

# 開孔結構體之補強分析

劉正良\* 黃麗萍\*\*

國立臺灣大學機械工程學研究所

國科會計畫編號：NSC 90-2212-E-002-213

## 摘要

工具機結構常因動力傳遞或零件裝配等因素，而必需在結構體之壁上開孔，這些孔將造成結構剛度的弱化，此弱化效應可以孔邊增加補強邊框的方法改善之。本研究之目的便是藉著有限元素法的模擬分析，找出沒有開孔的結構、有開孔的結構、以及開孔後增加補強邊框的結構，三者的抗扭剛度及抗彎剛度之比較。本研究將針對結構體之一壁上開有一孔者、及兩壁同時開孔者的情況作分析，最後把所得的數據整理成圖表，供相關結構體設計者引用。從分析結果可知，孔口對於結構體之扭轉剛度的損失量最多，其次便是 My-彎曲剛度，而剛度損失量最少的是 Mx-彎曲剛度，因此，設計者可針對結構體的受力方向來決定開孔位置。

**關鍵詞：**結構、開孔、剛度、補強邊框

## 1. 緒論

工具機具有體積龐大之構件，其在受負荷下將產生一定程度的變形，此變形量之大小決定於機器之剛度(stiffness)。簡單來說，剛度便是負荷與變形之比值，此比值愈高，結構在受負荷下之變形量便愈小。剛度受工具機之材料[1]、工具機之形狀、及工具機中結構體間力的傳遞方向等因素的影響。隨著科技發展的日益進步，對產品精度的要求也愈來愈嚴格，常以微米( $\mu m$ )作為計算單位。在這樣的情況下，為了讓機器在市場上具有一定的競爭力，不致被淘汰，所以

更應重視結構剛度之設計。造成結構變形之因素主要包括：機器及待切削物之重量、切削力、機器之振動及溫度變化等，本研究將針對由力所造成的結構變形作分析，至於因振動及溫度所造成之結構變形將不作討論。

機器常常會為了動力傳遞和零件裝配等原因，而需要在結構體的壁上開孔，這些壁孔對結構剛度將有弱化的效應，如圖 1.b 中有開孔的結構體，其剛度會較圖 1.a 中沒有開孔者為差，且會造成結構體斷面的不連續變化，此突然改變之斷面，將使結構體很容易發生局部應力集中及局部變形之增加。此弱化效應雖可藉由增加壁厚來補償之，但這樣將增加結構之重量，且浪費材料，故一般均以在孔緣附近增加補強肋[2]的方法來改善之。以補強肋來增加結構剛度的方法，除了應用於工具機結構體外，亦常見於土木工程的使用[3][4][5]。台灣大學之產學計劃[6]研究過程中，嘗見日本 FANUC 公司 ROBOCUT  $\alpha$ -oc 線切割放電加工機之構造體，其多處開孔均有補強邊框，如圖 1.b 中的壁孔可藉由孔邊增加補強邊框後形成如圖 1.c 中的形狀，這樣便可增加其剛度。國內一般工具機業者對補強邊框之使用並不廣泛，可能是因為鑄造時安排砂心不易，亦可能是一般設計者對於補強邊框對剛度改善的效果並不熟悉，故本研究將針對以上問題作量化之分析。

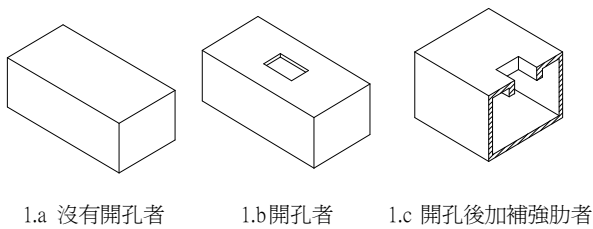


圖 1 六面結構體

本研究之目的為希望藉由有限元素模擬分析，得到結構體孔口及補強邊框之尺寸，與結構剛度之間的關係。本研究將針對在固定大小之結構體上，開不同大小之孔，然後增加不同大小的補強邊框，分析其剛度的改善情況。並把沒有開孔者、有開孔者、及開孔後增加補強邊框者三者之剛度作比較。除此之外，對結構體之兩壁同時開孔之情況將一併作分析；最後，將比較矩形孔口及圓形孔口對結構剛度之影響情況。分析所得的數據將整理為圖表，供結構設計者參考之用。

