

NAR Labs 國家實驗研究院

國家地震工程研究中心

雜項工作物結構設計地震力要求之 修訂重點

翁元滔

2022.08.14

承諾·熱情·創新

www.narlabs.org.tw

修訂緣起

- 非建築結構範圍甚廣，包括油、電、水維生管線等設施
- 營建署設定範圍在建築法所訂之雜項工作物
- 是否有必要用最大考量地震等級進行設計檢核？



修訂適用範圍

1. 105 年 11 月 17 日研商修正「建築物耐震設計規範及解說」第 4 次會議，已通過第 5 章雜項工作物結構之地震力及第 1 章配合修正相關條文，經國震中心調整相關格式及文字內容。
2. 106 年底結構技師公會來函：
 - 本章不適用於需特別考量其反應特性和環境而須另行提供耐震標準與法規的結構，例如橋梁、輸電塔、水工結構、離岸平台結構、地下公用設施管線及其附屬設備和核能電廠設施等。

雜項工作物結構認定範圍

- **建築法第七條**所稱之雜項工作物結構：
包括營業爐灶、**水塔**、瞭望臺、招牌廣告、樹立廣告、**散裝倉**、**廣播塔**、**煙囪**、**圍牆**、機械遊樂設施、**游泳池**、**地下儲藏庫**、建築所需駁坎、挖填土石方等工程及建築物興建完成後增設之**中央系統空氣調節設備**、**昇降設備**、**機械停車設備**、防空避難設備、污物處理設施等。
- 其中屬於建築物結構之一部分、附屬於建築物之結構物部分構材、非結構構材或設備且**其基礎部分非定著於土地者**，應依第二章至第四章辦理，其餘則應依本章規定。

常見雜項工作物結構的震害

Tanks



Elephant's
foot
buckling

常見雜項工作物結構的震害

Tanks & Towers



雜項工作物結構與建築結構之異同

Same:

- Basic ground motion hazards
- Basic structural dynamics

Different:

- Structural characteristics
- Fault rupture
- Fluid dynamics
- Performance objectives
- Networked systems

相似於建築結構之雜項工作物結構

鋼製儲物架



高架水塔

類似於一般建築結構的梁、柱、斜撐及樓版所組成



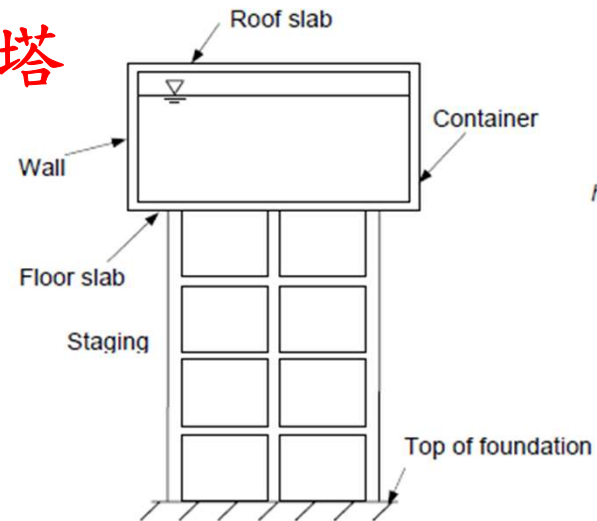
表 5-1 相似於建築結構之雜項工作物結構系統韌性容量與高度限制

	雜項工作物結構型式	R	高度限制 (m)
一、 <u>鋼造儲物架</u>		2.4	不限
二、 <u>構架系統</u>			
	1. <u>鋼造特殊同心斜撐構架</u> (同 1-3)	3.6	50
	2. <u>鋼造普通同心斜撐構架</u>		
	(1)高度未達 10m 者	2.0	10
	(2)高度 10 (含)至 50m 以下者	1.5	50
三、 <u>抗彎矩構架系統</u>	1. <u>鋼造特殊抗彎構架</u>	4.8	不限
	2. <u>鋼筋混凝土造特殊抗彎構架</u>	4.8	不限
	3. <u>鋼造部份韌性抗彎構架</u>	1.5	15
	4. <u>鋼筋混凝土造部份韌性抗彎構架</u>	1.6	15

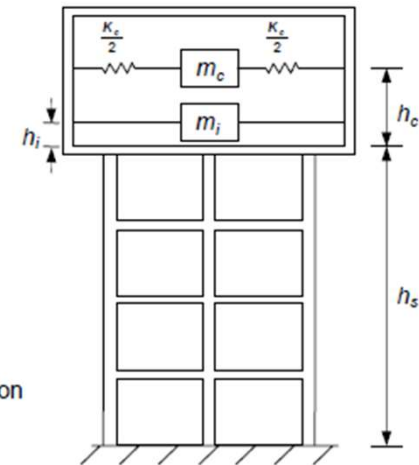
國內設計規範中針對鋼造普通同心斜撐構架與鋼筋混凝土造部份韌性抗彎構架並無相關設計規定，此部分可參考國外規範如AISC及ACI-318等規範之相關規定進行設計。

