ F_{tu} (MPa)	Building Type Structures		Bridge Type Structures	
			Design Shear Stress on Effective Area ² (MPa)	Design Tensile Stress on Root Area ² (MPa)	Design Shear Stress on Effective Area ³ (MPa)	Design Tensile Stress on Root Area ³ (MPa)
2024-T4	255	425	110	180	95	160
6061-T6	170	290	75	125	65	110
7075-T73	280	470	120	200	105	180

1. From ASTM B316/B316M
2. $SF = 2.34$
3. $SF = 2.64$

(三)自攻螺絲接合

美國鋁結構也允許使用自攻螺絲做接合，所謂自攻螺絲即在預鑽孔之構材自行攻鑽出所配合之螺紋，使構件間相互緊密配合，主要常用於較薄之版件連接。由於其自行攻出其配合螺紋，因此在接合上具有高防鬆能力，且可以除卸。其破壞模式可分為：(1)拔出破壞，(2)拉破破壞，(3)剪力破壞。

(四)鐸接接合

所謂鐸接接合係構材間藉由鐸材及局部加熱使表面熔融而接合，其也是鋁結構常用的方法之一。採鐸接接合之優點為不需鑽孔、節省材料以及能擁有較連續之結構，但由於高溫之影響易發生殘留應力。鐸接接合承受外力時之破壞不外乎鐸道破壞與母材(即構材本身)破壞兩種，而鐸道破壞之破壞模式為剪力破壞、拉力破壞等。

美國鋁結構之鐸接方法主要分為兩種，第一種為 TIG (Tungsten Inert Gas)，稱為惰性鎢氣體鐸接，其使用非消耗性之鎢電極及保護性之情氣(氬氣，氬氣或混合氣)作為屏蔽，一般較常使用氬氣，亦稱氬鐸，如圖 4.9(a)；第二種為 MIG (Metal Inert Gas)，稱為惰性金屬氣體鐸接，係可自動供應鐸線並由氣體保護熔池的鐸接法，一般使用 CO₂ 氣體，亦稱 CO₂ 鐸，如圖 4.9(b)。此兩種鐸接方法甚為穩定，且

品質良好。

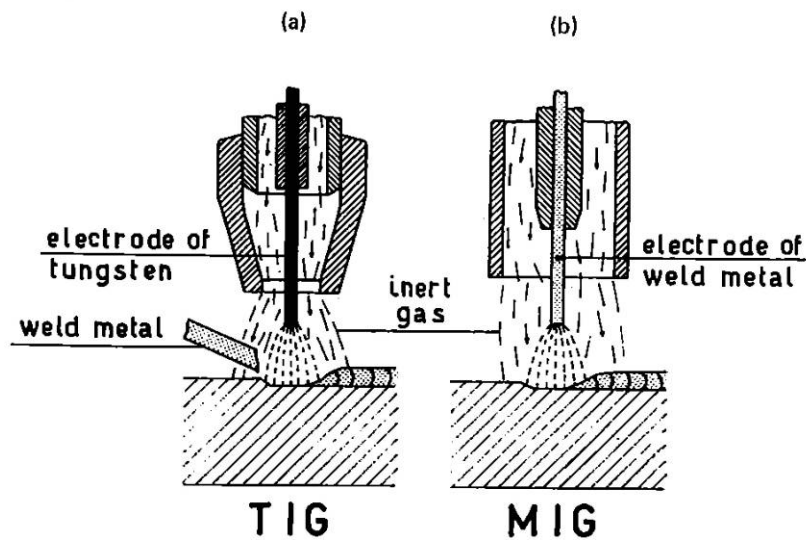


圖 4.9 鋁結構銲接方法(Mazzolani 1995)

鋁結構之銲接型式，依銲材在欲銲接母材上形成之形狀，大致分為開槽銲(grove weld)、填角銲(fillet weld)以及塞槽銲(Plug and Slot Welds)等，另外，由於開槽銲所需之加工成本較高，故通常採填角銲。就設計而言，銲材所承受之應力不外乎拉力、壓力及剪力等，故若此三項應力值符合容許應力範圍，則接合處之強度即滿足要求。

