

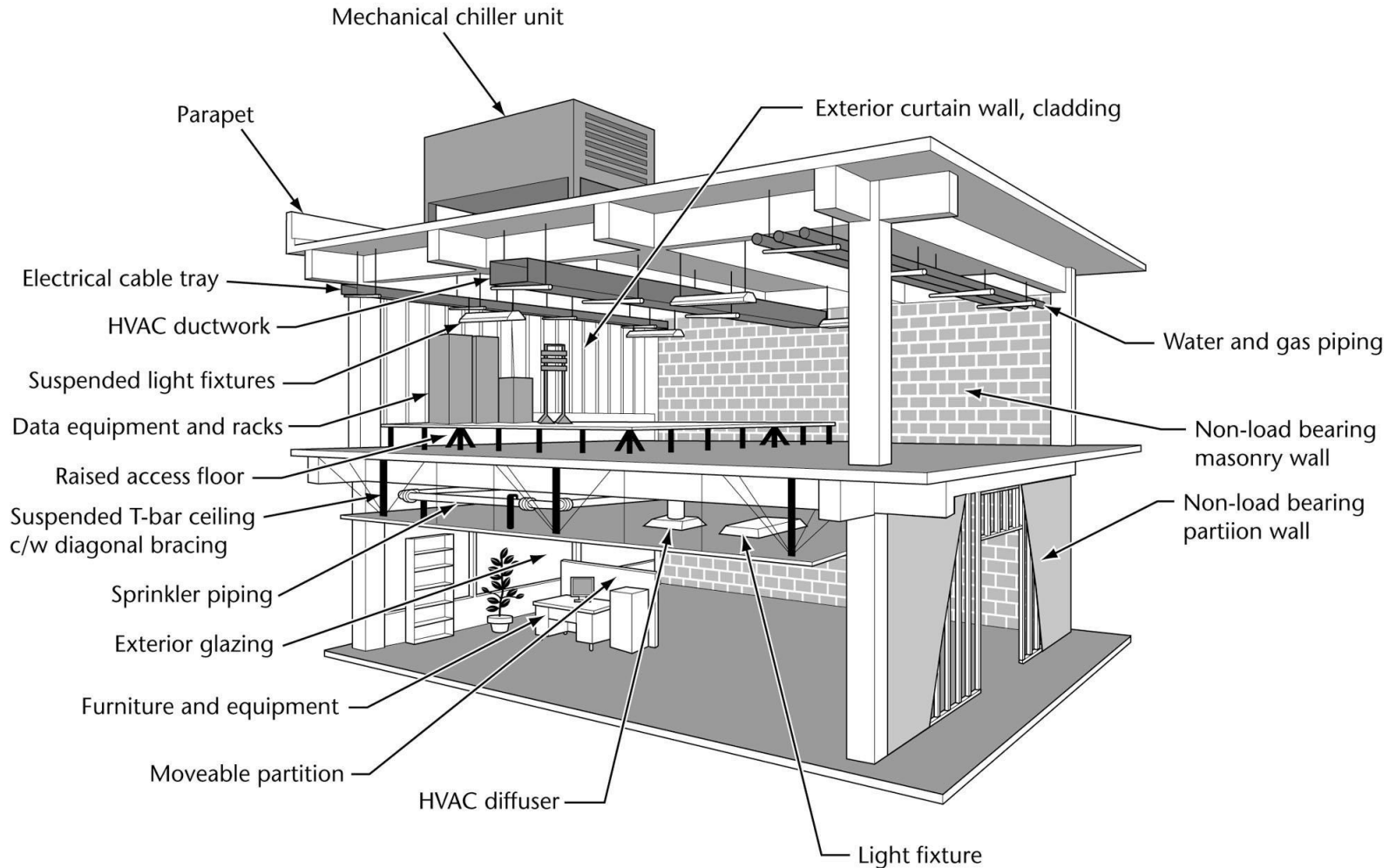
功能性設備物耐震設計概論



成功大學建築系
姚昭智教授

建築物功能性設施

(資料來源：Canadian Standard Association, 2006)



功能性設施

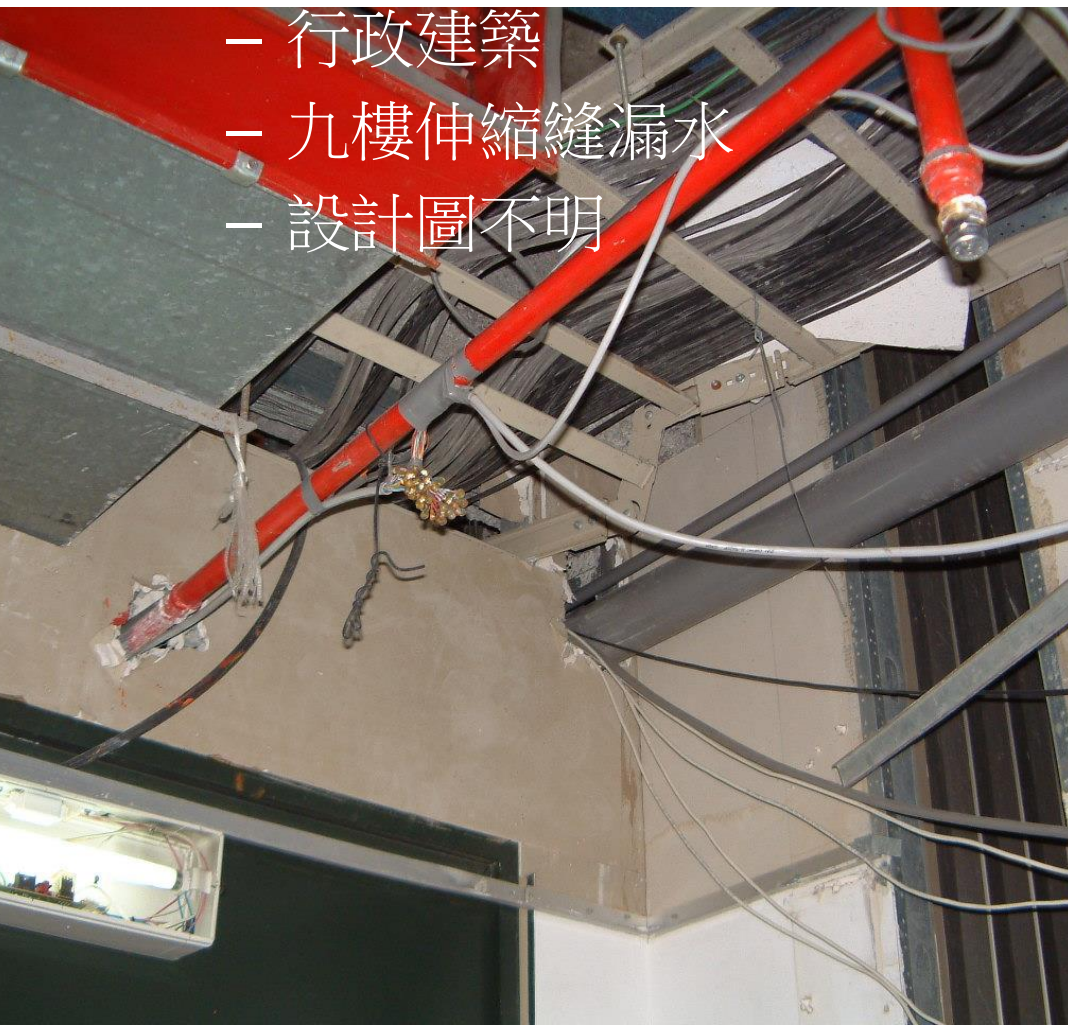
- 影響建築使用功能的機電設備或建築設施
 - 供電、供水、空調....
 - 天花板、吊掛石材、書架....
- 耐震性能不詳、系統複雜、缺乏適當的品管
 - 震災破壞經驗為前車之鑑

歷年地震功能性設施損壞調查

淹水(1) - 市政府

- 消防管線通過伸縮縫

- 行政建築
- 九樓伸縮縫漏水
- 設計圖不明



淹水(2) — 醫院

- 供水管通過伸縮縫
 - 醫院建築
 - 八樓以下各樓層淹水
 - 不明使用單位擅接管道



淹水（3）— 旅館



非結構牆內之自來水管破裂而滲水



房間走道淹水情形



天花板、石材牆面之縫隙滲水情形



地下室水管穿牆處的滲水情形

設有隔振彈簧的機器易受損



輕鋼架天花板掉落

- 案例極多
- 乾式牆施工錯誤





圖書館書架受損

921地震經驗



圖書館書架倒塌(1)

- 未設置架頂連桿



圖書館書架損壞(2)

- 靠牆固定者
 - 錨定強度不足
 - 大量圖書掉落



圖書館書架(3)

- 設有架頂連桿
 - 底部未固定造成滑動傾斜(東海建築系陳格理教授提供)



圖書館書架損壞(4)

- 有設置架頂連桿
- 書架平面內變形(東海建築系陳栩栩教授提供)



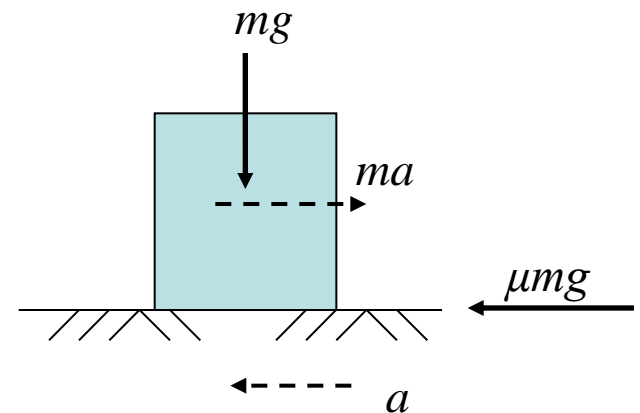
0206美濃地震

- 台南學校圖書館只有兩校書架倒塌
 - 其他學校有採取書架抗震措施



為何損壞如此嚴重？

- 耐震設計只有考慮結構體
 - 功能性設施大半無耐震設計
- 觀念誤導
 - 愈重物體愈安全？
 - $F = ma$
 - 經濟損失 **VS** 人命損失



非結構物抗震補強原則

- 建議補強方法 (6R)

1. 束制 (Restrain) : 固定

2. 強固 (Reinforce) : 強化本身強度

3. 減少地震力 (Reduce) : 底部隔震、減重

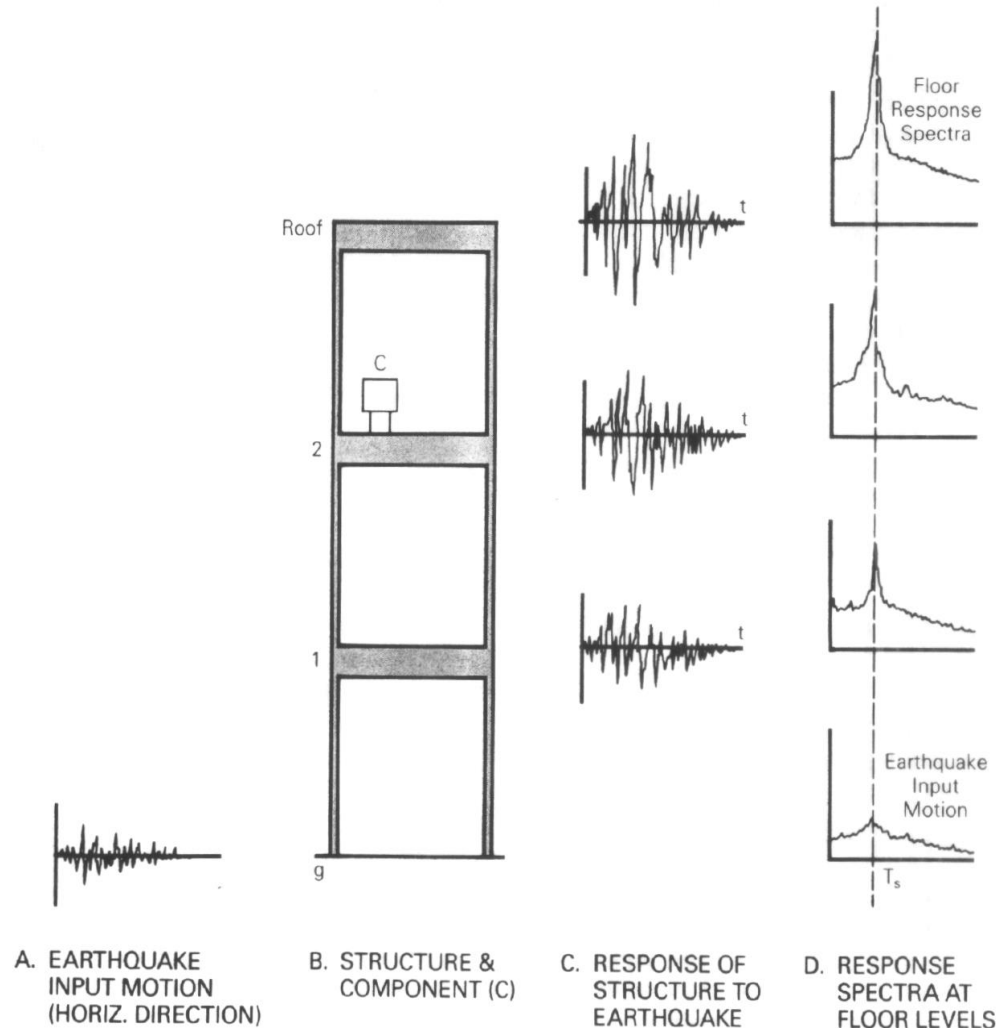
4. 更換位置 (Relocate) : 往低樓層搬

5. 移除 (Remove)