高塔式容器

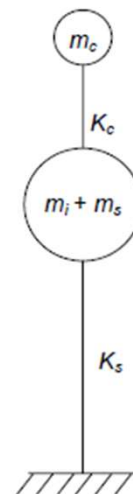
高架水塔



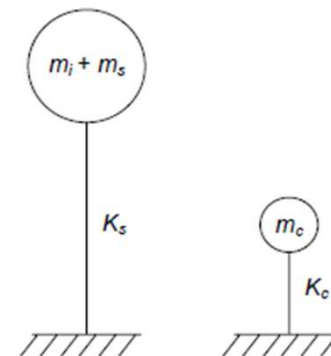
(a) Elevated tank



(b) Spring mass model



(c) Two mass idealization of elevated tank



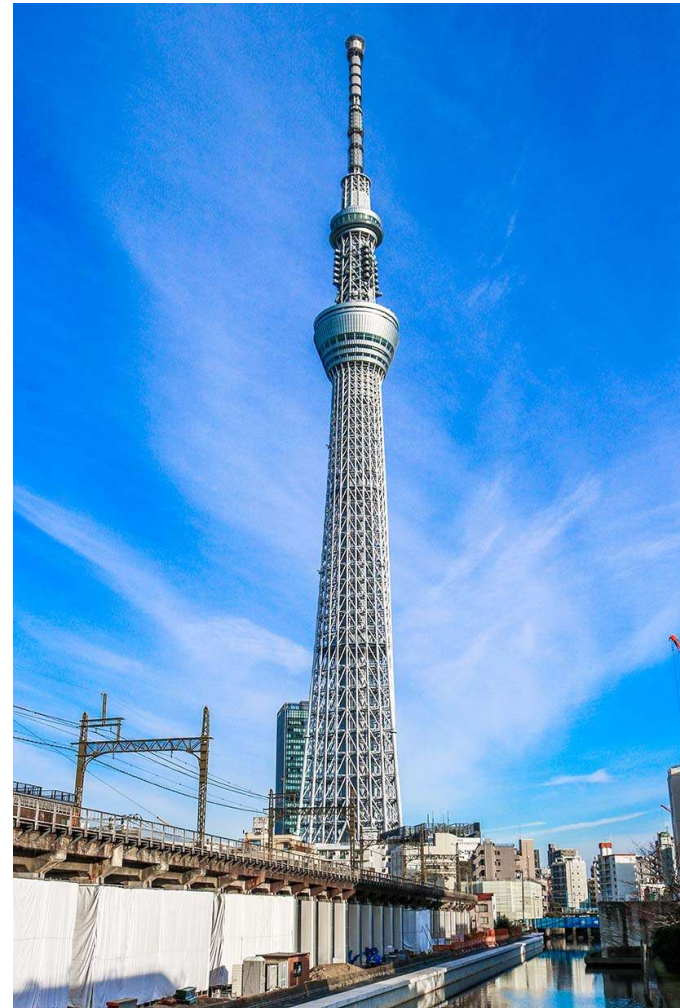
(d) Equivalent uncoupled system

非相似於建築結構之雜項工作物結構

煙囪



通訊電塔



韌性容量及高度限制

非相似於建築結構之雜項工作物結構

- 一、高架式容器、水塔、儲槽或壓力容器
- 二、鞍座支承之臥式銲接鋼槽
- 三、類建築塔式結構支承之儲存槽
- 四、地盤支承之平底式儲存槽
- 五、現地澆注之混凝土穀倉及煙囪、具連續性之牆壁並延續至基礎者
- 六、非類似於建築之部分加強磚造剪力牆結構
- 七、混凝土造煙囪或排氣管
- 八、所有鋼造或鋼筋混凝土造質量均佈懸臂結構，如煙囪、穀倉及具縱向隔板支撐之立式儲槽
- 九、桁架式高塔(獨立式或拉線式)、拉線式倉房或煙囪
- 十、冷卻水塔
- 十一、通訊電塔
- 十二、遊樂用結構及紀念碑
- 十三、倒鐘擺型結構(高塔式容器或儲存槽除外)
- 十四、招牌及廣告版
- 十五、前述以外之其它自己承擔載重之結構物

韌性容量及高度限制

非相似於建築結構之雜項工作物結構

表 5-2 非相似於建築結構之雜項工作物結構韌性容量與高度限制

	非建築結構型式	R	高度限制 (m)
一、高架式容器、水塔、儲槽或壓力容器			
	1.對稱式斜撐支架	1.8	50
	2.無斜撐或不對稱式斜撐支架	1.2	30
二、鞍座支承之臥式銲接鋼槽		1.8	不限
三、類建築塔式結構支承之儲存槽		1.0	*
四、地盤支承之平底式儲存槽			
	1.鋼造或碳纖強化可塑式		
	(1)機械錨定式	1.8	不限
	(2)自錨定式	1.5	不限
	2.鋼筋混凝土造或預力混凝土造		
	(1)強化無滑動式基礎	1.2	不限
	(2)錨定式柔性基礎	2.0	不限
	(3)無錨定與束制式柔性基礎	1.0	不限
	3.其它	1.0	不限
五、現地澆注之混凝土穀倉及煙囪、具連續性之牆壁並延續至基礎者		2.0	不限

雜項工作物結構之耐震設計考量

1. 鑒於雜項工作物結構之**韌性容量較小**，故其設計地震力常較一般建築結構為高，
2. **幾乎不提供人類居住使用**，對生命安全的危害較小，故以回歸期**475年之設計地震力**進行設計與分析。
3. 若儲存或排放具有**毒性、爆炸性等危險物**之雜項工作物結構，則仍**宜同時採用最大考量地震等級**進行**詳細分析檢核**。
4. 建築主體結構與雜項工作物結構之間**有側向支承相連者**，若該雜項工作物結構重量超過雜項工作物結構與支承結構重量和之**25%以上時**，雜項工作物結構之地震力應考慮兩者間之結構互制作用效應。

住商大樓與停車機 械結構共構

NARLabs

鍋爐



更新雜項工作物結構設計地震力要求

◆ 「相似於建築結構之建築雜項工作物結構」：

- 其最小設計水平總橫力應依(2-3)式計算，而其最小設計垂直地震力則依2.18節之規定計算。 $V=(S_{aD}/F_u)_m IW/1.4\alpha_y$