美國鋁結構銲接接合之強度均假設作用在銲材之有效斷面積上，隨著銲接型式不同，其容許應力及有效斷面積皆有不同之規定，分別說明如下：

一、開槽鉚

開槽鉚之有效斷面積為有效鉚長與鉚接尺寸 S_w (如圖 4.10) 之乘積，而有效鉚長為垂直拉、壓力方向或平行剪力方向之長度。

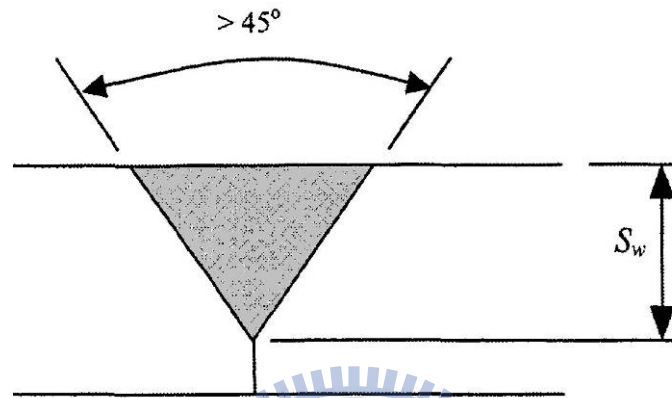


圖 4.10 開槽鉚示意圖(AA 2005)

其容許拉、壓力強度 P_{gw} 為

$$\frac{F_{uw} A_{we}}{n_u} \quad (4-27)$$

其中， F_{uw} 為母材拉力極限強度與鉚材拉力極限強度兩者之小值；母材拉力極限強度參照表 4.16，鉚材拉力極限強度則參照表 4.17 所示。

A_{we} 為鉚接有效斷面積， n_u 安全係數則與前述相同為 1.95。

容許剪力強度 V_{gw} 為

$$\frac{F_{suw} A_{we}}{n_u} \quad (4-28)$$

其中， F_{stw} 為母材銲接剪力極限強度與銲材剪力極限強度兩者之小值；母材銲接剪力極限強度參照表 4.17，銲材剪力極限強度則參照表 4.18 所示。 A_{we} 、 n_u 定義同上。



表 4.17 銲接鋁合金之機械性質(ksi)(AA 2005)

ALLOY AND TEMPER	PRODUCT	THICKNESS RANGE in.	TENSION		COMPRESSION	SHEAR
			F_{LW}^1 ksi	F_{TYW}^2 ksi	F_{CYW}^2 ksi	F_{SUW} ksi
1100-H12, H14	All		11	3.5	3.5	8
3003-H12, H14, H16, H18	All		14	5	5	10
Alclad						10
3003-H12, H14, H16, H18	All		13	4.5	4.5	
3004-H32, H34, H36, H38	All		22	8.5	8.5	14
Alclad						13
3004-H32, H34, H36, H38	All		21	8	8	
3005-H25	Sheet		17	6.5	6.5	12
5005-H12, H14, H32, H34	All		15	5	5	9
5050-H32, H34	All		18	6	6	12
5052-O, H32, H34	All		25	9.5	9.5	16
5083-O, H111	Extrusions		39	16	15	23
5083-O, H116, H32, H321	Sheet & Plate	0.188-1.500	40	18	18	24
5083-O, H116, H32, H321	Plate	1.501-3.000	39	17	17	24
5086-O, H111	Extrusions		35	14	13	21
5086-H112	Plate	0.250-2.000	35	14	14	21
5086-O, H32, H34, H116	Sheet & Plate		35	14	14	21
5154-H38	Sheet		30	11	11	19
5454-O, H111	Extrusions		31	12	11	19
5454-H112	Extrusions		31	12	12	19
5454-O, H32, H34	Sheet & Plate		31	12	12	19
5456-O, H116, H32, H321	Sheet & Plate	0.188-1.500	42	19	18	25
5456-O, H116, H32, H321	Plate	1.501-3.000	41	18	17	25
6005-T5	Extrusions	up thru 0.250	24	13	13	15
6061-T6, T651, T6510, T6511 ³	All		24	15	15	15
6061-T6, T651, T6510, T6511 ⁴	All	over 0.375	24	11	11	15
6063-T5, T52, T6	All		17	8	8	11
6351-T5, T6 ³	Extrusions		24	15	15	15
6351-T5, T6 ⁴	Extrusions	over 0.375	24	11	11	15
6463-T6	Extrusions	0.125-0.500	17	8	8	11
7005-T53	Extrusions	up thru 0.750	40	24	24	22

