

# 結構

<b>1 結構簡介</b> .....	<b>3</b>
<b>2 結構的受力</b> .....	<b>3</b>
(a) 壓縮 .....	3
(b) 拉張 .....	3
(c) 屈曲 .....	4
(d) 扭轉 .....	4
(e) 剪切 .....	4
<b>3 結構的平衡</b> .....	<b>5</b>
(a) 力的平衡 .....	5
(b) 力的矢量加法 .....	5
(c) 力的分解 .....	6
(d) 平衡狀態的力 .....	7
(e) 力矩的平衡 .....	9
(f) 平衡條件 .....	12
<b>4 材料及切面形狀</b> .....	<b>13</b>
(a) 材料的特性 .....	13
(b) 切面面積 .....	14
<b>5 結構的特性</b> .....	<b>14</b>
(a) 極限形變 .....	14
(b) 穩定性 .....	15
(c) 強度 .....	16
(i) 增強材料強度 .....	16
(ii) 增強結構強度 .....	17
(d) 不同種類的結構 .....	18
(i) 拱架 .....	18
(ii) 支架 .....	19
(iii) 橫樑 .....	19
(iv) 方箱 .....	20

<b>6 結構的接合方法</b> .....	<b>21</b>
(a) 永久接合 .....	21
(b) 半永久接合 .....	21
(c) 活動接合 .....	21
<b>7 簡單結構設計</b> .....	<b>22</b>
(a) 構件受力 .....	22
(b) 構件的切面面積 .....	22
(c) 安全系數 .....	23
(i) 安全系數的意義 .....	23
(ii) 成本效益 .....	24
(d) 增強結構的方法 .....	24
<b>8 結構測試</b> .....	<b>24</b>
(a) 結構的負載 .....	25
(b) 結構的強度 .....	25
(c) 結構的穩定性 .....	26
(d) 結構的撓度 .....	27
<b>練習</b> .....	<b>29</b>

# 結構

## 1 結構簡介

結構是利用多個輕巧部分組合而成的，它可以用來承受較大的負載，組成結構的部分稱為構件。許多建築物和機械都屬於結構，例如：電纜塔、建築物、橋樑和起重機等(圖 1)。



圖1 (a) 電纜塔



(b) 起重機

結構有許多優點。以圖 1b 中的起重機為例，它由多條輕巧的金屬構件所組成，所以重量較輕、容易安裝和拆除，但可以吊起極重的負荷，所以它常用來協助建築樓宇。

## 2 結構的受力

結構承受荷載時，各構件受力的性質可以分為壓縮、拉張、屈曲、扭轉和剪切等。

### (a) 壓縮

壓縮導至構件沿施力的軸線距離縮短，例如：支柱的壓縮變形。



圖2 (a) 壓縮力



(b) 彈簧被壓縮

### (b) 拉張

拉張使構件沿施力的軸線距離延長，例如：懸索橋上的鋼纜及鞦韆架上的鐵鏈所受的力。



圖3 (a) 拉力



(b) 彈簧被拉長

### (c) 屈曲

當構件在側面被垂直施力時會變屈曲。構件在施力一邊會被壓縮，而在另一面則會被拉張。例如：書架的層板受壓彎曲。

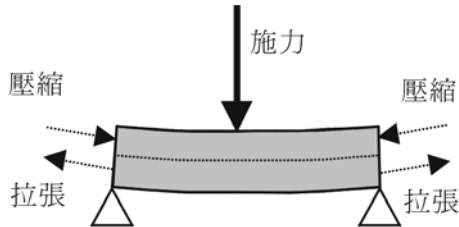


圖4 (a) 彎曲力



(b) 層板被書的重量屈曲

### (d) 扭轉

扭轉是由兩個大小相等但方向相反的力所產生的效果，兩力的作用線並不重疊。例如：汽車轉向軸在扭動轉向盤；用手旋開瓶蓋等。

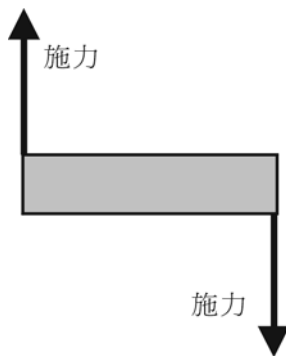
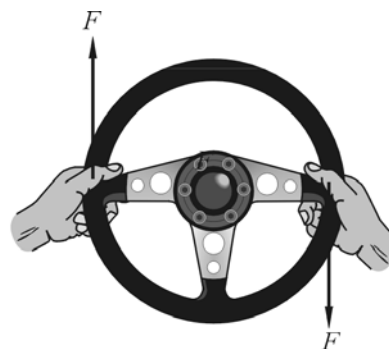


圖5 (a) 扭力



(b) 用力扭轉汽車吹盤

### (e) 剪切

剪切是構件在大小相等、方向相反、作用線垂直於構件軸線的一對力的作用所產生的結果。例如：剪刀剪切紙張、鉚釘鉚接鋼板等。

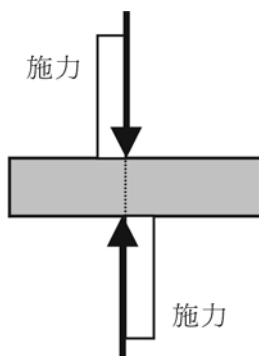


圖6 (a) 剪切力



(b) 用剪刀剪紙

### 3 結構的平衡

#### (a) 力的平衡

力可以改變物體的運動狀態。力有大小和方向，所以是一種矢量。力可以用一條直線和箭咀來表示，長度代表大小，箭咀方向代表力的方向。圖 7 顯示多個不同大小和方向的力。

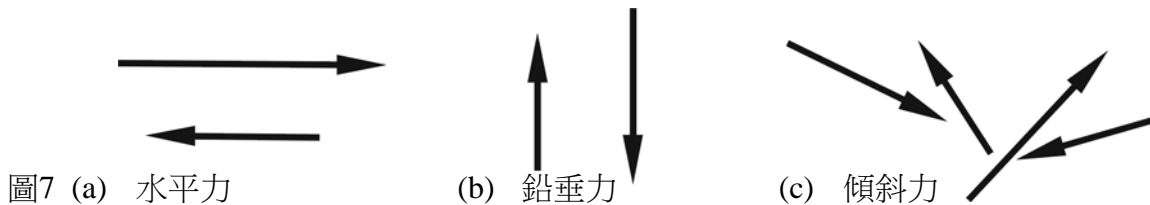


圖 7 (a) 水平力

(b) 鉛垂力

(c) 傾斜力

假如用力  $F$  把一個靜止物體向前拉，它會由靜止開始移動。 $F$  便稱為不平衡力(圖 8a)。



圖 8

(a) 不平衡力

(b) 兩力平衡

假如施在靜止物體上的兩力  $F$  和  $F'$  有相同的大小，但方向相反，物體便會保持靜止。 $F$  和  $F'$  便稱為平衡力，物體上的淨力便等於零。

#### (b) 力的矢量加法

力的單位是牛頓，符號是 N。例如一個 1 kg 物體的重量便大約是 10 牛頓，即 10 N。由於力是矢量，所以相加時要同時考慮大小和方向。

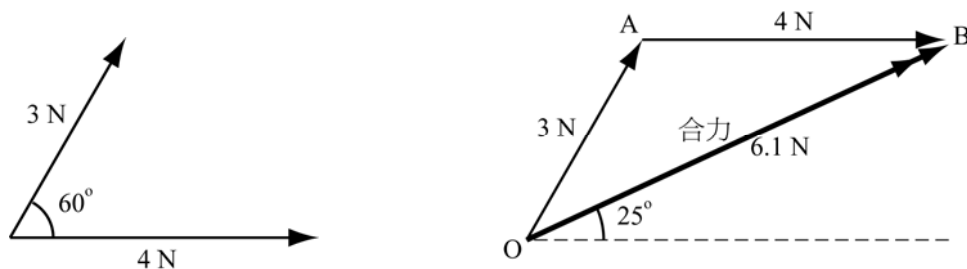
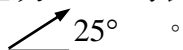


圖 9 (a) 兩力相加

(b) 合力

假如要將圖 9 中的 3 N 和 4 N 的兩力相加，可以按合適比例(例如 1 cm 代表 1 N)和方向沿箭咀順序畫出兩力，如圖 9b 所示。然後將起點 O 畫一直線到 B，直線 OB 便是 3 N 和 4 N 兩個力的合力，圖中的合力用雙箭咀來表示，以茲識別。這方法稱為力的矢量加法或圖解法。合力 OB 的長度大約是 6.1 cm，即是 6.1 N。合力的方向與水平線成 25°，可以表示為



事實上，亦可以繪畫平行四邊形來找出兩力相加的合力。如圖 10 所示，合力  $OB$  是平行四邊形  $OXBY$  的對角線。所以，這方法亦稱為力的平行四邊形法。

