

出國報告

出國類別：會議

## 參加「2009年國際橋樑結構疲勞及破壞 工程學會研討會」

服務機關：國工局第一區工程處

姓名職稱：五股工務所主任黃承郎

派赴國家：美國

出國期間：98年7月24日至31日

報告日期：98年9月24日

## 摘要

2009 年國際橋樑結構工程「International Conference on Fatigue & Fracture in the Infrastructure」研討會係該學會第二屆舉辦，其中位於 Lehigh 大學的大型結構物先進科技(ATLSS)的研究中心在試驗、發展、測試、評估實際尺寸的大型土木結構物方面是國際知名的領導者。其研究計畫主要著重在結構物的使用壽命週期、結構系統和結構材料的破壞評估、研發新型的結構系統及材料以增進結構物在服務荷重下的表現、評估實際結構物的結構系統及材料的狀況、發展非破壞檢測及監測的技術、結構物破壞的法證調查、及實際結構物的修復及翻新。目前實驗中心正在進行的幾個結構物疲勞及破壞的大型計畫。ATLSS 也建立在 George E Brown, Jr.地震工程模擬網路(NEES)的即時多向試驗設備上，這是一個在地理資訊傳播上全國連線共同合作，共享的實驗研究設備。

本次研討會由各專業領域的學者專家就實務及理論設計的比對修正，其對演進過程及趨勢的視野甚具參考價值，對日後公路橋樑及附屬結構物的設計提供寶貴個經驗。

## 參加「2009 年國際橋樑下部結構疲勞及破壞工程學會研討會」出國報告

### 一、目的：

參加本次國際性的研討會，可藉以瞭解在橋樑工程技術設計實務與維護運轉的發展，尤其是案例探討未來創新改進的思考方向及分享專家學者之最新發現，再透過各小組排定之議程講習，期能對橋樑相關結構的疲勞及破裂問題作出更深入的探討，俾於設計時能借鏡舉例吸收經驗，維護運轉時能更詳實。

### 二、過程：

國際橋樑結構疲勞及破壞工程研討會自 98 年 7 月 26 日至 7 月 29 日共 4 天，在費夕法尼亞州歷史悠久的費城舉行，第一天報到後大會安排參觀 Lehigh Universitys Advanced technology for Large Structural Systems (ATLSS) Engineering Research Center. ATLSS 多向試驗設備一些計畫和設備的概要將在下面 ATLSS 參觀中介紹；第二天起就於 Lowel Hotel 的不同會議廳展開橋樑結構工程破壞及疲勞問題的設計實務研討，及維護施作造成破壞原因的分析與檢討建議處理方式。

#### ATLSS 計畫相關的疲勞與破壞試驗

##### 1. 紐約市的 Verrazano Narrows 橋實際尺寸的正交替代橋面板的疲勞試驗：

紐約市的 Triborough 橋及隧道管理局(Metropolitan 運輸局)正在用正交性鋼床板橋面板更換 Verrazano Narrows Suspension 橋上層的混凝土橋面板作橋樑的修復，正交性鋼床板橋面板重量較輕可以增加橋樑鋼索的壽命，因此用在長跨距橋及可活動式橋上是不錯的選擇，然而在缺少好設計的實例和需要組裝大量密集且複雜的焊接接頭以及在世界上有許多使用這種橋面的橋都有發生過延展性的疲勞破壞的例子。實際現場的表現和實驗室的試驗顯示如果有適當的設計，這類橋面板在最少維護下可以提供 100 年的壽命。Lehigh 大學的 ATLSS 的研究中心正在進行 Verrazano Narrows 橋實際尺寸替代橋面板的疲勞試驗，其試驗是由紐約市 Persons Transportation Group 設計。試驗的試體包括了一部份完整修復的橋面板包含板的橫樑及縱樑，並用九個油壓施加載重來同時模擬呆重和卡車通過橋面板的荷重，這個試驗是非常獨特的因為可以表現出多層的影響，ATLSS 的研究中心的這套可以試驗如此大尺寸的設備是世界上唯一的一套。



## 2.NCHRP 計畫 10-70：用於高速公路標誌燈具和交通號誌結構物的接頭

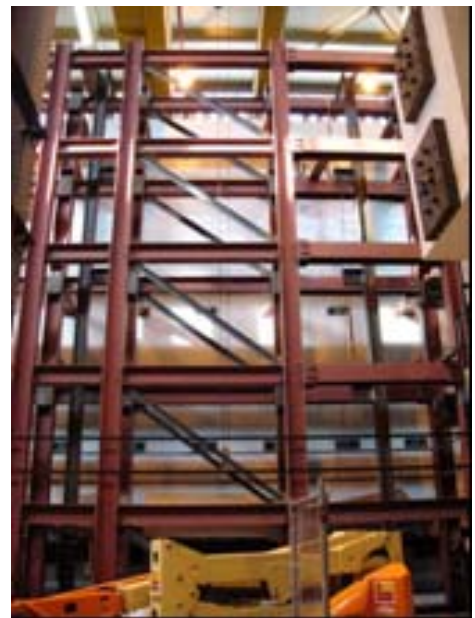
高速公路懸臂標誌及交通號誌和高桿照明燈具結構物實際尺寸疲勞試驗正在ATLSS的研究中心和Fritz 試驗室進行，此屬於 NCHRP 計畫 10-70 的一部分。在過去二十年中在全美境內這種結構物疲勞破壞的案例持續增加中，這衝擊到有限的公路建設資源，現行的 AASHTO 規



範指出這些結構物常常是因為不適當的設計造成縮短結構疲勞方面的使用年限，並且造成這些大樣的疲勞破壞結果和實驗結果預期的不一致。目前試驗完成了常用於這些結構物的焊接接頭的疲勞表現的評估。這些焊接接頭包括了……，在這個計畫內總共試驗了 74 組試體包括實際尺寸的標誌號誌結構物和高照明燈桿，並可同時進行八組試驗。到今日為止，這個計畫仍是世界上對此結構物評估疲勞表現有著最廣泛的結果的計畫。

## 3.Self-Centering(SC) Damage-Free 抗震鋼桁架系統

這個計畫研究創新的 SC 鋼桁架系統，其用位能去抵抗未受損結構物容許的基本設計地震力(DBE)。這計畫的目標是：1.發展出 SC 鋼桁架系統抗震的基本理論，2.在 SC 鋼桁架系統上用 George E Brown, Jr.地震工程模擬網路(NEES)現有的設備來結合設計、分析和實驗，3.發展出可靠的 SC 鋼桁架系統抗震設計的程序及準則，4.教育學生及業者 SC 鋼桁架系統的基礎實用知識。不像傳統的抗震鋼桁架系統設計在基本設計地震力(DBE)下產生非彈性破壞導致明顯的破壞，這計畫所創新的 SC 鋼桁架系統在基本設計地震力(DBE)具有位能來避免結構破壞的特色。



## 三、心得與建議：

本次技術研討會議著重於實務運用與最新研究之理論發現，小組委員會議每日議定，提供與會者提出問題進行討論的機會。由於與會者皆為結構工程領域內的專家學者及官方專業人士、因此對於經驗的交流提供很好的平台，對有關疲勞及破壞

的問題更進一步瞭解，相信能於未來做出更有效之供獻。

此次與會的專家學者將其最新之發現分享、協助識別不同需求及建立後續合作關係之基礎，對工程主辦機關及營建業界可獲瞭解有關其既已建構造物之服務壽期延長與安全性改善等最新的問題與最近之發展狀況。對資深經驗之設計實務與維護運轉工程人員得以瞭解，在成功的探討新舊結構物疲勞與破裂相關問題上截至目前最新發現方法。對資淺年輕工程人員將可獲得瞭解以往之問題題案例、現行解決方案與未來創新改進之思考方向。

## 研習心得

### 壹、橋樑鋼結構部分：

- 鋼構材料之疲乏與破裂 (An Introduction to Fatigue and Fracture)
- 分析與試驗
- 補強與告示結構物

目前國內主要橋樑鋼結構之材料疲乏檢核大都依據交通部頒之「公路橋樑設計規範」之方式，其相關章節有 8.1.3，8.2.9.E 等，均以工作應力法檢核反復應力之容許區間，惟近年來各項學術研究均朝向載重因數法 (LRFD)，因此本次研討會分析部份亦多針對 LRFD 之估算方式作為介紹，以下針對研討會內容作一概述：

#### 一、材料疲乏之主要參數：

- (1)  $S_r$ ：應力變化區間 (Stress Range)
- (2)  $N$ ：反復變化次數 (Cycles)
- (3) 結合型式：各部份結合方式 (Type A、B、C···) 詳如「公路橋樑設計規範」表 8.1.3 及圖 8.1.3

一般而言應力變化區間有固定振幅及變化振幅兩種，橋樑結構為複雜之變化振幅，故一般均簡化為最高峰值之差額作為應力變化區間。

材料疲乏之損壞主要原因有：

- (1) 材料疲乏應力無法回復
- (2) 疲乏產生具有傳播性
- (3) 疲乏裂縫大分細微，常無法早期發現
- (4) 損壞可能造成全面性之結構生命週期提早結束

因此一般係依據 Miner' s Rule 假設疲乏損壞為「在生命週期內反復變化次數之一次線性函數」即

$$D = \frac{n}{N}$$

D : damage

n : cycles happened

N : Design Cycles

依此假設，則容許應力區間可得

$$Sr = \left( \sum fi(Sn)^3 \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$fi = \frac{ni}{N}$$

$n_i$  : 發生某一應力區間之反復次數 (如每 100kgf/cm<sup>2</sup>)

$Sn$  : 發生某一計算次數之應力區間 (如上項之 100kgf/cm<sup>2</sup>)

$N$  : 總變化應力之次數

因此 AASHTO 修正之 Limit-State 疲乏應力計算式為

$$\eta r(Sr) \leq \phi(\Delta Fn)$$

$\eta$  : load modifier

$r$  : load factor

$Sr$  : Stress range

$(\Delta Fn)$  : nominal fatigue resistance (可由定幅反復應力求得)