6. 替換取代 (Replace)

建築物震動特性

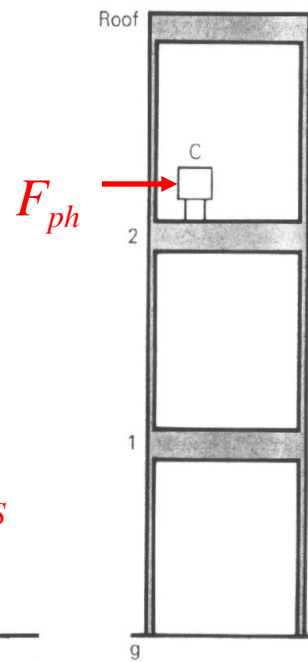
- 建築物樓版震動
 - 樓層越高加速度峰值愈大
 - 震動頻率以房屋自振頻率為主
- 位處頂樓設備較易受震過大而損壞



非結構物耐震設計規範

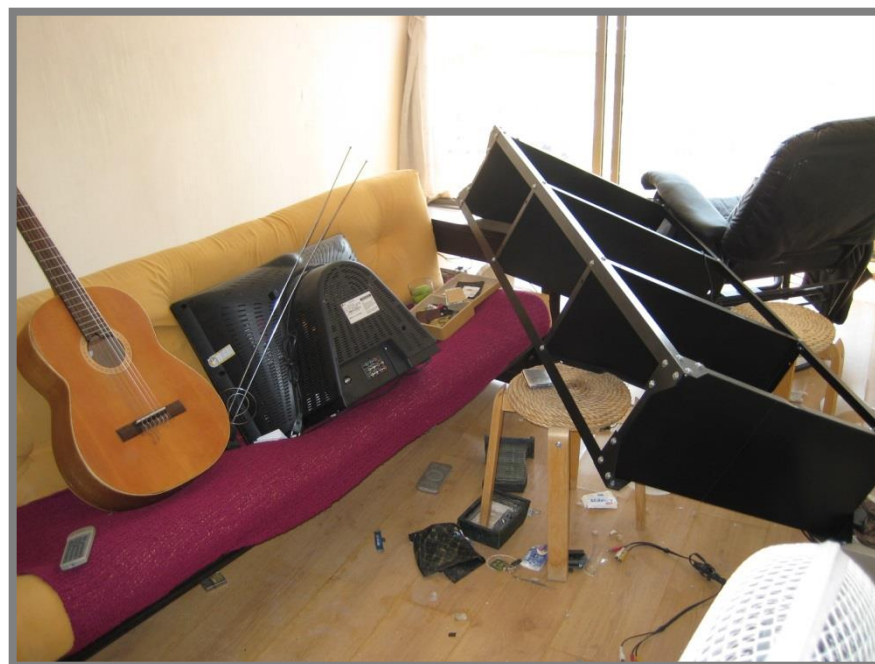
- 最小設計水平總橫力 F_{ph} 依下式計算：

$$F_{ph} = 0.4S_{DS} I_p \frac{a_p}{R_{pa}} \cdot (1 + 2h_x/h_n) W_p$$



1-1 傾覆性原理

當剛性物體在無束制狀態下（Free Standing）受到地震力作用時，反應的行為多為擺動、滑動、傾倒等情況。其中又以**傾倒**（Overturning）較容易造成嚴重的破壞。

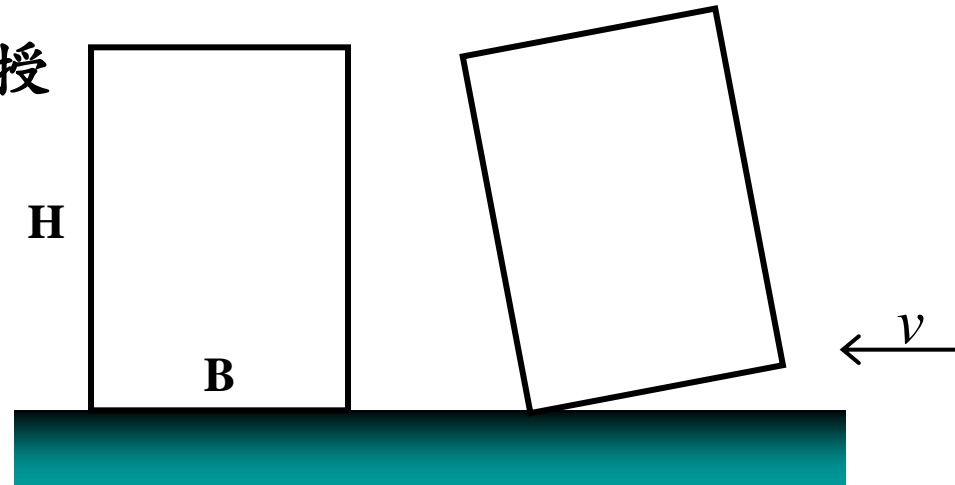


1-1 傾覆性原理

Ishiyama教授探討物體受樓版作用時的運動行為。其結論為物體的傾倒主要與所受到的速度有關。

假如物體底部寬度為B公分，物體高度為H公分，根據Ishiyama教授的物體傾覆性預測公式：

當 $v(\text{cm/sec}) > 10 \times \frac{B}{\sqrt{H}}$ ，



無束制物體即可能會發生傾倒。

1-1 傾覆性原理

物體依靠著牆壁時，則必須修正預測公式。

以震動台進行測試，結果與預測公式 $v=10 \times B / \sqrt{H}$ 比較發現試體傾倒時的速度，大多數約為預測速度的「**兩倍**」。

因此當物體依靠著牆壁或受其他束制，可將預測公式中物體底部的寬度計算為 $2B$ 。

$$\text{臨界速度 } v=10 \times \frac{2B}{\sqrt{H}}$$

1-1 傾覆性原理

例：

某書櫃寬60cm，高150公分，試討論有無靠牆的行為。

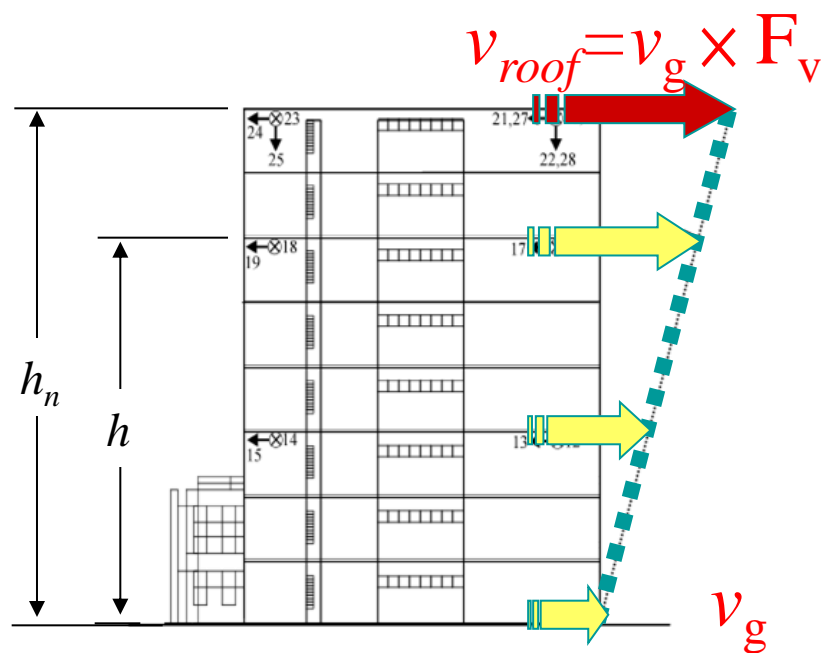
$$\text{無靠牆時臨界速度 } v_1 = 10 \times \frac{B}{\sqrt{H}} = 10 \times \frac{60}{\sqrt{150}} = 48.99 \text{ cm/s}$$

$$\text{有靠牆時臨界速度 } v_2 = 10 \times \frac{2B}{\sqrt{H}} = 10 \times \frac{2 \times 60}{\sqrt{150}} = 97.98 \text{ cm/s}$$

1-2 樓層速度預測公式

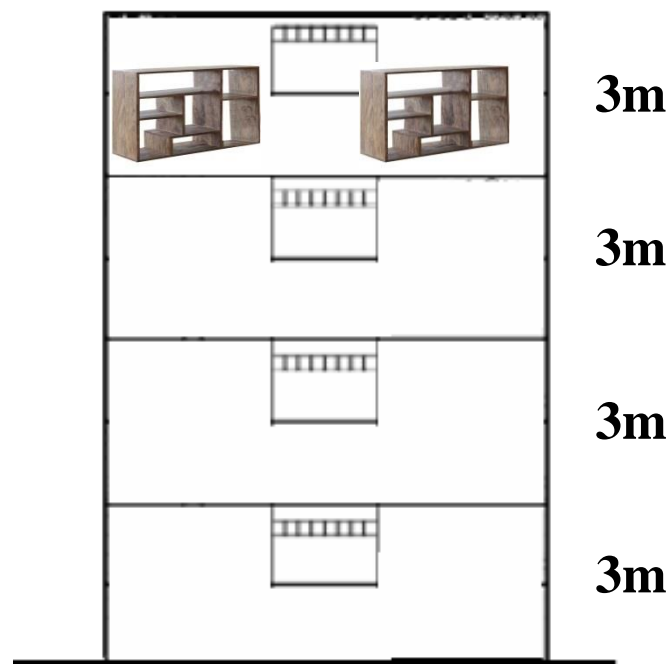
- 以台灣近年來的大地震為研究對象，分析強震儀所記錄的樓層振動量，可歸納出簡化的樓版速度預測公式。
- 預測公式根據建築物的震動情形絕大部分呈「**線性關係**」
- 求得頂樓的樓板速度，再依據線性分布的原則，可推算出其他樓層的樓板速度。

頂樓速度放大倍率
 $F_V = 1.99T + 0.79$



1-3 範例說明

有棟4層樓RC校舍建築物坐落在台南市東區（第二類地盤），已知建築物各樓層高度為3m，總高度為12m。假設四樓有兩個書櫃，寬為50cm，高為150公分，一個書櫃靠牆放置而另外一個書櫃單獨放置，試討論這兩個書櫃在地震中是否有傾倒之疑慮。



1-3 範例說明

1. 計算地表最大加速度

從規範可知 S_{DS} 為0.7，校舍之用途係數 I_p 為1.5，代入公式可以求得地表最大加速度 $PGA=0.4 \times I_p \times S_{DS} \times g = 0.42g$ 。

2. 換算地表最大速度PGV

$$PGV \text{ (cm/s)} = PGA \text{ (cm/s}^2\text{)} / 8.6561 = 0.42 \times 980 / 8.6561 = 47.55 \text{ cm/s}$$