本研究之分析工具主要以有限元素法為主，由於結構體多為箱形結構，故分析對象選擇較常見之六面結構體及四面結構體兩種。工具機結構體之負荷主要為扭矩(torsion)及彎矩(moment)兩種，而結構體在承受扭轉及彎曲負荷下，將有不同的扭轉剛度及彎曲剛度，故在結構剛度的比較上，將分別針對此兩部份作分析。

使用剛度(stiffness)來作為設計的觀念最早是由 Krug[7]所提出，他認為剛度應該以負荷與變形之比值來量度之，即結構抵抗變形之能力。剛度常常會與剛性(rigidity)混淆在一起，剛性是指材料在還沒破壞前的最大容許應力，而結構在其可容許之變形下所受之應力一般遠小於此最大容許應力，故結構一般以剛度作設計之考量，而非剛性。在線性之情形下，剛度為指"每單位變形之負荷"。

有關壁孔造成結構體剛度的弱化情形，已有學者作相關方面的研究，如 Kaminskaj 等人 [8]之研究中提出了一壁厚一定的箱型結構體，其開孔前與開孔後之結構剛度比，但並無補強之措施。Bielefele [9]之研究也提出了壁孔對結構的影響長度，及人孔蓋板對結構

剛度之改善情況。從其研究結果可發現，狹窄孔對樑之抗扭剛度的影響比圓孔大。假若在狹窄孔處加入蓋板後，蓋板幾乎可補回因狹窄孔所減弱的抗彎剛度，但對於抗扭剛度，其效果則沒有那麼顯著。Reschetow 與 Kaminskaga [10]也以盒形結構為例，分析孔口及補強肋對結構之側面壁變形的影響。其報告中比較了試驗的量度值和所建議之計算方法所得值，但對於開孔後補強材的情形卻沒有提及。

## 2. 結構體模型之建立

本研究之結構體模型係依以下之假設及條件進行模擬分析：

1. 假設為靜態剛度分析。
2. 假設結構體之材料為工具機常用之鑄鐵。
3. 忽略結構體之自重。
4. 假設結構體所受之外加線分佈負荷為  $f = 20,000(N/m)$ 。
5. 以較常見之六面結構體及四面結構體兩種作分析，即如圖 2 及圖 3 所示。

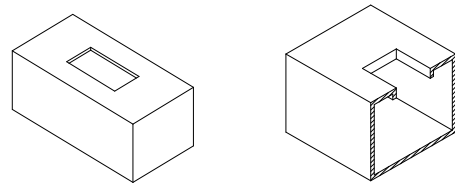


圖 2.a 開孔後      圖 2.b 補強後之剖面圖  
圖 2 六面結構體

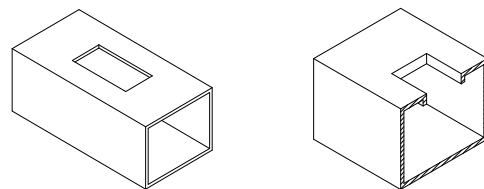


圖 3.a 開孔後      圖 3.b 補強後之剖面圖  
圖 3 四面結構體

6. 本分析在結構剛度的比較上，將分別針對其 Z-方向扭轉剛度、 $M_x$ -彎曲剛度、及  $M_y$ -彎曲剛度等三項目作比較。
7. 剛度比

為了方便分析結果之容易比較，故定義一剛

度比，可表示如下：

設： $k$ ：剛度比

$u_1$ ：開孔前之結構變形量

$u_2$ ：開孔後之結構變形量

$u_3$ ：補強後之結構變形量

剛度比可表示如下：

$$k = \frac{u_1}{u_2}$$

$$\text{或 } k = \frac{u_1}{u_3}$$

### 8. 有限元素模型

本研究為三維之問題，故選擇三維元素 Solid45 來建構網格。此元素共有八個節點(node)，每一節點有 3 個自由度(degree of freedom)，即位移  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 。本研究所建立之模型約需 3000 個元素。

