

國震中心與結構學會工程技術講座(14)

鋼橋的工地現場螺栓接頭設計探討

Design of High Strength Bolt Joint for Steel Bridge

張英發 李家順

張容慈 李俊偉 邱益成

台灣世曦工程顧問股份有限公司
簡報人：第一結構部技術經理 張英發
ehte@ceci.com.tw

2019年4月19日



簡報內容

- 工地接頭說明
- 翼板接頭設計
- 腹板接頭設計
- 接頭設計探討
- 結論

鋼結構應用優點



材料強度強

重量輕

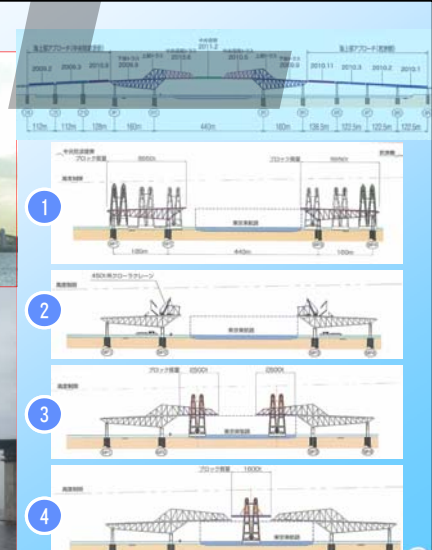
韌性佳

造型自由

工地組裝快

- 長跨距橋梁
- 多層高架橋
- 曲線段梁橋
- 共構高架橋
- 新形式橋梁
- 工期短橋梁
- 場地受限橋梁

東京港臨海大橋



圖片摘自日本「橋の構造とがわる本」

■ 工地接頭說明



限制條件：

1. 運輸條件
 - ✓ 道路寬度
 - ✓ 運輸車輛
 - ✓ 運載重量
2. 施工條件
 - ✓ 製作場地
 - ✓ 施工機具
 - ✓ 施工設備

5

鋼橋架設工法



6

鋼結構 現場接頭：銲接與螺栓

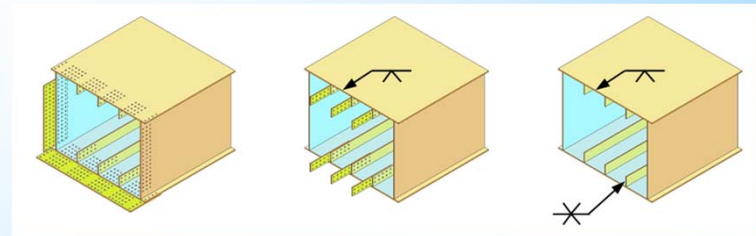


銲接

螺栓

7

工地現場接頭接合型式



螺栓接合

外部銲接內部栓接

全斷面銲接

8

接頭設計之相關規定

「公路橋梁設計規範」第九章鋼結構第9.1.16續接

續接可使用高強度螺栓或銲接。

除本節其他規定外，一般而言，不論拉力、壓力、彎矩或剪力之續接，採用「容許應力設計法」或「強度設計法」設計應取不小於續接點之需求設計強度與設計構材強度之平均值，且不得小於設計構材強度之75%。

若續接處斷面有變化時，上述續接設計使用較小一邊之斷面。

螺栓接頭設計注意事項

1. 連續跨徑橋之續接，應儘量設置於靜載重反曲點或其附近為宜。
2. 翼板及腹板之續接，其接頭每邊應至少使用兩行以上之螺栓。
3. 過大孔或槽型孔不得使用於螺栓接頭中之構材或續接板。
4. 翼板及腹板使用高強度螺栓續接設計時，應考量在鋼構架設及澆鑄或安置橋面板過程中不致發生滑動。
5. 在反復應力區之翼板及腹板續接，其正彎曲及負彎曲皆應加檢核。
6. 採用大於6mm以上填板之螺栓續接，應加額外聯結物或剪力強度作折減。

翼板螺栓接頭設計

依「公路橋梁設計規範」第九章鋼結構第9.1.17接頭強度之規定，除另有規定者外，以「容許應力設計法」設計主要構材接頭時，其設計應力應不小於接點處構材之計得應力及同點構材容許應力之平均值，但不得小於該構材容許應力之75%。