3. 計算建築物基本振動週期T

若依照法規規定鋼筋混凝土建築物振動週期

$$T = 0.07h_n^{3/4} = 0.07 \times (12)^{3/4} = 0.45 \text{ sec}$$

1-3 範例說明

4. 推算頂樓速度反應放大倍率 F_v

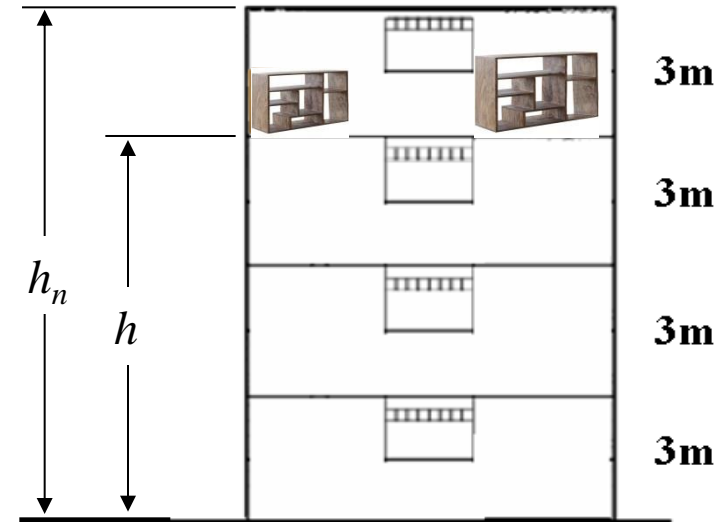
$$F_v = 1.99T + 0.79 = 1.99 \times 0.45 + 0.79 = 1.68 \circ$$

5. 推算四樓速度反應放大倍率 F_{vh}

$$F_{vh} = 1 + (F_v - 1) h/h_n = 1 + (1.68 - 1) \times 9/12 = 1.51 \circ$$

6. 計算四樓樓版最大速度反應

$$PV = F_{vh} \times PGV = 1.51 \times 47.55 = 71.8 \text{ cm/s} \circ$$

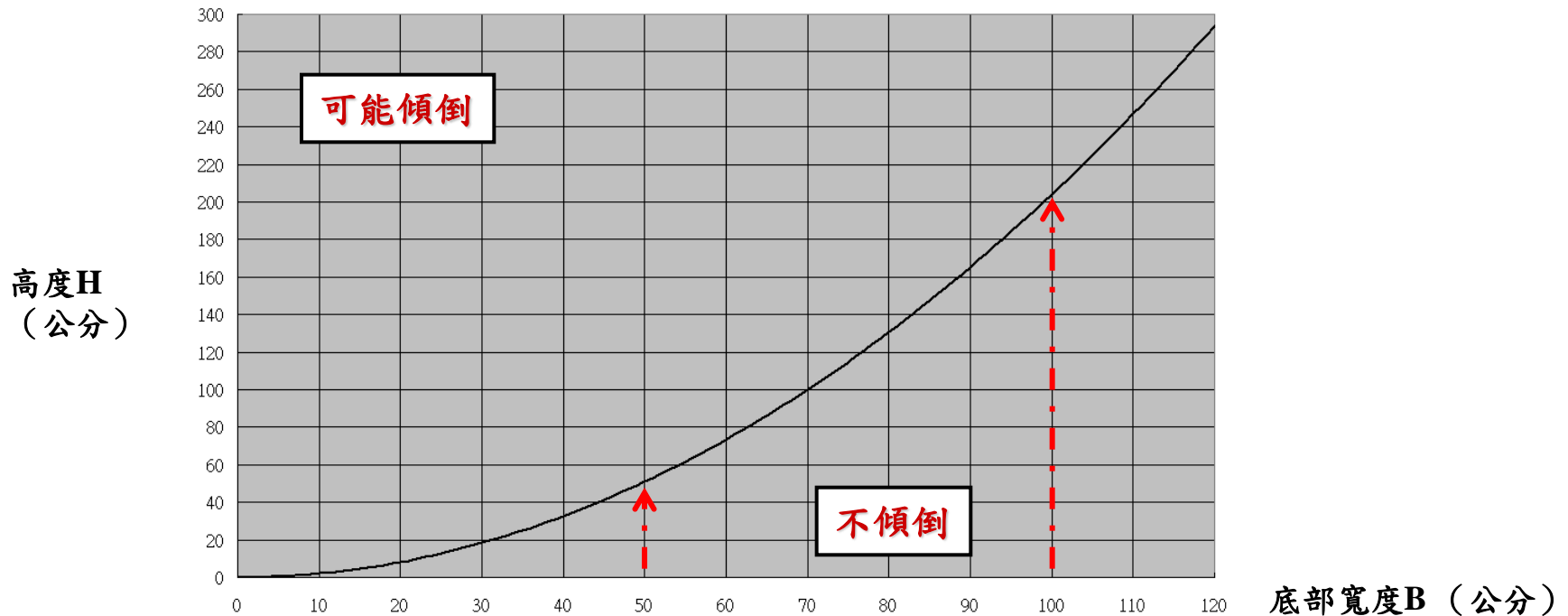


1-3 傾覆預測圖

為求使用上的方便可利用傾覆預測圖來判斷設備是否有傾倒的可能性。

假如某層樓樓版預測的振動速度為71 cm/s，試繪出傾覆預測圖。

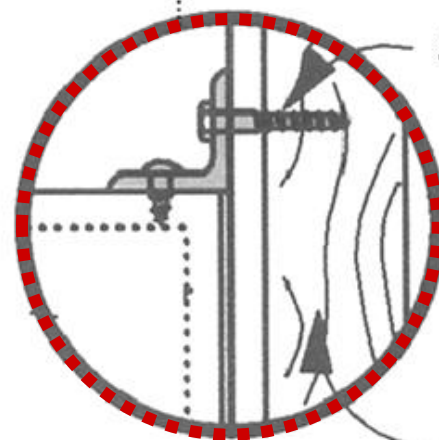
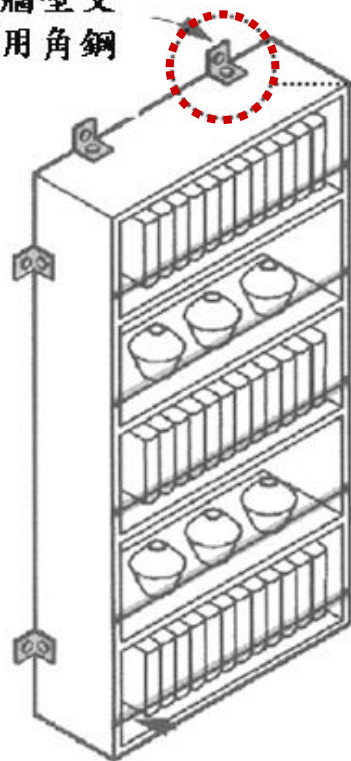
$$v = 10 \times \frac{B}{\sqrt{H}} = 71; H = \frac{10^2}{71^2} B^2$$



1-4 設備物柔性固定耐震工法

國內傳統上對於設備物的耐震性並不重視，較為常見的耐震方式為**L型角鋼固定法**，但在執行上有些不易被人接受的缺點。

位於櫃頂與牆壁交接處的固定用角鋼



自攻螺絲

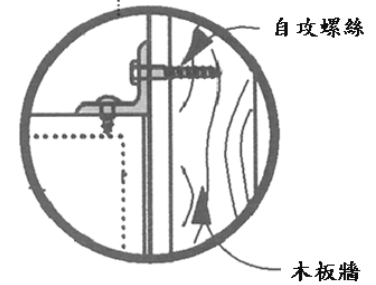
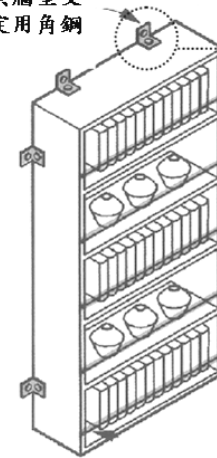
木板牆

1-4 設備物柔性固定耐震工法

L 型角鋼固定法的缺點：

1. 角鋼、螺栓等固定物外觀不佳。
2. 造成設備物外表面及牆體的破壞。
3. 固定完成後難以再作移動。
4. 地震發生時，接著點有應力集中問題。

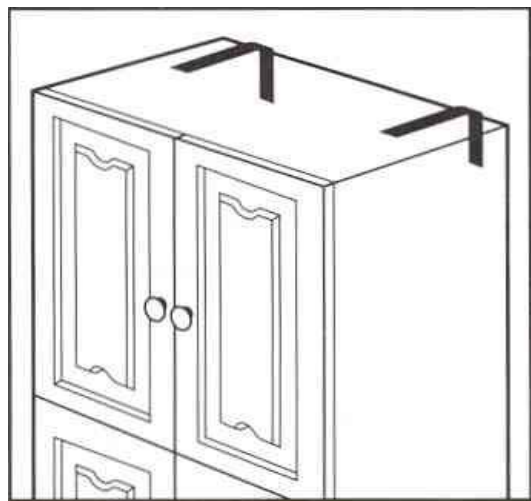
位於櫃頂與牆壁交接處的固定用角鋼



1-4 設備物柔性固定耐震工法

美國產品：Quakehold

Furniture Strap



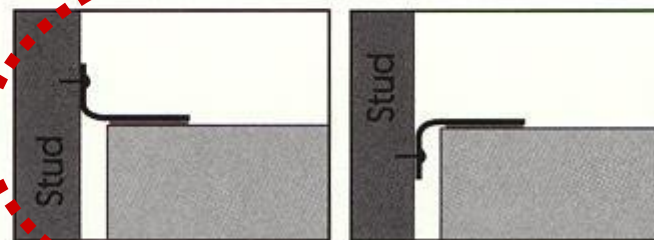
Prevent Valuable Furniture from Falling

**How do they work?
It's easy!**

Select the strap color that best matches your furniture. Then *peel and press* the adhesive portion to the outside edges of either the top or sides. This easy *peel and press* installation prevents putting holes in your cherished furniture. Straps must be secured to the wall stud first with option to either h strap or have it in

EXAMPLES OF SECURING

Below are two examples of top securing into wall stud. This kit also enables you to side mount.



Strap in view

Strap is hidden

Note: Loosely stacked furniture must be secured together first. Detailed instructions inside.