$\phi$  : resistance factor

在 Limit-State 應力下：

$$\eta = 1.0 \quad \text{and} \quad \phi = 1.0$$

在有限生命週期內則：

$$r = 1.5 \quad \text{或} \quad r = 2.25 \quad (\text{鋼橋面版系統})$$

## 二、 對於現有橋樑之評估

如欲針對現有橋樑評估其疲乏所造成的影響，則本研討會亦針對其中一些方法略為敘述：

- (1) 首先針對現有結構作結構分析，取得標準車輛載重之振幅 (可用一維、二維或三維)
- (2) 依現場實測之頻率估算其振幅

則實測之反復應力區間可計算得

$$S_{re} = \left( \sum f_i(S_{ri})^3 \right)^{\frac{1}{3}}$$

依設計方式計算之反復應力區間為  $S_{rD}$

$$\text{則可得 } S_{re} = \alpha S_{rD}$$

$\alpha$  : 為實測佔依規範計算之反復應力百分比，一般約為 0.5~0.67

則依前節 Miner' s Rule 所述

$$S'_{re} = S_{rD} - r \times S_{re}$$

$r$  : load factor

$S'_{re}$  : 生命週期內可容許之反復應力區間

如對於 Infinite life check

$$\text{則建議 } S_{r,max} \leq \frac{1}{2} S'_{re}$$

如估算有效使用年限

則有效使用年限 = 總生命年限 - 目前使用  
年限

而依反復次數

$$N = 365 \text{ days} \times \text{years} \times n \times ADTT \quad \text{及} \quad N = R_R \left( \frac{A}{S_{re}^3} \right)$$

A : 結合型式之對應常數(參見原附表 6.6.1.2.5-3)

ADTT : 反復應力次數與標稱應力區間之函數(參見附圖)

並須考量交通成長之可能性

$R_R$  : resistance factor

$10^{0(SD)}$  : minimum life

$10^{1(SD)}$  : evaluation life

$10^{2(SD)}$  : mean life

SD : 標準偏差值之 log 函數

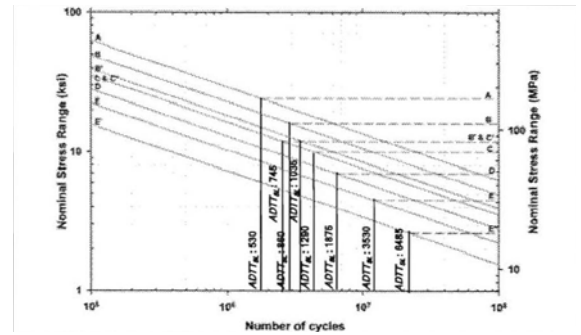


Table 6.6.1.2.5-3

Detail Category	Threshold (ksi)
A	24.0
B	16.0
B'	12.0
C	10.0
C'	12.0
D	7.0
E	4.5
E'	2.6
A 325 Bolts in Axial Tension	31.0
A 490 Bolts in Axial Tension	38.0

### 三、 現有橋樑之補強

依據上述方法，則可就現況及交通量、使用年限期望值，利用結構補強方式降低反復應力區間，以達到使用年限之要求。



## 貳、公路標誌牌面、照明、及交通號誌構造物之耐疲勞設計(Fatigue Design of Highway Sign, Luminaire and Traffic Signal Structure)部分：

講師 Dr. Sougata Roy, ATLSS Center Lehigh University

Dr. Robert J. Connor, Purdue University

Dr. Karl H. Frank, University of Texas at Austin

- 提供學員有關”公路標誌牌面照明及交通號誌構造物之耐疲勞設計”之背景知識。
- 提供當前 AASHTO 規範對於設計前揭構造物相關規定之總的看法。
- 提供持續研究及規範可能修正內容之最新情報。

### 一、影響耐疲勞性能之問題

#### 1.各種標誌牌面鋼構破壞倒塌類型實例說明：

- 懸臂豎桿疲勞斷裂



Figure 2.5 Fatigue Crack at End Plate Weld Toe in Laboratory Specimen

- 錨碇螺桿破壞



- 橫桅桿構造物破壞



Figure 1.3. Fatigue failure of mast arm in Lubbock, Texas

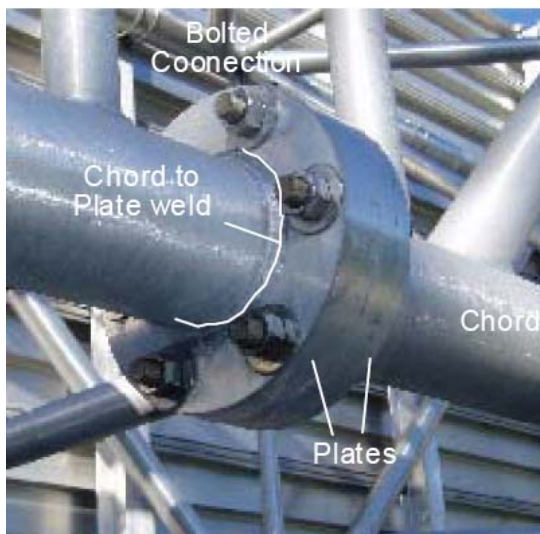


Figure 4. Mast Arm Fatigue Failure

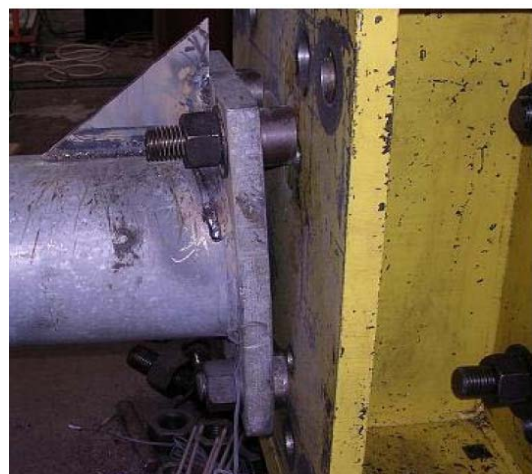
- 桿柱內外之銹蝕



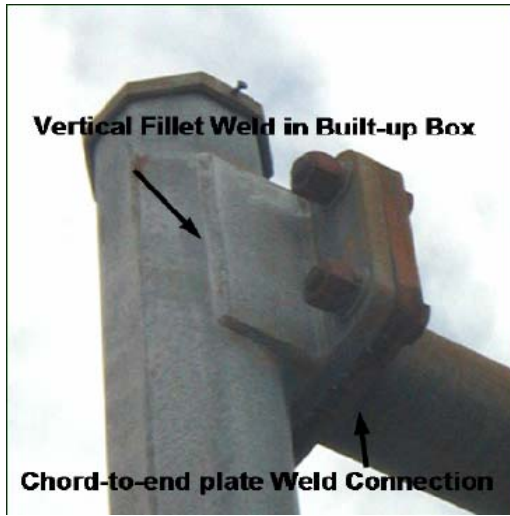
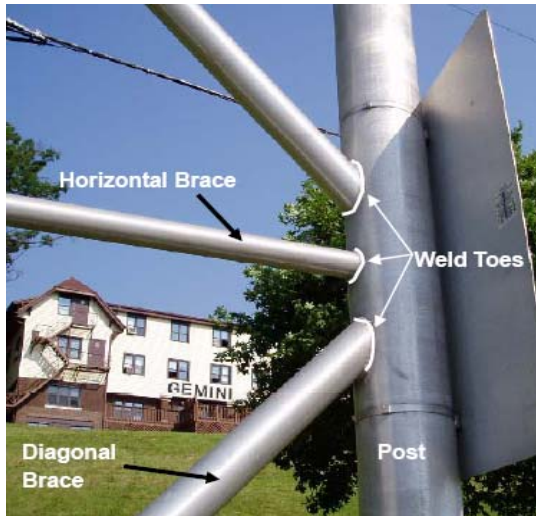
- 桁架弦桿接頭裂開



- 接合螺栓太短、斷裂、銹蝕、遺失



- 柱與弦桿焊接裂開



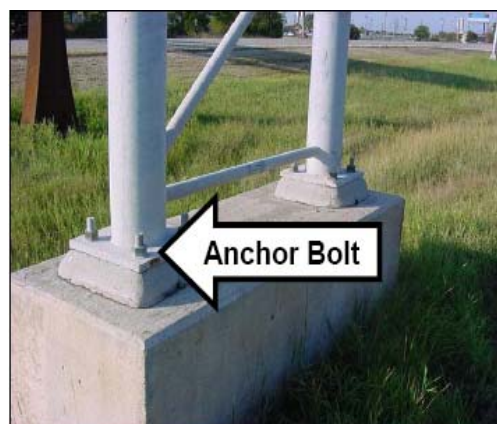
## 2.造成倒塌原因

### (1)結構物之瑕疵

- 桿身手孔禿緣焊接裂開

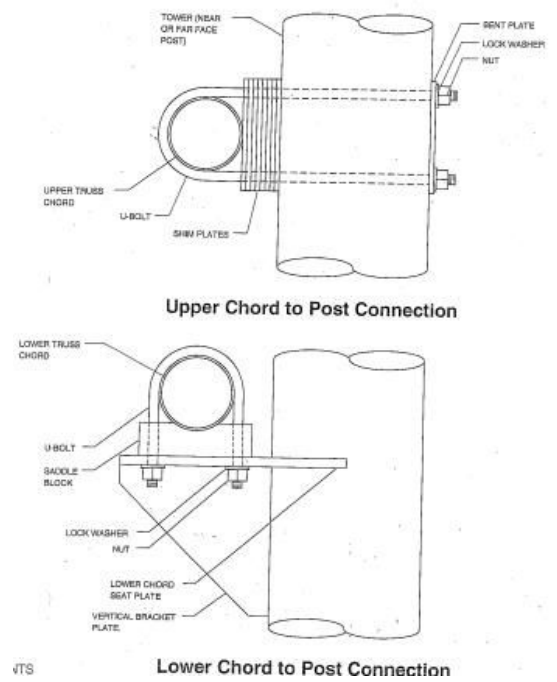
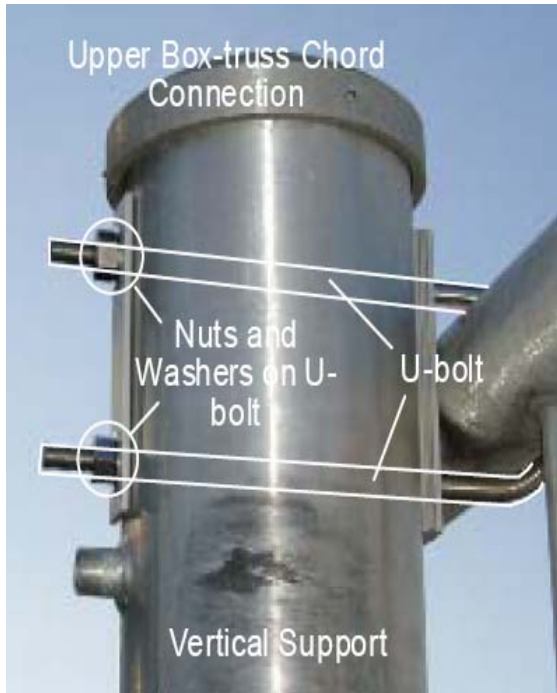