◆ 「非相似於建築結構之建築雜項工作物結構」：

- $T < 0.06 \text{ sec}$, $V = S_{DS} IW / 3\alpha_y$
- $T \geq 0.06 \text{ sec}$, $V = (S_{aD}/F_u)_m IW / 1.2\alpha_y$
- 因其靜不定度少，故由(2-3)式計算最小設計水平地震力時，係數1.4也不宜使用，改用1.2。而例如營業爐、各式圍牆、駁坎等建築雜項工作物，其基本振動周期常較低，而其基本振動周期低於0.06秒時， $S_{aD} > 0.4S_{DS}$ ， F_u 亦大於1.0，因此為求簡單，仍可假設 $S_{aD}/F_u = 0.4S_{DS}$ 。

修訂剛性雜項工作物設計地震力要求的建議

1. 若直接採用 $V=(S_{aD}/F_u)_m IW/1.2\alpha_y$ 計算剛性雜項工作物之設計地震力，有時會比採用現行規範5.3節所訂 $V=S_{DS}IW/3\alpha_y$ 為約低於11%至25%，亦即易較不保守
2. 剛性雜項工作物其實在台灣並不少見，例如大樓群地下室或地下街外排氣管道(為數不少，約長寬各4m、高1.5m、牆厚20cm)

Note: 剛性結構不會放大地震地面運動，響應加速度與地面加速度幾乎相同。

垂直向地震力

$$V_z = \frac{b \cdot S_{DS} IW}{3\alpha_y}$$

- b 為垂直向之設計譜加速度係數 $S_{aD,V}$ 與水平向之設計譜加速度係數 S_{aD} 兩者的比值
- 池槽結構物構體本身之垂直向振動週期甚短，其對應之設計譜加速度值應在設計加速度反應譜的等加速度段之內

雜項工作物設計地震力計算

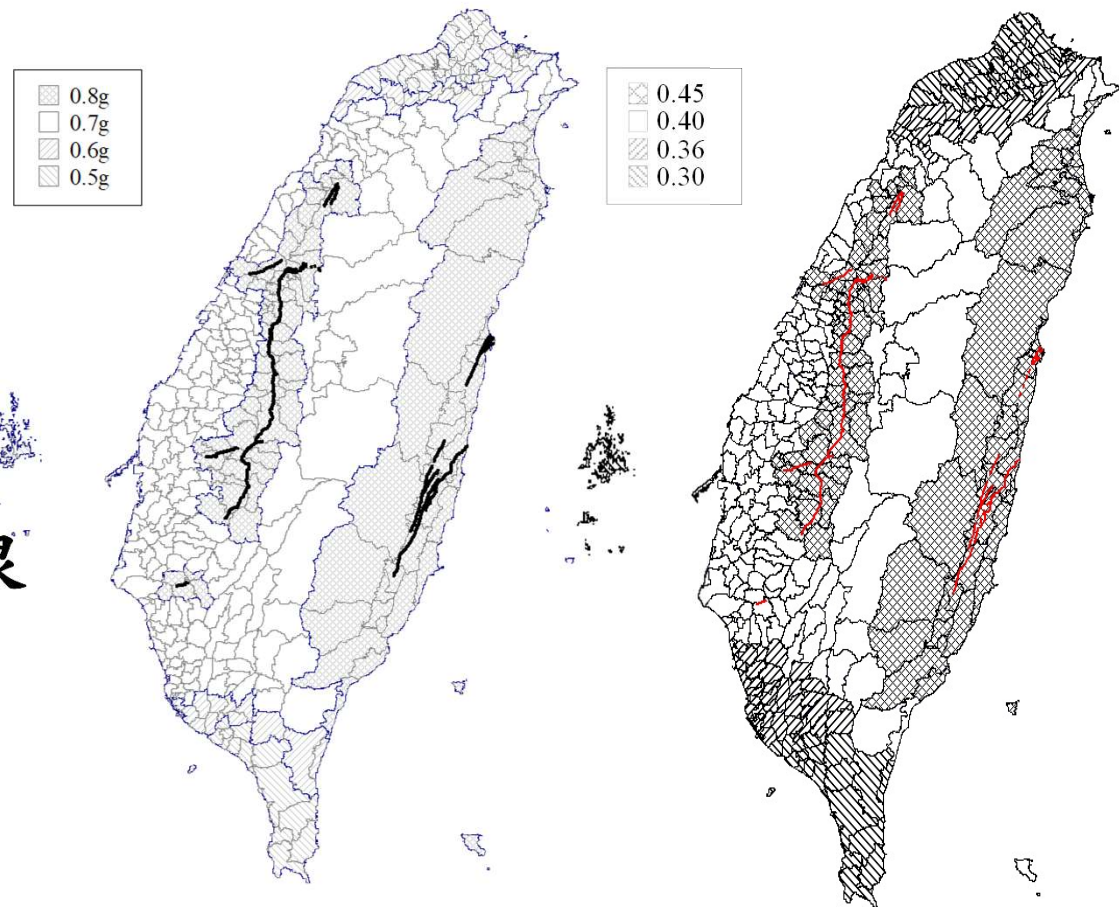
W ：結構物全部靜載重。一般倉庫、書庫應計入至少四分之一活載重；水箱、水池等容器，應計入全部內容物之重量。亦應包括水塔、貯槽、管線等在正常操作時之全部內容物重量。