1-4 設備物柔性固定耐震工法

「**矽力康 (Silicone) 黏著設備物固定工法**」，相較於其他傳統固定方式其優點為：

1. 矽力康容易施打與清除。
2. 不需破壞牆體或設備物本身。
3. 價格便宜。
4. 設備物以矽力康施打後可抵抗較大的地震力，大大降低設備物傾倒的機率。



1-4 設備物柔性固定耐震工法

案例：

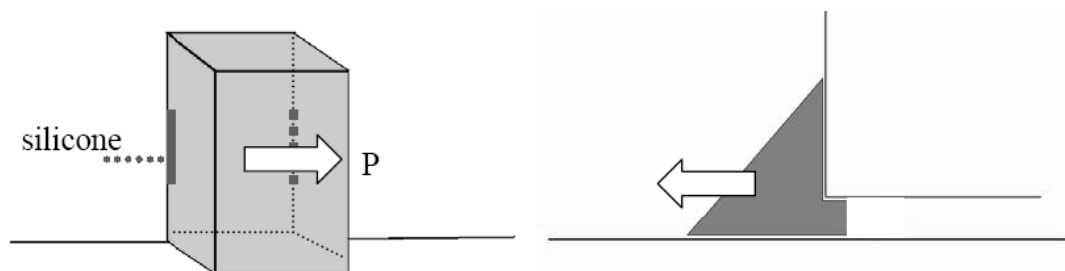
嘉義某醫院內口罩販賣機以矽力康固定，在甲仙地震作用下並無傾倒情形發生。



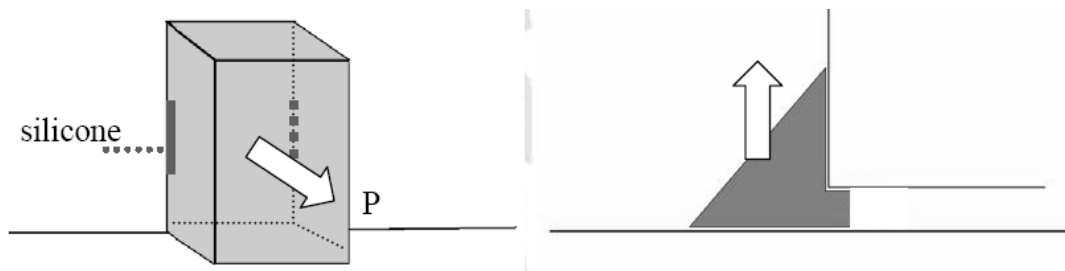
1-4 設備物柔性固定耐震工法

設備物在地震力作用下主要會在「面內」以及「面外」兩方向發生傾倒，因此曾以全尺寸的實驗裝置對矽力康兩方向的耐震性做測試。

設備物受到面內力作用，矽力康以面內強度抵抗



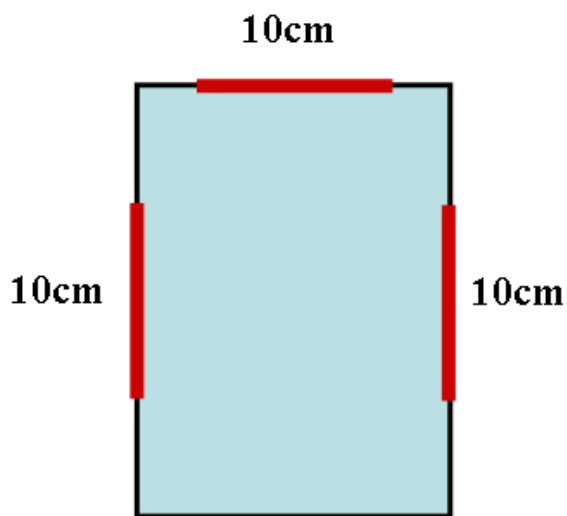
設備物受到面外力作用，矽力康以面外強度抵抗



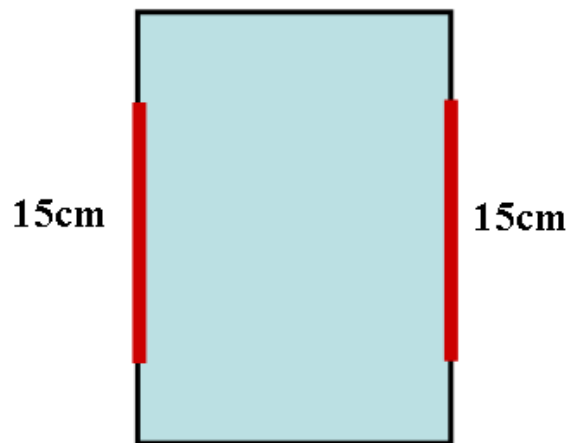
1-4 設備物柔性固定耐震工法

從實驗的結果可以知道：

1. 沿水平方向施打或沿垂直方向施打矽力康，其抗震效能幾乎相同。



總長度 30cm



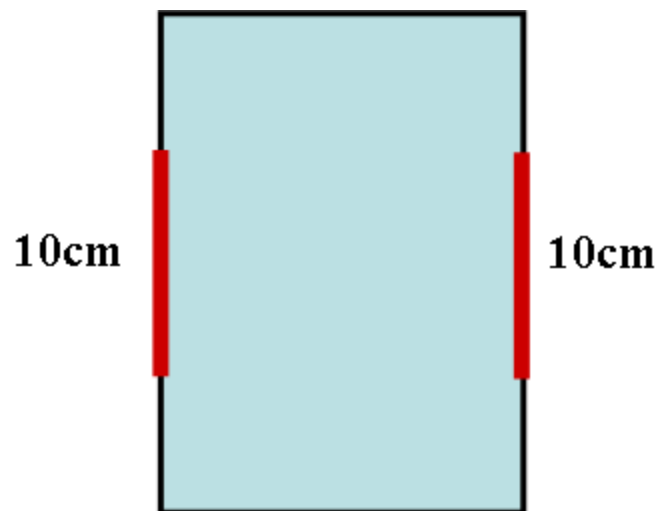
總長度 30cm

抗震效能相同

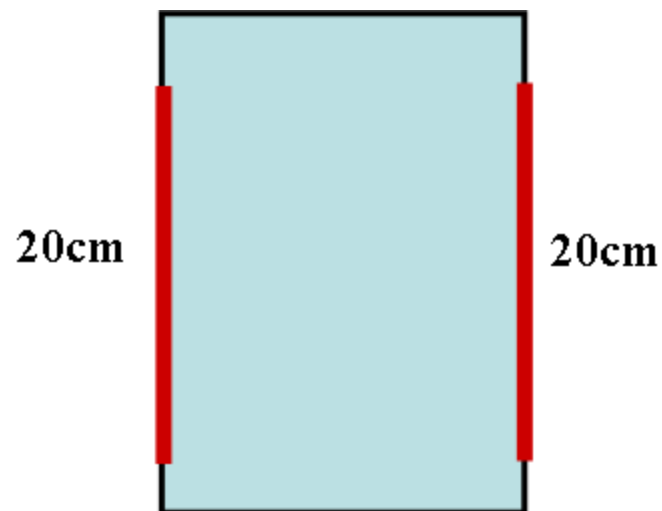
1-4 設備物柔性固定耐震工法

2. 矽力康黏著設備物所能提供的抗震強度與施打長度成正比。

下方右側的設備物施打矽力康的總長度為左側設備物的兩倍，能抵抗地震力的大小亦為兩倍。



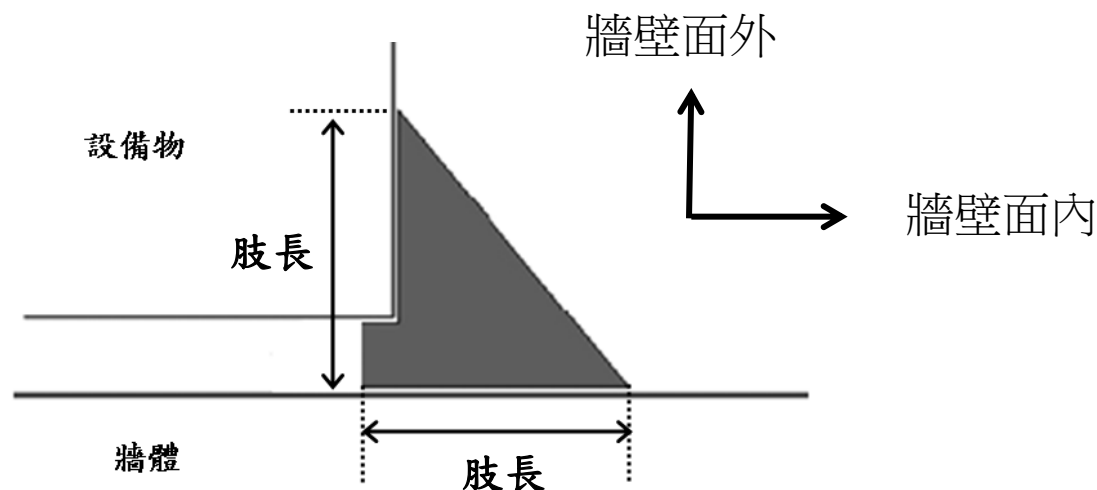
總長度 20cm



總長度 40cm

1-4 設備物柔性固定耐震工法

3. 可藉由改變矽力康施打長度和斷面大小（肢長），來控制設備所能承受的地震力大小。



若矽力康施打長度相同，則肢長2cm耐震性較肢長1cm來得好，建議使用2cm肢長斷面，可滿足建築物內大部分設備物所需的抗震強度。

1-4 設備物柔性固定耐震工法

經實驗結果分析可以得到「**矽力康抵抗力計算公式**」如下：

1. 設備左右兩側各施打斷面**肢長1cm**、**長度Lcm**的矽力康，其

牆壁面內抵抗力

$$F_v = 0.15 \times f_u \times L \text{ (cm)}$$

牆壁面外抵抗力

$$F_h = 0.37 \times F_v$$

f_u ：矽力康的極限抗張強度

2. 設備左右兩側各施打斷面**肢長2cm**、**長度Lcm**的矽力康，其

牆壁面內抵抗力

$$F_v = 0.21 \times f_u \times L \text{ (cm)}$$

牆壁面外抵抗力

$$F_h = 0.37 \times F_v$$

1-4 設備物柔性固定耐震工法

已知某矽力康的 f_u 為 0.55MPa ，若於書櫃左右兩側各施打長度 70cm ，肢長 1cm 的矽力康，試計算矽力康抵抗橫向力與縱向力之大小。

面內抵抗力 $F_v = 0.15 \times 0.55 \times 10^6 (\text{N/m}^2) \times 70 (\text{cm}) = 577\text{N}$

面外抵抗力 $F_h = 0.37 \times F_v = 0.37 \times 577\text{N} = 213\text{N}$

已知矽力康的 f_u 為 0.55MPa ，若肢長為 2cm ，則

面內抵抗力 $F_v = 0.21 \times 0.55 \times 10^6 (\text{N/m}^2) \times 70 (\text{cm}) = 808\text{N}$

面外抵抗力 $F_h = 0.37 \times F_v = 0.37 \times 808\text{N} = 299\text{N}$

1-5 綜合討論

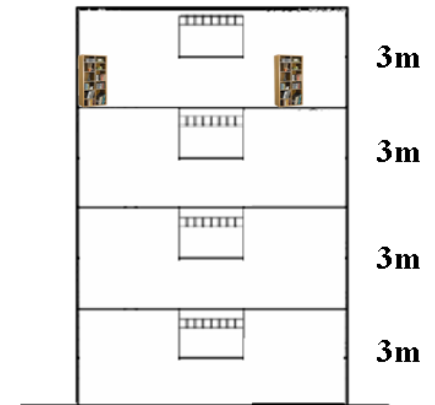
承1-3的範例，已知四樓單獨放置的書櫃在地震作用下將有傾倒的可能性，該如何加強其耐震性（假設書櫃總重80公斤）。

1. 計算四樓樓板加速度大小

耐震規範中樓板加速度放大係數為 $(1 + 2 \frac{h}{H})$

因此四樓樓版加速度大小為

$$a = 0.4 \times I_p \times S_{DS} \times (1 + 2 \frac{h}{H}) \times g$$
$$= 0.4 \times 1.5 \times 0.7 \times (1 + 2 \frac{9}{12}) \times g = 1.05g$$



1-5 綜合討論

2. 設備物所承受的地震慣性力大小 (N)

$$F = ma = 80 \times 1.05 \times 9.8 = 820 \text{ N}$$

3. 以面內作用力推算需矽力康施打長度 (假設斷面肢長1cm且 $f_u=0.5\text{MPa}$)

$$F_v = 0.15(\text{cm}) \times 0.5 \times 10^6 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) \times L_v(\text{cm}) = 820 \text{ N}; L_v = 129 \text{ cm}$$

4. 以面外作用力推算需矽力康施打長度 (假設斷面肢長1cm且 $f_u=0.5\text{MPa}$)

$$F_h = 0.37 \times 0.15(\text{cm}) \times 0.5 \times 10^6 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) \times L_h(\text{cm}) = 820 \text{ N};$$
$$L_h = 295 \text{ cm}$$

5. 最小矽力康施打長度 (肢長1cm)

$$L = L_v + L_h = 129 + 295 = 424 \text{ cm}$$

1-5 綜合討論

6. 以面內作用力推算矽力康施打長度（假設斷面肢長2cm且 $f_u=0.5\text{MPa}$ ）

$$F_v = 0.21(\text{cm}) \times 0.5 \times 10^6 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) \times L_v(\text{cm}) = 820 \text{ N}; L_v = 80 \text{ cm}$$