- 續接頭之螺栓斷裂、遺失

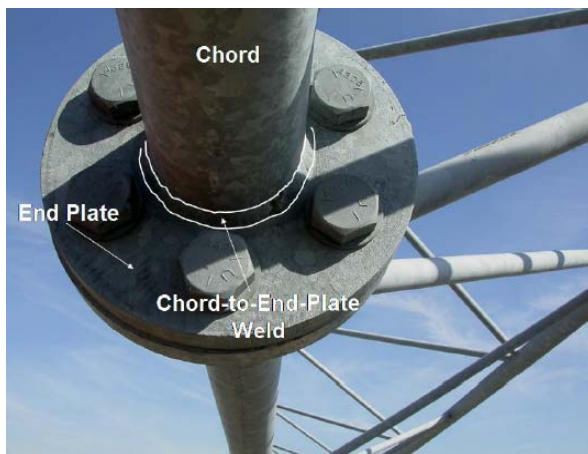


● 焊道瑕疵

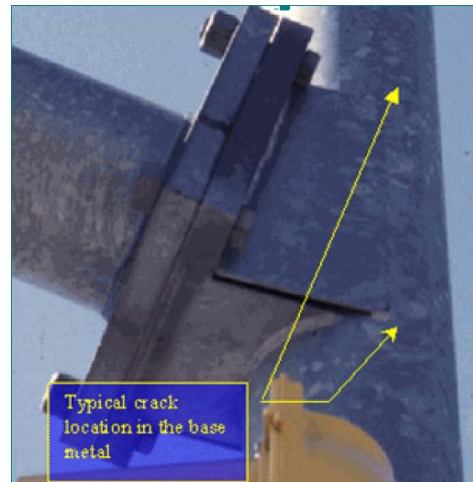
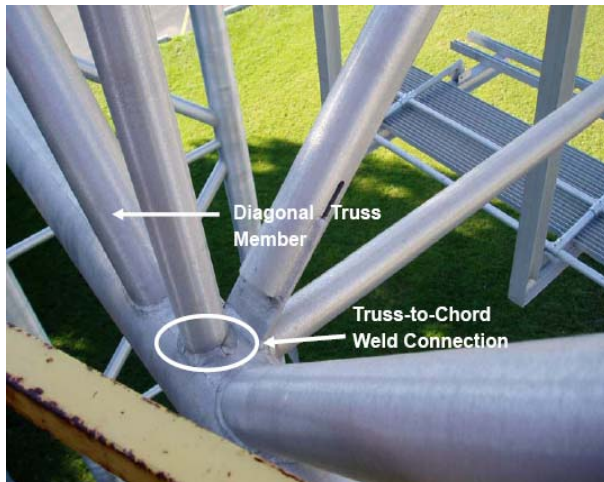
摩擦型夾鉗焊接裂開



焊道品質不良



焊道裂開



- 高桅桿塔柱

底座砂漿墊—灌漿不實造成底板鏽蝕



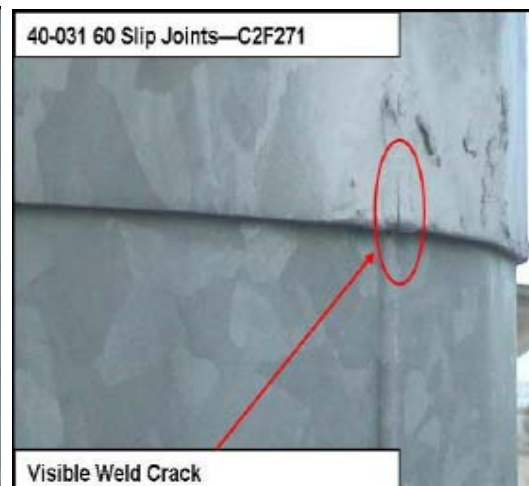
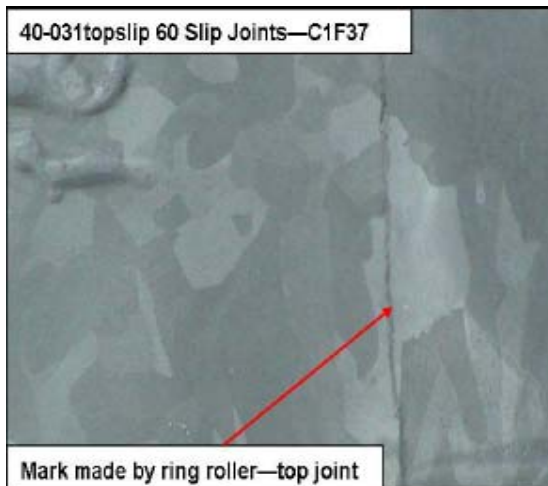
- 高桅桿塔柱倒塌

鏽蝕破壞造成倒塌



多邊形桅桿折角裂縫

折角之疲勞裂縫

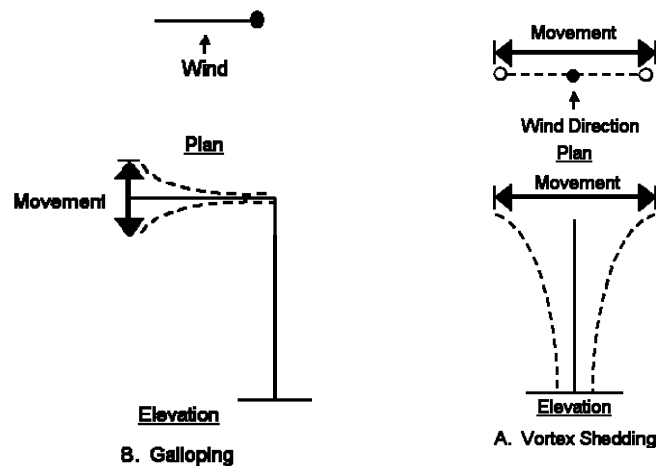


## 底座接合之裂縫

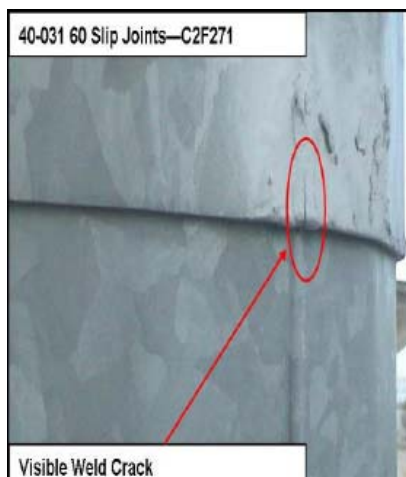


### (2) 荷重之作用造成

- 風力是造成疲勞損壞之主要作用力包括  
自然陣風 Nature wind gust  
渦流溢震 vortex shedding



- 多邊塔柱滑動套接之疲勞損壞裂開



- 基座螺帽鬆弛



- 調平螺帽鬆弛

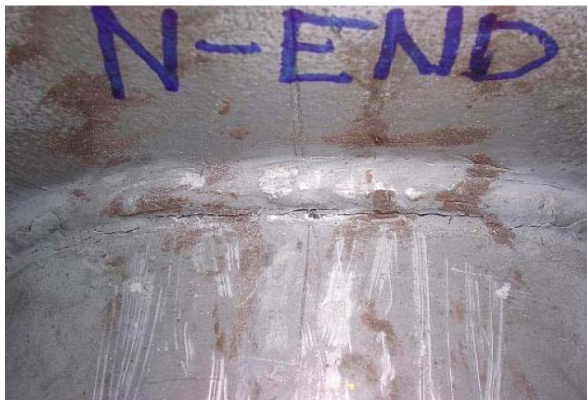


### 3. 缺乏必要之檢查與檢查項目

- 螺帽墊片之檢查  
檢查基座螺帽鬆弛  
檢查調平螺帽鬆弛



- 柱與基座版電焊接合之檢查  
檢查所有焊道



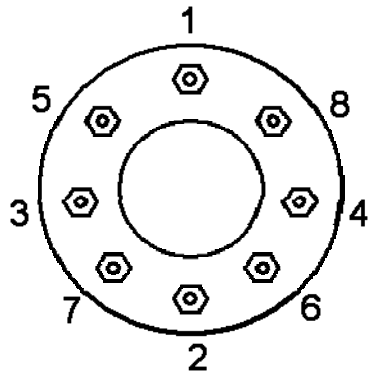


## 檢查機械加工補助焊件



### ● 錨碇基座之檢查

檢查錨碇螺帽充分鎖緊



檢查調平螺帽鎖緊



檢查基座版底面清潔無殘屑



#### 4.其他之論點

- 高柱桿 (>120 呎) 薄底板 (<1.5 吋) 抗疲勞破裂性能軟弱
- 強風區域之柱桿易發生疲勞破壞
- 維持基座版底面清潔無殘屑 (尤其是耐候鋼桿)