1. Filler wires are listed in Table 7.1-1. Values of F_{LW} are AWS D1.2 weld qualification values.
2. 0.2% offset in 2 in. gage length across a groove weld.
3. Values when welded with 5183, 5356, or 5556 alloy filler wire, regardless of thickness. Values also apply to thicknesses less than or equal to 0.375 in. when welded with 4043, 5554, or 5654 alloy filler wire.
4. Values when welded with 4043, 5554, or 5654 alloy filler wire.

表 4.17 銲接鋁合金之機械性質(MPa)(AA 2005) (續)

ALLOY AND TEMPER	PRODUCT	THICKNESS RANGE mm	TENSION		COMPRESSION	SHEAR
			$F_{t,w}^1$ MPa	$F_{t,w}^2$ MPa	F_{cw}^2 MPa	F_{sw} MPa
1100-H12, H14	All		75	25	25	55
3003-H12, H14, H16, H18	All		95	35	35	70
Alclad						
3003-H12, H14, H16, H18	All		90	30	30	70
3004-H32, H34, H36, H38	All		150	60	60	95
Alclad						
3004-H32, H34, H36, H38	All		145	55	55	90
3005-H25	Sheet		115	45	45	85
5005-H12, H14, H32, H34	All		105	35	35	62
5050-H32, H34	All		125	40	40	85
5052-O, H32, H34	All		170	65	65	110
5083-O, H111	Extrusions		270	110	110	160
5083-O, H116, H32, H321	Sheet & Plate	6.30-38.00	270	115	115	165
5083-O, H116, H32, H321	Plate	38.00-80.00	270	115	115	165
5086-O, H111	Extrusions		240	95	85	145
5086-H112	Plate	6.30-50.00	240	95	95	145
5086-O, H32, H34, H116	Sheet & Plate		240	95	95	145
5154-H38	Sheet		205	75	75	130
5454-O, H111	Extrusions		215	85	85	130
5454-H112	Extrusions		215	85	85	130
5454-O, H32, H34	Sheet & Plate		215	85	85	130
5456-O, H116, H32, H321	Sheet & Plate	6.30-38.00	285	125	125	170
5456-O, H116, H32, H321	Plate	38.00-80.00	285	125	120	170
6005-T5	Extrusions	up thru 12.50	165	90	90	105
6061-T6, T651, T6510, T6511 ³	All		165	105	105	105
6061-T6, T651, T6510, T6511 ⁴	All	over 9.50	165	80	80	105
6063-T5, T52, T6	All		115	55	55	75
6351-T5, T6 ³	Extrusions		165	105	105	105
6351-T5, T6 ⁴	Extrusions	over 9.50	165	80	80	105
6463-T6	Extrusions	3.20-12.50	115	55	55	75
7005-T53	Extrusions	up thru 20.00	275	165	165	155

1. Filler wires are listed in Table 7.1-1. Values of $F_{t,w}$ are AWS D1.2 weld qualification values.

2. 0.2% offset in 50 mm gage length across a groove weld.

3. Values when welded with 5183, 5356, or 5556 alloy filler wire, regardless of thickness. Values also apply to thicknesses less than or equal to 9.5 mm when welded with 4043, 5554, or 5654 alloy filler wire.