7. 以面外作用力推算矽力康施打長度（假設斷面肢長2cm且 $f_u=0.5\text{MPa}$ ）

$$F_h = 0.37 \times 0.21(\text{cm}) \times 0.5 \times 10^6 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) \times L_h(\text{cm}) = 820 \text{ N};$$

$$L_h = 211 \text{ cm}$$

8. 最小矽力康施打長度（肢長2cm）

$$L = L_v + L_h = 80 + 211 = 291 \text{ cm}$$

從計算的結果可以知道，在書櫃左右兩側各施打肢長1cm、長度最少424cm或是肢長2cm、長度最少291cm的矽力康則能有效防止書櫃在地震中傾倒。

小結

- 重心高的設備容易傾倒
 - 依規範推估樓層速度
 - 採用Ishiyama方法判斷
- 不同的固定工法，可以避免傾倒或滑動
 - 固定帶
 - 碇立康

大面積輕鋼架天花板損壞

- 日本經驗

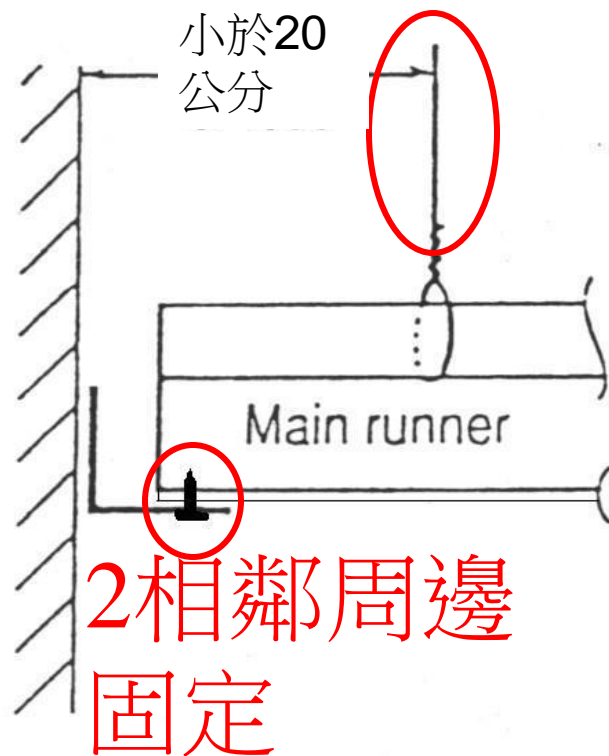
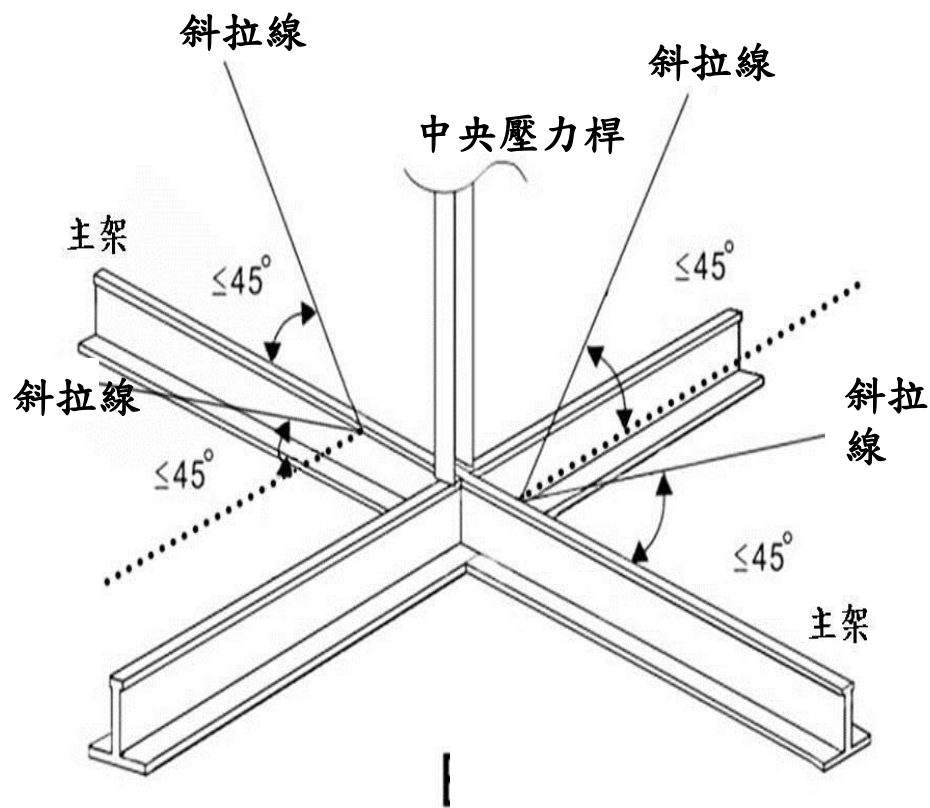


收邊處易破壞



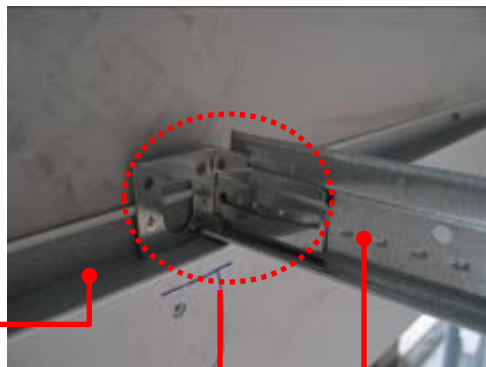
輕鋼架天花板耐震施工指南 (建築物耐震設計規範附錄B)