#### ● 材料素質之因素

鍍鋅鋼材：

不耐疲勞

鍍鋅浴池之化學成分影響問題

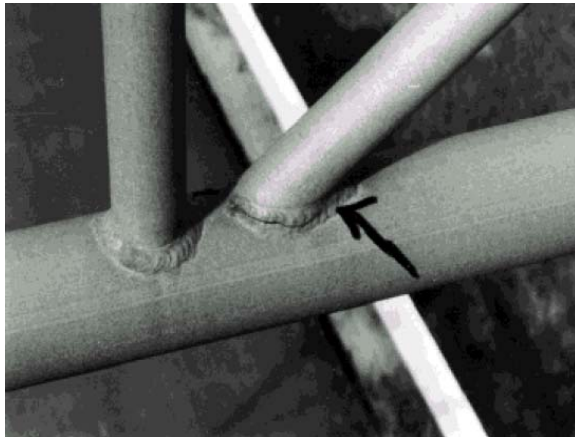
耐候鋼：

高鹽分、經常潮濕之環境仍有腐蝕問題

鋁材：

勁度低於鋼

耐疲勞性能僅有鋼之 1/3



## 二、耐疲勞設計之荷重 (Fatigue Design Loads as per AASHTO)

### 1. AASHTO 指引|標誌結構物設計規範內涵

- 參照 NCHRP 412
  - 上述規範適用於：
    - 車道上方懸臂之標誌結構物
    - 車道上方懸臂之交通燈號結構物
    - 高桅桿照明燈桿
  - 當量靜力演算步驟
  - 代表極限疲勞荷重狀態之作用力
  - 設計具有無限壽期之結構物
- 計算得之結構應力範圍需<CAFL)

## 2. 耐疲勞設計準則 (Design Criteria)

設計懸臂構造物使能承受風力作用下之當量靜荷重  
 當量靜荷重以重要性因子修正後個別作用於構造物  
 詳細分類懸臂構造物，賦予常數振幅疲勞限度 (CAFL)  
 分析所得標稱應力要小於 CAFL

### ● 懸臂構造物分類

構造物分類	主要公路	次要公路	其他位置
大型標字架	I	II	III
長懸伸燈號桿	I	II	III
高照明燈柱(30 公尺)	I	II	III
其他	II	II	III

### ● 在風力作用下之結構物反應

空氣動力學

自然陣風壓力卡車引發之陣風壓力

空氣動力彈性力學

躍馬式彈性震動

渦流溢洩彈性震動

### ● 荷重之疲勞作用

風力作用是疲勞損壞之主因

規範列出之風力作用

自然陣風壓力 (Nature wind gusts)

卡車引發之陣風壓力 (Truck induced gusts)

躍馬式彈性震動 (Gallopings)

渦流溢洩彈性震動 (Vortex shedding)

### ● 耐疲勞設計重要性因子 $I_F$

構造物疲勞 分類	重要性因子 $I_F$			
	躍馬式 Gallopings	渦流溢洩 Vortex shedding	自然氣流陣風 Nature wind gusts	卡車誘發之陣風 Truck induced gusts
I 標字架	1.0	×	1.0	1.0
燈號臂	1.0	×	1.0	1.0
高燈柱	×	1.0	1.0	×
II 標字架	0.65	×	0.75	0.89
燈號臂	0.65	×	0.80	0.84
高燈柱	×	0.65	0.72	×
III 標字架	0.31	×	0.49	0.77
燈號臂	0.30	×	0.59	0.88
高燈柱	×	0.30	0.44	×

對振動模式、渦流溢洩、自然氣流陣風、卡車又發之陣風等作用簡述如下：

● 振動模式－躍馬式 Galloping

橫交穩定風場之桿件共振

四弦桁架式結構少有影響

不對稱構件斷面所造成一牌面與號誌

振幅正比於風速

永遠為第 1 振態

柔軟之懸臂結構物最容易受害

橋樑之承結構少有影響

水平號誌、標字牌留間隔可有效消除 galloping

加裝阻尼可有效減振 35%

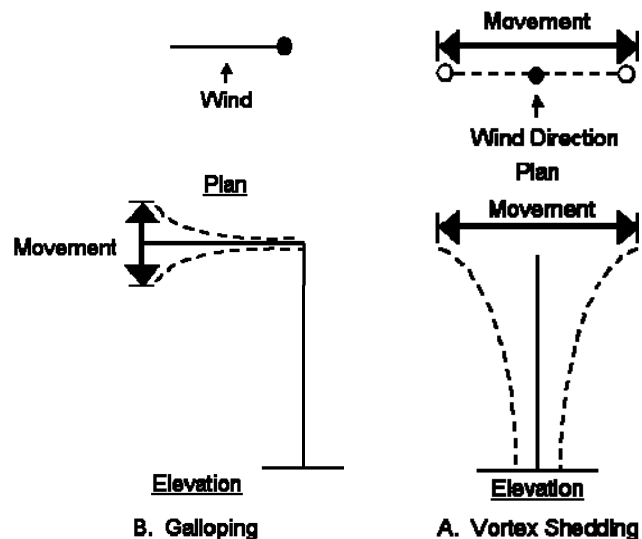
相當之靜力風荷重模式

疲勞極限狀態荷重

垂直剪力荷重作用於結構物投影面積

$$P_G = 21 \times I_F \text{ (psf)}$$

$$P_G = 1000 \times I_F \text{ (Pa)}$$



● 渦流溢洩 Vortex Shedding 造成直立桿自由端正交於風向之橫向振動

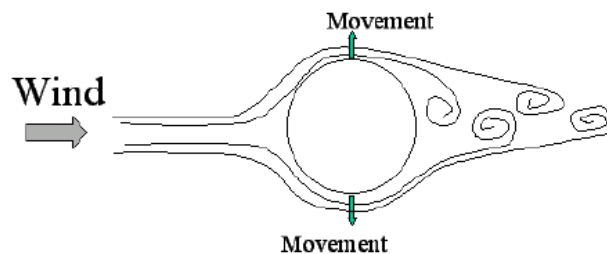


Figure 4-4 Shedding of vortices on a bluff body

反應出高階之振態

穩定風場流經直立桿時產生之渦流自桿之兩側面交互溢洩

達到臨界風速（VC）時直立桿進入鎖定狀態

超出臨界風速直立桿產生大量低應力循環

$$V_c = f_n d / S_n \quad V_c < 20 \text{ mph}$$

$$P_{vs} = 0.613 V_c^2 C_d I_F / 2 \beta \quad (\text{Pa})$$

$$P_{vs} = 0.00118 V_c^2 C_d I_F / 2 \beta \quad (\text{psf})$$

以  $P_{vs}$  作用於構造物上計算應力值範圍

水平桿自由端正交於風向之上下振動

● 自然氣流陣風－

反應在第 1 振態

產生高應力範圍－超出  $CACL$  值不明顯時可忽略不計

長時間之風暴振動循環數可能高出  $CACL$  值

作用於所有暴露之投影面

相當之靜力風荷重模式

疲勞極限狀態荷重（非極限強度， $V_{mean} > 11.2 \text{ mph}$  之機率 = .01%）

$$P_{NW} = 5.2 C_d I_F \quad (\text{psf}) \quad \text{Eq (11-5)}$$

$$P_{NW} = 250 C_d I_F \quad (\text{Pa})$$

上式配合當地特定風場調整

正交於牌面之水平力為主造成沿風向之前後震動

● 卡車誘發之陣風－

產生垂直陣風作用於水平之投影面

可變標字牌最受危害

12 尺寬車道範圍之垂直壓力作用於結構物水平之投影面

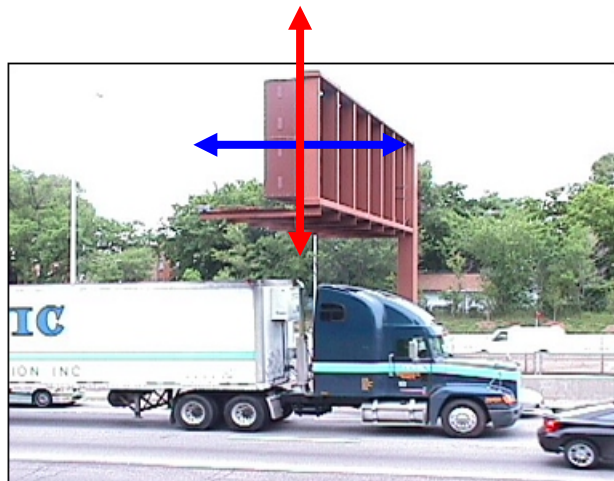
結構物高度升高則壓力可予減小

$$P_{TG} = 18.8 C_d I_F \quad (\text{psf}) \quad \text{Eq (11-8)}$$

$$PTG = 900 C_d I_F \quad (\text{Pa})$$

車速限降低則壓力可予減小

車速限降低則壓力可予減小



● 變形量限制—

適用於單桿懸臂標字牌與號誌結構

駕駛人所關心之可視性

Galloping 及 Truck induced gusts 荷重條件下要考量結構變形

水平桿尾端下垂以 200mm 為限(詳設計案例)

### Example

Signals:  
Vertical Projected Area  $(A_{sig})_v = 9 \text{ ft}^2$   
Horizontal Projected Area  $(A_{sig})_h = 1 \text{ ft}^2$   
Importance: Category II

<b>Column:</b> Column length $L_1 = 22 \text{ ft}$ Length to mast-arm $L_2 = 18 \text{ ft}$ Diameter at base $d_b = 13 \text{ in}$ Diameter at tip $d_t = 10 \text{ in}$ Thickness $t = 0.2391 \text{ in}$	<b>Mast-Arm:</b> Length to Signal 1 $L_3 = 25 \text{ ft}$ Length to Signal 2 $L_4 = 37 \text{ ft}$ Length to Signal 3 $L_5 = 49 \text{ ft}$ Diameter at base $d_b = 10.5 \text{ in}$ Diameter at tip $d_t = 4 \text{ in}$ Thickness $t = 0.2391 \text{ in}$
---	---

LEHIGH UNIVERSITY  
Advanced Technology for Large Structural Systems Center  
Lehigh University