依設計規範規定，控制翼板(Controlling Flange)之續接板至少應以設計力 P_{cu} 設計之，控制翼板應取續接處上翼板或下翼板較小斷面者，其翼板在其厚度中央之彈性彎曲應力與其容許應力比較，佔有最大比率。考量一般設計條件下，其設計應力如下：

$$P_{cu} = F_{cu} * A_e$$

$$F_{cu} = \frac{(|f_{cu}| + F_{yf})}{2} \geq 0.75F_{yf}$$

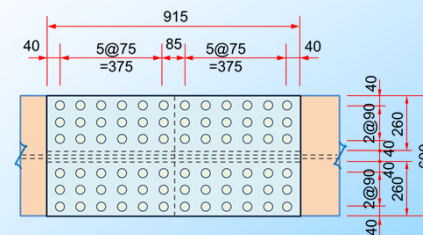
非控制翼板(Noncontrolling Flange)應至少以設計力 P_{ncu} 設計之，其設計應力如下：

$$F_{ncu} = R_{cu}(|f_{ncu}|) \geq 0.75F_{yf}$$

翼板設計案例 1

實際分析應力值進行分析

受壓上翼板的接頭設計，其上翼板板厚為32mm，寬度為600mm，接用A709 Gr.50鋼材， $F_y = 3500\text{kgf/cm}^2$ ， $F_b = 1890\text{kgf/cm}^2$ ，該接頭處的實際分析應力值為 1681kgf/cm^2 ，大於 $0.75F_b = 1417.5\text{kgf/cm}^2$ 。



$$N = \frac{A_f \times \sigma_u}{\frac{3.2 \times 60 \times 1.681}{9.913}} = 32.5 \text{ 顆}$$

$$A_{gs} = 60 \times 1.6 + 2 \times 26 \times 1.6 = 179.2\text{cm}^2$$

$$F_v = 1280.6 \text{ kg/cm}^2$$

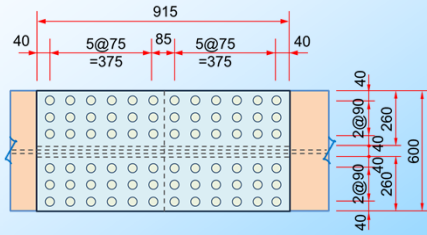
$$P = \pi/4 \times D^2 \times F_v \times 2 = 9.913 \text{ t}$$

$$\sigma_s = \frac{\sigma_u \times A_f}{A_{gs}} = \frac{1.681 \times 3.2 \times 60.0}{179.2} = 1.801 \text{ tf/cm}^2 < F_b$$

翼板設計案例 2

實際分析應力值進行分析

受拉下翼板的接頭設計，其下翼板板厚為32mm，寬度為600mm，接用A709 Gr.50鋼材， $F_y = 3500\text{kgf/cm}^2$ ， $F_b = 1890\text{kgf/cm}^2$ ，該接頭處的實際分析應力值為 1681kgf/cm^2 ，大於 $0.75F_b = 1417.5\text{kgf/cm}^2$ 。



$$N = \frac{A_f \times \sigma_u}{P}$$

$$= \frac{3.2 \times 60 \times 1.681}{9.913}$$

$$= 32.5 \text{ 顆}$$

$$A_{fc} = 60 \times 3.2 - 6 \times 2.5 \times 3.2 = 192.0 - 48.0 = 144.0 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_l' = \frac{\sigma_l \times A_f}{A_{fc}} = \frac{1.681 \times 3.2 \times 60.0}{144.0}$$

$$= 2.241 \text{ t f / cm}^2 > F_b$$

下翼板板厚
↓
38mm

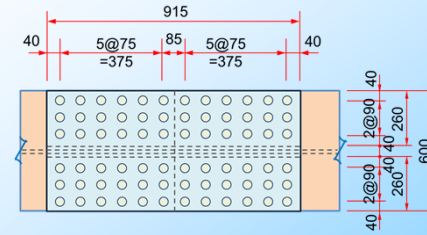
$$\sigma_l' = \frac{\sigma_l \times A_f}{A_{fc}}$$

$$= 1.887 \text{ t f / cm}^2 < F_b$$

翼板設計案例 3

全強設計進行分析

受拉上翼板的接頭設計，其上翼板板厚為32mm，寬度為600mm，接用A709 Gr.50鋼材， $F_y = 3500\text{kgf/cm}^2$ ， $F_b = 1890\text{kgf/cm}^2$ 。採全強設計。