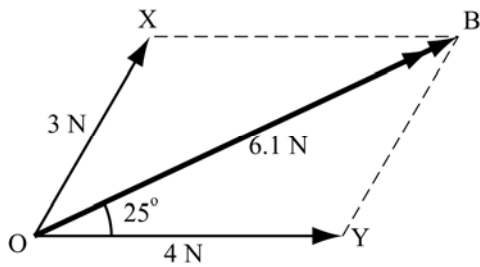


圖10 力的平行四邊形

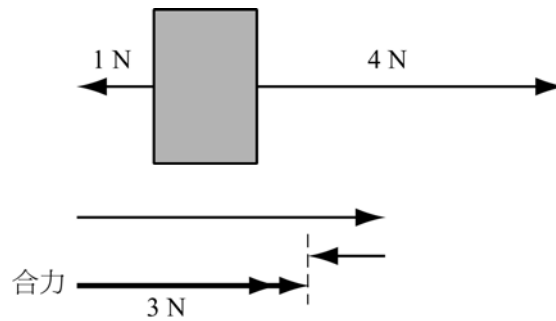


圖11 平行的力

矢量加法也可以應用在平行的力上。例如，圖 11 的合力是  $4 - 1 = 3 \text{ N}$ ，指向右。事實上，我們曾經使用過這種方法，合力相等於淨力。

矢量的加法可以引申至多於兩個力。圖 12a 顯示四個力  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_4$ 。如圖 12b 所示，把各力按適當力比例地頭與尾連接，它們的合力便是  $F$ 。由於各力和合力組成一個多邊形，這方法亦稱為力的多邊形法。

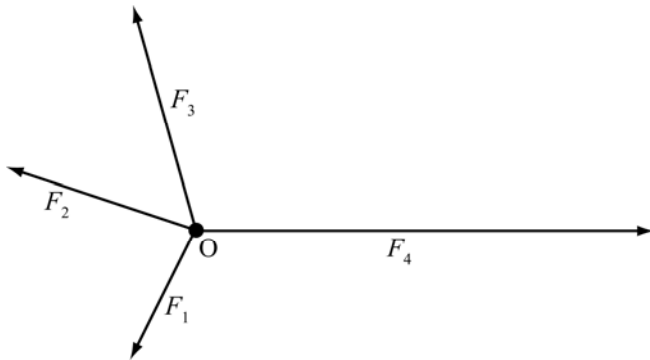
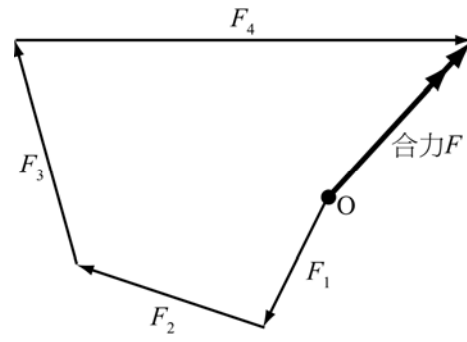


圖12 (a) 多力相加



(b) 力的多邊形

### (c) 力的分解

數個力可以合成為一個合力。相反，一個力也可以分解為數個分力，這方法稱為**分解法**。為了方便運算，普遍的做法是把一個力分解為兩個互相垂直的分力。在圖 13 中，力  $F$  與  $x$  軸形成角度  $\theta$ 。把它分解為兩個分力  $F_x$  和  $F_y$ 。 $F_x$  沿著  $x$  軸， $F_y$  沿著  $y$  軸，我們可得

$$\frac{F_x}{F} = \cos \theta$$

$$\frac{F_y}{F} = \sin \theta$$

$$F_x = F \cos \theta$$

$$F_y = F \sin \theta$$

如果在圖 13 中， $F = 10 \text{ N}$ ， $\theta = 30^\circ$ ，則

$$F_x = 10 \cos 30^\circ = 8.7 \text{ N}$$

$$F_y = 10 \sin 30^\circ = 5 \text{ N}$$

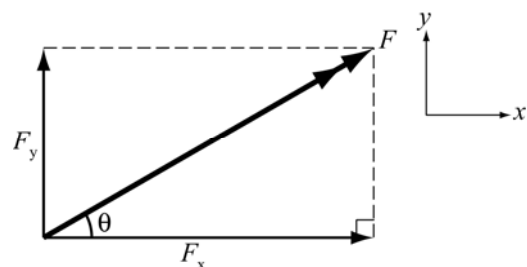


圖13

### 例題 1

在一個支架結構中，兩支桿的內力施在同一點  $O$  上，如圖 14a 所示。利用分解法找出合力。

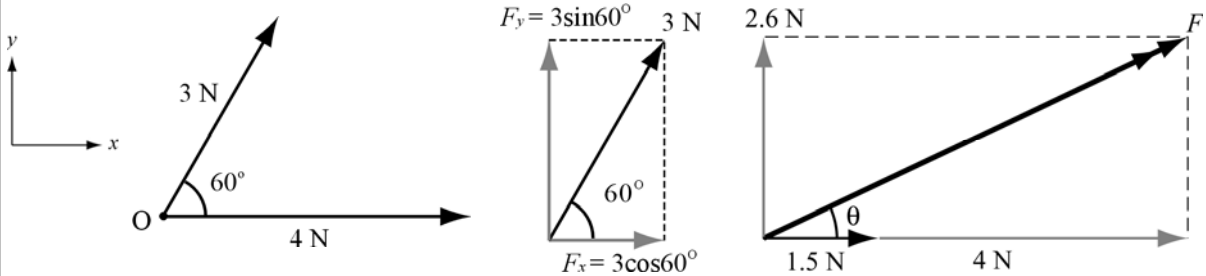


圖14 (a) (b) (c)

### 解題

使用分解法，把 3 N 分解為水平和鉛垂的分力  $F_x$  和  $F_y$  (圖 14b)，

$$F_x = 3 \times \cos 60^\circ = 1.5 \text{ N}$$

$$F_y = 3 \times \sin 60^\circ = 2.6 \text{ N}$$

$$\text{在 } x \text{ 方向的淨力} = 1.5 + 4 = 5.5 \text{ N}$$

$$\text{在 } y \text{ 方向的淨力} = F_y = 2.6 \text{ N}$$

合力如圖 14c 所示。

$$F = \sqrt{5.5^2 + 2.6^2} = 6.1 \text{ N}$$

$$\tan \theta = \frac{2.6}{5.5} = 0.473$$

$$\theta = 25.3^\circ$$

合力  $F$  是 6.1 N，它與水平線形成  $25.3^\circ$ 。

### (d) 平衡狀態的力

當施在物體上同一點的所有力的合力是零時，則稱為力平衡。

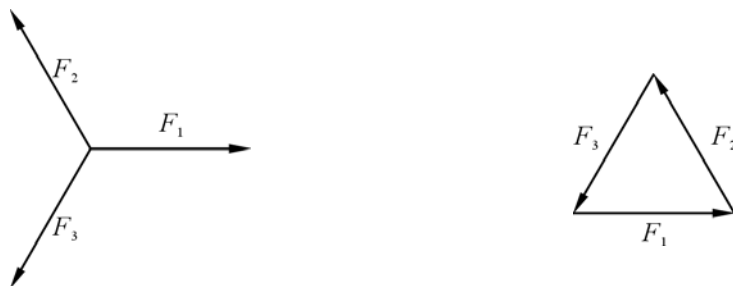


圖15 (a) 三平衡力

(b) 平衡力形成閉合圖形

如圖 15a 所示，三個力施在物體的同一點上。假如它們的合力成形成一個閉合的三角形，這表示三力的合力是零，即物體保持平衡(15b)。由此可知，當物體上的力平衡時，各力會形成閉合的合力圖。在例題 2 中，合力圖可以用來解決力平衡的問題，這方法稱為圖解法。

## 例題 2

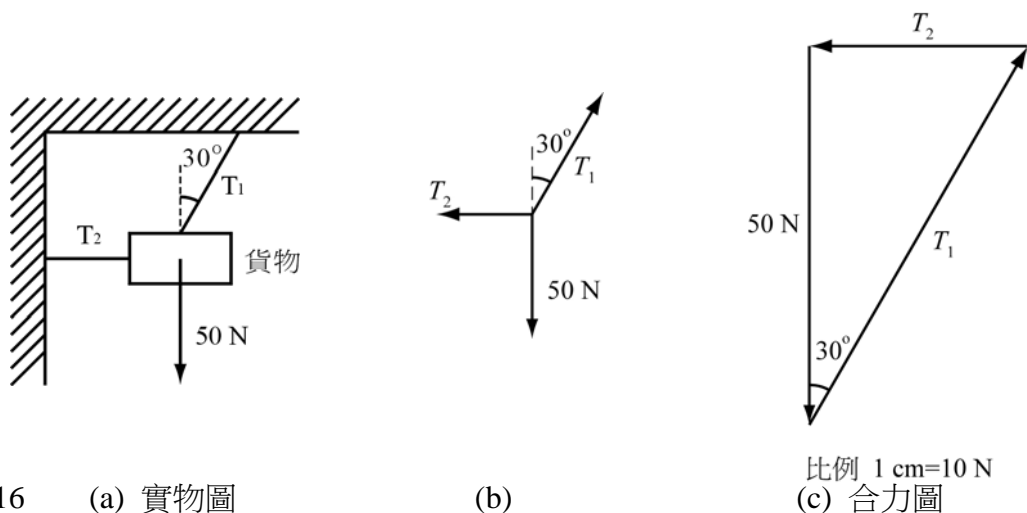


圖 16 (a) 實物圖

(b)