### Example (2)

<b>Galloping</b> Fatigue Importance Factor $I_F = 0.65$ (Table 11-1) Vertical Shear Pressure $P_g = 21 I_F = 13.65 \text{ psf}$ (Eq. 11-1) Vertical Shear Load $F_g = P_g (A_{sig})_v = 122.85 \text{ lbs}$ -Applied at each signal. Vortex Shedding As per Section 11.7.2 commentary, vortex shedding effects negligible for tapered sign and signal supports.	<b>Natural Wind Gusts</b> Fatigue Importance Factor $I_F = 0.80$ (Table 11-1) Equivalent Static Natural Wind Gust Pressure $P_{NW} = 5.2 I_F C_d = 4.16 C_d$ (Eq. 11-5) Drag Coefficient $C_d = 1.2$ for traffic signals (Table 3-6) $C_d = 1.1$ for cylindrical members (Table 3-6)
--	---

LEHIGH UNIVERSITY  
Advanced Technology for Large Structural Systems Center  
Lehigh University

### Example (3)

<b>Natural Wind Gusts</b> Column Equivalent Static Load $(F_G)_{col} = P_{NW} (L_1 d_{ave}) = 96.48 \text{ lbs}$ Mast Arm Equivalent Static Load $(F_G)_{arm} = P_{NW} (L_5 d_{ave}) = 135.47 \text{ lbs}$ Signal Equivalent Static Load $(F_G)_{sig} = P_{NW} (A_{sig})_v = 44.93 \text{ lbs}$	<b>Truck-Induced Gusts</b> Fatigue Importance Factor $I_F = 0.84$ (Table 11-1) Equivalent Static Truck Gust Pressure $P_{TG} = 18.8 I_F C_d = 15.79 C_d$ (Eq. 11-6) Mast Arm Equivalent Static Load -Applied to 12 ft length at end of arm $d_{ave} = 4.8 \text{ in} = 0.4 \text{ ft}$ $(F_{TG})_{arm} = P_{TG} (12 d_{ave}) = 83.37 \text{ lbs}$ Signal Equivalent Static Load $(F_{TG})_{sig} = P_{TG} (A_{sig})_v = 18.95 \text{ lbs}$
---	---

LEHIGH UNIVERSITY  
Advanced Technology for Large Structural Systems Center  
Lehigh University

## Example (4)

### Galloping Moment

$$M_g = F_g (L_3 + L_4 + L_5) = 163.6 \text{ kip-in}$$

### Natural Wind Gust Moment

$$(M_x)_{NW} = (F_G)_{col} (L_3 / 2) + (F_G)_{arm} L_2 + 3(F_G)_{sig} L_2 = 71.1 \text{ kip-in}$$

Note: Assumed that column gust load acts at mid-height of column.

$$(M_y)_{NW} = (F_G)_{arm} (L_5 / 2) + (F_G)_{sig} (L_3 + L_4 + L_5) = 99.7 \text{ kip-in}$$

### Truck-Induced Gust Moment

Pressure applied over the last 12 ft of the arm,  $(F_{TG})_{arm}$  centered at  $(L_5 - 6)$

$$(M_2)_{TG} = (F_{TG})_{arm} (L_5 - 6) + (F_{TG})_{sig} (L_4 + L_5) = 62.6 \text{ kip-in}$$

**Controlling Case: Galloping Moment**

$$M = 163.6 \text{ kip-in}$$



Advanced Technology for Large Structural Systems Center  
Lehigh University

## Example (5)

### Stress Range Calculations

$$I_{col} = 195.18 \text{ in}^4$$

$$(S_r)_{col} = M_g c / I_{col} = 5.4 \text{ ksi}$$

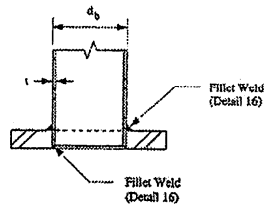
Determine Category from Table 11-2

Detail 16: Fillet-welded tube-to-transverse plate connection

Stress Category E'

CAFL = 2.6 ksi (Table 11-3)

$(S_r)_{col} > CAFL$  **NO GOOD!**



Redesigns:

- 1) Column increased to 19 in diameter.
- 2) Full-penetration weld, 15 in diameter.
- 3) Full-penetration weld, 5/16 in thickness.



Advanced Technology for Large Structural Systems Center  
Lehigh University

## Example (6)

### Stress Range Calculations

$$I_{arm} = 101.49 \text{ in}^4$$

$$(S_r)_{arm} = M_g c / I_{arm} = 8.5 \text{ ksi}$$

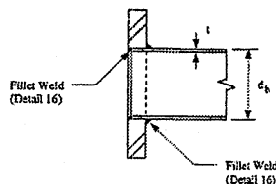
Determine Category from Table 11-2

Detail 16: Fillet-welded tube-to-transverse plate connection

Stress Category E'

CAFL = 2.6 ksi (Table 11-3)

$(S_r)_{col} > CAFL$  **NO GOOD!**



Redesigns:

- 1) Arm increased to 19 in diameter.
- 2) Full-penetration weld, 15 in diameter.
- 3) Full-penetration weld, 5/16 in thickness.



Advanced Technology for Large Structural Systems Center  
Lehigh University

## 三、耐疲勞性之連接細部 (Connection Detail)

### 1. 現行規範

- 2001 年頒行  
以有限之研究為依據  
存在些許之缺陷與不足



耐疲勞力與荷重方面有明顯之爭辯

- 後續研究

NCHRP project 10-70

Texas Pooled Fund Study

University of Minnesota

University of Wyoming

NCHRP project 10-70

- 規範全面性修改

即將啟動

## 2. Connection 之細部

- 一般觀察

管件對端板焊道大量出現裂縫

大變形引起疲勞破壞——薄管材料為最

耐疲勞強度取決於：

(1) 桿件斷面——圓形或多邊形

(2) 連接之形式

(3) 連接細節——管座式連接、開槽焊 (Groove weld) 等

(4) 焊道形式——焊道末端轉角、焊道形狀與尺寸

- 管件對端板之 Connection

端板勁度越高耐疲勞強度越佳

端板勁度影響因素——管徑、板厚 (2in)、螺栓數、厚度比、底板開孔

- 多邊形斷面

邊數、折曲半徑、真圓度

管座式連接——圓形較多邊形耐疲勞

折曲半徑大者耐疲勞度高

## 3. GROOVE 焊接

- 焊接裂縫之成因——背襯環、防水封焊

- 背襯環之影響——環高至少 2in 為佳

襯環頂與管壁焊接封閉——防水防銹之必要性不明顯

襯環頂與管壁焊接封閉——增強結構與贅餘度 (焊道無裂縫)

襯環頂與管壁焊接封閉——焊道品質極為重要 (可能損傷管壁)

- 疲勞試驗結果/標誌燈號

桿柱底板柔軟度之影響——底板開孔越大應力集中因子越高

GROOVE 焊接優於管座式連接

加焊襯環頂及底部優於不焊 (高品質焊道)

GROOVE 焊接/試驗結果——厚底板優於薄底板

適當設計之底板 GROOVE 焊接可達到耐疲勞度 CAFL 之 D 級(7ksi)



- 為避免破壞 connection 手孔，附掛物件均要予以加勁處理。



#### 4. 高桅桿管件對端板之 Connection

- 破裂模式之觀察——底板加勁處之裂縫
- Connection 之加勁

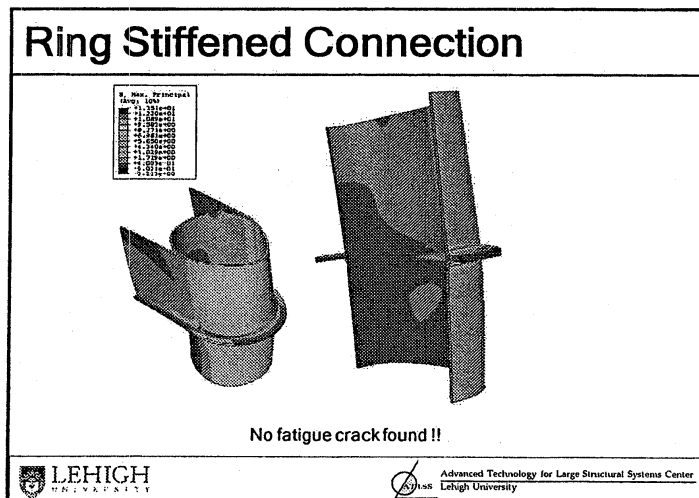
加勁管座式連接可經濟有效提升耐疲勞度

加勁才厚度取管壁厚之 1.25 倍為最佳

加勁管座式連接可達到耐疲勞度 CAFL 之 D 級(7ksi)