$$A_{fc} / A_f$$

$$= 144.0 / 192.0 = 0.75$$

$$\sigma_l' = (A_{fc} / A_f + 0.15) F_b$$

$$= 1.701 \text{ t f / cm}^2 < F_b$$

$$N = \frac{A_f \times \sigma_l'}{P}$$

$$= \frac{192.0 \times 1.701}{9.913}$$

$$= 32.9 \text{ 顆}$$

腹板螺栓接頭設計

$$f_v < 0.5F_w \quad F_w = 1.5f_v \quad f_v \text{ 腹板之最大剪應力}$$

$$f_v \geq 0.5F_w \quad F_w = 0.5(f_v + F_v) \quad F_v \text{ 腹板之容許剪應力。}$$

設計剪力偏心產生之腹板設計彎矩 M_v

$$M_v = F_w D_w t_w e$$

- F_w : 續接處腹板之設計剪應力
- D_w : 腹板深度
- t_w : 腹板厚度
- e : 自續接中心至所考慮接頭一側中心點之距離。

腹板接頭型式 1 (I型螺栓配置)



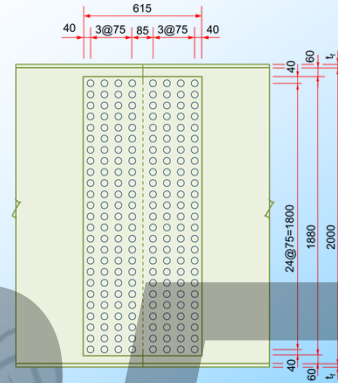
腹板接頭型式 2 (等寬度螺栓配置)



腹板設計案例 1

實際分析應力值進行分析

腹板的接頭設計，其腹板深度 D_w 為2000mm，腹板厚 t_w 為25mm。腹板接用 A709 Gr.50鋼材， $F_y = 3500\text{kgf/cm}^2$ ， $F_b = 1890\text{kgf/cm}^2$ ， $F_v = 1190\text{kgf/cm}^2$ ，螺栓則採用 A325 7/8" H.S.B.。



$$M = 2132.66 \text{ t-m} \quad V = 127.21 \text{ t} \quad I_y = 0.2268 \text{ m}^4$$

$$f_b = \frac{My}{I_y} = \frac{2132.66 \times 1.0}{0.2268} = 940.3 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\sigma = \text{Max} \left\{ \frac{1}{2}(F_b + f_b), 0.75F_b \right\}$$

$$= \text{Max} (1415.2, 1417.5) = 1417.5 \text{ kgf/cm}^2$$

$$V' = V \frac{\sigma}{f_b} = 127.21 \times \frac{1417.5}{940.3} = 191.77 \text{ t}$$

螺栓的承受剪力 P_{bt} 之計算

$$e = \frac{8.5}{2} + \frac{3}{2} \times 7.5 = 15.5 \text{ cm}$$

$$M_e = V' \times e = 191.77 \times 15.5$$

$$= 2972.44 \text{ t-cm}$$

$$M_b = \sigma \times s = 1417.5 \times \frac{1}{6} \times 2.5 \times 200^2$$

$$= 23625 \text{ t-cm}$$

$$M_t = M_b + M_e = 26597.44 \text{ t-cm}$$

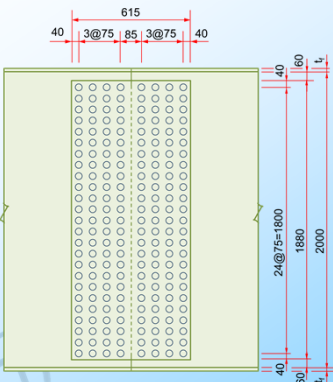
$$P_v = \frac{V'}{N} + \frac{M_t \times d_h}{\sum d^2} = 2.917 \text{ t}$$

$$P_h = \frac{M_t \times d_v}{\sum d^2} = 7.992 \text{ t}$$

$$P_{bt} = \sqrt{P_v^2 + P_h^2} = 8.508 \text{ t} < P = 9.913 \text{ t} \quad \text{ok}$$