比例 1 cm = 10 N  
(c) 合力圖

在圖 16a 中，50 N 的貨物在搬運時被兩繩懸掛。

- 繪畫各繩內張力的合力圖。
- 求張力  $T_1$  和  $T_2$ 。

## 解題

(a) 圖 16b 顯示各力的關係。訂定比例 1 cm = 10 N，先按比例畫出貨物的重量 50 N，然後以合適的角度畫出  $T_1$  和  $T_2$ ，並完成合力圖(圖 16c)。畫圖時一般按順時針方向順序畫出各力。

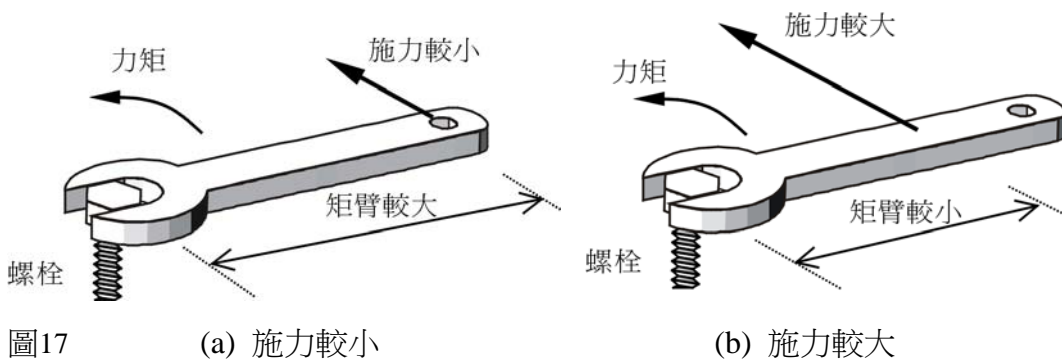
(b) 量度圖 16c 的合力圖，可知

$$T_1 = 5.7 \text{ cm} = 5.7 \times 10 = 57 \text{ N}$$

$$T_2 = 2.9 \text{ cm} = 2.9 \times 10 = 29 \text{ N}$$



## (e) 力矩的平衡



假如我們用板手(即士巴拿)來鬆開螺栓，施力點越接近螺栓，所需要用的力亦越大(圖17)。這是因為力的轉動作用是由**力矩**來決定的。在圖17的板手轉動中，螺栓的位置是支點，力矩的定義是

$$\text{力矩} = \text{力} \times \text{施力和支點之間的垂直距離}$$

施力  $F$  和支點之間的垂直距離稱為矩臂  $d$ ，所以力矩  $M$  可以表示為

$$\text{力矩} = \text{力} \times \text{矩臂}$$

或

$$M = F \times d$$

力矩的單位是  $\text{N m}$ 。在圖17b中，由於矩臂較短，所以便需要較大的施力。

**例題3**

參考圖17a。假如工人的施力是  $50 \text{ N}$ ，矩臂是  $0.3 \text{ m}$ ，求施在螺栓中心的力矩。

**解題**

$$\text{力矩 } M = F \times d = 50 \times 0.3 = 15 \text{ N m} \quad (\text{逆時針})$$

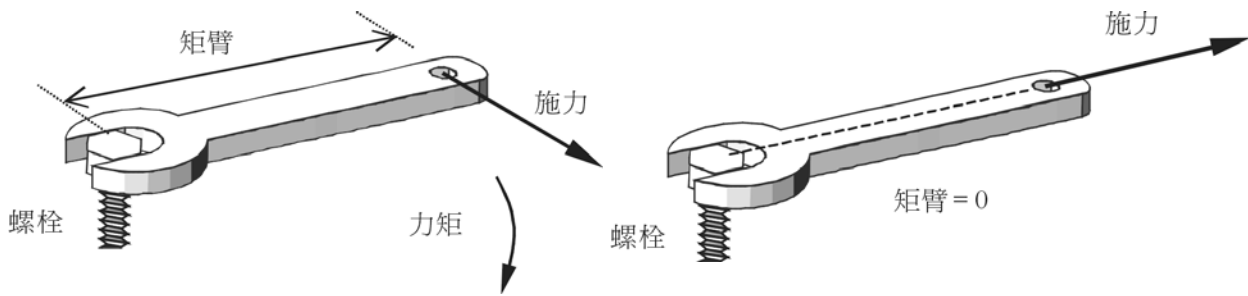


圖18 (a) 順時針力矩

(b) 零力矩

圖 17 的力矩傾向使板手以逆時針方向轉動。習慣上，我們可以將逆時針方向的力矩定為正值。相反，圖 18a 的力矩傾向使板手以順時針方向轉動，我們將順時針方向的力矩定為負值。在圖 18b 中，由於施力通過支點，矩臂是零，所以力矩亦是零。

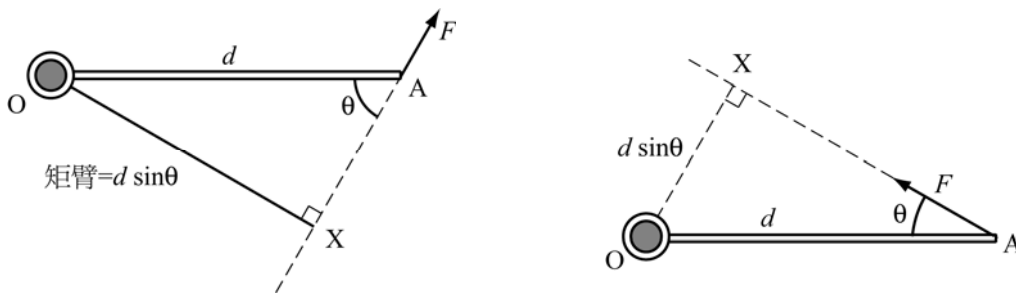


圖19 (a)

(b)

在圖 19a 中，如果力  $F$  並不是與  $OA$  垂直， $F$  對  $O$  的矩臂（垂直距離） $OX$  應為

$$\frac{OX}{d} = \sin \theta \quad \text{或} \quad OX = d \sin \theta$$

其中  $d$  是  $OA$  的長度，而  $\theta$  是力  $F$  的延長線與  $OA$  的夾角。所以

力矩  $M = F \times d \sin \theta$

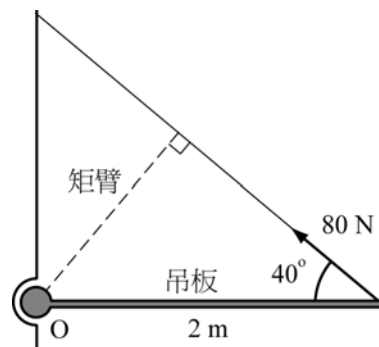
這結果亦適用於圖 19b 的情況。

### 例題4

在圖 20 中，假如用 80 N 的力拉起一塊 2 m 長的吊板，求拉力對  $O$  點的力矩。

### 解題

力矩  $M = F \times d \sin \theta = 80 \times 2 \times \sin 40^\circ = 103 \text{ N m}$



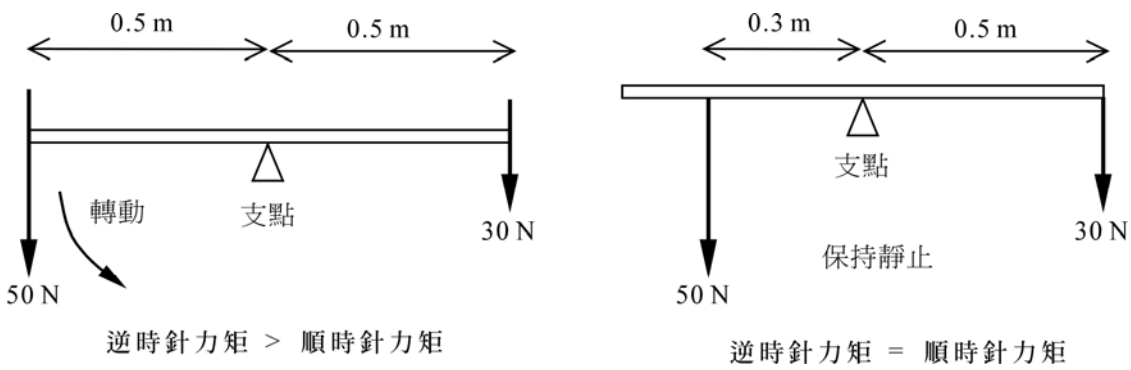


圖21 (a) 兩邊力矩不相等

(b) 淨力矩 = 0

在圖 21a 中，順時針力矩 =  $30 \times 0.5 = 15 \text{ N m}$ ，逆時針力矩 =  $50 \times 0.5 = 25 \text{ N m}$ 。由於逆時針力矩較大，所以長桿會逆時針轉動。在圖 21b 中，順時針力矩 =  $30 \times 0.5 = 15 \text{ N m}$ ，逆時針力矩 =  $50 \times 0.3 = 15 \text{ N m}$ 。由於逆時針力矩與順時針力矩相等，淨力矩 = 0，所以長桿會保持靜止。由此可推論：