收邊懸吊線



依規範構法施作

構件介紹



組件：

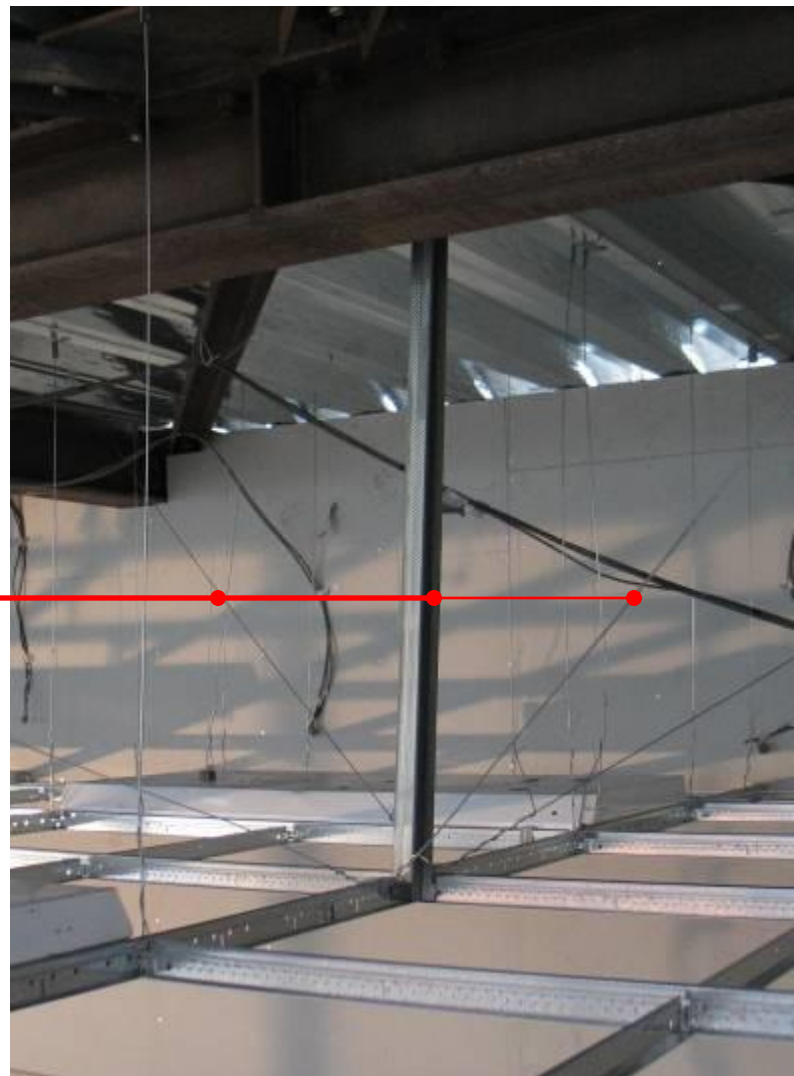
收邊架

收邊組

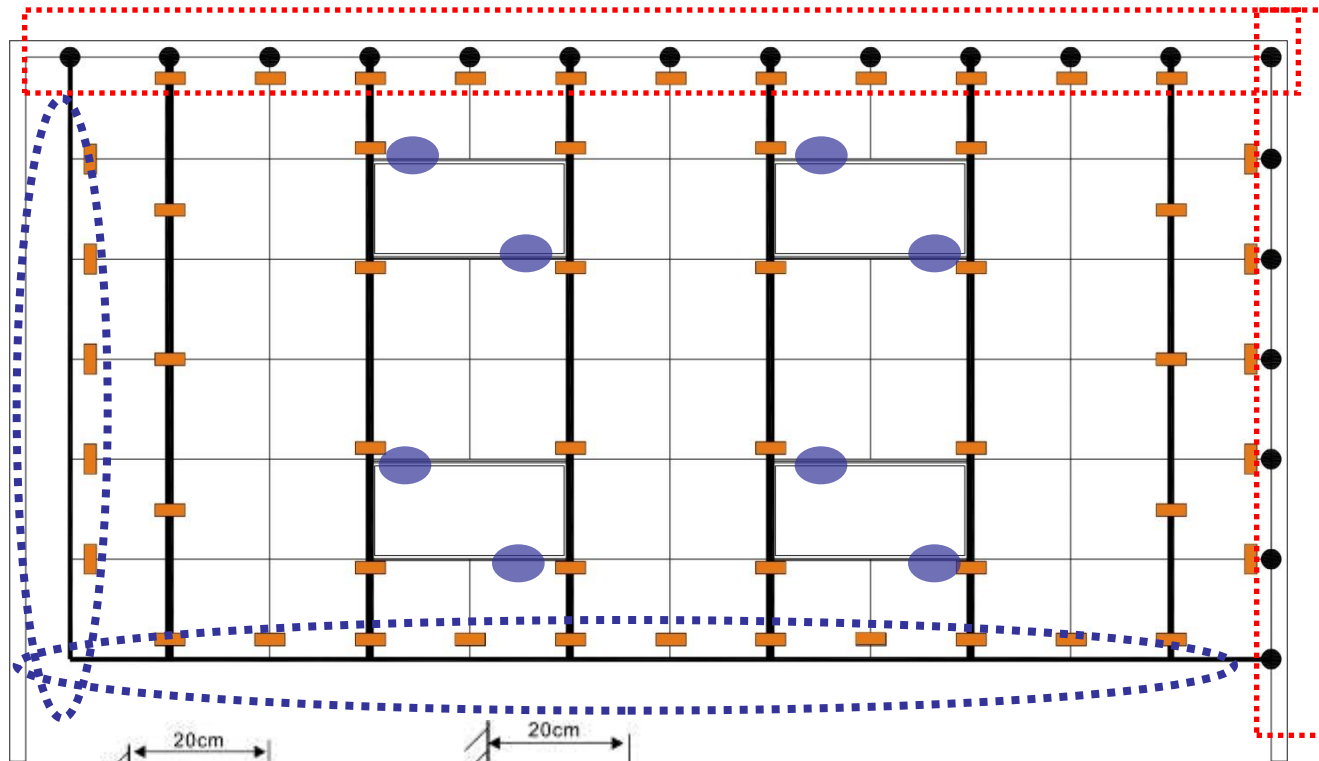
骨架

主架續接處及主副架接頭強度需80kgf以上

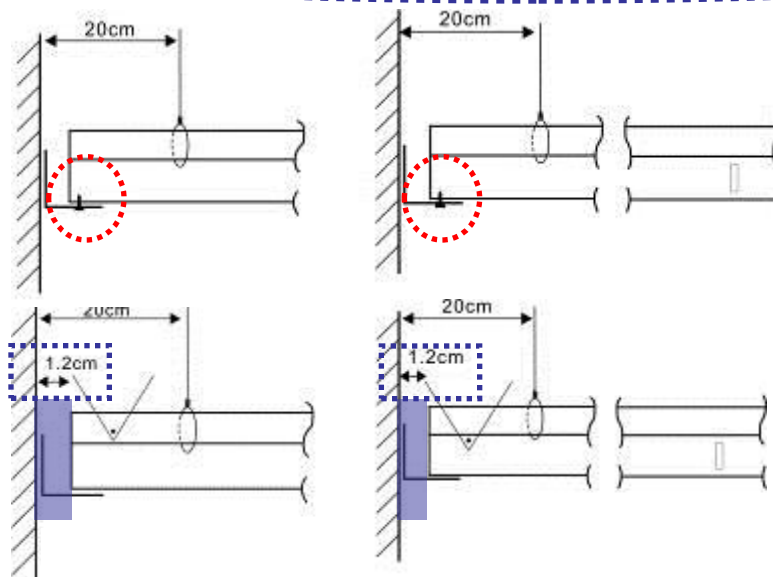
斜拉線組



懸吊線與邊界條件



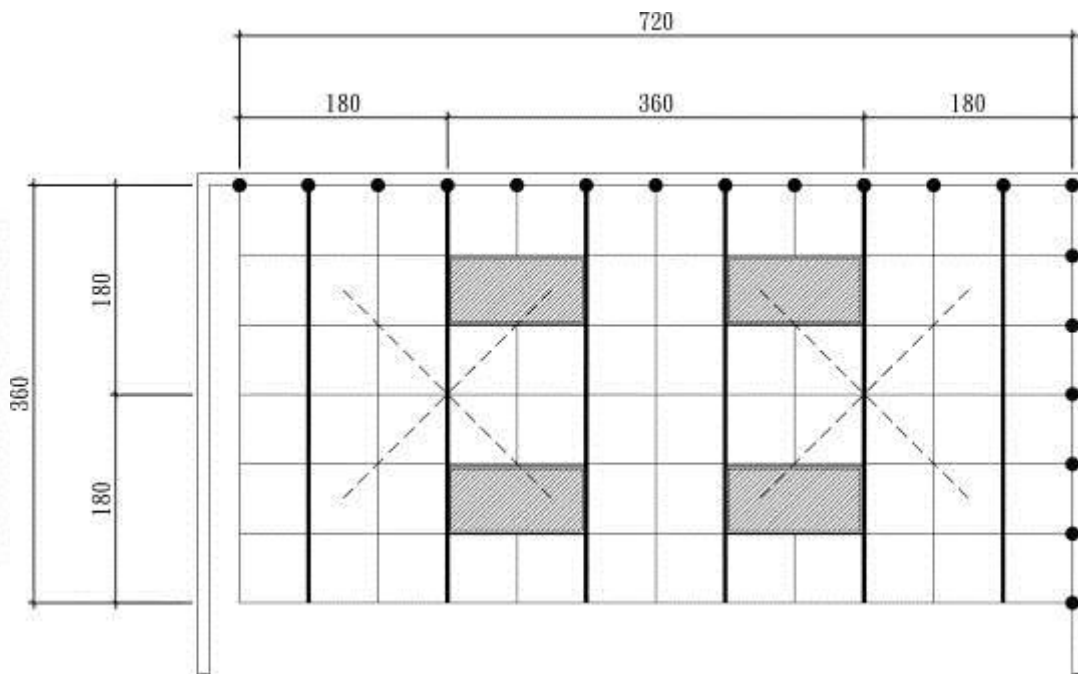
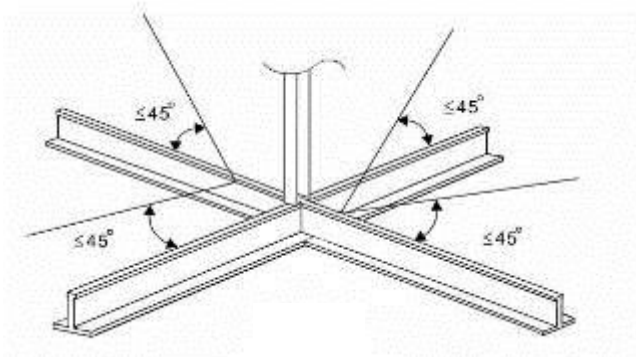
- 懸吊線
- 備用懸吊線



- 使用自攻螺絲，尺寸在#7以上
- 骨架與收邊材需確實接合

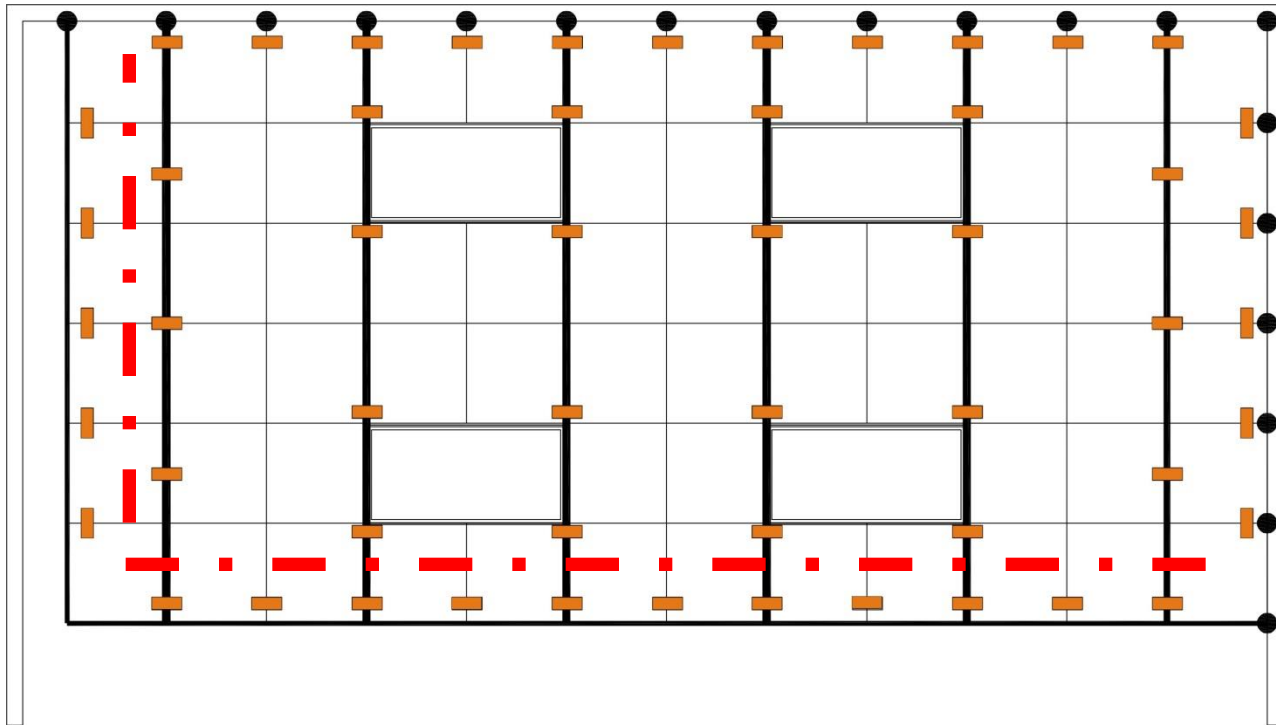
斜拉線組

- 含壓力桿與斜拉線
- 設置於主架上
- 懸吊線與水平夾角 $\leq 45^\circ$
- 與邊界距離 $\leq 180\text{cm}$ ；
兩斜撐距離 $\leq 360\text{cm}$
- 斜拉線組固定在與副架交接處 5cm 內的主架上



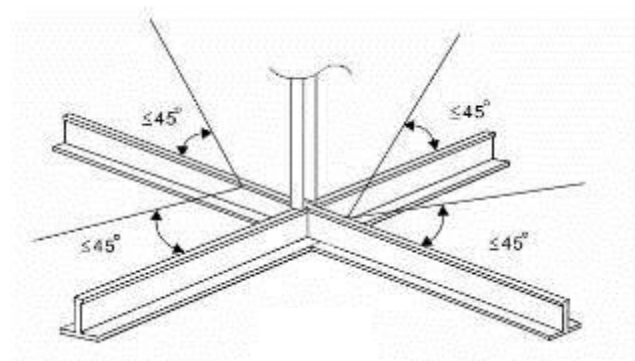
固定連桿(V型夾)

- 置於未以收邊釘固定之兩端
- 與邊牆距離 $\leq 60\text{cm}$
- 須有固定裝置



懸吊式輕鋼架天花板耐震施工指南

- 天花板面積大小
- $A < 13 m^2$ 且四周有牆壁者
 - 不需按此規定
- $A < 100m^2$
 - 不需裝設斜拉線組
- $A > 250m^2$
 - 要設置隔離縫，使側向變形量小於2 cm