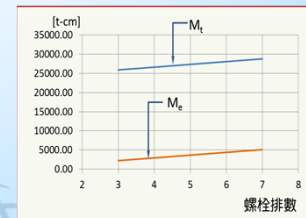
腹板連接板之板厚 t_s 計算

$$t_s = \frac{t_w(D_w \times 1.15 - n_b \times d_b)}{2 \times D_s \times 1.15 - n_b \times 2 \times d_b} = 13.6 \text{ mm}$$

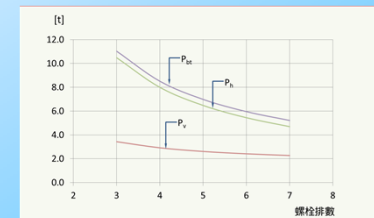


排數	螺栓數量	$\sum d^2$ [cm ²]	e [cm]	d_h [cm]	d_v [cm]	M_e [t-cm]	M_t [t-cm]	P_v [t]	P_h [t]	P_{bt} [t]
3	75	222187.5	11.75	90.0	7.50	2253.30	25878.30	3.430	10.482	11.029
4	100	299531.3	15.50	90.0	11.25	2972.44	26597.44	2.917	7.992	8.507
5	125	379687.5	19.25	90.0	15.00	3691.57	27316.57	2.613	6.475	6.983
6	150	463359.4	23.00	90.0	18.75	4410.71	28035.71	2.413	5.445	5.956
7	175	551250.0	26.75	90.0	22.50	5129.85	28754.85	2.269	4.695	5.214

不同螺栓排數之腹板接頭試算表



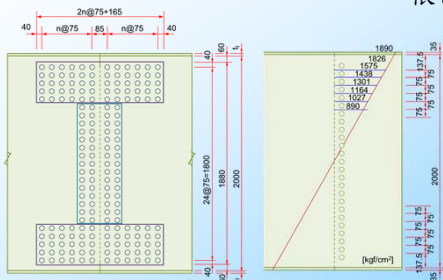
偏心彎矩與螺栓排數的關係



腹板設計案例 2

腹板的接頭設計，其腹板深度 D_w 為2000mm，腹板厚 t_w 為25mm。腹板接用A709 Gr.50鋼材， $F_y = 3500\text{kgf/cm}^2$ ， $F_b = 1890\text{kgf/cm}^2$ ， $F_v = 1190\text{kgf/cm}^2$ ，螺栓則採用A325 7/8" H.S.B.。

依日本「道路橋示方書」規定



應力分佈

第1排螺栓，採6顆螺栓

$$P_{bt} = \frac{(1826 + 1575)/2 \times 13.75 \times 2.5}{6} = 9742.4 \text{ kgf} < P = 9.913 \text{ tok}$$

第2排螺栓，採6顆螺栓

$$P_{bt} = 4707.8 \text{ kgf} < P = 9.913 \text{ t ok}$$

第3排螺栓，採6顆螺栓

$$P_{bt} = 4284.3 \text{ kgf} < P = 9.913 \text{ t ok}$$

腹板設計案例 3 本計算例僅作為設計計算之探討

腹板的接頭設計，其腹板深度 D_w 為2000mm，腹板厚 t_w 為25mm。腹板接用A709 Gr.50鋼材， $F_y = 3500\text{kgf/cm}^2$ ， $F_b = 1890\text{kgf/cm}^2$ ， $F_v = 1190\text{kgf/cm}^2$ ，螺栓則採用A325 7/8" H.S.B.。

$$V = 1.190 \times 2.5 \times 200.0 = 595.0 \text{ t}$$

$$M_w = 1.890 \times \frac{1}{12} \times 2.5 \times 200.0^3 / 100 = 31500.0 \text{ t-cm}$$

$$e = \frac{8.5}{2} + 3 \times 7.5 = 26.75 \text{ cm}$$

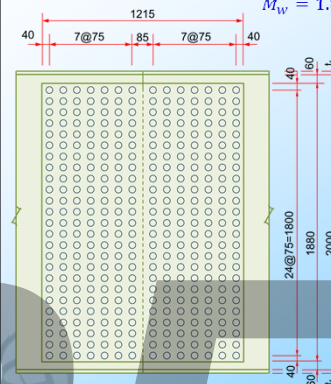
$$M_e = V \times e = 595.0 \times 26.75 = 15916.25 \text{ t-cm}$$

$$M_t = M_w + M_e = 47416.25 \text{ t-cm}$$

$$P_v = \frac{V}{N} + \frac{M_t \times d_h}{\sum d^2} = \frac{595.0}{175} + \frac{47416.25 \times 22.5}{551250.0} = 5.335 \text{ t}$$

