

# 《鋼結構設計》

程中鼎老師 主解

- 一、請就下列四種鋼材中選擇一種最適合於上部結構採用全斷面銲接之鋼結構跨海大橋，並舉出四項理由說明選擇該鋼種之原因，多於四項，第五項起不予計分。(25分)

鋼種	$F_y$ (MPa)	C(%)	$C_{eq}$ (%)	CVN	預熱溫度
A.	> 325	0.18~0.20	< 0.36	0°C、27J 軋延方向取樣	66°C
B.	> 345	< 0.23	無規定	21°C、34J 軋延方向取樣	21°C
C.	> 485	< 0.11	無規定	-25°C、200J 軋延方向取樣	21°C
D.	> 500	< 0.11	< 0.44~0.47	-25°C、200J 垂直軋延方向取樣	不需預熱

<b>試題評析</b>	命題委員其實是想問「高降伏強度橋梁結構用鋼SBHS 500」之優點，但不直接問您而是換個方式來切入考點，很有趣吧！國道四號豐潭段714段主橋梁，因行經三義斷層帶，而採用中鋼70公斤級SBHS 500鋼材。 選用鋼材不外乎從降伏強度越高、碳及碳當量值低、CVN值高、不需預熱下手，有大大方向後續回答就簡單多了。本題類似於104年結構高考试题，有87%像。
<b>考點命中</b>	《高點建國「國考鋼結構精解」講義》程中鼎編授，例題1.7.3。

解：

本題建議選擇鋼種D作為鋼結構跨海大橋上部結構用鋼，原因如下：

## 1.最大降伏強度 $F_y$

我國98年頒「公路橋梁設計規範」規定鋼材最小拉力強度 $F_u$ 及最小降伏強度 $F_y$ ，換句話說規範希望設計者採用高強度鋼材。當鋼材強度越高，鋼材使用量會越少，可提升強度重量比，建造較經濟(較輕)之結構。

## 2.碳含量越低越好

(1)碳是影響鋼材機械性質最大元素，根據研究每增加0.01%的碳，抗拉強度約增加6.89 MPa。雖然抗拉強度、降伏強度與硬度隨碳含量增加而增加，但延展性、銲接性及衝擊韌性反而下降。碳屬於有害成份，在銲接過程中碳與氧會形成一氧化碳而造成銲道產生氣孔，不利於銲道品質。尤其是在碳含量大於0.12%以上時易造成熱裂發生，並加速硫對銲道的不利影響；另外碳對於麻田散鐵的影響也易造成冷裂(氫裂)。

(2)若可以將碳含量控制在0.10%以下則可以大幅降低銲道發生氫裂機率，目前如SBHS 500、SBHS 700、SBHS 500W、SBHS 700W、ASTM HPS 50W、ASTM HPS 70W等高性能鋼材碳含量皆控制在0.11%，較傳統鋼材的碳含量低50%。

## 3.碳當量越低越好

(1)為了減少鋼材化學成份對銲接品質的影響，提升銲接性，尤其是高入熱量銲接，因此減少碳、磷及硫等不利於鋼結構銲接的元素是必要的。

(2)碳當量乃是將碳以外元素如錳、矽、鉻、鎳...等元素對可銲性的影響轉換成相對的碳量，作為可銲性之評估。碳當量值越低可銲性越佳，銲接瑕疵程度越低，較容易銲接出令人滿意結果。

(3) 橋梁因承受車輛反覆動力作用而有疲勞載重且銲接為鋼橋製造過程中不可避免的過程，因此採用碳當量越低鋼材確保銲接後的品質是必需的。

#### 4. CVN在越低溫度下若能吸收越大能量者越佳

(1) **破裂韌度**(Fracture Toughness or Notch Toughness)為鋼材在**尖銳刻痕**情況下**抵抗裂縫增長**的能力，破裂韌度越高代表鋼材抵抗**脆性破壞**的能力越好。