如果物體沒有轉動，順時針總力矩 = 逆時針總力矩。

這稱為力矩原理。

### 例題5

在圖 22 中，一個支架用來負載 50 N 的貨物。若支架保持平衡，求繩的張力 T。

### 解題

以 O 點為支點。

順時針力矩 =  $50 \times 2 = 100 \text{ N m}$ ， 逆時針力矩 =  $T \times (6 \sin 60^\circ)$

應用力矩原理，可知  $T \times (6 \sin 60^\circ) = 100$

$$T = 19.2 \text{ N}$$

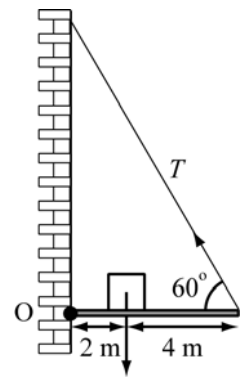


圖22

## (f) 平衡條件

如果一個物體既保持靜止亦不轉動，它便被稱為處於平衡狀態。所以，平衡狀態的兩個條件便是

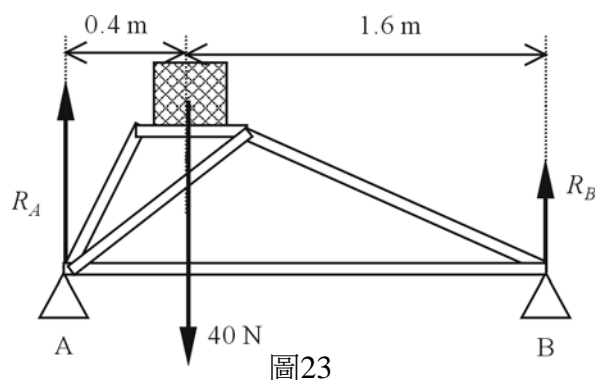
$$\text{淨力} = 0$$

和

$$\text{淨力矩} = 0$$

### 例題6

一件重 40 N 的貨物放在 2 m 長的支架上，如圖 23 所示。求支架的支撐 A 和 B 上的反作用力  $R_A$  和  $R_B$ 。支架的重量可以忽略。



### 解題

因為支架處於靜止狀態，所以可應用平衡條件。

應用平衡條件二：淨力矩 = 0 或 順時針總力矩 = 逆時針總力矩

對 A 點取力矩，

$$40 \times 0.4 = R_B \times 2$$

$$R_B = 8 \text{ N}$$

應用平衡條件一：淨力 = 0 或 向上的總力 = 向下的總力

$$R_A + R_B = 40$$

$$R_A + 8 = 40$$

$$R_A = 40 - 8 = 32 \text{ N}$$

## 4 材料及切面形狀

### (a) 材料的特性



圖24 青馬大橋的吊索

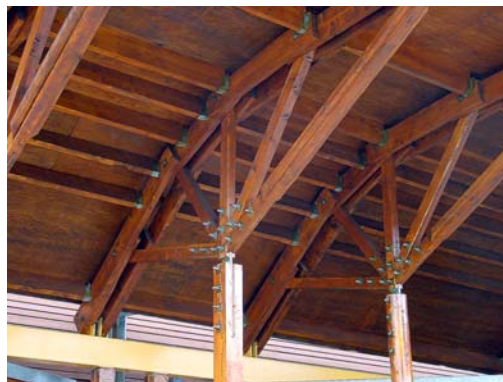


圖25 木造結構 (建築物的上蓋及支架)

結構上的負荷可以是壓力、張力、扭力、彎曲力和剪切力。在設計和製造結構時，必須選用合適的材料。錯誤選用材料，可能會令結構容易地被外力破壞或產生永久變形。例如鋼纜可以承受較大的張力，但卻不可以承受任何壓力(圖 24)。另一方面，混凝土可以承受非常大的壓縮力，但卻很容易被張力拉斷。表 1 列出適合應付不同負荷的材料特性和一些例子。

負荷	實例	合適材料的特性	常用材料例子
壓力	大廈支柱、橋墩等	硬度較佳	金屬、混凝土
張力(拉力)	鋼纜、吊橋吊索等	韌性較佳	金屬、纖維(繩索)
扭力	轉軸、螺絲等	硬度和韌性較佳	金屬
彎曲力	橋面、書架的層板、屋樑、車床的主軸等	硬度、韌性、彈性和展性較佳	木材、塑膠、金屬
剪切力	鉚釘、螺絲等	硬度較佳	金屬

表1 材料特性和一些例子

由於一個結構的不同部分可能會承受不同的負荷，所以各部分可能需要選用不同的材料來構造。以圖 25 的結構為例，它的支架主要由木造成，但會使用金屬螺絲來接合各構架。

## (b) 切面面積

假如材料的切面面積增加，它便可以承受更大的負荷而不斷裂。若要比較兩個不同切面面積構件的平均受力，可以計算它們的應力。

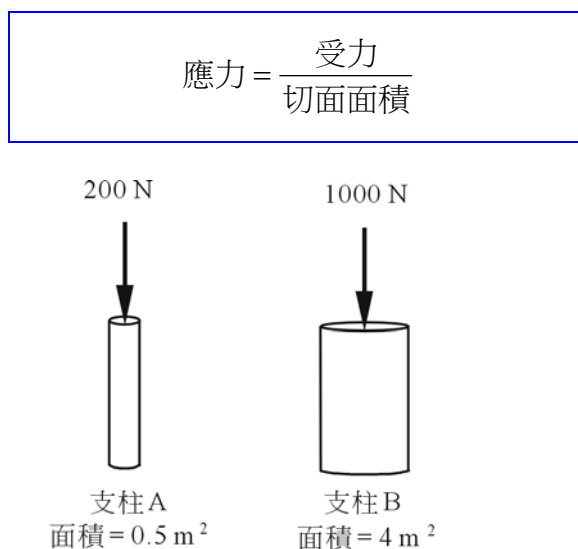


圖26 不同切面面積的支柱

在圖 26 中，

$$\text{支柱 A 的應力} = \frac{200 \text{ N}}{0.5 \text{ m}^2} = 400 \text{ N m}^2$$

$$\text{支柱 B 的應力} = \frac{1000 \text{ N}}{4 \text{ m}^2} = 250 \text{ N m}^2$$

所以，事實上支柱 A 的平均受力較大。

## 5 結構的特性

### (a) 極限形變

當結構中的構件受力後，它的長度會改變。假如施力不太大，當施力移走後，構件會回復原來的長度，這現象稱為彈性形變。不過，如果施力超過構件的彈性極限，當施力移走後，構件還保留部分長度改變，這現象稱為塑性形變。構件的塑性形變會令結構永久改變原來的形狀，所以在設計結構時必須避免。

極限形變是指構件在彈性極限內所引致的形變，在這情況下，構件承受最大的施力，但不至引致永久形變，這亦是一個結構最大的長度或形狀改變。在設計一個結構時，必須先考慮它的負荷極限，然後計算各構件的受力，以找出整個結構的極限形變，並在設計結構時加以考慮。

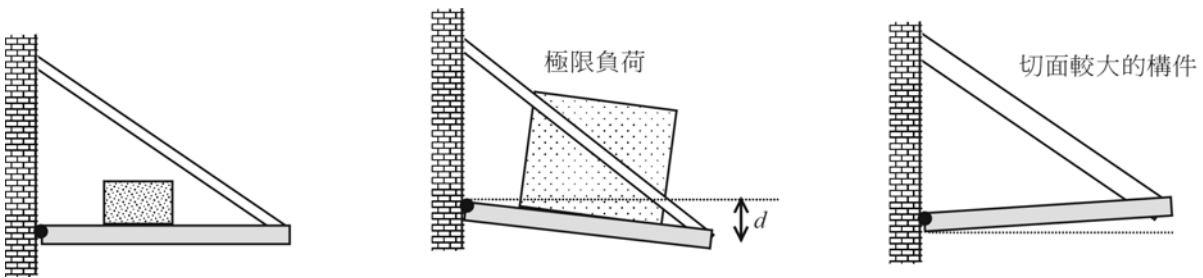


圖 27 (a) 形變不明顯 (b) 極限形變 (c) 改良設計

圖 27 顯示極限形變對結構的影響。在圖 27a 中，小負荷放在支架結構上，形變不明顯。在圖 27b 中，當極限負荷放在支架上，產生非常大的極限形變  $d$ ，令層板明顯地傾斜。雖然結構沒有損壞，但負荷卻可能會因此下滑而掉到地上。在圖 27c 中，找出極限形變後，可以使用切面較大的構件或把層板向上稍微傾斜，令極限負荷放在支架上時亦只會令層板保持水平。