4. Values when welded with 4043, 5554, or 5654 alloy filler wire.

表 4.18 各鐸材之強度表(ksi)(AA 2005)

Filler	Minimum Tensile Ultimate Strength (ksi)	Minimum Shear Ultimate Strength (ksi)
1100	11	7.5
2319	35	16
4043	24	11.5
4047	–	13
4643	–	13.5
5183	40	21
5356	35	17
5554	31	17
5556	42	20
5654	30	12

表 4.18 各鐸材之強度表(MPa)(AA 2005) (續)

Filler	Minimum Tensile Ultimate Strength (MPa)	Minimum Shear Ultimate Strength (MPa)
1100	75	50
2319	240	110
4043	165	80
4047	–	90
4643	–	95
5183	275	145
5356	240	115
5554	215	115
5556	290	140
5654	205	85

二、填角鉸

填角鉸亦稱為角鉸，主要使用於構材搭接或 T 型接頭之鉸接，其有效斷面積等於有效鉸喉與有效鉸長之乘積，而有效鉸喉之決定乃基於實驗證明填角鉸之抗拉與抗壓比抗剪強度大，故填角鉸理論上破壞模式應為沿著與載重呈 45° 之平面破壞，如圖 4.11。因此，有效鉸喉即鉸道根部至鉸道表面之最短距離，故有效鉸喉 t_e 為

$$\frac{S_w}{\sqrt{2}} \quad (4-29)$$

其中 S_w 為鉸接尺寸。

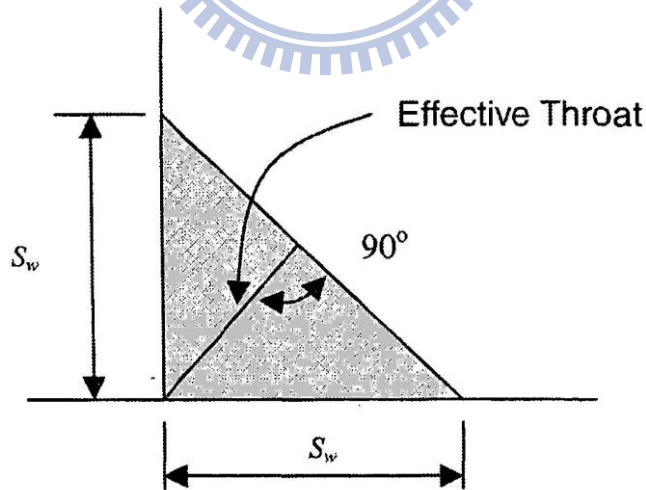


圖 4.11 填角鉸有效鉸喉之示意圖(AA 2005)

美國鋁結構規定其容許剪力強度 V_w 為

$$\frac{F_{sw}L_{we}}{n_u} \quad (4-30)$$

式中， F_{sw} 之值取下列三者之小值：(1) 鋁材剪力極限強度與有效鋁喉之乘積，(2) 母材鋁接剪力極限強度與鋁接尺寸之乘積，(3) 母材鋁接拉力極限強度與鋁接尺寸之乘積。母材鋁接剪力與拉力極限強度參照表 4.17，鋁材之剪力極限強度則參照表 4.18 所示。

三、塞槽鋁

塞槽鋁通常用於彌補構材搭接採用填角鋁之接合處剪力強度不足，較少使用於主要傳力機制。美國鋁結構規定其槽孔不得大於鋁接厚度之十倍。設計上，其有效斷面積 A_{we} 為其接合面上槽孔之標稱面積，如圖 4.12 所示。

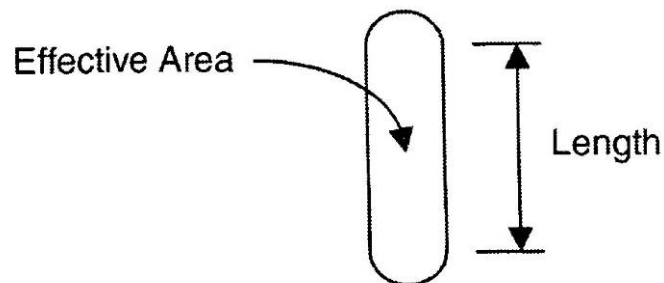


圖 4.12 塞槽鋁之平面示意圖(AA 2005)