韌度亦稱**韌性**，係指材料吸收能量的能力。鋼材承受衝擊載重(如橋梁結構)或承載地震力之能力皆可用韌性來評估。韌性可以由材料應力-應變曲線下所包圍成的面積來評估，面積越大韌性越好。

(2) 破裂韌度通常以衝擊試驗(Charpy V-notch Test, CVN Test)試驗，破裂韌度值與材料的轉脆溫度(transition temperature)有關。鋼材衝擊試驗所吸收之能量值一般需達到27J(焦耳)以上，對於裂縫急速增長之抵抗才較佳，換句話說衝擊試驗值越高之鋼材越不容易產生不穩定裂縫，對銲接瑕疵的忍受度也越高。高性能鋼如SM 570及SBHS 500分別訂定在-5°C為47J及100J規定。

(3) 本題D鋼種在-25°C可達200J，代表該鋼種在環境溫度較低的情況下不易產生脆性斷裂，對於母材、銲接瑕疵與幾何形狀變化所造成的應力集中忍受度也較高，由於鋼橋設計常常是疲勞載重控制，因此CVN值在鋼材選用上是一個非常重要的指標。

#### 5. 不需預熱最好

(1) 除了化學成份與衝擊韌性要求外，銲接程序中**入熱量的控制**是影響銲接品質重要因素之一。

銲接時如果入熱量過高，銲道容易產生熱裂及熱影響區會有脆化影響。

(2) 橋梁厚板往往需要經過數十道以上往返的銲接，因此對於其預熱溫度、道間溫度或後熱溫度需有嚴格控制；而銲接作業項目多反倒是銲接效率差、施工工期相對較長。

(3) 為了確保銲接品質下，降低或省去預熱、道間加熱或後熱等程序以簡化銲接作業，是為高性能鋼板特性之一。

(4) D鋼種不需預熱，代表可大幅縮短工期，且此種不需預熱鋼材通常可採用大入熱銲接方式，減少銲道層數，亦為施工上好處之一。

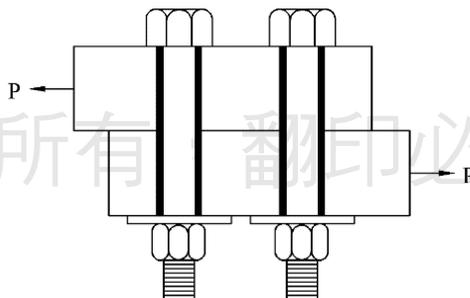
## 二、請敘述高強度螺栓接合中摩阻型(Slip-critical)螺栓接合承受剪力時之傳遞機制及如何定義其極限狀態。(15分)

試題評析	摩阻型接合剪力傳遞機制每年在黑板上都有畫出來跟您說明，根本是賺到了！另外摩阻型滑動後會變成承壓型接合，掌握此觀念要拿到分數很簡單的。
考點命中	《高點建國「國考鋼結構精解」講義》程中鼎編授，P.6-5。

解：

#### 1. 摩阻型接合承受剪力傳遞機制

**摩阻型**接合基本原理是利用高強度螺栓鎖緊時所施加的**預拉力**，此預拉力會使螺栓頭與螺帽夾距內的鋼板產生**夾緊力(壓力)**，由靜力學觀念可知最大靜摩擦力 $F_s$ 為靜摩擦係數 $\mu_s$ 乘上正向壓力 $N$ ，**摩阻型接合**即利用鋼板間夾緊力 $N$ 與鋼板間摩擦係數 $\mu_s$ ，使外力經由**摩擦力**來傳遞，如圖所示。