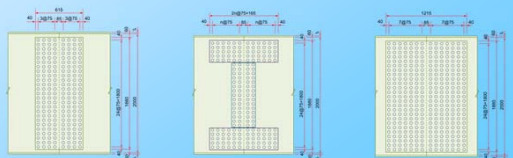
$$P_h = \frac{M_t \times d_v}{\sum d^2} = \frac{47416.25 \times 90}{551250.0} = 7.741 \text{ t}$$

$$P_{bt} = \sqrt{P_v^2 + P_h^2} = \sqrt{5.335^2 + 7.741^2} = 9.401 \text{ t} < P = 9.913 \text{ t ok}$$



腹板螺栓接頭設計案例比較

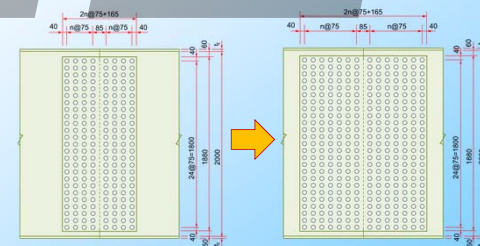
項目	設計案例1	設計案例2	設計案例3
螺栓配置	等寬度	I型	等寬度
單一接頭 螺栓數量	200顆	180顆	350顆
與案例1的螺栓 數量比值	100%	90%	175%
連接板板厚	16 mm	13 mm	16 mm



鋼板加厚 強度增加

解決方案

- ① 螺栓排數加多
- ② 高強度的螺栓
- ③ 放大螺栓直徑



採更高強度的螺栓(例如A490)

依「公路橋梁設計規範」規定，單顆A490的雙剪設計強度依上述計算，可達到12.560t，相較於A325的強度，每一顆螺栓的剪力提升約2.647t。

9.913t → 12.560t

日本「道路橋示方書」規定，螺栓排數在8排以下，其強度不需折減，但每增加一排須折減2%。螺栓配置最多為12排，其強度須配合折減8%。

螺栓排數	%
8 排以下	100
9 排	98
10 排	96
11 排	94
12 排	92

放大螺栓直徑

若採更大直徑的螺栓時，須注意其螺栓配置時之邊距及中心距的要求，否則須作強度折減，反而無法達到預期效果。若螺栓直徑大於2.54mm(1")以上，其設計強度應乘以0.875，即其強度須作折減，使得加大螺栓尺寸沒有獲得很大效益。

表 9.11 摩擦型接頭之標稱抗滑力 (每單位螺栓面積抗滑力 F_t , kgf/cm² MPa)

孔型及載重作用方向	標稱型							
	側向				平行			
	短槽型		過大型及短槽型		長槽		長槽	
收接構材表面狀況	AASHTO	AASHTO	AASHTO	AASHTO	AASHTO	AASHTO	AASHTO	AASHTO
	M 164	M 253	M 164	M 253	M 164	M 253	M 164	M 253
	(ASTM	(ASTM	(ASTM	(ASTM	(ASTM	(ASTM	(ASTM	(ASTM
	A325)	A490)	A325)	A490)	A325)	A490)	A325)	A490)
A級(滑動係數0.33)	1050	1330	910	1120	770	910	630	770
C級(滑動係數0.33)	1050	1330	910	1120	770	910	630	770
熱浸鍍鋅或以鋼制	103.4	131.0	89.6	110.3	75.3	89.6	62.0	75.8

註：a. 直徑大於 25mm 之 M164(A325) 螺栓抗力強度折減。b. 系列設計係採用螺栓直徑為 25mm，直徑大於 25mm 之設計值必須乘以 0.875。
 b. 分類如 A 類或 B 類資料分別包含了平均滑動係數不小於 0.33 或 0.50 之資料，以 "Testing Method to Determine the Slip Coefficient for Coatings Used in Bolted Joints" 所決定者。見 9.2.2 節 3 項 (3)。