### 3. 結構體之外形及各部份參數

圖 4 所示為六面結構體及四面結構體之外形及各部份參數。

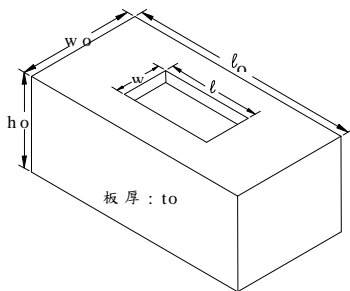


圖 4.a 外形圖

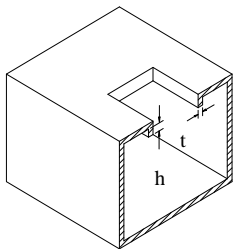


圖 4.b 剖面圖

圖 4 六面結構體及四面結構體之外形及參數

各部份參數圖(其中未標示處與圖 4 相同)。

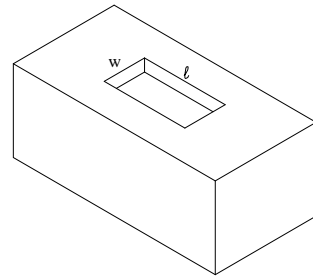


圖 5.a 外形圖

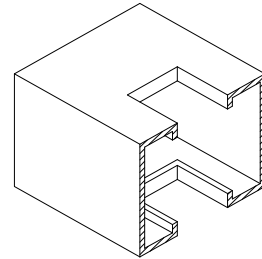


圖 5.b 剖面圖

圖 5 六面結構體相對兩側壁開孔之外形及參數圖

圖 6 所示為六面結構體相鄰兩側壁開孔之外形及各部份參數圖(其中未標示處與圖 4 相同)。

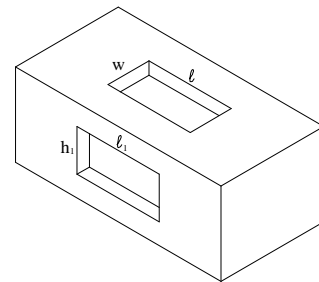


圖 6.a 外形圖

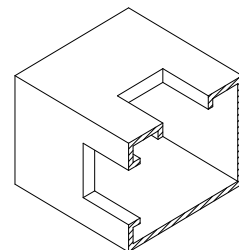


圖 6.b 剖面圖

圖 6 六面結構體相鄰兩側壁開孔之外形及參數圖

圖 5 所示為六面結構體相對兩側壁開孔之外形及

圖 7 所示為六面結構體頂、側兩壁開孔之外形及

各部份參數圖(其中未標示處與圖 4 相同)。

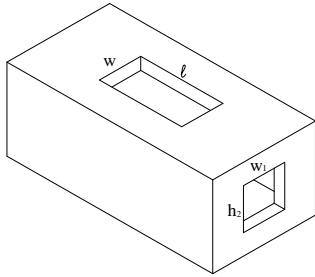


圖 7.a 外形圖

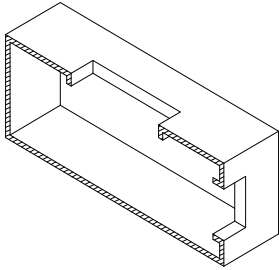


圖 7.b 剖面圖

圖 7 六面結構體頂、側兩壁開孔之外形及參數圖

#### 4. 有限元素分析結果

以下為本研究之部份分析結果，橫坐標為補強邊框的高度與結構體板厚之比  $h/to$ ，縱坐標為剛度比  $(k)$ ， $w/wo$  為孔口寬度與結構體寬度之比， $l/lo$  為孔口長度與結構體長度之比。