### (b) 穩定性

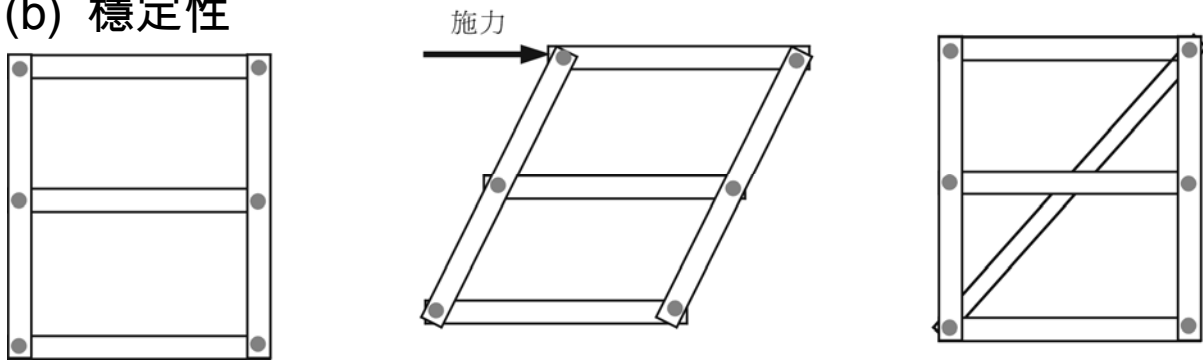


圖 28 (a) 不穩定的支架結構 (b) 容易受力形變 (c) 較穩定的結構

由支桿連接成的結構不一定能保持穩定。例如圖 28a 中的支桿均由螺栓和螺母來連接，結構的形狀並不穩定，整個支架可以因受力而變成圖 28b 的形狀。假如在構架上加上斜桿，整個結構會變得較為穩定，如圖 28c 所示。

當一個結構被施力加於其上而沒有出現永久形變，這結構便稱為穩定性高的結構。在各種結構形狀中，三角形結構是一種十分穩定的結構，所以它常被各種機械和建築結構所採用 (圖 29)。在設計結構時，可以採用三角形結構來提高穩定性。



(a)



(b)

圖 29 三角形結構的例子

另一種提高結構穩定性的方法是將支桿組成立體形狀。例如：超級市場購物車的盛物籃便是由多條互相垂直的支桿組成的。由於各支桿被彎曲成 U 形，並固定在盛物籃的金屬框上，所以不易變形。這種購物車的設計不但堅固、輕巧、容易清理，而且還可以方便地疊在一起。

大部分手提嬰兒車亦採用堅固的支架結構來組成，各支桿由嬰孩車的圍欄所固定，所以可以安全地盛載嬰孩。此外，當抱起嬰孩後，還可以方便地摺疊起來。

## (c) 強度

如果一個物體越能夠承受負荷而保持不變形，它便稱為越剛強。所以，物體的強度便是它抵抗外力而不被破壞或產生永久形變的能力。一個結構的強度由它的材料和結構強度所決定。

### (i) 增強材料強度

材料強化的方法主要有三種：(i) 熱處理；(ii) 融合；及(iii) 夾層。

#### 熱處理

熱處理是利用加熱來改善材料物理性質的方法。把材料加熱至所需的溫度，按不同的需要將材料冷卻，從而改變它的分子結構或表面成分。最常見的熱處理方法有退火、冷卻、硬化、回火及表面硬化等。

#### 融合

融合是把不同特性的物質按比例混成一體，過程中會產生化學作用，目的是增加它的強度，例如：混凝土便是把細石、水泥、砂和水混合，當它們結合後便會硬化，成為更強的材料。

#### 混合

合金便是由兩種或以上的金屬按比例混合而成，過程中不會產生化學作用，例如：黃銅便是純銅和鋅的合金，鋅加入銅時會增加它的硬度，但減少它的韌性。黃銅的用途很廣泛，它可以用來製造廉價的珠寶、門鎖、水龍頭、水管、航海用品和簡單的軸承等。

#### 夾層

將兩種材料一層一層地混合，便可以成為一種夾層。例如：混凝土的抗壓強度高但抗張強度差。假如以混凝土來建造橋樑，橋樑底部受拉力較大，容易出現裂紋而折斷。不過，可以加入一些鋼筋來製造鋼筋混凝土，藉以增加其抗張強度(圖 30)。



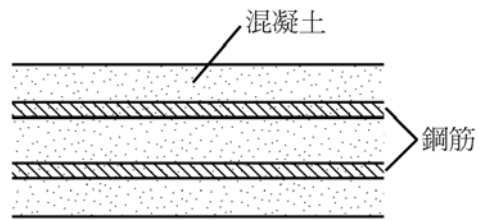


圖 30 (a)鋼筋

(b) 鋼筋混凝土

另一個夾層的例子是玻璃纖維。把玻璃纖維集合為束或紗，然後再塗上適當的黏合劑(例如環氧樹脂)，便可以形成玻璃纖維。玻璃纖維有很多種類，但一般較其他塑料堅硬。玻璃纖維可以用來製造獨木舟、快艇船身、汽車外層等。

## (ii) 增強結構強度

假如要製造一個堅固的結構，除了要考慮材料的特性，還需要考慮材料的切面形狀。以圓柱形的支柱和橫樑為例，它們承受軸向負荷時不易彎曲(圖 31a)，但在承受徑向負荷時卻會容易彎曲(圖 31b)。

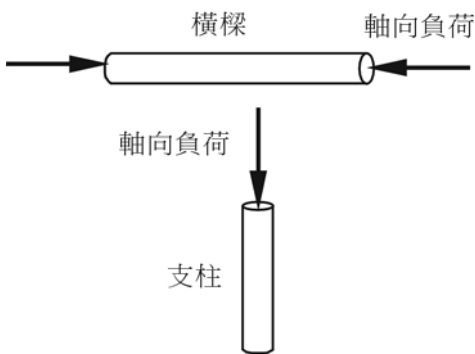
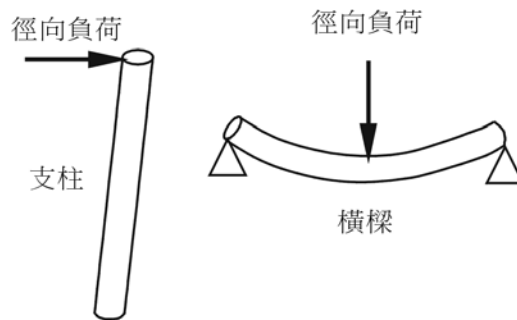


圖31 (a) 承受軸向負荷



(b) 承受徑向負荷

## 空心橫切面

若要防止結構內柱體彎曲，可以採用空心橫切面的設計。相對於用相同材料製造的實心柱體，空心柱體有較大的直徑，必需較大的徑向負荷才可以將它彎曲(圖 32)。例如：街燈燈柱、學校旗桿等長柱體結構大多採用空心柱來製造。

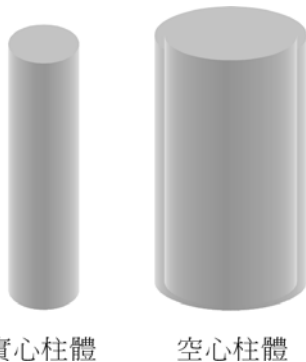


圖 32

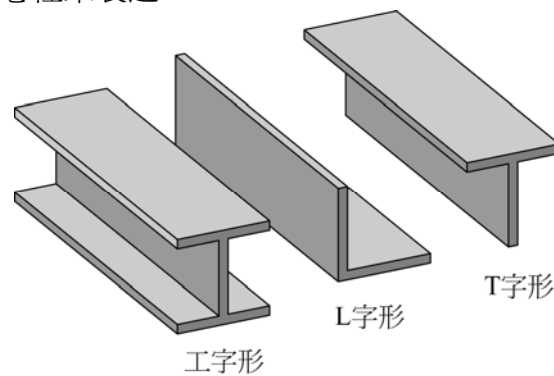


圖 33

## 摺曲橫切面

另一種防止結構變形或彎曲的設計是把橫切面摺曲，例如把橫切面造成工字形、L 字形和 T 字形等，如圖 33 所示。這些立體形狀不易彎曲。例如不少金屬橫樑都採用這種設計，可以用來建造行人天橋、建築物屋頂、雜物架、冷氣機支架、起重機支架等結構(圖 34)。



圖 34 冷氣支架

此外，摺曲橫切面的方法亦可以用來增加平面的強度。例如：把金屬薄片摺曲成三角形、方形、波浪形的橫切面，便可以用來建造牆壁、貨櫃箱和屋頂等結構。

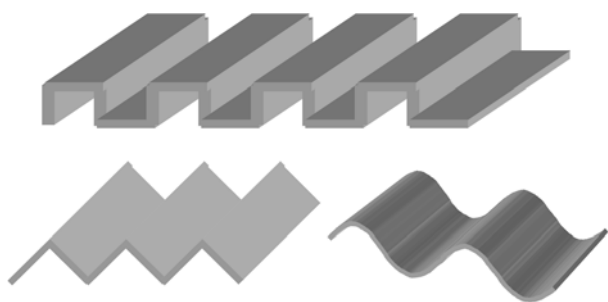


圖 35 (a) 金屬薄片摺曲



(b) 用摺曲薄片造成的貨櫃箱

## (d) 不同種類的結構

### (i) 拱架

拱架是一個純粹承受壓縮負荷的結構，向下負荷的力通過各構件而轉移到左右兩方(圖 36a)。拱架無須接合構件，只要把構件放到適當位置，便可以產生堅固的結構，常用材料包括有石塊、磚、混凝土等。拱架常見於中國古代的石橋底部和歐洲古代建築物等(圖 36b)。