I ：主要取決於當其用途會明顯影響其所在建築主體結構的使用機能時，該雜項工作物結構的用途係數 I 就應與建築主體結構之用途係數 I 一致。

地震力需求：強地動

- 以迴歸期475年之地震危害等級作為設計地震力

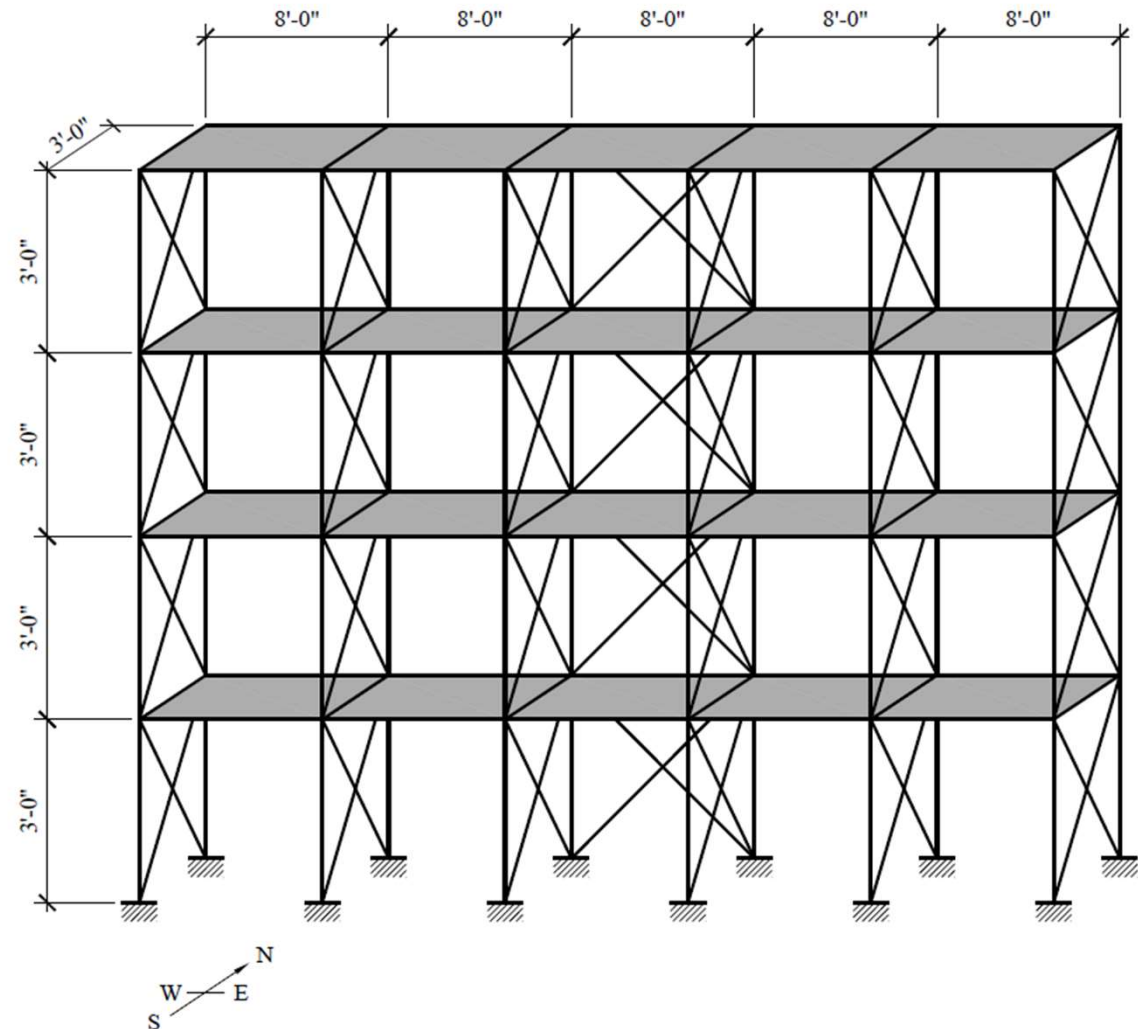
- ◆ 一般工址
- ◆ 近斷層效應
- ◆ 工址放大效應
- ◆ 臺北微分區
- ◆ 設計反應譜曲線
- ◆ 垂直地震力



示範設計例一大賣場內的鋼造儲物架

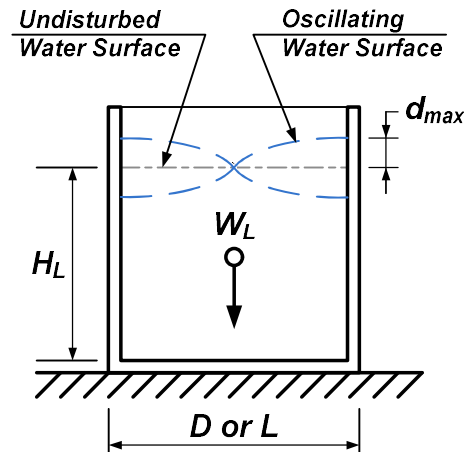
1. 商場的I=1.25
2. 韌性容量R=2.4
3. Loading conditions
 - 1) 每層架皆全載
 - 2) 只有頂層架全載

$$V = (S_{aD}/F_u)_m IW / 1.4\alpha_y$$

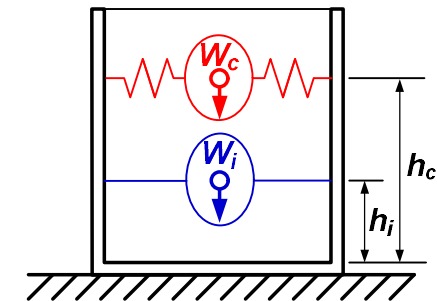


池槽結構耐震需求

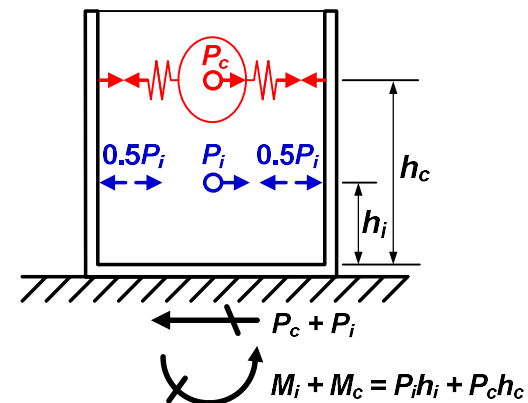
耐震設計考量
耐震設計基本原則
設計地震力要求
耐震性分析
(地上、半埋置、地下)