##### 4.1 六面結構體之開孔剛度分析

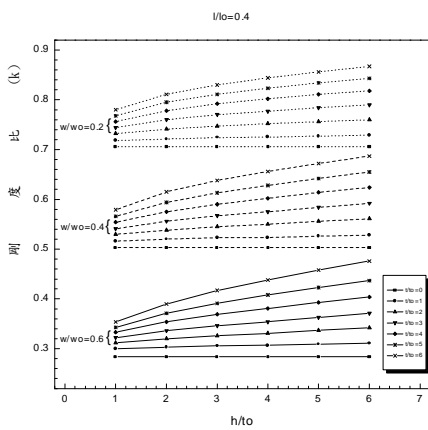


圖 8 六面結構體之扭轉剛度分析結果

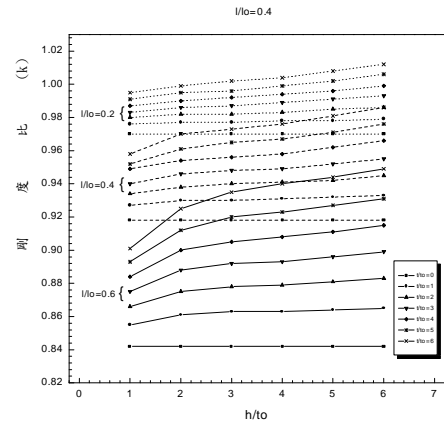


圖 9 六面結構體之  $M_x$ -彎曲剛度分析結果

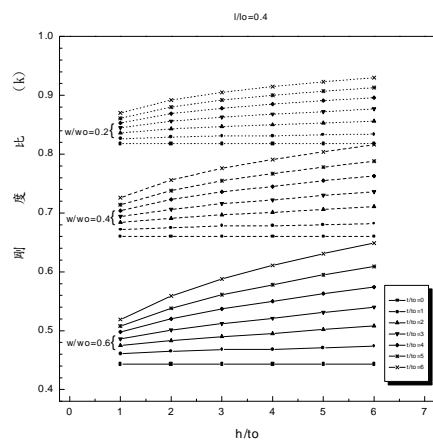


圖 10 六面結構體之  $M_y$ -彎曲剛度分析結果

##### 4.2 四面結構體之開孔剛度分析

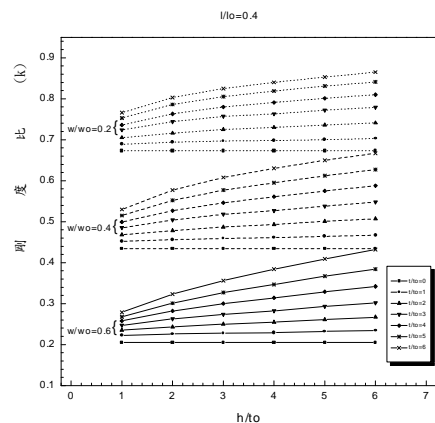


圖 11 四面結構體之扭轉剛度分析結果

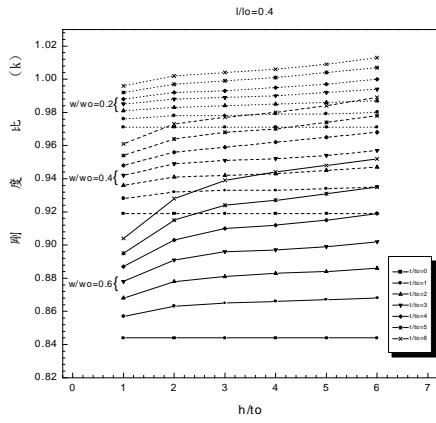


圖 12 四面結構體之  $M_x$  彎曲剛度分析結果

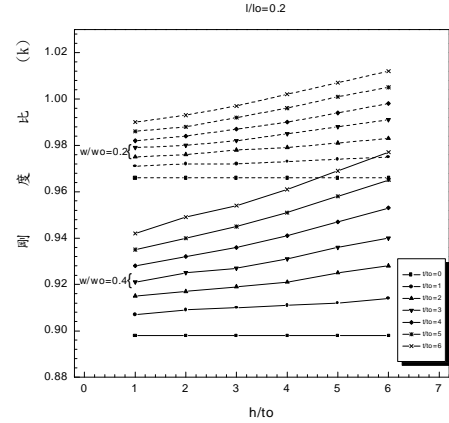


圖 15 相對兩側壁開孔之  $M_x$ -彎曲剛度分析結果

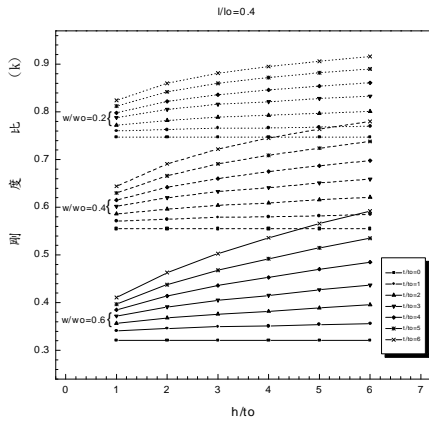