#### 5. Connection 之加勁案例說明

- 環狀 ring stiffener

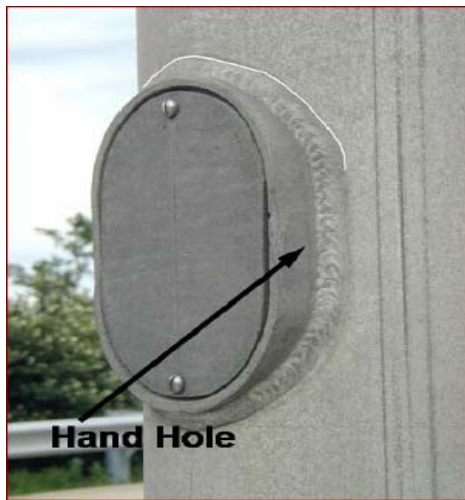


- 續接板 Guesset Plate



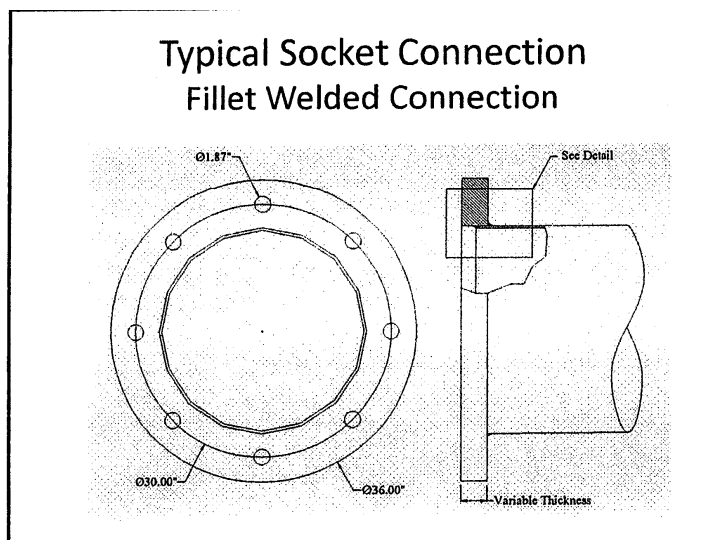
## 6. 桿身手孔之細節

- 桿身手孔之加勁

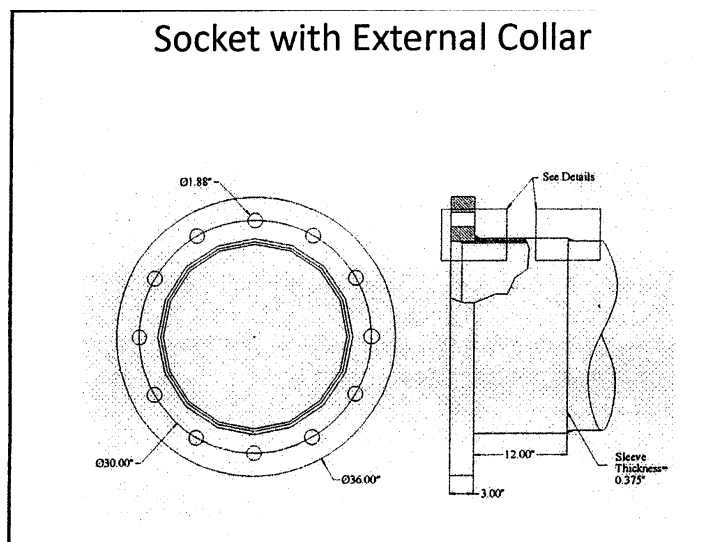


## 四、直立高桅桿之研究成果

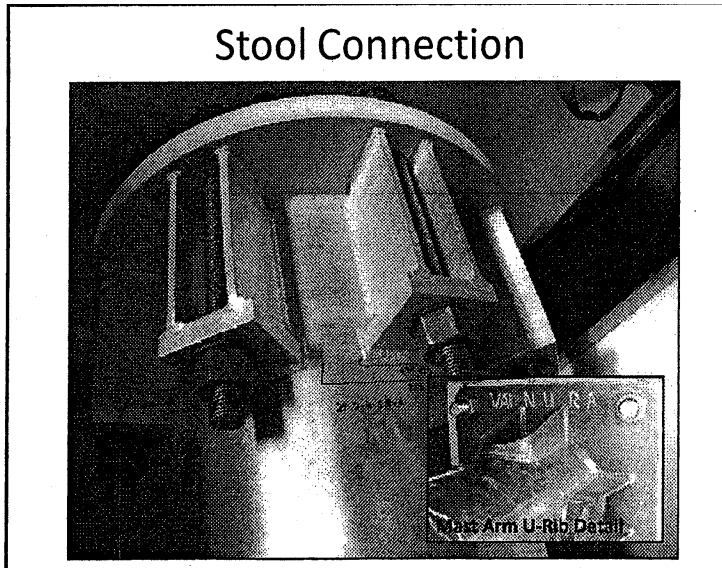
### 1. 填角焊接之細節



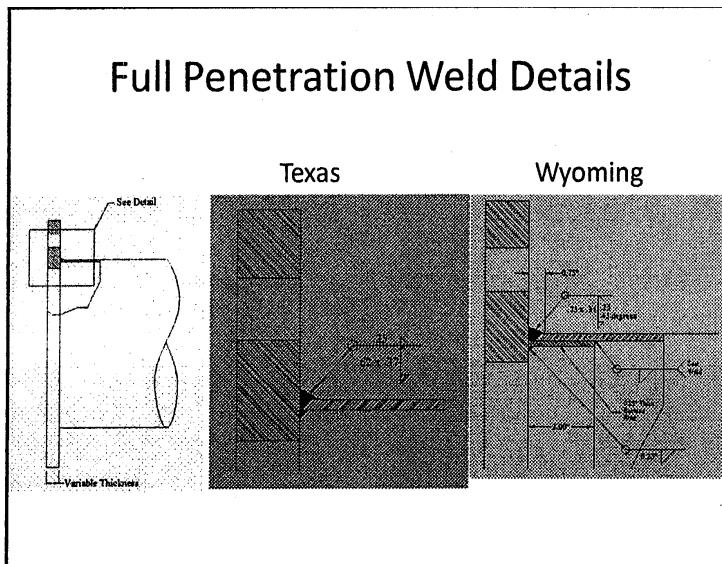
### 2. 管座式連接 Socket Connection 附外領圈加勁



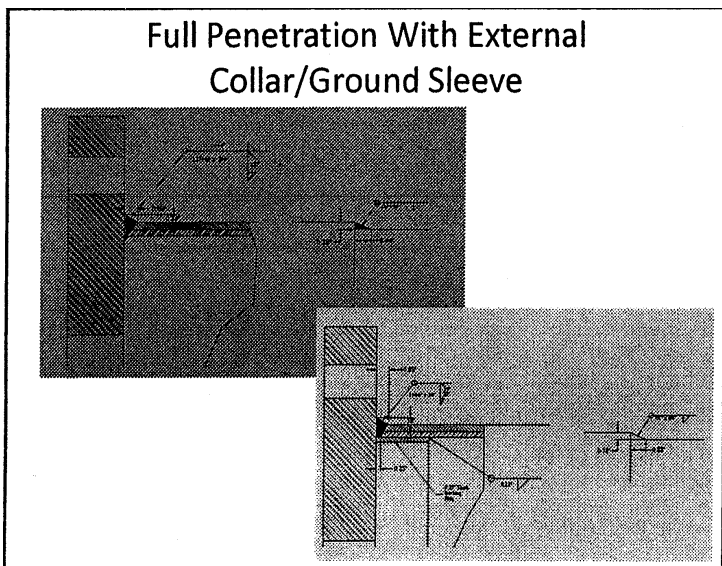
### 3. 螺栓墊凳 (stool) Connection



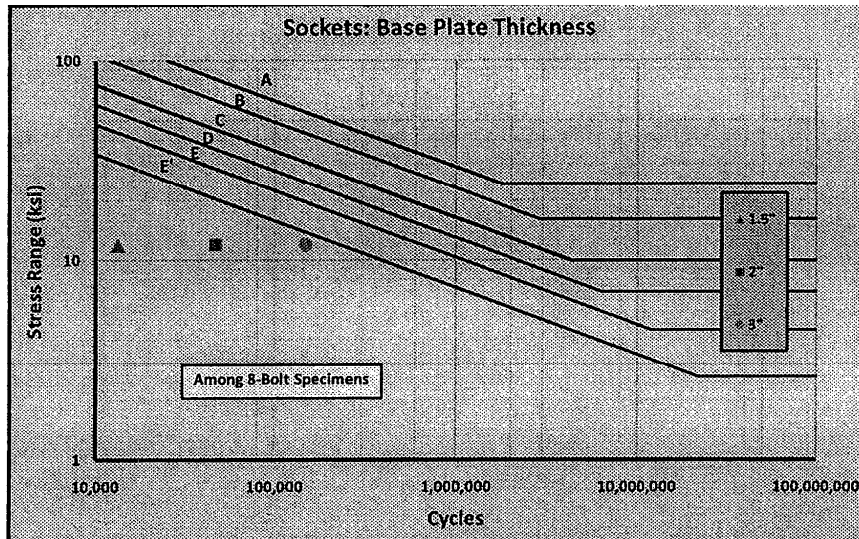
### 4. 全滲透焊接之細節



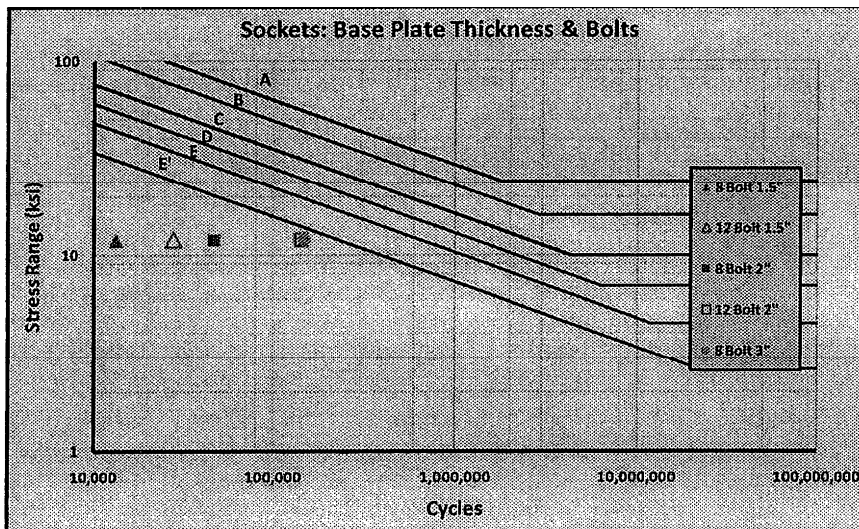
### 5. 全滲透焊接附外領圈/內套筒之細節



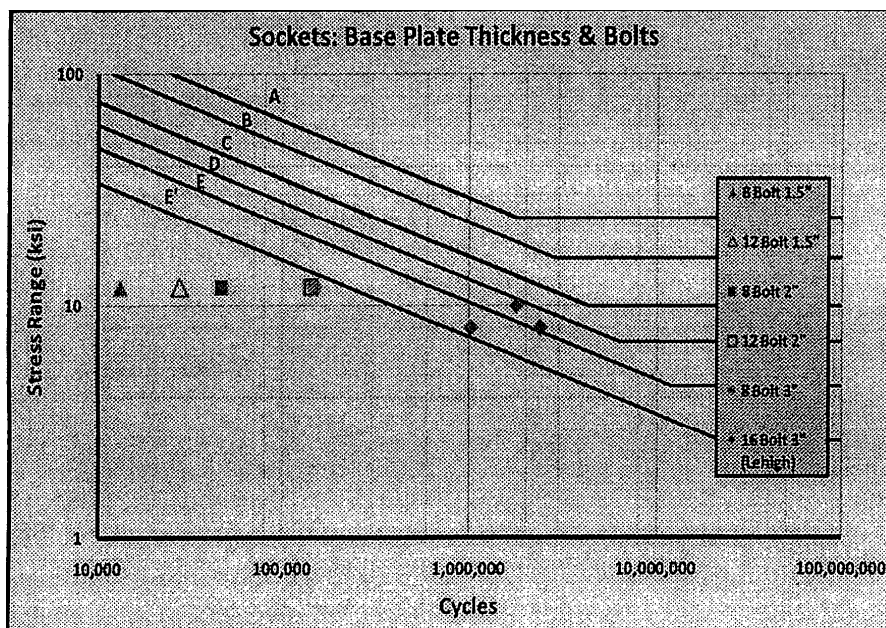
6. 管座式連接 Socket Connection：底板厚 VS.耐疲勞度試驗成果