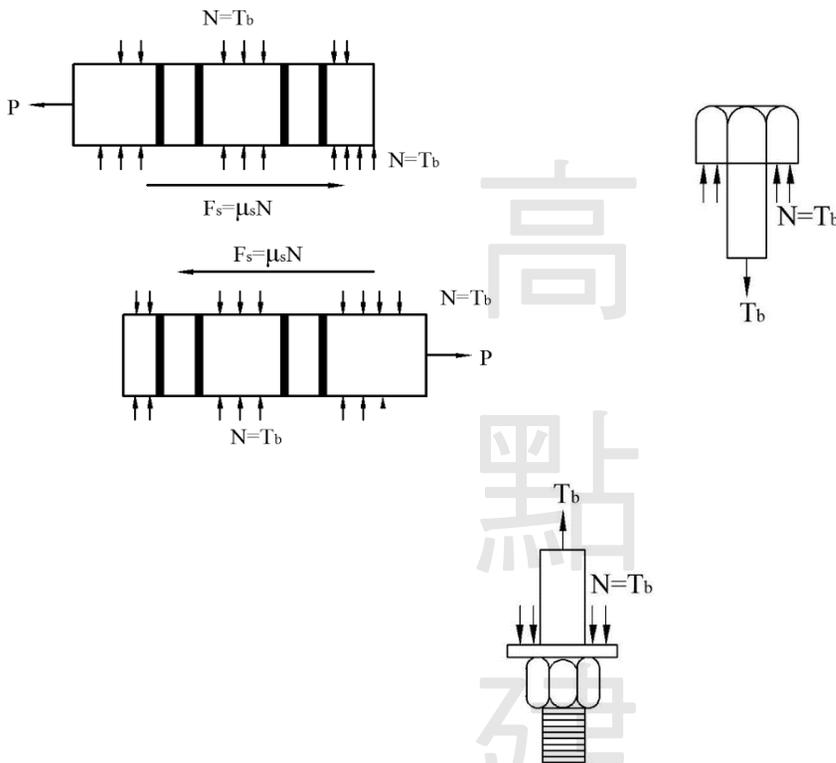


圖 摩阻型接合設計受力機制

摩阻型螺栓接合的設計強度可以用下式來說明：

$$F_s = \mu_s N$$

公式中 $N$ 為正向壓力，就是螺栓預拉力對鋼板產生的夾緊力。當預拉力越大時鋼板的正向壓力 $N$ 亦越大，摩擦力 $F_s$ 也會跟著變大，使鋼板有足夠的摩擦力來傳遞力量。規範規定**最小預拉力 $T_b$ 需達抗拉強度的70%**，也是避免螺栓預拉力過小使得鋼板摩擦力不足，致使接合失敗。

$\mu_s$ 為鋼板接合面間之摩擦係數(滑動係數)，此**摩擦係數的大小與鋼板表面處理方式有關**。一般若無特殊要求，大都以 $\mu_s = 0.33$ 作為設計基準。

## 2. 摩阻型接合極限狀態

### (1) 使用性極限狀態

在**摩阻型接合中，不允許鋼板產生相對滑動**，因為一旦鋼板產生滑動表示外力已經大於摩擦力，摩擦力無法再傳遞外力，**摩阻型接合視為失敗**。特別注意的是鋼板產生滑動後構件仍完好無缺，並沒有產生損壞，是一種**使用性**的極限狀態失敗。在此階段檢核的是**摩阻型螺栓剪力強度**是否足夠。

### (2) 強度極限狀態

## 3. 摩阻型接合一但產生滑動即變成承壓型，此時需檢核的有：

(1) 承壓型螺栓剪力強度。

(2) 螺栓孔承壓強度。

(3) 拉力桿件或鋼板的全斷面積降伏、有效淨斷面積撕裂及塊狀剪力強度。

三、某工程師依據容許應力設計法設計一長6 m承受純軸壓之銲接組合H型鋼 H700×300×25×50，應力檢核時得容許應力( $F_a$ )為 $0.34F_y$ ，請問計算所得之值容許應力( $F_a$ )是否合理？請敘述原因。(30分)(假設 $K_x=0.8$ 、 $K_y=2.1$ ， $C_c=128$ )

試題評析	本題要考您的是基本性質計算，判斷是彈性挫屈或非彈性挫屈後，再利用彈性挫屈最大值去判別容許應力值是否合理，考在結構技師算是送分啊！
考點命中	《高點建國「國考鋼結構精解」講義》程中鼎編授，例題2.4.3。