圖 13 四面結構體之  $M_y$  彎曲剛度分析結果

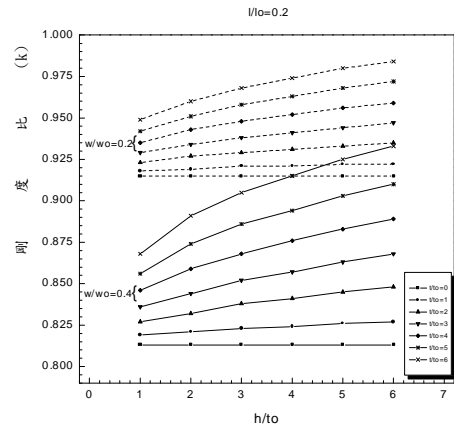


圖 16 相對兩側壁開孔之  $M_y$ -彎曲剛度分析結果

#### 4.3 相對兩側壁開孔之開孔剛度分析

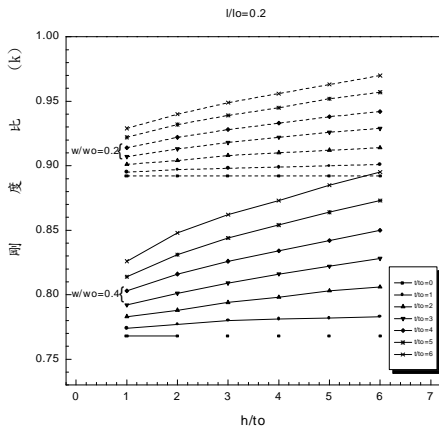


圖 14 相對兩側壁開孔之扭轉剛度分析結果

#### 4.4 相鄰兩側壁開孔之開孔剛度分析

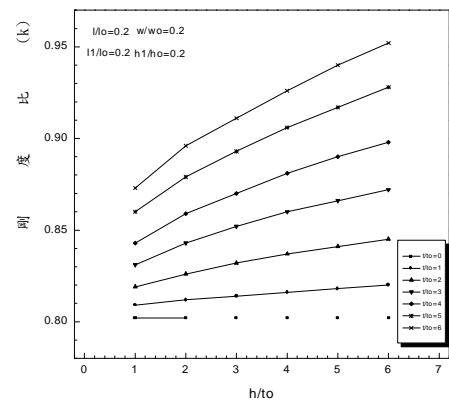


圖 17 相鄰兩側壁開孔之扭轉剛度分析結果

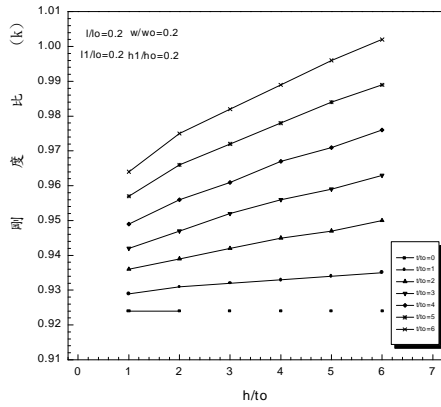


圖 18 相鄰兩側壁開孔之  $M_x$ -彎曲剛度分析結果

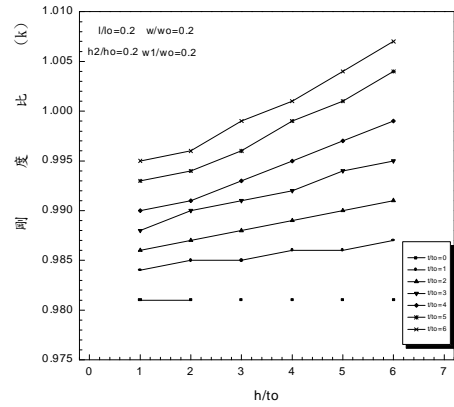


圖 21 頂、側兩壁開孔之  $M_x$ -彎曲剛度分析結果

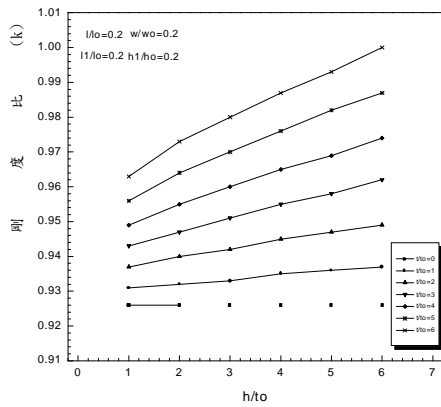


圖 19 相鄰兩側壁開孔之  $M_y$ -彎曲剛度分析結果