(a) Fluid Motion in Tank



(b) Dynamic Model



(c) Dynamic Equilibrium of Horizontal Forces

相關載重之計算

- 靜載重
 - 槽體自重
 - 液體重量
- 靜態壓力
 - 液體靜止壓力
 - 土壤靜止壓力
- 地震引致動態壓力
 - 液體：衝擊模態、對流模態
 - 土壤：主動、被動(土壤彈簧)
- 結構分析模型
 - 柱、梁、版、牆構件
 - 各式載重、土壤彈簧設定
 - 構件重新配筋、設計圖說

矩形案例

圓形案例



直立式儲槽耐震檢核

- 計算檢核項目

- 地震力需求

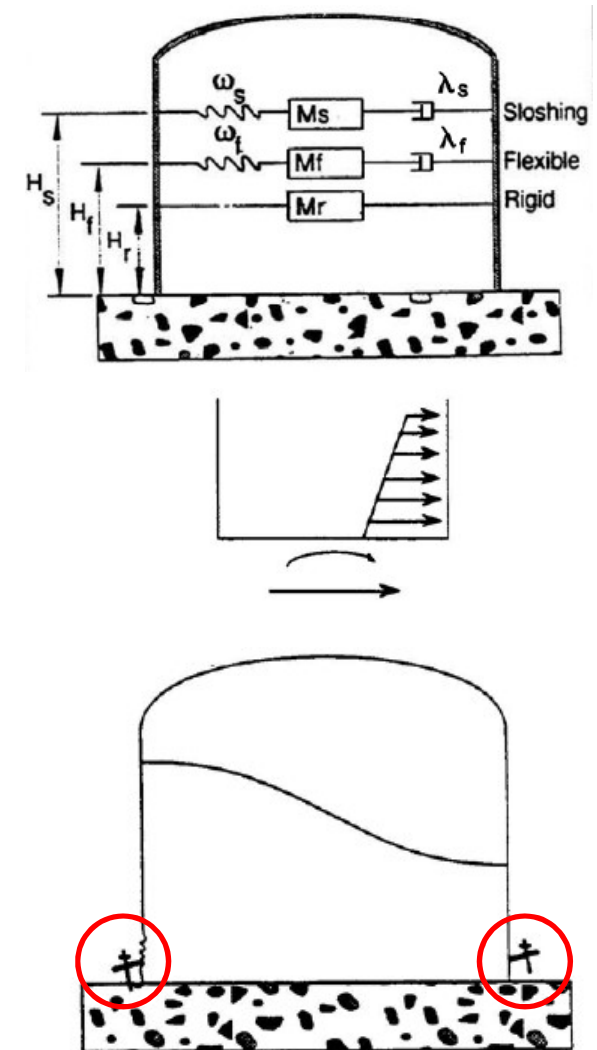
- Convective mode + Impulsive mode
 - Haroun-Housner 分析模型
 - 傾倒力矩、槽壁側壓、基底剪力

- 抗傾覆容量檢核

- 槽體挫屈強度 (與側壓相關)
 - 螺棒抗拉強度
 - 錨錠接合構件強度 (連結板、焊接...)