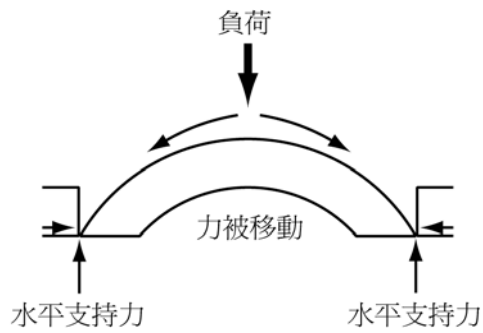


圖36 (a) 拱架結構



(b) 拱架結構的實例

## (ii) 支架

支架結構是由獨立的桿狀或棒狀物件連結而成的。支架的優點是結構較簡單和輕巧，一般用來負重，它的主要組成部份是支桿和接口(圖 37a)。支架結構的例子有很多，許多建築物和機械都是由支架所構成的，例如：電纜塔、建築物、橋樑和起重機等(圖 37b)。

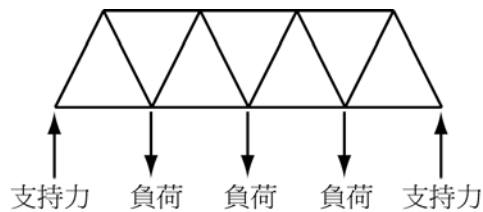


圖37 (a) 支架結構



(b) 支架結構的實例

## (iii) 橫樑

橫樑是用來承受從上而下的壓力，故其橫切面上受的力分為剪切和屈曲兩部份。常用的橫樑有工字型橫樑、盒式橫樑、L 字型橫樑等。表 2 例出一些橫樑的特點和應用。


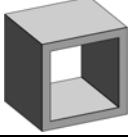
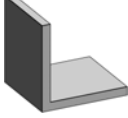
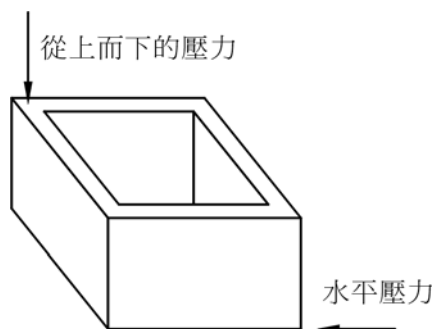
橫樑	圖例	特點	應用例子
工字型		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 上下平面都能承受強大的壓力</li> <li>• 不易屈曲</li> </ul>	建築工程、高速公路旁的防撞欄等
盒式		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 強度較工字型橫樑為高</li> <li>• 能夠承受更大的負荷，尤其是扭力</li> </ul>	建築工程、樁柱
L 字型		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 強度較低</li> <li>• 所用材料較少</li> </ul>	承托冷氣機的支架

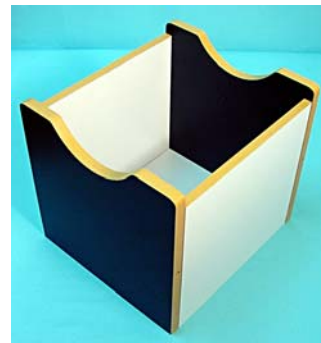
表 2 橫樑的例子

#### (iv) 方箱

方箱是由一些重量較輕的材料(例如紙、木、金屬薄片等)組合而成的矩形結構(圖 38a)。它能夠承受較大的從上而下壓力，但只能承受較小的水平方向壓力。常見的方箱結構有辦公室內的紙箱、木箱、鋼櫃、木櫃等(圖 38b)。



(a) 方箱結構



(b) 木櫃



圖38 (c) 貨櫃車上的貨櫃是方箱結構的一個例子

## 6 結構的接合方法

接合結構的方法大致上分為三大類：永久接合、半永久接合和移動式接合。(各種接合方法的詳細內容，可參考「第二章 物料處理科技」中「2.4 物料接合」一節。)

### (a) 永久接合

當結構被永久接合後，構件便極難分開，並且有特定的形狀，但構件不能活動。

永久接合的方法包括：接合劑黏合、熔接、軟焊、鉚接等。例子：金屬被電焊焊接、木工件給接合劑黏合等。熔接和軟焊適宜用來接合相同的材料，而且可以接合兩個或以上的構件。另一方面，接合劑和鉚接則適宜用來接合不同的材料。

### (b) 半永久接合

當結構被半永久接合後，構件會有固定的形狀，但較容易分開。

常用的半永久接合方法包括：螺絲、螺栓和螺帽、裝拆式結構等。半永久接合方法的特點包括：適用範圍較廣、可接合不同材料造成的構件(如木和金屬、木材和塑膠)。例子：用螺栓及螺帽牢固電器的組件、用螺絲接合木層板和鐵架等。如要接合兩個或以上的構件，必須考慮厚度的限制。

### (c) 活動接合

當結構被活動接合後，構件按照特定的位置移動。活動接合的例子有：螺絲安裝在門鉸後，門可以被打開或關上。此外，用摺疊撐接合的摺疊式檯面、摺鉸接合的大門都是採用這種接方法(圖 39a)。除此之外，剪刀、火鉗等工具也是活動接合例子(圖 39b)。這種方法可以接合相同或不同材料，但以兩個構件為佳。



(a) 門鉸



(b) 剪刀

圖39 活動接合方法的實例

## 7 簡單結構設計

### (a) 構件受力

在一個用來承受負載的結構內，它的不同構件會承受著不同的應力。若要準確地設計各種工程結構，必須先找出各構件的受力。支架上各構件的受力可以用力圖來找出。

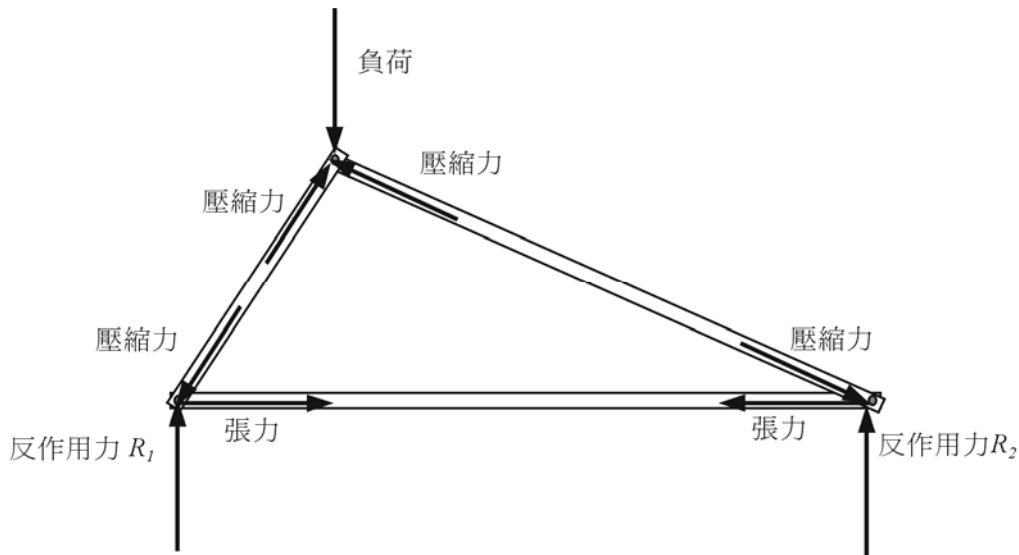


圖40 承受負載的的支架結構

圖 40 顯示一個承受負載的支架結構，它的支桿分別承受壓縮力和張力。由於整個支桿保持平衡，所以

$$\text{負荷} = \text{兩反作用力的和} = R_1 + R_2$$

此外，支架上各接口的力亦互相平衡。所以可以用力圖來找出各力的大小。例如：在上面的接口，負荷與兩壓縮力互相平衡(圖 41a)。假設已知負荷的大小，利用適當比例畫出有關的力圖，便可以找到壓縮力  $T_1$  和  $T_2$ 。

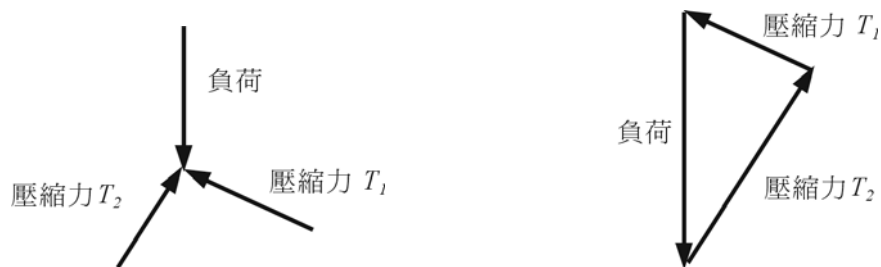


圖41 (a) 接口上各力平衡

(b) 力圖

### (b) 構件的切面面積

找到各構件的受力後，便可以計算構件的切面面積。構件上每單位面積所受的力稱為應力。

$$\text{應力} = \frac{\text{施力}(F)}{\text{橫切面積}(A)} \quad (\text{應力的單位是 } \text{Nm}^{-2})$$

構件的應力不能太大，否則可能會引致塑性形變或折斷。所以，只要知道構件上的應力限制，便可以利用以上公式來計算構件的橫切面積。

### 例題7

某結構內的一個構件承受  $20 \times 10^6 \text{ N}$  的拉力，它的應力限制是  $100 \times 10^6 \text{ N m}^{-2}$ 。求該構件的最少橫切面積。