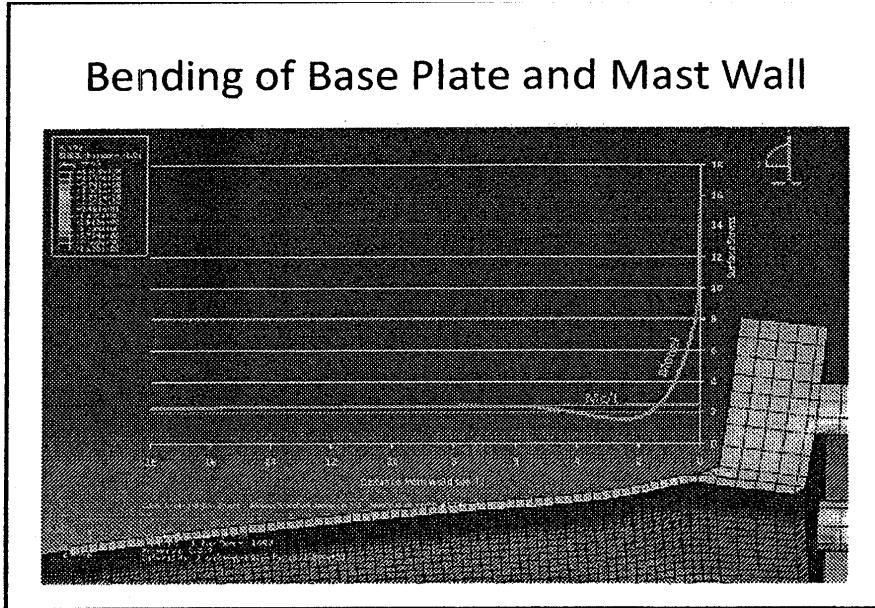
7. 管座式連接 Socket Connection：底板厚與螺栓數 VS.耐疲勞度試驗成果



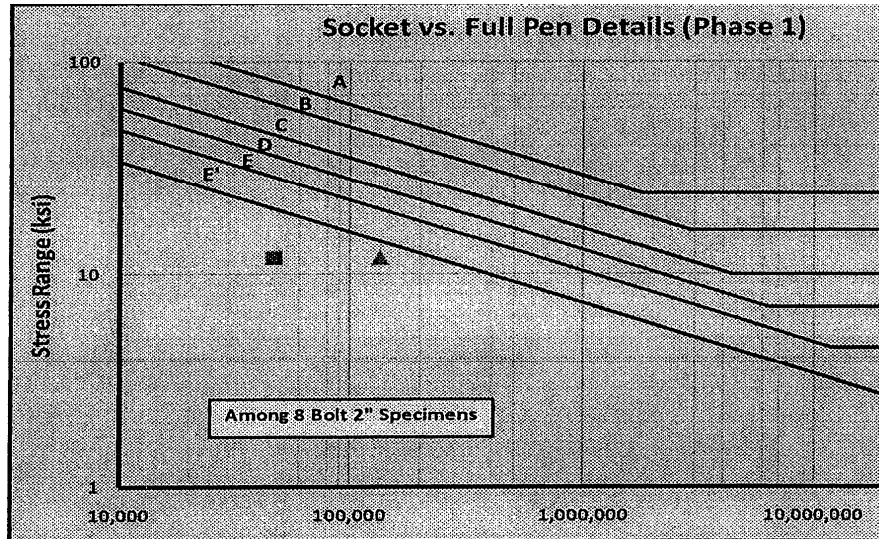
8. 管座式連接 Socket Connection：底板厚與螺栓數 VS 耐疲勞度試驗成果



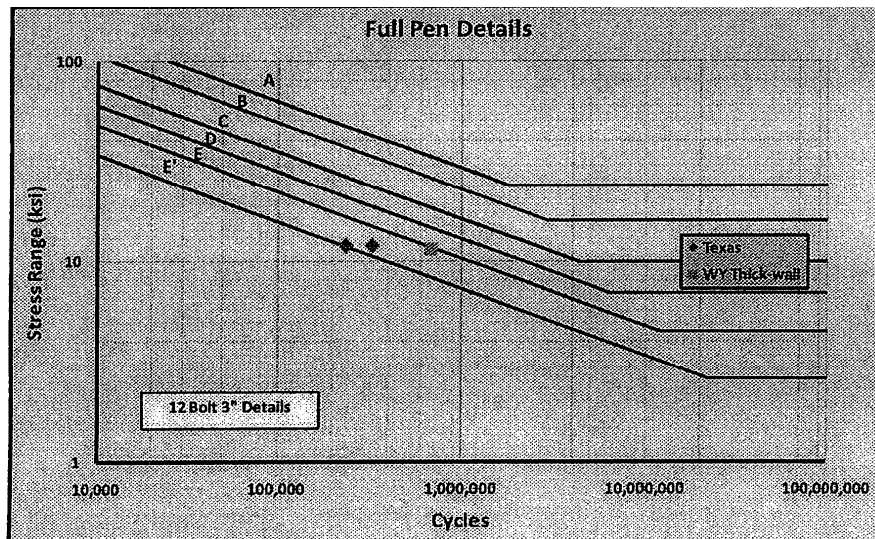
9. 底板與桅桿壁 VS.彎曲耐疲勞度試驗成果



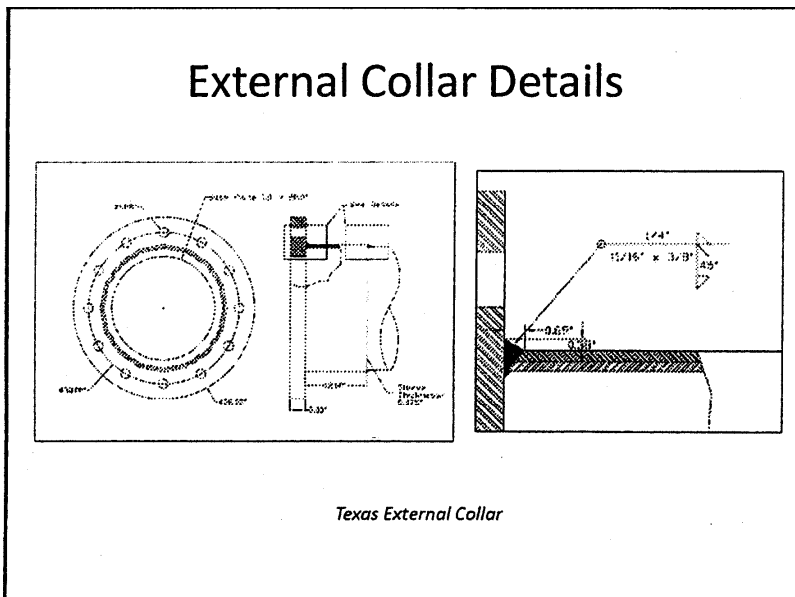
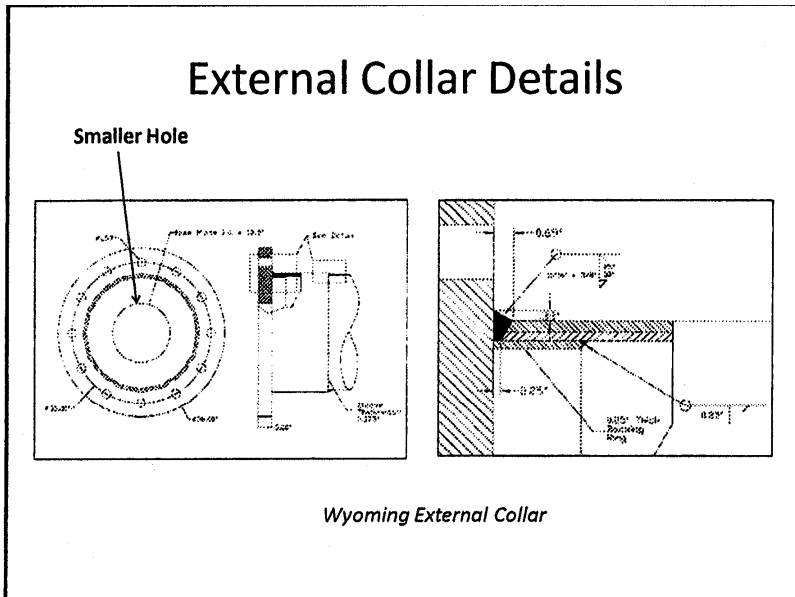
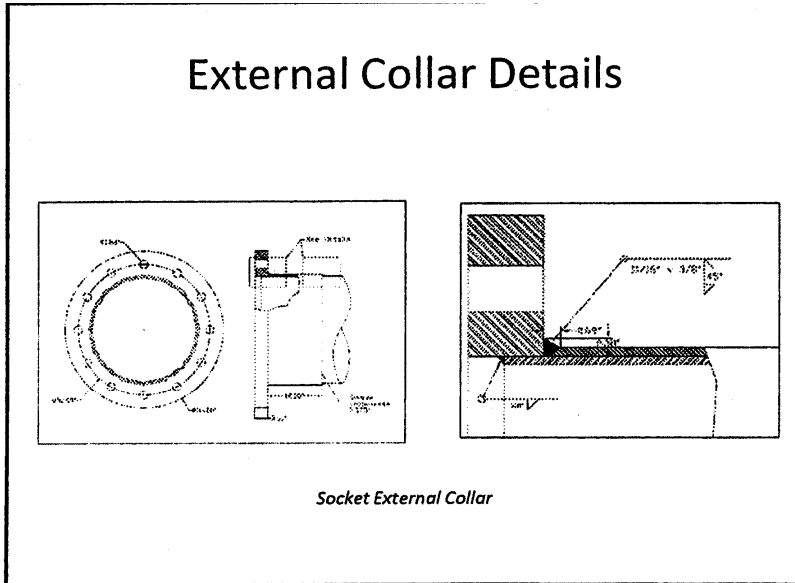
10. 全滲透優於管座式連接耐疲勞度試驗成果