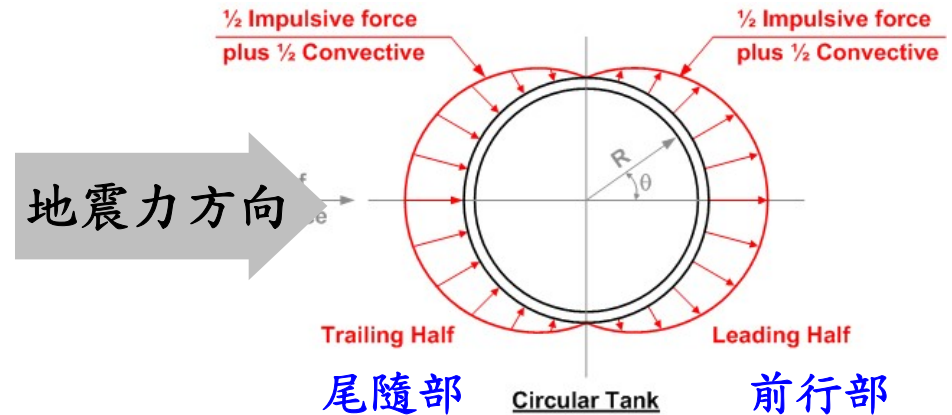
- 剪力容量檢核

- 儲槽底部與支撐基礎之摩擦力



直立式儲槽之池壁液體載重 NAR Labs

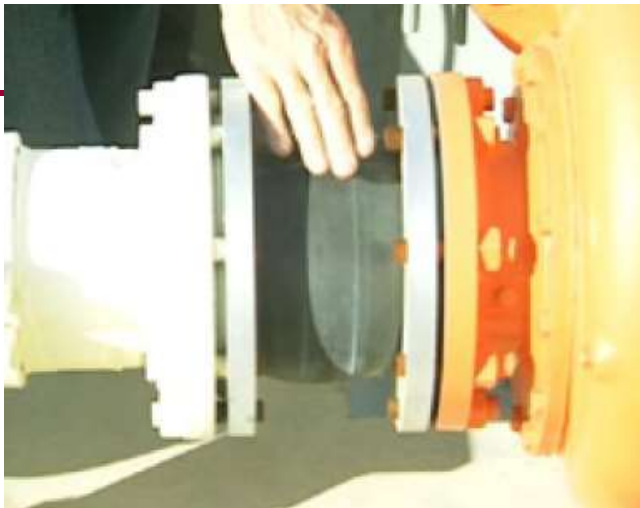
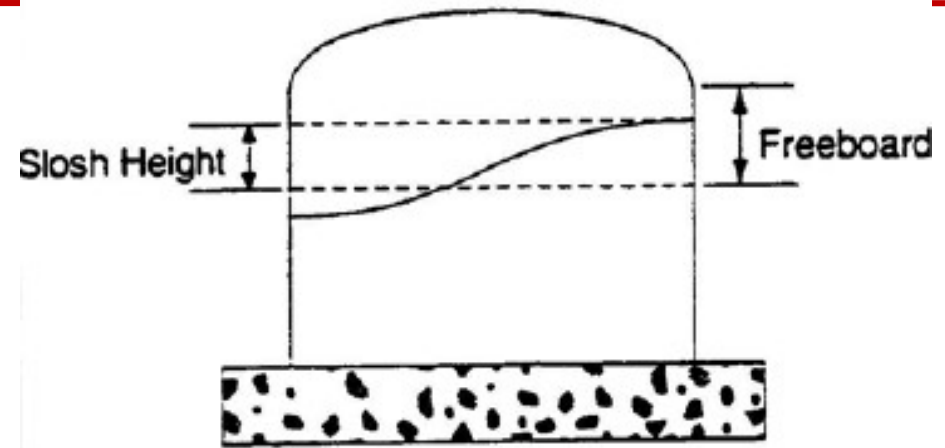
- ✚ 衝擊、對流模態力 P_i 與 P_c ，採紐西蘭規範(NZS, 1986)建議之近似直線之豎向分布
- ✚ 作用於前行、尾隨部池壁，力量各半，分別作推擠及拉曳力，大小隨圓周角而變



	作用力(單位高度之受力，N/m)	壓力(Pa)
靜壓		$p_{hy} = q_{hy}$
池壁慣性力 P_w (取半邊)	$P_{wy} = \frac{P_w}{2} \cdot \frac{1}{H_w}$	$p_{wy} = \frac{P_{wy}}{\pi r}$
衝擊模態力 P_i 之一半	$P_{iy} = \frac{P_i}{2} \cdot \frac{1}{H_L^2} \left[4H_L - 6h_i - (6H_L - 12h_i) \cdot \frac{y}{H_L} \right]$	$p_{iy} = \frac{2P_{iy}}{\pi r} \cos \theta$
對流模態力 P_c 之一半	$P_{cy} = \frac{P_c}{2} \cdot \frac{1}{H_L^2} \left[4H_L - 6h_c - (6H_L - 12h_c) \cdot \frac{y}{H_L} \right]$	$p_{cy} = \frac{16P_{cy}}{9\pi r} \cos \theta$
垂直地震力 引致之額外 靜壓		$p_{vy} = \ddot{u}_v q_{hy}$

直立式儲槽耐震檢核(2/2)

- 計算檢核項目
 - 液面與槽頂間距檢核



橫臥式儲槽耐震檢核

• 計算檢核項目

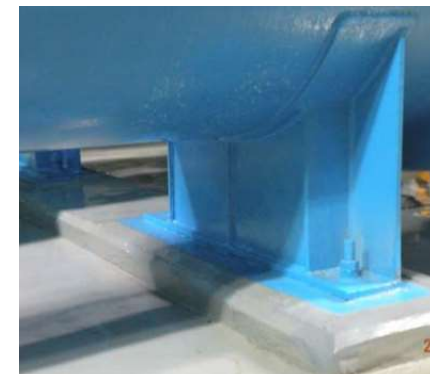
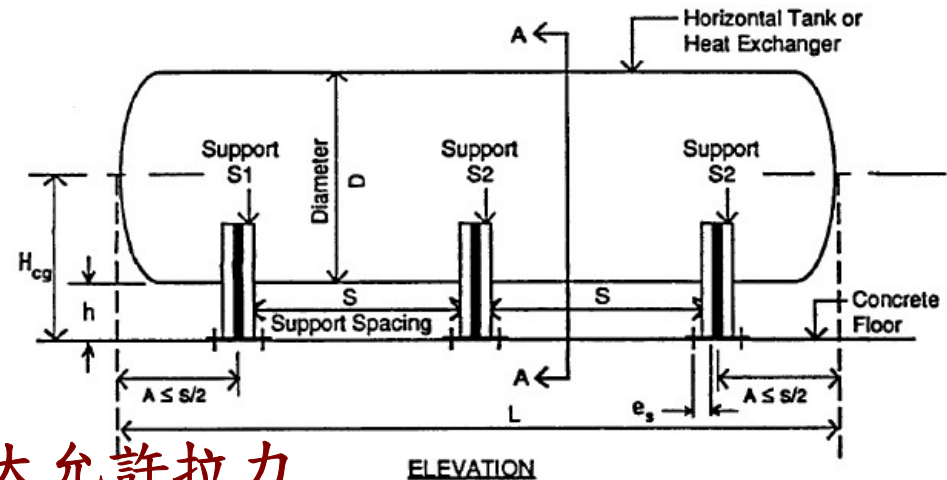
— 錨錠強度容量檢核