其容許剪力強度 V_w 為

$$\frac{F_{sw}A_{we}}{n_u} \quad (4-31)$$

其中， F_{sw} 取鋁材與母材兩者剪力極限強度之小值。

此外，經由上述接合方式組合之結構，亦可能因構件承受拉力及剪力而發生塊狀剪力撕裂，其破壞模式可能沿著螺栓孔周圍或沿著鋁接接合。美國鋁結構計算塊狀剪力撕裂之強度 P_{sr} ，乃採直接判斷剪力撕裂強度與張力撕裂強度大小，再依破壞模式選擇適用公式。

螺栓接合：

若 $F_{tu}A_{nt} \geq F_{su}A_{nv}$ ，



$$P_{sr} = \left[\left(F_{ty} / \sqrt{3} \right) A_{gv} + F_{tu}A_{nt} \right] / n_u \quad (4-32)$$

否則，

$$P_{sr} = (F_{su}A_{nv} + F_{tu}A_{nt}) / n_u \quad (4-33)$$

鋁接接合：

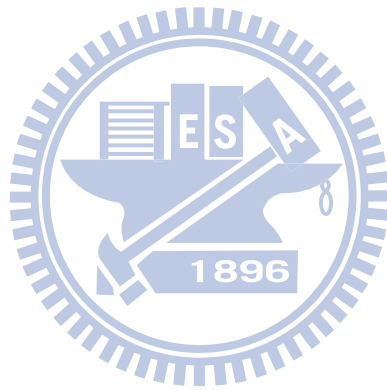
若 $F_{tu}A_{nt} \geq F_{su}A_{nv}$ ，

$$P_{sr} = \left[\left(F_{ty} / \sqrt{3} \right) A_{gv} + F_{tu}A_{gt} \right] / n_u \quad (4-34)$$

否則，

$$P_{sr} = (F_{su} A_{nv} + F_{tu} A_{gt}) / n_u \quad (4-35)$$

其中， A_{gv} 為剪力全斷面積， A_{gt} 為張力全斷面積， A_{nv} 為剪力淨斷面積， A_{nt} 為張力淨斷面積。



4.5.2 鋁結構與鋼結構接合設計規範之比較

目前國內鋼結構規範已將鉚釘接合淘汰，主要採用高強度螺栓接合及銲接接合，而美國鋁結構規範尚保留鉚釘接合且多了自攻螺絲接合之接合方式。

就銲接接合而言，鋼結構銲接方法較多，如遮護金屬電弧銲接 (Shield Metal Arc Welding, SMAW)、潛弧銲接 (Submerged Arc Welding, SAW)、包藥銲線電弧銲接 (Flux Cored Arc Welding, FCAW)、氣體遮護金屬電弧銲接 (Gas Metal Arc Welding, GMAW)、電熱氣體電弧銲接 (Electrogas Welding, EGW) 等，而鋁結構僅使用 TIG 與 MIG 兩種銲接方法。

關於螺栓接合塊、銲接接合之剪力撕裂強度計算，國內鋼結構採剪力面之強度與張力面之強度相加，即 $T_{all} = 0.3F_u A_{nv} + 0.5F_u A_{nt}$ ，此種計算法較為粗略，無法判斷何種破壞模式會控制，因塊狀剪力撕裂發生時，通常僅剪力撕裂或張力撕裂之一先發生。美國鋁結構採用之方法為先行比較剪力撕裂強度與張力撕裂強度大小，故所得強度較為精準，其計算方式較類似鋼結構極限設計法。