### 解題

$$\text{應力} = \frac{F}{A}$$

$$5 \times 10^6 = \frac{20 \times 10^6}{A}$$

$$A = \frac{20 \times 10^6}{5 \times 10^6} = 4 \text{ m}^2$$

所以，該構件的最少橫切面積為  $4 \text{ m}^2$ 。

## (c) 安全系數

### (i) 安全系數的意義

在設計結構時，必須先考慮該結構在正常操作時的最大負荷。不過，在實際操作時，負荷有時會意外地增加，這便可能會令結構損壞或發生意外。例如，假如因工潮而引致大量貨櫃車同時停在天橋上，便會對天橋產生非常大的負荷。所以，在設計結構時，必須按安全系統來增加結構的負荷。安全系數的定義如下：

$$\text{安全系數} = \frac{\text{導致損壞的負載}}{\text{實際構件承受的負載}}$$

不同材料的結構會有不同的安全系數值，例如：鋼材的安全系數  $\geq 1.5$ 、磚材的安全系數  $\geq 5.5$  等。

## (ii) 成本效益

結構要求的安全系數越高，便需要較強的材料和結構，建造成本亦會相應地提高。不過，一些和人類性命息息相關的結構必須有極高的安全要求，所以成本亦較大。例如：核能發電廠、水壩、載貨升降機的結構等。相反，假如結構並不影響性命和財產，可以用比較低的標準，以節省成本。

## (d) 增強結構的方法

在製作結構的時候，部分構件可能會承受較大的壓力。若要增強結構，可以在結構設計上加以改良，例如：在超級市場的盛貨籃及手推行李車用摺曲的支柱，可以強化框架部分，令整體結構更加穩固(圖 42a)。



圖42 (a) 盛貨籃



(b) 手推行李車

另一個例子是電視天線桿。為了加強它的穩定性，可以用鋼索將天線桿固定在建築物的天台上。

## 8 結構測試

設計及製作結構後，必須測試它的特性是否符合設計的要求。對於大型的結構，可以製作模型來測驗。例如：圖 43a 顯示青馬大橋模型，它用來測試該橋的橋面在不同受力情況下的變化。



圖43 (a) 青馬大橋模型



(b) 青馬大橋

常用的結構測試項目包括量度結構的負載、強度、穩定性和撓度等。下列介紹一些簡單的量度方法。



## (a) 結構的負載

當一個支架結構承受負載時，各構件上的受力可以利用轉盤式彈簧秤來量度(圖 2a)。當轉盤式彈簧秤的兩個觸頭受力時，它的指針會根據受力大小而轉到適當的刻度。觀察刻度盤上讀數，我們就可以知道該構件的受力了。有些轉盤式彈簧秤亦可以用來量度拉力。

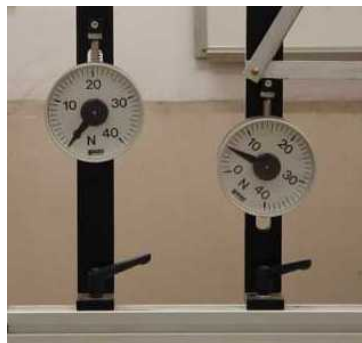
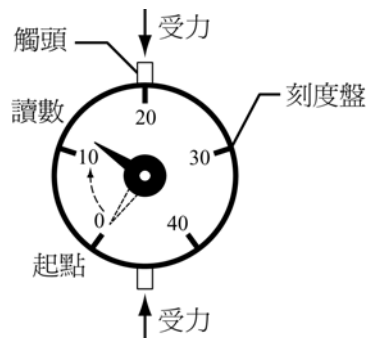


圖44 (a) 轉盤式彈簧秤



(b) 轉盤式彈簧秤的使用方法

在實際應用時，可以先將多個轉盤式彈簧秤牢固地連接到適當的構件上，如圖 44 所示。然後，在結構(或模型)上加上代表負載的適量砝碼，令各構件受力。觀察各轉盤式彈簧秤的讀數，就可以知道各構件的受力大小了。

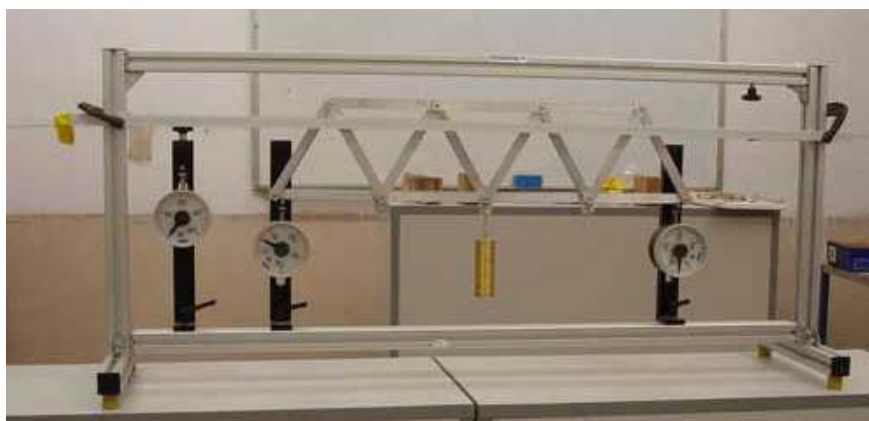


圖45 利用模型量度結構的負載

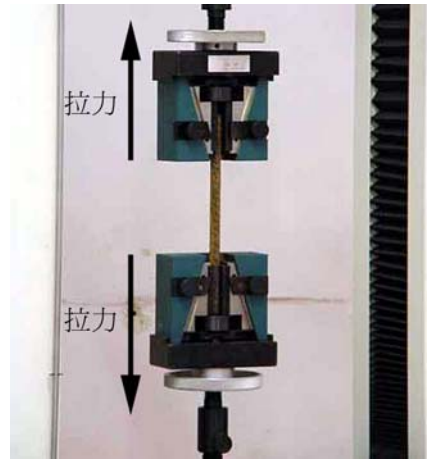
## (b) 結構的強度

當結構上的構件承受過大的壓力或拉力時，它可能會折斷。不過，當構件的切面面積越大時，它就可以承受更大的受力。所以，我們較適宜用應力 (亦即是每單位面積的受力)來表示構件上的受力情況。構件的強度就是它可以承受的最大應力，一個結構的強度由各構件的強度所決定。

強度可以分為拉力強度和抗壓強度兩種。拉力強度表示材料承受拉力時抵抗變形的能力，它可以用拉力測試機來量度。拉力測試機會不斷用力拉張構件，並同時記錄結果，直至構件變形和折斷。圖 46 顯示拉力測試機和鋼筋的拉力測試。



圖46 (a) 拉力測試機

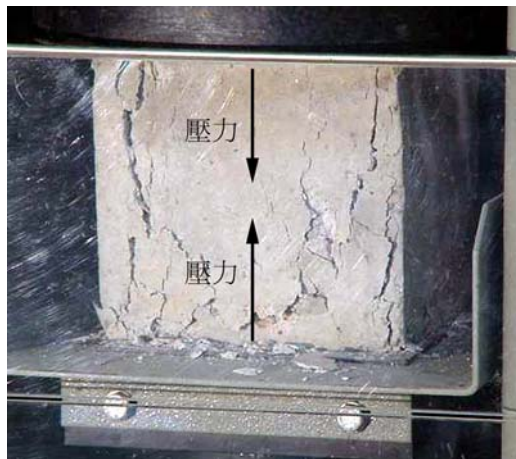


(b) 鋼筋拉力測試

壓縮強度表示材料承受壓縮力時抵抗變形的能力，它可以用壓力測試機來量度。壓力測試機會不斷用力壓縮構件，並同時記錄結果，直至構件變形和斷裂。圖 47 顯示壓力測試機和混凝土的壓力測試。



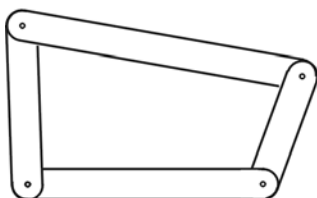
圖47 (a) 壓力測試機



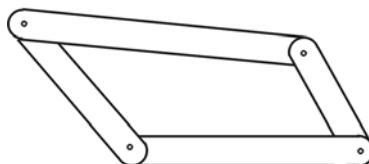
(b) 混凝土壓力測試

### (c) 結構的穩定性

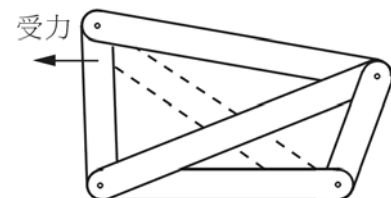
假如一個結構容易被改變形狀或容易翻倒，則這個就是一個不穩定的結構。圖 48 顯示的一個利用螺栓來接合的支架結構，它承受水平力後容易變形，所以是一個不穩定結構的例子。如果在結構中加入新的支桿，形成三角形的結構，則整個結構便會較為穩定。如果加入太多支桿(虛線支桿)，則會成為多餘桿。