解：

1.先求桿件最大細長比 $(\frac{KL}{r})_{\max}$ 和臨界細長比 $C_c$

$$\text{強軸慣性矩 } I_x = \frac{1}{12}(30 \times 70^3 - 27.6 \times 60^3) = 362500 \text{ cm}^4$$

$$\text{弱軸慣性矩 } I_y = \frac{1}{12}(5 \times 30^3 \times 2 + 60 \times 2.5^3) = 22578.125 \text{ cm}^4$$

$$\text{H型鋼斷面積 } A = 2(30 \times 5) + (60 \times 2.5) = 450 \text{ cm}^2$$

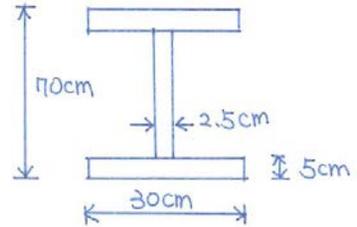
$$\text{強軸迴轉半徑 } r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{362500}{450}} = 28.382 \text{ cm}$$

$$\text{弱軸迴轉半徑 } r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{22578.125}{450}} = 7.083 \text{ cm}$$

$$\text{強軸桿件細長比 } (\frac{KL}{r})_x = \frac{0.8(600)}{28.382} = 16.912$$

$$\text{弱軸桿件細長比 } (\frac{KL}{r})_y = \frac{2.1(600)}{7.083} = 177.891 = (\frac{KL}{r})_{\max}$$

因為最大細長比 $(\frac{KL}{r})_{\max} >$  臨界細長比 $C_c$ ，故柱為**彈性挫屈**！



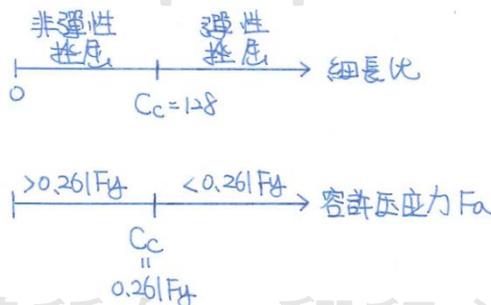
2.再求容許壓應力 $F_a$

桿件在**最大彈性挫屈**階段的細長比為 $C_c$ ，由 $C_c = 128$ 可反求此時的彈性係數 $E$ ：

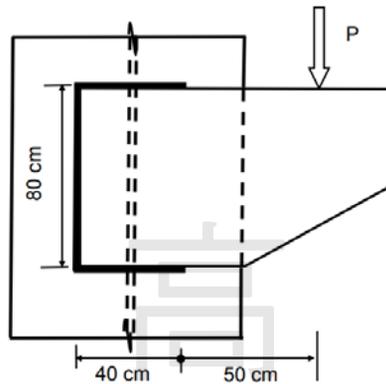
$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \Rightarrow C_c^2 = \frac{2\pi^2 E}{F_y} \Rightarrow E = \frac{C_c^2 F_y}{2\pi^2} = \frac{128^2 F_y}{2\pi^2} = 830.023 F_y$$

$$\text{最大彈性挫屈之容許壓應力 } F_a = \frac{12\pi^2 E}{23C_c^2} = \frac{12\pi^2 (830.023 F_y)}{23(128)^2} = 0.261 F_y$$

上面這個結果告訴我們一件事情：「**桿件在彈性挫屈的最大應力為 $0.261F_y$** 」。本題最大細長比 $(\frac{KL}{r})_{\max} >$  臨界細長比 $C_c$ ，因此所得之容許壓應力**必定會小於 $0.261F_y$** ，但依據題目所述其計算所得容許壓應力為 **$0.34F_y$** ，顯然是不合理的，故可以推斷該工程師必有計算錯誤！



四、一銲接於鋼柱托架承受 $P$ 之集中載重，採用E70XX銲條，填角銲之有效喉厚為10 mm，銲道長度如下圖，上、下水平銲道長度相同。請依極限設計法檢核該銲道可承受之最大集中載重 $P_u$ 。(30分)( $\phi 0.6F_{EXX}$ ， $\phi = 0.75$ ，不須考慮載重係數)