- 螺棒抗拉強度
- 底板抗彎強度
- 底板焊接強度
- 螺棒抗剪強度 → 螺棒最大允許剪力

— 鞍座應力檢核

螺棒最大允許拉力

允許最大
譜加速度值



相關位移檢核

表15.7-1 管路附件連接—設計最小位移量

條件	位移量(in.)
<p>槽或容器機械<u>示</u>錨定</p> <p>向上垂直位移相對於支撐或地基</p> <p>向下垂直位移相對於支撐或地基</p> <p>橫向位移範圍(徑向及切線方向)相對於支撐或基礎</p>	<p>1(25.4mm)</p> <p>0.5(12.7mm)</p> <p>0.5(12.7mm)</p>
<p>自身錨定槽或容器(依據等級)</p> <p>向上垂直位移相對於支撐或地基</p> <p>如果設計符合按照本標準修訂的參考文件</p> <p><u>錨定比率</u> ≤ 0.785(表示無隆起)</p> <p><u>錨定比率</u> > 0.785(顯示隆起)</p> <p>如果地震負載設計符合本標準,但是,參考文件未納入說明。</p> <p>槽或容器直徑 < 40 ft</p> <p>槽或容器直徑 ≥ 40 ft</p> <p>向下垂直位移相對於支撐或地基</p> <p>槽與<u>環型護壁</u>/筏式地基</p>	<p>1(25.4mm)</p> <p>4(101.1mm)</p> <p>8(202.2mm)</p> <p>12(0.305m)</p> <p>0.5(12.7mm)</p> <p>1(25.4mm)</p>

自身錨定槽的錨定比

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2 (w_t + w_a)}$$

Table 15.7-2 Anchorage Ratio

J Anchorage Ratio	Criteria
$J < 0.785$	No uplift under the design seismic overturning moment. The tank is self-anchored.
$0.785 < J < 1.54$	Tank is uplifting, but the tank is stable for the design load, provided that the shell compression requirements are satisfied. The tank is self-anchored.
$J > 1.54$	Tank is not stable and shall be mechanically anchored for the design load.

w_r = 頂部負載作用於殼體周圍(N/m)，僅應計入頂部永久性負載，不應計入頂部臨時性負載。

w_a = 儲槽內容物最大重量，可用於抵抗殼體周圍傾倒彎矩(N/m)，通常包含液體環形容器受限於儲槽底板或環形板彎曲強度。

M_{rw} = 作用於殼體底部，由地震設計載荷所產生之傾倒彎矩(N-m) (稱為“環壁力矩”)。

D = 槽體直徑(ft)

W_s = 槽殼體總重(pounds)

液體載重計算流程(1/2)

1. 確定結構型式與尺寸

- 長寬高、直徑
- 液面設計高度
- 壁厚、頂板厚、接合方式等

2. 依結構尺寸，計算模態重量與作用高度

- 衝擊模態之等效重量 W_i 、側向作用力重心高度 h_i 、 h_i'
- 對流模態之等效重量 W_c 、側向作用力重心高度 h_c 、 h_c'

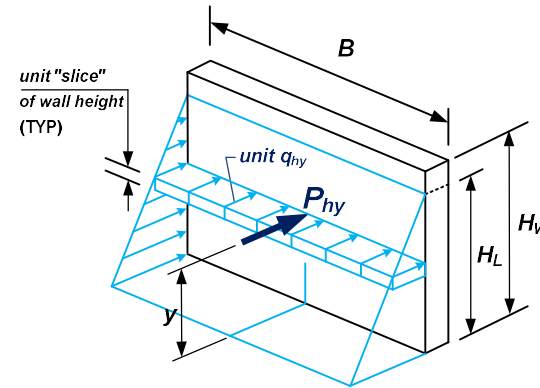
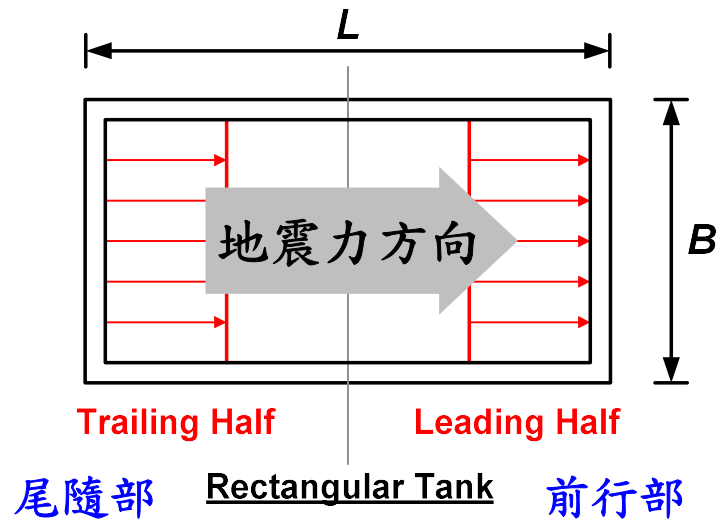
3. 計算模態週期

- 衝擊模態週期 T_i (由池壁勁度及參與質量決定)
- 對流模態週期 T_c
- 垂直向模態週期 T_v (限圓形)

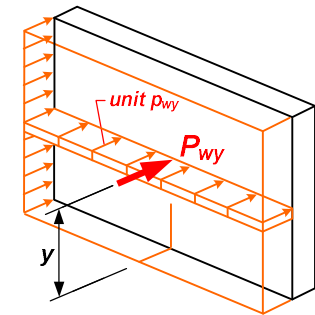
液體載重計算流程(2/2)