此外，鋼結構之螺栓接合，考量承受拉力與剪力之互制行為，故將容許剪應力乘以一折減係數 $(1 - f_t A_b / T_b)$ ，而美國鋁結構規範並無

此相關規定。



第五章 結論與建議

本研究藉由深入探討美國鋁結構容許應力設計法規範，提出以下結論與建議。

5.1 結論

1. 考量國外現有之各國鋁結構設計規範與國內鋼結構設計規範之設計原理，以美國鋁結構設計規範較為值得國內擬定鋁結構設計規範之參考。
2. 鋁結構受拉構材與鋼結構設計邏輯相同，考量受拉構材全斷面降伏與淨斷面斷裂之破壞模式。
3. 鋁結構受壓構材考量降伏、非彈性挫屈以及彈性挫屈三種模式，而有不同之公式計算容許壓應力，鋼結構僅採非彈性挫屈與彈性挫屈兩種模式。
4. 鋁結構撓曲構材考量容許撓曲拉應力與撓曲壓應力，且主要採區分鋁合金熱處理類型為設計基礎，設計邏輯與鋼結構明顯不同。
5. 鋁結構受軸力與彎矩共同作用之構材與鋼結構設計邏輯相同，均採相同之規定。

6. 鋁結構接合設計，因鋁材料之特性尚保留鉚釘接合並允許使用自攻螺栓。

5.2 建議

1. 美國鋁結構設計規範除容許應力設計法外尚有載重與係數設計法，後續之研究可探討鋁結構之載重與係數設計法
2. 歐洲鋁結構設計規範除了包含構材之設計外，尚包含防火設計，國內鋁結構規範擬訂時可參考歐洲規範之防火設計。