參考資料
公路橋梁設計規範
(2015)
第九章鋼結構

■腹板接頭設計的探討 - 計算方式

- 以腹板剪力容許應力之90%及彎矩容許應力之75%(簡稱為折減係數方案)進行接頭螺栓剪力計算
- 以設計案例3(簡稱不折減方案)及容許值等，作綜整比對，以使設計工程師對螺栓受力程度更有感覺。
- 以單跨簡支梁、兩跨連續梁及三跨連續梁作為分析探討對象，分別計算其剪力及彎矩比值，然後依比值進行接頭之螺栓承受最大剪力計算，以了解螺栓可能的受力情況。

■腹板接頭設計的探討 - 計算方式

- 以腹板剪力容許應力之90%及彎矩容許應力之75%(簡稱為折減係數方案)進行接頭螺栓剪力計算

腹板的接頭設計，其腹板深度 D_w 為 2000mm，腹板厚 t_w 為 25mm。腹板接用 A709 Gr.50 鋼材， $F_y = 3500 \text{ kgf/cm}^2$ ， $F_b = 1890 \text{ kgf/cm}^2$ ， $F_v = 1190 \text{ kgf/cm}^2$ ，螺栓則採用 A325 7/8" H.S.B.。

$$V = 0.9 \times 1.190 \times 2.5 \times 200.0 = 0.9 \times 595.0 t = 535.5 t$$

$$M_w = 0.75 \times 1.890 \times \frac{1}{12} \times 2.5 \times 200.0^3 / 100$$

$$= 0.75 \times 31500.0 t - cm = 23625 t - cm$$

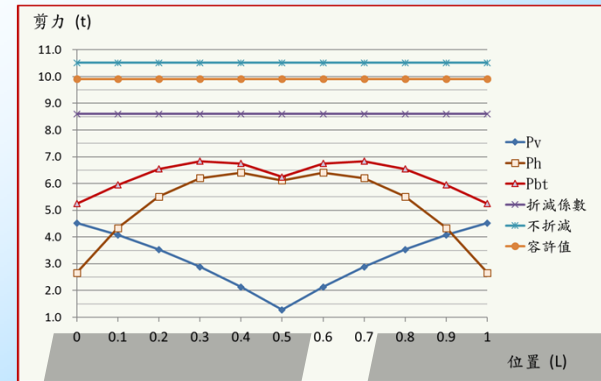
■腹板接頭設計的探討 - 計算方式

- 以單跨簡支梁、兩跨連續梁及三跨連續梁作為分析探討對象，分別計算其剪力及彎矩比值，然後依比值進行接頭之螺栓承受最大剪力計算，以了解螺栓可能的受力情況。

步驟一、計算各主梁承受 V_{max} 及 M_{max} ，再依實際受力計算其各分點受力比值 R_V 及 R_M 。
 步驟二、採各分點受力比值 R_V 及 R_M ，依各點鋼板容許強度計算各螺栓強度，以了解其受力情況。

■腹板螺栓接頭設計探討(1)

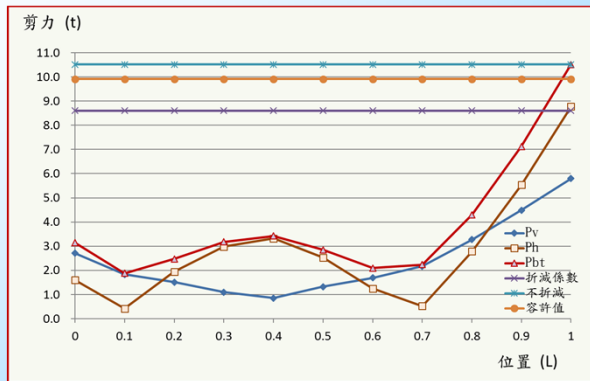
簡支梁



依剪力及彎矩比例計算之螺栓剪力

■腹板螺栓接頭設計探討(2)

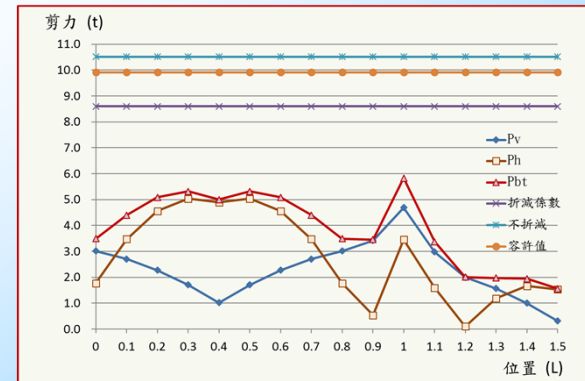
兩跨連續梁



依剪力及彎矩比例計算之螺栓剪力

■腹板螺栓接頭設計探討(3)