45度斜吊線及壓力桿



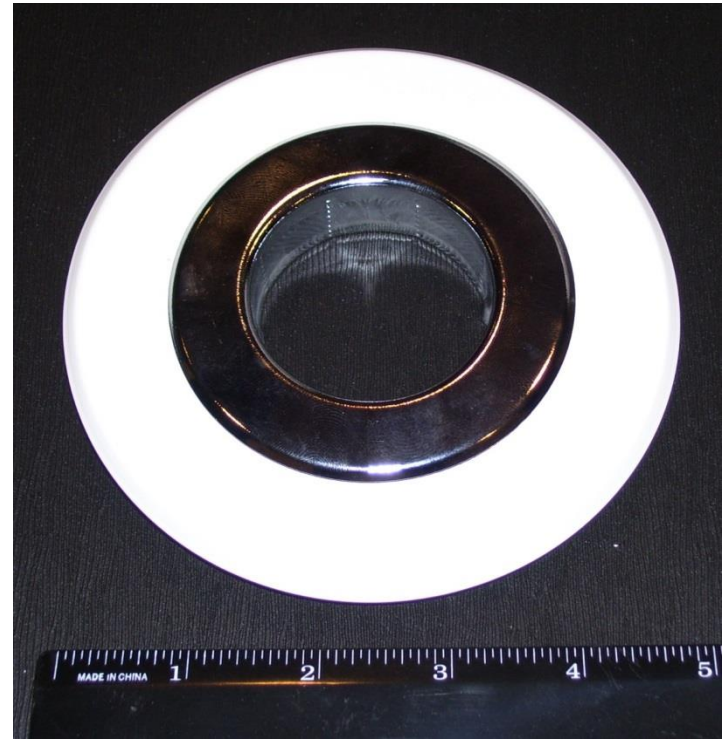
輕鋼架天花板骨架收邊懸吊線



消防灑水頭受損防治



A) 消防管的柔性接頭

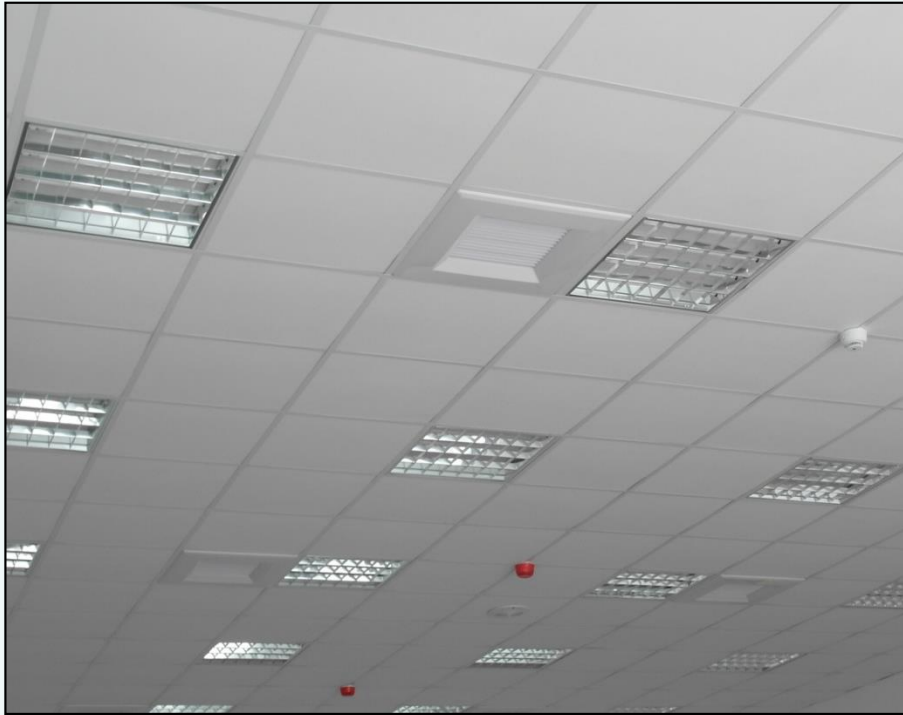


B) 消防灑水頭用超大邊蓋

暗架天花板

懸吊式輕鋼架天花板

明架天花板系統



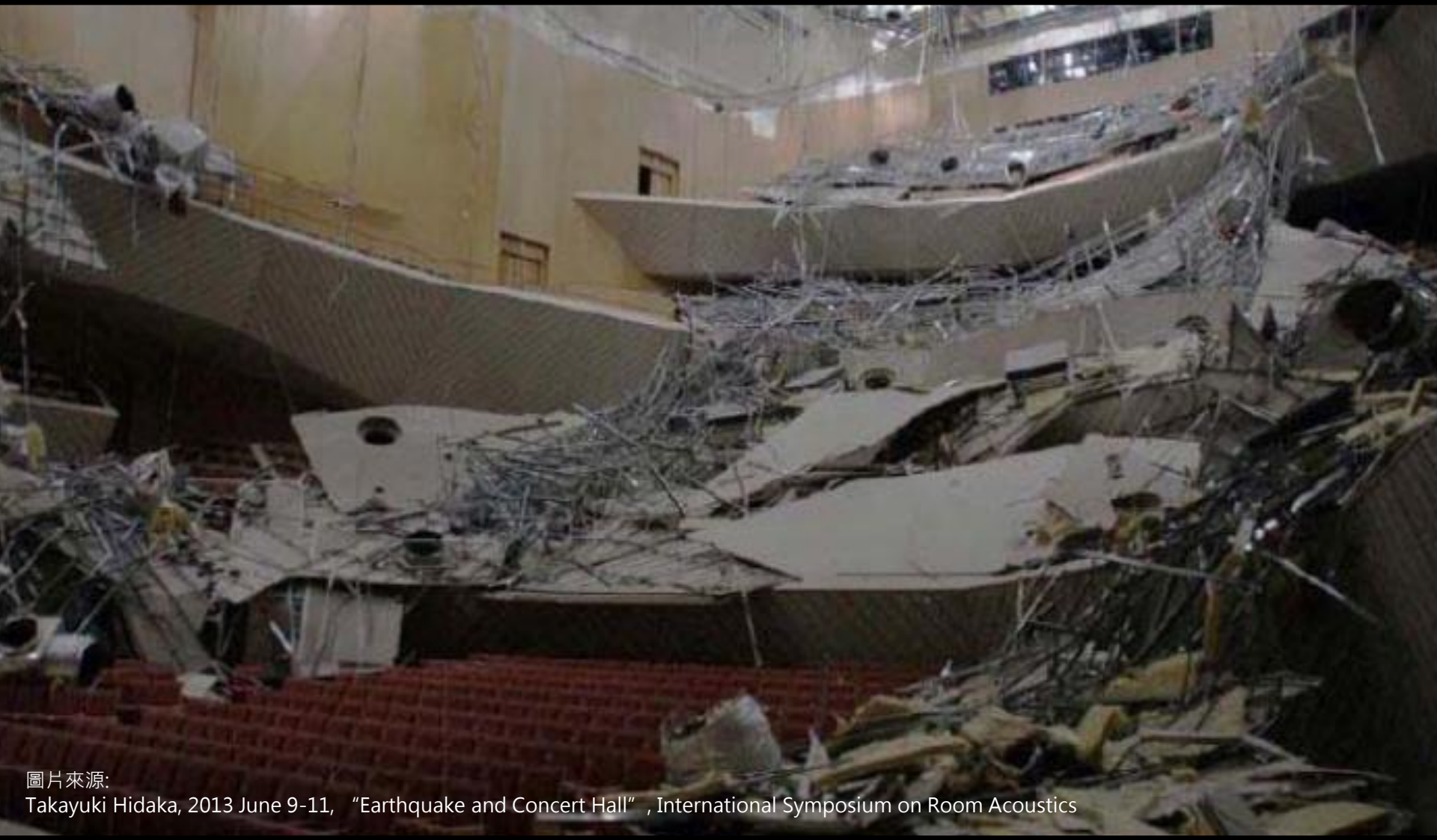
暗架天花板系統



暗架天花板破壞案例 - 釧路機場 (2003十勝沖地震)

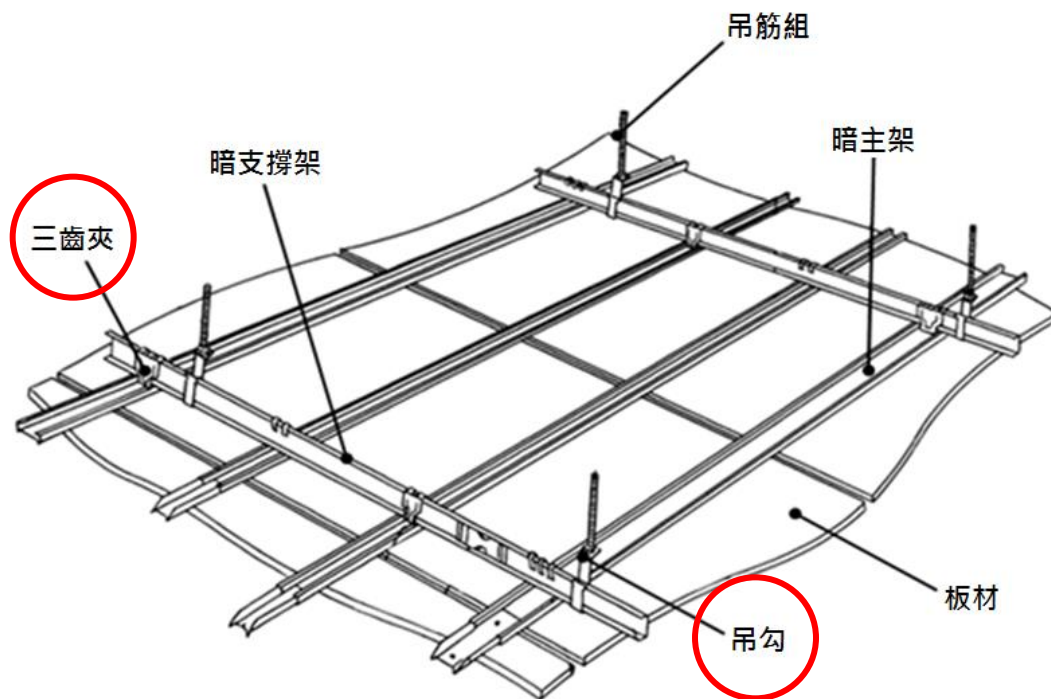


暗架天花板破壞案例 - 東京川崎音樂廳 (311地震)



圖片來源:
Takayuki Hidaka, 2013 June 9-11, "Earthquake and Concert Hall", International Symposium on Room Acoustics

國外暗架天花板破壞案例 - 東京川崎音樂廳 (311地震)



(I) 傳統式

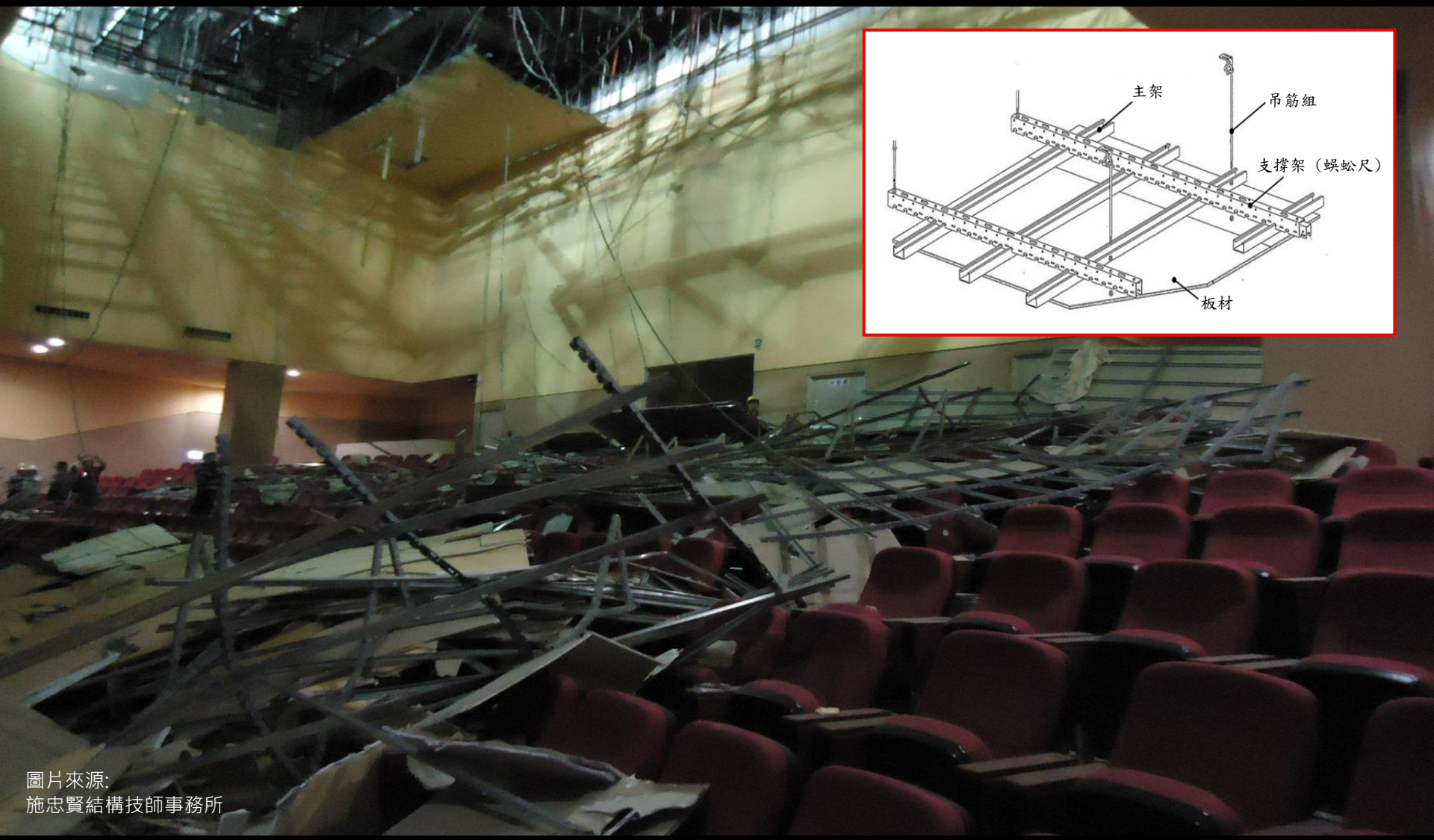
國外暗架天花板破壞案例 – 仙台新幹線 (311地震)



國外暗架天花板破壞案例 - 東北某音樂廳 (311地震)



國內暗架天花板破壞案例 – 嘉義市政府 (2013仁愛地震)



圖片來源:
施忠賢結構技師事務所

國內暗架天花板破壞案例 – 嘉義市政府 (2013仁愛地震)

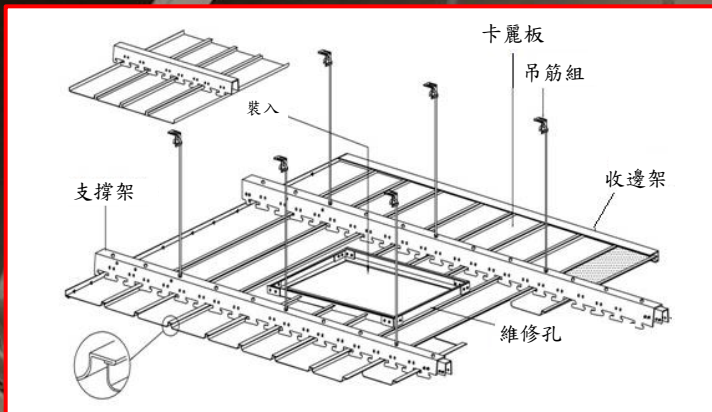
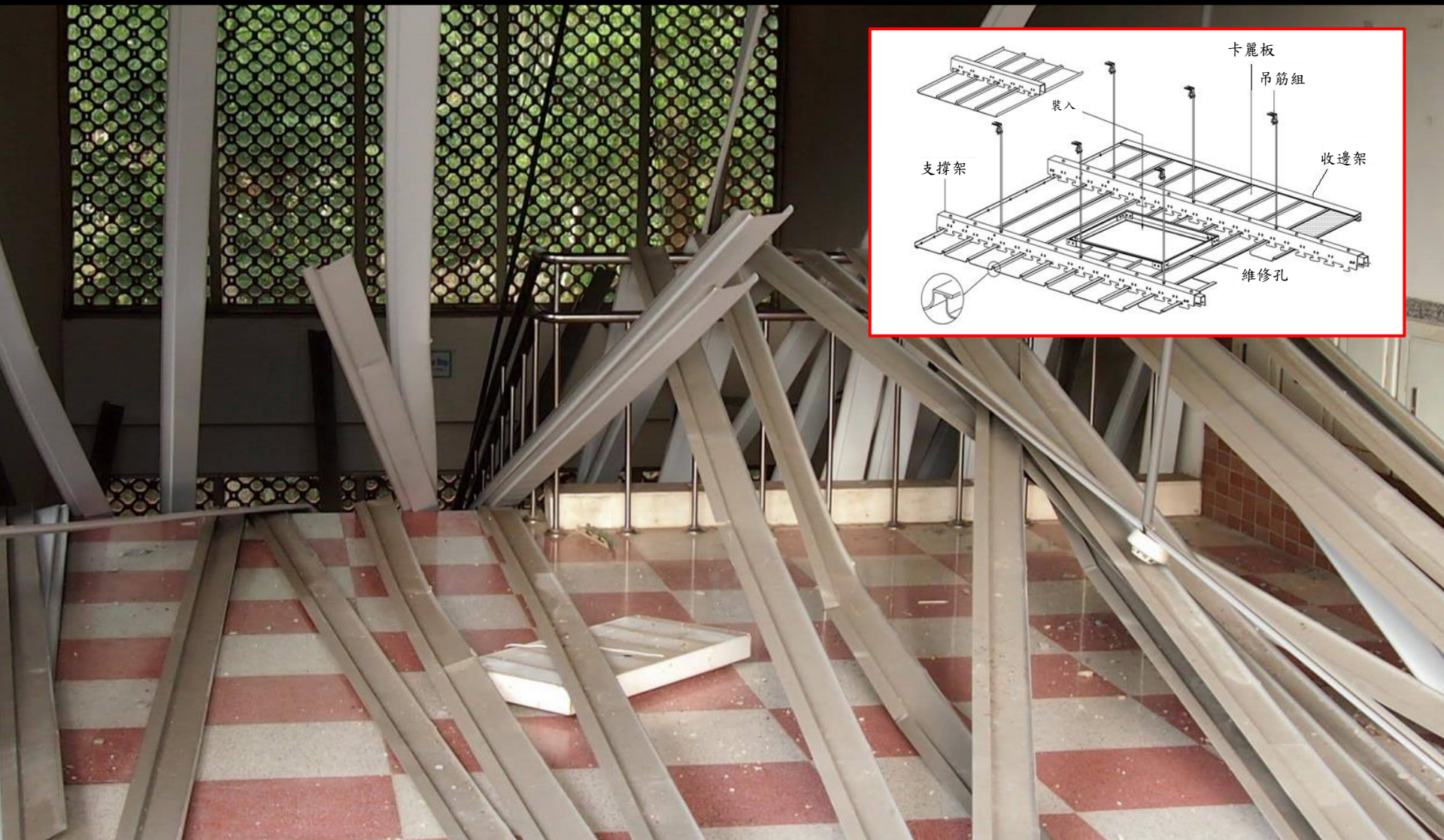