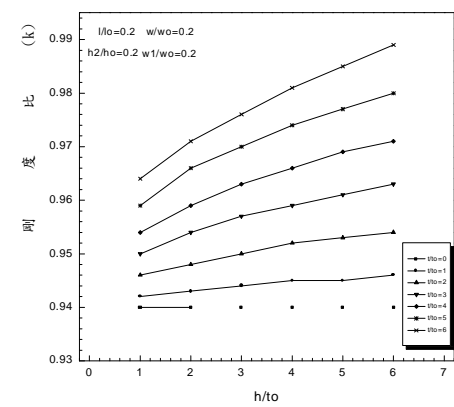


圖 22 頂、側兩壁開孔之  $M_y$ -彎曲剛度分析結果

#### 4.5 頂、側兩壁開孔之開孔剛度分析

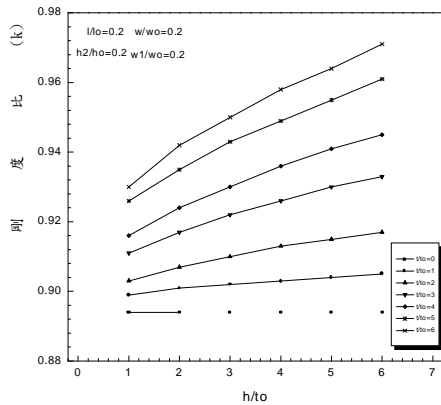


圖 20 頂、側兩壁開孔之扭轉剛度分析結果

#### 4.6 結構體開方形孔與圓形孔之剛度比較

表 1 為結構體在開孔面積相同之情況下，結構體分別開方形孔與圓形孔之剛度比比較。

表 1 結構體開方形孔與圓形孔之剛度比比較

		扭轉 剛度比	$M_x$ -彎曲 剛度比	$M_y$ -彎曲 剛度比
開孔情形一	圓孔： $r/l_o = 0.08$	0.921	0.972	0.956
	方孔： $l/l_o = 0.2$ ， $w/w_o = 0.2$	0.894	0.981	0.940
開孔情形二	圓孔： $r/l_o = 0.1128$	0.827	0.942	0.900
	方孔： $l/l_o = 0.2$ ， $w/w_o = 0.4$	0.771	0.943	0.864