符號說明

A_f = 翼板面積

A_{gt} = 張力全斷面積

A_{gv} = 剪力全斷面積

A_{nt} = 張力淨斷面積

A_{nv} = 剪力淨斷面積

A_w = 腹板面積

A_{we} = 銲接有效斷面積

B_{br} = 肢材受彎曲情況下之挫屈常數

B_c = 受壓構材承壓情況下之挫屈常數

B_p = 肢材承壓情況下之挫屈常數

B_s = 肢材受剪力情況下之挫屈常數

B_t = 曲面肢材承壓情況下之挫屈常數

B_{tb} = 曲面肢材受彎曲情況下之挫屈常數

C_b = 撓曲修正係數



C_{br} = 肢材受彎曲情況下之挫屈模式分界點

C_c = 受壓構材承壓情況下之挫屈模式分界點

$$C_m = 0.6 - 0.4(M_1/M_2)$$

=0.85，構材端可側移

C_p = 肢材承壓情況下之挫屈模式分界點

C_s = 肢材受剪力情況下之挫屈模式分界點

C_t = 曲面肢材承壓情況下之挫屈模式分界點

C_{tb} = 曲面肢材受彎曲情況下之挫屈模式分界點

D_{br} = 肢材受彎曲情況下，非彈性挫屈直線公式之斜率

D_c = 受壓構材承壓情況下，非彈性挫屈直線公式之斜率

D_p = 肢材承壓情況下，非彈性挫屈直線公式之斜率

D_s = 肢材受剪力情況下，非彈性挫屈直線公式之斜率

D_t = 曲面肢材承壓情況下，非彈性挫屈直線公式之斜率

D_{tb} = 曲面肢材受彎曲情況下，非彈性挫屈直線公式之斜率

E = 鋁合金之彈性模數

E_s =鋼材之彈性模數

F_{ao} =構材容許軸壓應力，採 4.2 節加權平均法所計算之容許應力

F_{ba} =撓曲構材之加權平均容許應力

F_{bx} = X-X 軸之容許撓曲應力

F_{by} = Y-Y 軸之容許撓曲應力

F_c =容許壓應力

F_{ca} =受壓構材之加權平均容許應力

F_{cr} =肢材之彈性局部挫屈應力

F_{cy} =鋁合金之壓力降伏強度

F_e =彈性挫屈應力除以 n_u ，即 $\frac{\pi^2 E}{n_u (kL/r)^2}$

F_{ec} =彈性側向挫屈應力

F_{rc} =受壓構材考慮局部挫屈影響之容許應力

F_{su} =鋁合金之極限剪力強度

F_t =構材僅承受軸力之容許拉應力

F_{ty} =鋁合金之拉力降伏強度

F_{tu} = 鋁合金之極限強度

F_{tuw} = 開槽鋁之極限拉力強度

F_u = 鋼材之抗拉強度

F_y = 鋼材之降伏強度

K = 鋼結構之有效長度係數

L = 構材之未支撐長度

L_b = 撓曲構材之側向支撐間距

M_A = 1/4 點處彎矩值

M_B = 終點彎矩值

M_C = 3/4 處彎矩值

M_{max} = 未支撐段之最大彎矩載重

M_x = 對 X-X 軸之彎矩

M_y = 對 Y-Y 軸之彎矩

M_1 = 構材側向未支撐段兩端彎矩小者

M_2 = 構材側向未支撐段兩端彎矩大者



P_{gw} = 開槽鐸之容許拉力強度

P_{sr} = 塊狀剪力撕裂強度

S_x = 對 X-X 軸之斷面模數

S_y = 對 Y-Y 軸之斷面模數

S_w = 鐸接尺寸

V = 剪力

V_{gw} = 開槽鐸之容許剪力強度

V_w = 填角鐸之容許剪力強度

V_w = 塞槽鐸之容許剪力強度

f_a = 實際軸向應力

f_{ax} = X-X 軸之實際撓曲應力

f_{by} = Y-Y 軸之實際撓曲應力

f_{max} = 斷面最大應力

f_s = 剪應力

h = 腹板在兩翼板間之淨深度



k = 鋁結構之有效長度係數

n_a = 發生面外變形之安全係數

n_u = 極限強度之安全係數

n_y = 降伏強度之安全係數

r = 斷面迴轉半徑

r_y = 斷面對 Y-Y 軸之旋轉半徑

t_e = 填角鉚之有效鉚喉

t_f = 翼板厚

t_w = 腹板厚



參考文獻

- Aluminum Association (AA). (2005). Aluminum Design Manual, Washington, D.C.
- Arrien, P., Bastien, J., and Beaulieu, D. (2001). Rehabilitation of Bridges using Aluminum Decks, Canadian Civil Engineer Journal, Vol. 28. pp. 992-1002.
- AS/NZS (1997). Aluminum Structures, Australian/New Zealand Standard, Standards Australia, Sydney, Australia.
- CEN (2007). Eurocode 9: Design of Aluminum Structures, European Committee for Standardization.
- Das, S. K., and Kaufman, J. G. (2007). Aluminum Alloys for Bridges and Bridge Decks, The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 61-72.
- Kissell, J. R. and Ferry, R. L. (2002). Aluminum Structures, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Logan, D. L. (1991). Mechanics of Materials, HarperCollins Publisher, New York, NY.
- Mazzolani, F. M., (1995). Aluminium Alloy Structures, 2nd Ed., E & FN Spon, London.
- Mazzolani, F. M., (2006). Structure Applications of Aluminum in Civil Engineering, Structure Engineering International.
- McCaffery, B. (2005). The Aviator Howard Hughes, <<http://www.theaviatorhh.com/index.htm>> (Apr. 5 2010)
- McCormac, J. C., (1992). Structural Steel Design : ASD Method, 4nd Ed., HarperCollins Publisher, New York, NY.
- Sharp, M. L. (1993). Behavior and Design of Aluminum Structures, MacGraw-Hill, New York.

Taiwell Aluminum corporation, (2002). Aluminum Knowledge,
<<http://www.taiwell.com.tw/aluminium-e.htm>> (Apr. 5 2010)

Valencia G. (2001). Recent Aluminum Roof Structure in Colombia,
ASCE conference.

內政部營建署 (2007) ，「鋼結構容許應力設計法規範及解說」。

陳生金 (2001) ，「鋼結構設計—極限設計法與容許應力設計法」，
科技圖書股份有限公司。