圖片來源:
施忠賢結構技師事務所



圖片來源:
施忠賢結構技師事務所

國內暗架天花板破壞案例 – 南投瑞峰國中 (2013仁愛地震)



國內暗架天花板破壞案例 – 南投瑞峰國中 (2013仁愛地震)



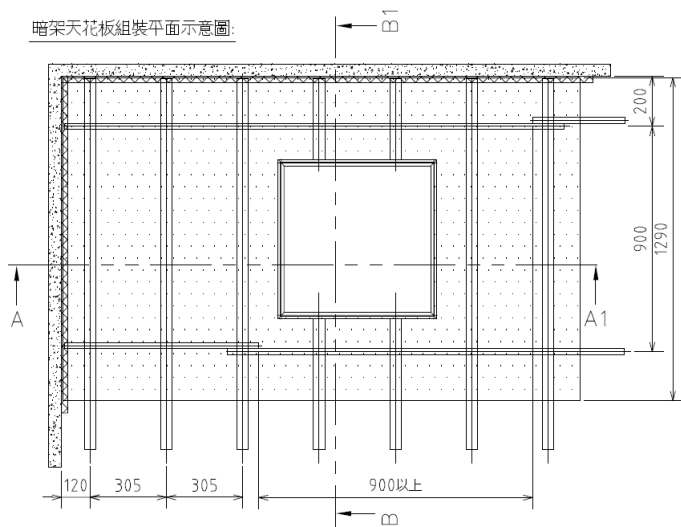
暗架天花板耐震設計及施工重點

根據本研究之實驗結果可初步規劃暗架天花板之耐震工法，此部分適用於天花板支撐架為蜈蚣尺之型式（卡夾式系統與金屬條狀式系統）。

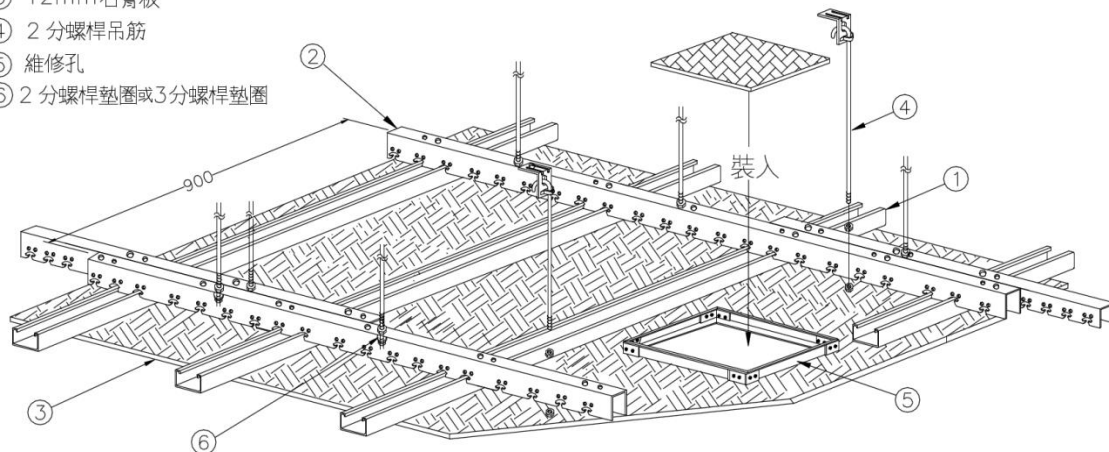
1. 天花板重量不宜超過 $20\text{kgf}/\text{m}^2$ 。

若是在支撐架連結螺桿處的下方使用一墊片補強，暗架天花板之重量不宜超過 $20\text{kgf}/\text{m}^2$ ；而若是沒有使用墊片，則吊筋僅能與支撐架上的圓孔進行連結（葫蘆孔及槽孔強度太低）且天花板之重量不宜超過 $10\text{kgf}/\text{m}^2$ 。

暗架天花板組裝平面示意圖:



- ① 暗架主架
- ② 支撐架
- ③ 12mm石膏板
- ④ 2分螺桿吊筋
- ⑤ 維修孔
- ⑥ 2分螺桿墊圈或3分螺桿墊圈



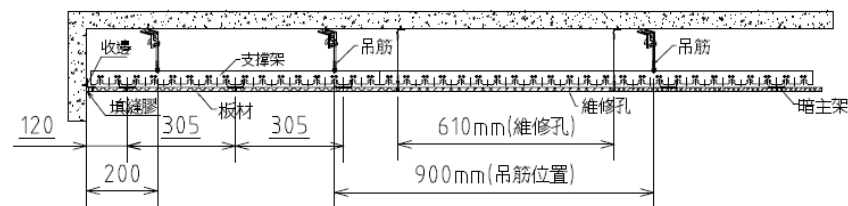
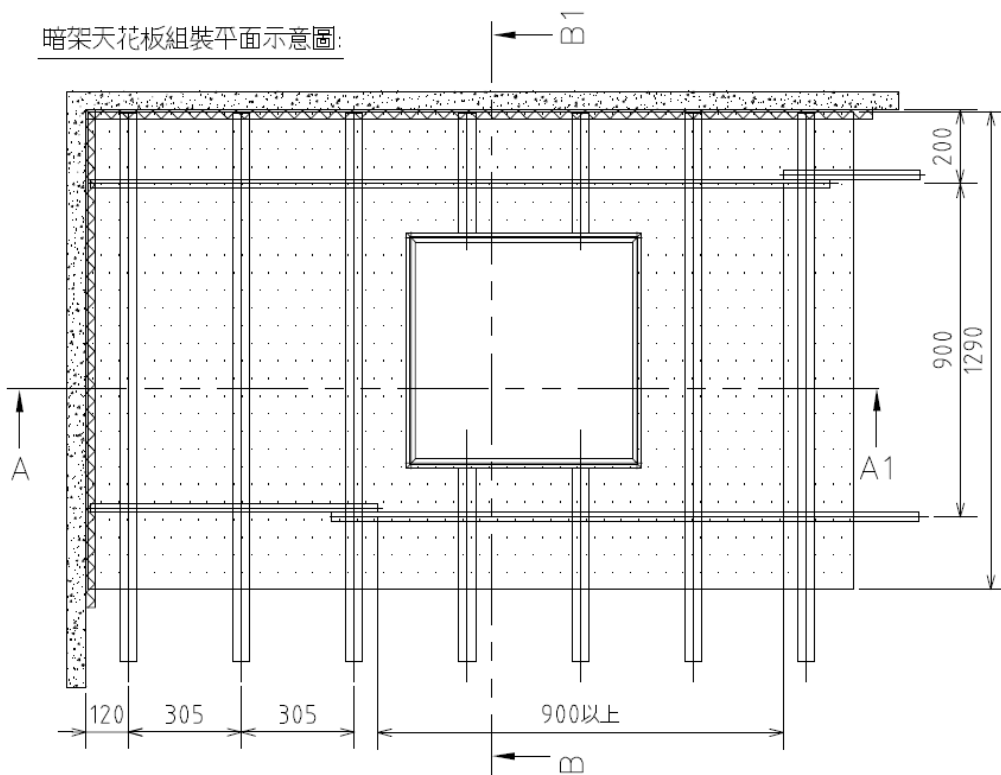
2. 吊筋間距為90公分、支撐架之間距為90公分。

此為國內目前之習用工法，當天花板重量在 $20\text{kgf}/\text{m}^2$ 之內可直接使用，而當天花板重量超過 $20\text{kgf}/\text{m}^2$ 則支撐架與吊筋的間距均須縮短。

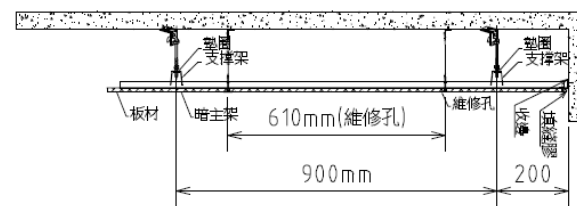
3. 支撐架的搭接處必須錯位。

支撐架搭接處較容易受到破壞以及為板材最易掉落之位置，因此支撐架之搭接處必須錯位，相鄰支撐架搭接處錯位 90cm 以上。

暗架天花板組裝平面示意圖:



A-A1 詳剖圖



B-B1 詳剖圖

4. 懸吊長度不宜超過3m。

當天花板之懸吊長度小於1m時，吊筋可採用2分螺桿；而當懸吊長度為1m~3m時，吊筋建議採3分螺桿。當懸吊長度超過3m時，吊筋建議以輕型鋼之立柱取代或加設鋼桁架等構件來進行施作。

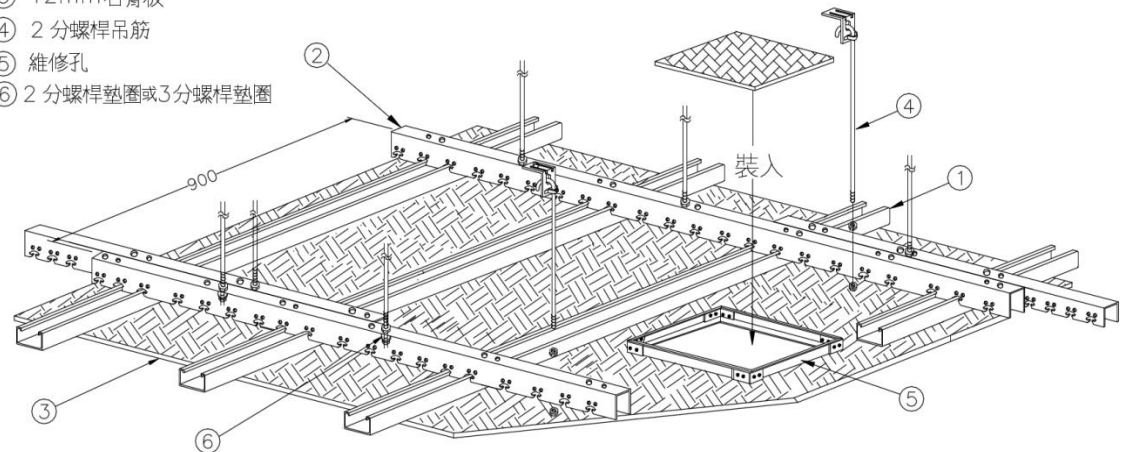
5. 搭接處之兩支撐架應緊靠，不宜有間距。

若兩支撐架有間距，則當支撐架受力時會對板材產生額外的扭矩，更容易造成破壞或導致板材掉落。

6. 高低差天花板應採不連續設計。

因高低天花板兩者各自有不同的自振頻率，故應拿掉連接高低天花板間之大七字收邊，採不連續設計以避免相互影響。

- ① 暗架主架
- ② 支撐架
- ③ 12mm石膏板
- ④ 2分螺桿吊筋
- ⑤ 維修孔
- ⑥ 2分螺桿墊圈或3分螺桿墊圈



結論

- 功能性設施的耐震重要性，國內一般缺乏足夠的重視
 - 學校、醫院、災民收容場所...
- 功能性設施的耐震技術，需要積極開發
 - 喚醒利害相關者予以重視