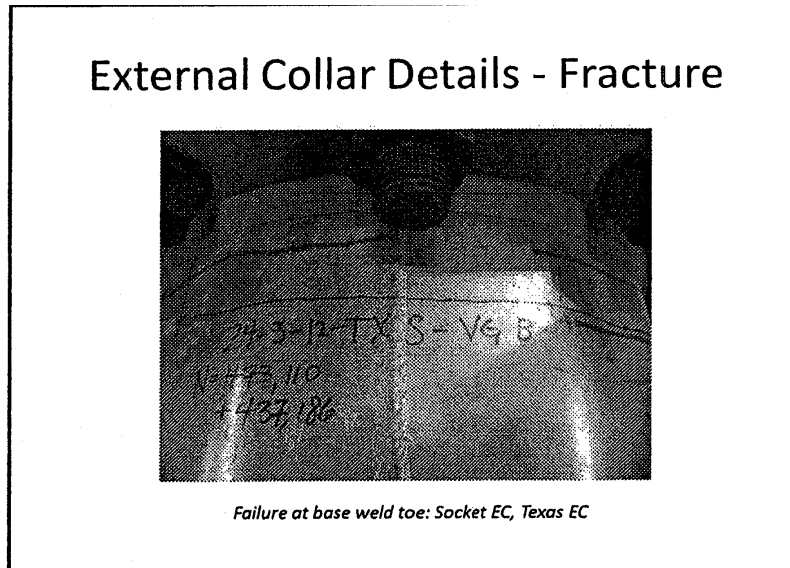
11. Wyoming 優於 Texas 耐疲勞度試驗成果



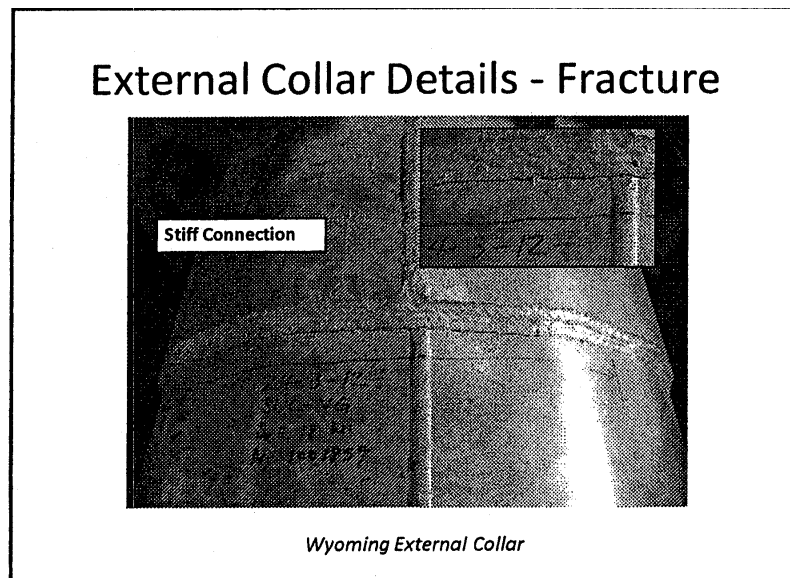
12. 插套接耐外領圈焊道細節



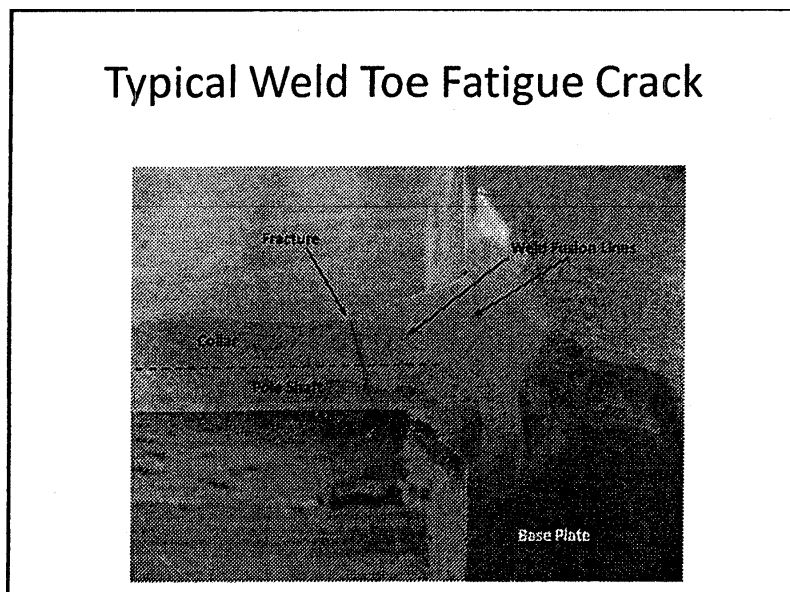
13. 外領圈加勁焊道細節－底板試驗結果之趾部裂紋



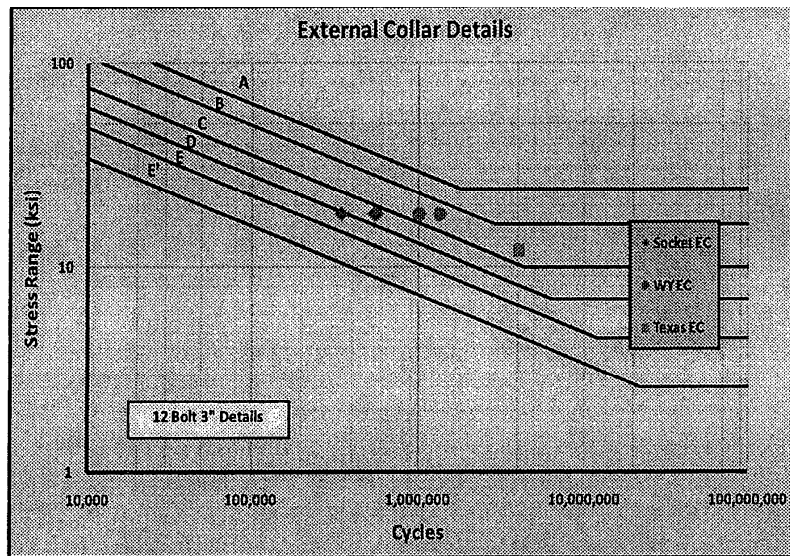
14. 外領圈加勁焊道細節－裂紋



15. 典型焊道趾部疲勞破裂切片



## 16. 外領圈焊道——全滲透優於管座式連接 Socket



## 17. 高桅桿焊道疲勞試驗之研究成果統計圖表

Connection Detail	臂桿直徑 (in)	底板厚 (in)	試驗樣本數	平均 A 值 ( $\times 10^3$ )	標準差	平均耐疲勞等級
管座式連接 Socket	24	2.5	2	0.36	0.18	X
		2	2	1.64	1.18	X
		3	4	0.45	6.90	E'
	合計		8	5.25	6.45	E'
全滲透 Full Penetration	24	2	1	2.31	0.00	X
		3	6	11.31	6.25	E
	32.625	3	6	5.23	2.89	E'
	合計		13		3.75	E'
外領圈加勁 External Collar	24	3	5	19.65	12.75	E
全滲透外領圈加勁 Full Penetration External Collar	24	5	5	68.56	9.65	C
墊凳 Stool	24	2	8	24.12	10.01	D
Total			35			

## 五、橫向懸伸桅桿之研究成果

### 試驗結果圖表

橫向懸伸桅桿 Connection Detail	臂桿直徑 (in)	底板厚 (in)	試驗樣本數	平均 A 值 ( $\times 10^3$ )	標準差	平均耐疲勞等級
管座式連接 Socket	10	1	3	5.85	3.86	E'
		1.5	11	4.68	3.72	E'
		1.75	12	9.1	4.11	X
		2	12	14.59	23.72	E'
		3	2	10.10	5.09	E'
	12	2	3	1.35	0.15	X
	合計		43	8.98	15.40	E'
全滲透 Full Penetration	8	2	2	110.84	10.62	C
	10	1	8	26.10	1.7214.93	D
		1.5	2	12.86	29.88	E
		2	5	95.15	95.18	C
	12	3	12	118.09	7.13	C
		2	2	56.43	3.55	C
	3	2	42.94	0.00	D	



全滲透	13	2	1	7.85	72.50	E'
Full Penetration	合計		34		72.50	C
全滲透（用錐尖敲打）	10	3	3	44.26	25.37	C
Full Penetration (peened)						
外領圈加勁 External Collar	8	2	2	34.00	5.79	D
	10	1.5	2	55.68	22.43	C
		1.75	5	57.64	24.35	C
		2	8	93.91	64.13	C
	12	2	4	21.72	4.68	E
合計		21	62.17	49.06	C	
Total			91			

## 六、研究結論

### 1. 下列措施可增強耐疲勞度

- 底板加厚
- 較小之全滲透焊接底板開孔

### 2. 高桅桿

結合厚底板、小開孔、12 支螺栓、外領圈加勁可產生 C 級耐疲勞強度

### 3. 螺栓配置型式對橫向桅桿影響不顯著

### 4. 橫向桅桿全滲透焊接底板

2"厚底板可產生

### 5. D 級或更高之耐疲勞強度

七、鍍鋅高桅桿之疲勞強度性能因鍍鋅產生之殘餘應力會使其各項強度降低，故設計時應予考量。