從整體分析結果可知道，結構體開圓形孔對其剛度之損失量較方形孔為少。

## 6. 結論

1. 六面結構體及四面結構體的側面開一方形孔的剛度分析中，孔口所造成結構體之剛度損失，以扭轉剛度之損失最為嚴重，其次便是  $M_y$ -彎曲剛度，而剛度損失最少的是  $M_x$ -彎曲剛度。所以，設計者在選擇開孔位置時，可針對結構體常受到的負荷方向，作最佳的位置設計，讓結構體受到較少的扭矩和  $M_y$ -彎矩。另外，由於六面結構體之整體材料較四面結構體為多，剛度也較高，故當兩者的開孔大小相同時，四面結構體之剛度損失量將較六面結構體為多。
2. 六面結構體之兩側壁同時開孔之剛度分析中，對扭轉剛度而言，相鄰兩側壁同時開孔之情況，其剛度損失量最多，相對兩側壁同時開孔、及頂側兩壁同時開孔的情況，其剛度損失量較少；而對  $M_x$ -彎曲剛度而言，相鄰兩側壁同時開孔之情況，其剛度損失量最多，而頂、側兩壁同時開孔的情況，其剛度損失量較少；對  $M_y$ -彎曲剛度而言，相對兩側壁同時開孔之情況，其剛度損失量最多，而頂、側兩壁同時開孔的情況，其剛度損失量較少。故此設計者可針對結構體之負荷方向，選擇較適合之開孔型式。
3. 由於結構體在開孔後，其  $M_x$ -彎曲剛度之損失量較少，故其在補強後之剛度比，將很有可能大於 1，即補強後的結構剛度，比沒有開孔時的結構剛度還要高。
4. 從分析結果發現，補強邊框之寬度對於增加結構體剛度，將較補強邊框之高度為佳，故在孔邊增加補強邊框時，應盡量把材料加於其寬度上。
5. 本研究除了分析常見之結構體開方形孔之情形外，還對結構體開圓形孔之情形作分析，在結果之比較後，發現在開孔面積相同之狀況下，開圓形孔之結構體，其剛度損失量，較開方形孔者為

少。

## 7. 參考文獻

- [1] 洪瑞斌、何祖璇，*工具機*，台北市：新科技出版社，1991。
- [2] 王政斌、陳定宇，“工具機補強肋之尺寸和形勢最佳化設計”，*機械月刊*，第 284 期，1999，pp.456-465。
- [3] 陳正平，“鋼結構細部設計--鋼樑腹板矩形開孔補強設計”，*營建世界*，第 39 期，1984，pp.53-57。
- [4] Abdul, W., Hashim, M. S. and Khalil, M. H., “Rigidity and strength of orthotropic reinforced concrete waffle slabs”, *Journal of Structural Engineering*, Vol.126, Issue 2, Feb. 2000, pp.219-227.
- [5] 李台光、蔡東和，“鋼梁腹板開孔設計方法及設計實例”，*結構工程*，第 46 期，1997，pp.109-121。
- [6] 廖運炫、鍾添東、劉正良，*智慧型線切割式放電加工機之研發期中報告*，台北市，行政院國家科學委員會，1997。
- [7] Krug, C. and Zum, B., “Der Starrheitsgrad von werkzeugmaschinen”, *Masch.-Bau*, 1931.
- [8] Kaminskaja, V. V., Levina, M. Z. and Resetov, N. D., “Staniny i korpusnyje detali metallozuscich stankov”, *Masghis Moskva*, 1960.
- [9] Bielefeld, J., “Modellversuche an Werkzeugmaschinelementen, 7. Forschungsbericht des Laboratoriums fur Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der T. H. Aachen”, *Industrie-Anz.*, Oct. 1957.
- [10] Reschetow, D. N. and Kaninskaja, V. V., “Untersuchungen, und Naherungsrechnungen der Starrhit kastenformiger Bautile im Werkzeugmaschinenbau”, *Stankiinstrument*, 1956. (reported by Peklenik, J. in *Industrie-Anz.*, Nos.2 and 11, 1957.)

## 8. 英文摘要

## **The Strengthen Analysis of Structure with Aperture**

Due to power transmission or assembly of components, machine tool structure often needs to make apertures on walls. These apertures weaken the stiffness and cause more deflection. However, the weakness maybe improved by adding flanges along aperture edges. The purpose of this research attempts to analyze flange-reinforced structures using finite element method. Torsional stiffness and bending stiffness will be analyzed in three conditions: structure with no aperture, structure with aperture, and structure with flange-reinforced aperture. The results of this research will be expected for a series of tables and figures which list the stiffness improvements versus flange dimensions of aperture and benefit structure design work. The analysis indicates that the aperture will cause the major loss in torsion stiffness, the next is the  $M_y$ -bending stiffness, then followed the  $M_x$ -bending stiffness. Designers thus may decide the location of the aperture against the load.

**Keyword:** Structure, Aperture , Stiffness , Flange

作者:

\* 劉正良 臺灣大學機械工程學系教授

\*\*黃麗萍 臺灣大學機械工程學系碩士