<b>試題評析</b>	本題類似於93年結構技師考古題，但是更為簡單啊！非常容易的銲接接合扭剪分析，有買「國考鋼結構精解」的朋友應該10分鐘就算完了！
<b>考點命中</b>	《高點建國「國考鋼結構精解」講義》程中鼎編授，例題7.11.4。

解：

1. 求銲道群形心 $\bar{x}$ 及 $\bar{y}$

有效喉厚 $t_e = 1 \text{ cm}$

$$\bar{x} = \frac{2(40 \times 1)(20) + (80 \times 1)(0.5)}{2(40 \times 1) + (80 \times 1)} = 10.25 \text{ cm}$$

$\bar{y} = 40 \text{ cm}$  (上下對稱)

2. 求銲道群極慣性矩  $J = I_x + I_y$

$$I_x = 2 \left[ \frac{1}{12} (40)(1^3) + (40 \times 1)(40^2) \right] + \left[ \frac{1}{12} (1)(80^3) \right] = 170673.333 \text{ cm}^4$$

$$I_y = 2 \left[ \frac{1}{12} (1)(40^3) + (1 \times 40)(9.75)^2 \right] + \left[ \frac{1}{12} (80)(1^3) + (80 \times 1)(10.25^2) \right] = 26683.333 \text{ cm}^4$$

$$\text{極慣性矩 } J = I_x + I_y = 197356.666 \text{ cm}^4$$

3. 計算垂直向係數化載重 $P_{uy}$ 、外加係數化扭矩 $T_u$

$$P_{uy} = P_u (\downarrow)$$

$$T_u = P_u e_x = P_u (90 - 10.25) = 79.75 P_u (\circlearrowleft)$$

4. 銲道(點)單位長度所承受之最大係數化剪力

依據力量同向相加、反向相減的觀念，最大剪應力會發生在A點：

$$y \text{ 方向係數化剪應力 } f_{uyy} = \frac{P_{uy}}{t_e \sum L} = \frac{P_u}{2(40 \times 1) + (80 \times 1)} = \frac{P_u}{160} (\downarrow)$$

$$x \text{ 方向係數化扭轉剪應力 } f_{uTx} = \frac{T_u y_i}{J} = \frac{(79.75 P_u)(40)}{197356.666} = \frac{P_u}{61.867} (\leftarrow)$$

$$y \text{ 方向係數化扭轉剪應力 } f_{uTy} = \frac{T_u x_i}{J} = \frac{(79.75 P_u)(29.75)}{197356.666} = \frac{P_u}{83.183} (\downarrow)$$

5. 計算最大因數化載重 $P_u$

$$f_{uR,max} = \sqrt{(f_{uTx})^2 + (f_{uyy} + f_{uTy})^2} = \sqrt{\left(\frac{P_u}{61.867}\right)^2 + \left(\frac{P_u}{160} + \frac{P_u}{83.183}\right)^2} = 0.0244 P_u$$

$$\text{銲材設計剪應力強度 } \phi R_W = 0.75(0.6 F_{EXX}) = 0.75(0.6 F_{EXX}) = 0.45 F_{EXX}$$

銲材設計剪應力強度要大於最大因數化載重，因此可反推 $P_u$ 值：

$$\phi R_W \geq f_{uR,max} \Rightarrow 0.45 F_{EXX} \geq 0.0244 P_u \Rightarrow \text{最大因數化載重 } P_{u,max} = 18.443 F_{EXX}$$

又因E70XX代表銲材的強度為70 ksi，70 ksi經過換算後為4.93 tf/cm<sup>2</sup>，故可進一步將 $F_{EXX} = 4.93 \text{ tf/cm}^2$ 代入上式：

$$\Rightarrow \text{最大因數化載重 } P_{u,max} = 90.924 \text{ tf}$$