(a) 原來的形狀



(b) 變形後的形狀



(c) 較穩定的結構

圖48 容易變形的結構

如果要測驗結構是否容易變形，首先找出可能出現施力的方向和估計量值。然後，沿這些方向施適當的力，並觀察結構會否變形。根據受力測試的結果，便可以評估結構的穩定性。

另一種測試穩定性的方法是採用振動器。如圖 49 所示，將結構模型放在振動器上，開啟電源後振動器便會不斷振動，振動的幅度和頻率還可以適當地調校。這方法可以模擬不同級數的地震，並測試地震對建築物穩定性的影響。

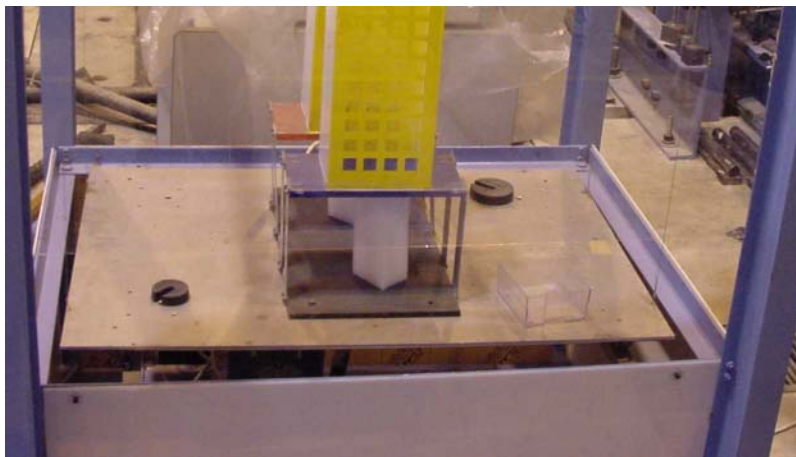


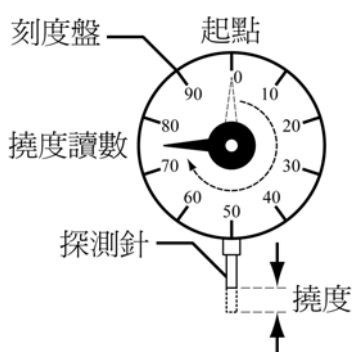
圖49 用來模擬地震的振動器

## (d)結構的撓度

當結構受力時，它的構件可能會產生不同程度的偏移，稱為撓度。我們可以利用針盤規來量度簡單結構的撓度。圖 50 顯示一個針盤規，它是一種可以非常精確地量度撓度的儀器。當針盤規的探測針被壓下時，它便會推動針盤規內的機械，令刻度盤上的指針轉到正確的撓度讀數。觀察針盤規上的撓度讀數，我們就可以知道結構的撓度了。



圖50 (a) 針盤規



(b) 針盤規的使用方法



(c) 數碼針盤規

針盤規有許多不同的種類，例如：圖 50c 的數碼針盤規就可以將撓度變為數碼讀數，以便更準確地顯示量度結果。

如果要量度橫樑結構中間的撓度，可以如圖 51a 所示，把橫樑安放在支撐點上。然後把針盤規抵著結構中間的底部，利用支撐架固定位置，然後將指針調校至零位。放上砝碼，然後觀察針盤規的讀數。針盤規的數值變化便是撓度。圖 51b 顯示另一種量度橫樑一端撓度的方法。根據量度的結果，可以測量橫樑長度  $L$  和撓度的關係。

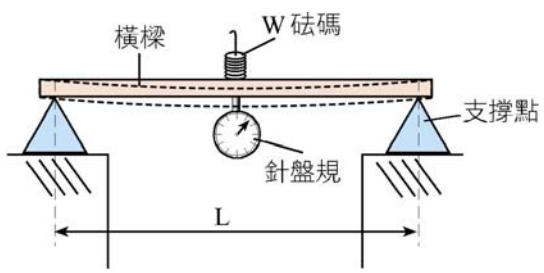
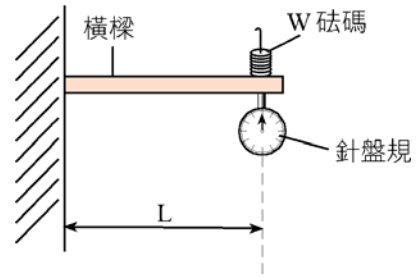


圖51 (a) 量度結構中間的撓度



(b) 量度結構一端的撓度

## 練習

1. 請舉出結構受力的五種性質(壓縮、拉張、屈曲、扭轉、剪切)的一個例子。

受力的性質	例子
壓縮力	
拉力	
彎曲力	
扭力	
剪切力	

表 1

2. 在一個牧場內、一頭馬被兩條繩扣著，各繩的力如下圖安排，試用分解法找出合力。

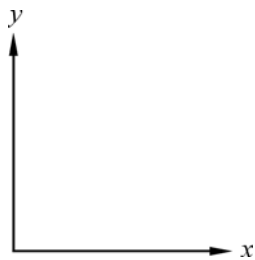


圖 1

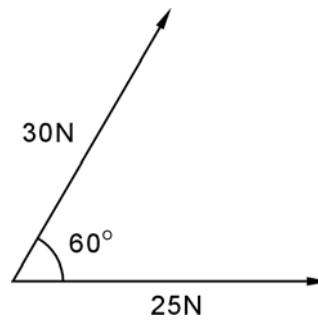


圖 2

3. 一艘渡海小輪在泊岸後，水手用 60 N 的力拉起吊板以便乘客登岸，吊板的長度為 2 m，求拉力對 O 點鉸位的力矩。

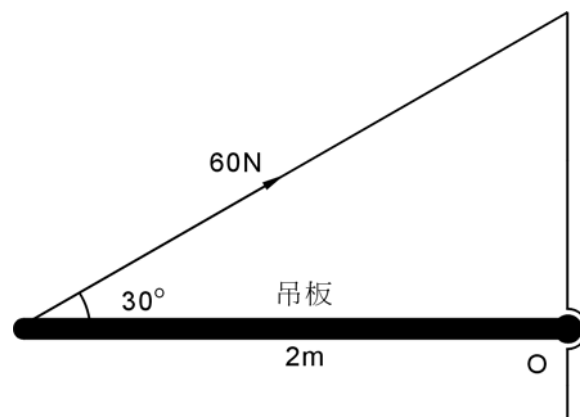


圖 3

4. 列出五類負荷常用材料例子，並舉出一些相關例子。

負荷	例子	常用材料
壓力		
拉力		
扭力		
彎曲力		
剪切力		

表 2

5. (i) 說明強化材料的三種方法名稱。  
 (ii) 小明由老師帶領參觀一座建築中的橋樑。小明發現混凝土內有很多鋼筋，但他不明白這些鋼筋的用處，請解釋使用鋼筋的原因？
6. (i) 從結構強度這方面考慮，為甚麼學校旗桿使用空心柱來製造？  
 (ii) 列舉兩個例子是以改變橫切面來增加結構的強度。
7. 說明拱架結構的特點。(需要附以草圖解說)
8. 下圖為一個金屬盒，試分辨 A、B、C 三區，那一個部分是永久接合、半永久接合、活動接合，並附以解說。

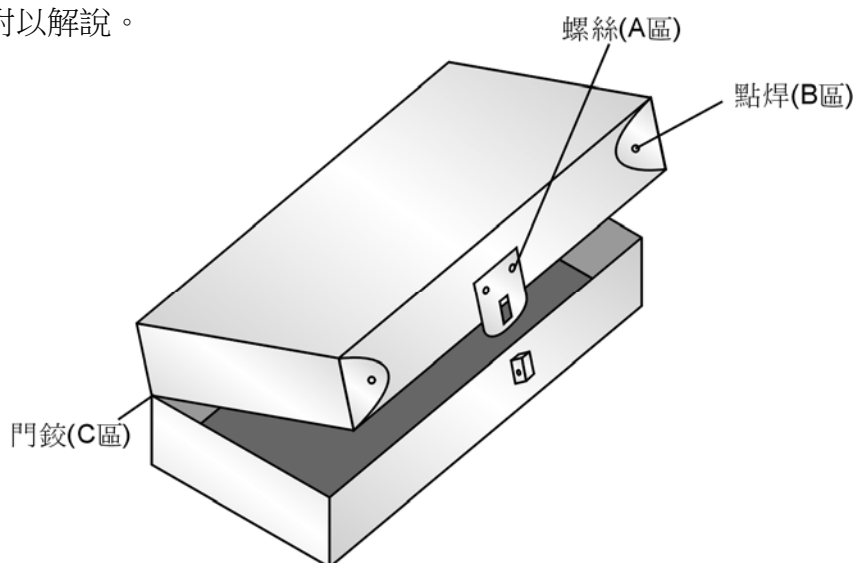


圖 4

區別	接合名稱	理由
A		
B		
C		

表 3

9. 一艘遊艇泊岸，並以一條麻繩固定於岸邊，該麻繩承受  $10 \times 10^5 \text{N}$  的拉力，它的應力限制是  $15 \times 10^5 \text{Nm}^{-2}$ ，求該麻繩的半徑是多少？(假設麻繩的橫切面積為圓形)。
10. (i) 簡單描述負載測試(橫樑)，需附以繪圖解說。  
(ii) 若在測試中，測試的橫樑不能承受 400 kg 的負載而折斷，而實際構件可承受的負載為 80 kg，試求這結構的安全系數。