4. 依工址之設計反應譜，計算反應譜係數
 - 衝擊、對流模態反應譜係數 C_i 及 C_c
 - 垂直向模態反應譜係數 C_t
5. 考慮反應修正係數 R_i 、 R_c ，計算各側向力
 - 池壁慣性力 P_w (或 P_w')，須考慮有效質量比 ε
 - 頂板慣性力 P_r
 - 衝擊、對流模態力 P_i 及 P_c
 - 垂直地震力之作用，視同額外之液體靜壓
6. 根據各種側向力，計算各種池壁載重分布

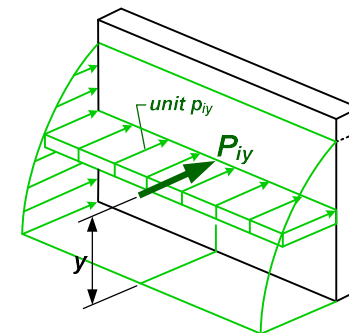
矩形池狀結構之池壁液體載重



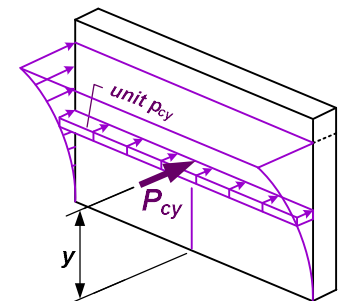
Unit q_{hy} @ Height $y = \gamma_L (H_L - y)$
 P_{hy} = Resultant Force @ Height $y = B \cdot q_{hy}$
 Total Lateral Force (TLF) $P_h = \frac{1}{2} \gamma_L H_L^2 \cdot B$
HYDROSTATIC PRESSURES q_{hy}



P_{wy} = Resultant Force @ Height y
 Unit $p_{wy} = P_{wy} / B$
 TLF P'_w
WALL INERTIA UNIT FORCE p_{wy}



P_{iy} = Resultant Force @ Height y
 Unit $p_{iy} = P_{iy} / B$
 TLF P_i
IMPULSIVE PRESSURES p_{iy}



P_{cy} = Resultant Force @ Height y
 Unit $p_{cy} = P_{cy} / B$
 TLF P_c
CONVECTIVE PRESSURES p_{cy}

(摘自美國ACI 350.3-06規範)

- ✚ 衝擊、對流模態力 P_i 與 P_c ，採紐西蘭規範(NZS, 1986)建議之近似直線之豎向分布
- ✚ 作用於前行、尾隨部池壁，力量各半，分別作推擠及拉曳力

載重組合

- 參考現行混凝土結構設計規範規定採用適當的載重因子
- 用 **100% + 30%法則** 考慮構體垂直地震載重

設計載重之組合如下：

(1) $1.4 (D+F)$

(2) $1.2 (D+F+T) + 1.6(L+H) + 0.5(L_r)$

(3) $1.2D + 1.6(L_r) + (1.0L \text{ 或 } 0.8Q)$

(4) $1.2D + 1.6Q + 1.0L + 0.5(L_r)$

(5) $1.2D \pm 1.0E + 1.0L + 0.5(L_r) \pm 0.3E_V$

(6) $0.9D \pm 1.6Q + 1.6H$

(7) $0.9D \pm 1.0E + 1.6H \pm 0.3E_V$

(8) $1.2D \pm 0.3E + 1.0L + 0.5(L_r) \pm 1.0 E_V$

(9) $0.9D \pm 0.3E + 1.6H \pm 1.0E_V$

D = 靜載重 (Dead Load)

F = 流體力

L = 活載重 (Live Load)

T = 溫度力

H = 土壤力

L_r = 池頂活載重

Q = 風力載重

E = 水平地震力

E_V = 構體垂直地震力

載重組合之訂定

- 所須考慮由地震引致的動態載重主要有：
 - 地震引致液體之動態載重(衝擊模態載重及對流模態載重)
 - 地震引致土壤及地下水之動態載重及構體本身之垂直向地震力等
 - 地震引致池頂頂蓋之側向慣性力及池牆之側向慣性力
- 各種動態載重之峰值地震作用過程中不會同時產生 → 用 **SRSS** 法則加以組合

載重組合之訂定(續)

- 以ACI 350-06規範中第9.2節之規定為主，再略經調整下列項目：
 1. 不考慮國內工程界不常使用的雨載重和雪載重；
 2. 將美國規範內所規定之屋頂活載重 L_r 視為活載重 L ；
 3. 將地震載重分作水平地震與垂直地震效應。
- 地震作用方向效應 → 100%+30%法則

結語

- 非建築結構→→雜項工作物結構
- 以回歸期475年之設計地震力進行設計與分析；有必要時宜同時採用最大考量地震等級進行詳細分析檢核
- 用途係數 I 應以是否影響機能運作來考量
- 相似與非相似於建築結構區分
 1. 鋼造普通同心斜撐構架與鋼筋混凝土造部份韌性抗彎構架可參考國外規範如AISC及ACI-318等規範；
- 必要時仍應考應液體動力載重與土壤載重
- 位移檢核、錨錠強度容量檢核
- 載重組合設定

參考文獻

- SEAOC (1999), *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary* (SEAOC 1999), 7th edition, CA.
- ACI (American Concrete Institute), 2006, ACI 350.3-06 *Seismic Design of Liquid-Containing Concrete Structures and Commentary*.
- American Society of Civil Engineers (ASCE), 2010. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE 7, ASCE Standard, SEI/ASCE 7-10, Reston, VA.
- 台灣省自來水公司，「自來水池狀結構耐震設計規範條文及解說(草案)」，2018。

謝謝聆聽
敬請指教