三跨連續梁



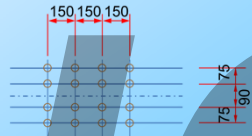
依剪力及彎矩比例計算之螺栓剪力

翼板及腹板的螺栓縱向接頭

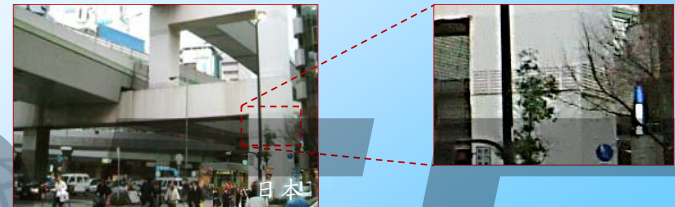
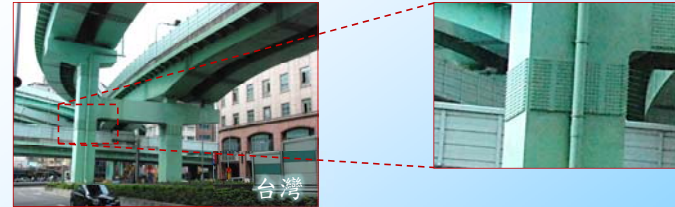
$$n = \frac{\bar{q} \times p}{\rho_a} = \frac{(\tau \times t) \times p}{\rho_a}$$

以某一鋼橋設計案為例，其腹板厚度為16mm，螺栓水平間距為150mm，剪應力值為666 kgf/cm²時，其列數(n)計算如下：

$$n = \frac{(666 \times 1.6) \times 15.0}{9913} = 1.51 \text{列}$$



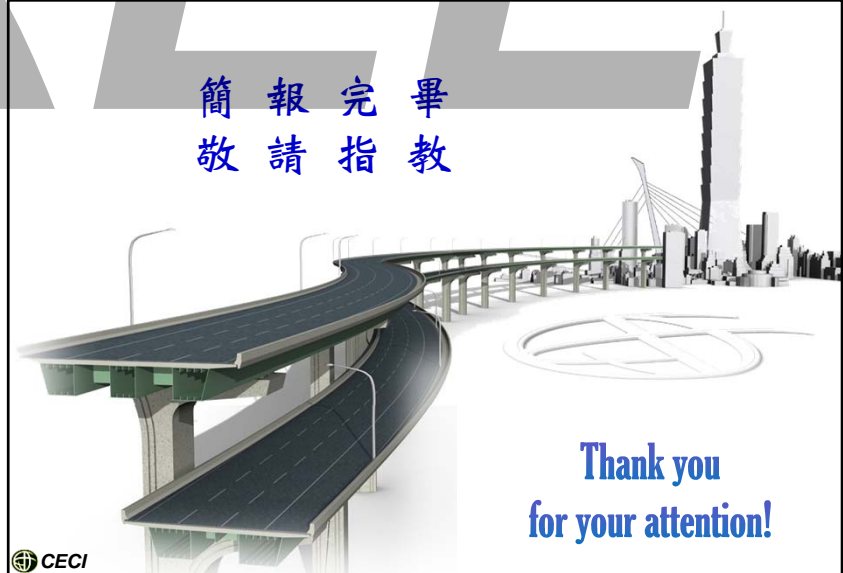
鋼橋墩柱的現場螺栓接頭



■ 結論

- 鋼橋構件的施工大都在鋼構廠進行製作，但受限於運輸或吊裝等條件，構件結合須採用現場接頭。因此現場接頭設計與施工，為全橋架設成功與否的重點。
- 鋼橋現場接頭，可採用螺栓、銲接或兩者併用，均要注意其設計與施工細節，包含現場施工的可行性及施工品質，方可確保橋梁的施工品質及安全。
- 本文章僅就鋼橋現場接頭的設計計算，提出相關的設計案例探討，包含翼板及腹板等接頭，依接頭採不同的計算方式，由計算結果作進一步比較及探討，作為鋼橋設計工程師的參考。

簡報完畢
敬請指教



Thank you
for your attention!