

# 圓柱形儲槽之非真圓公差對動態特性之影響研究

## The Study on Dynamic Characteristics of Cylindrical Tanks with diametrical imperfection

黎文龍 李台綾 吳明川  
台北科技大學 自動化科技研究所  
E-mail: [wlli@ntut.edu.tw](mailto:wlli@ntut.edu.tw)

### 摘要

本研究主要是大型圓柱形儲槽之「自動監測系統」之先導研究。有別於過去許多近似的研究，本研究特別納入非真圓之截面製造公差，以符合實際狀況，針對該非真圓之圓柱形儲槽，在不同之儲存液體容量下，考量儲槽之動態特性變化。研究過程中，先以波動理論分析槽內液體之特性，尤其注意波動之基頻，結果發現，如果儲槽為完全之真圓，雖然由材質彈性係數不一，會造成儲槽自然頻率變化，不過，波動與儲槽結構發生交互作用之機率，仍然非常低。另一方面，倘若以橢圓之截面分析圓柱形儲槽時，本研究發現，儲槽基頻會往低頻方向移動，這與槽內容液增加而造成波動基頻往高頻移動，仍有可能造成共振之不穩定現象，這種現象最有可能發生於製造公差大，而且容液儲存百分比高之圓柱形儲槽。

**關鍵詞：**圓柱形儲槽、液面晃動、自然頻率。

### Abstract

The present report is the preliminary study for the automatic diagnosis system of cylindrical tanks. The main objective is to find the feature factors that can be used in the diagnosis system. Unlike the most researches, the present investigation takes the manufacturing tolerance into account. In addition, the current report starts with the theoretical derivation, which is based on the true circular cross section. It has been found that the sloshing and structural interaction is very unlikely to occur for true circular cross section tanks. However, in case the cross section becomes elliptical, which commonly occurs during the field construction, the possibility becomes higher. The main reason stems in that the fundamental frequency of imperfect tanks tends to move to the lower side. As the consequence, it may just coincide with the sloshing frequency. This is most possible when tanks are with a large tolerance and filled with large percentage of liquid.

**Keywords:** cylindrical tanks, liquid sloshing, natural frequency.

### 1. 前言

由於近幾年來，台灣經歷了幾次頗具規模的地震，不論是生命還是財產都飽受震災威脅，如何致力於減少這種自然災害，進而減少工業設備(如塔槽、儲存槽)之損失，是相當需要重視的。在科技發達的今日，許多天然災害已經可以藉由預測技術達到預防的效果，唯獨地

震，到目前為止，仍然無法確切的預測。因此，事先的防範與規劃，方能將地震所造成的傷害減至最低。又因為台灣是位於太平洋地震帶上，由1999年之九二一集集大地震，以及世界上多次的大地震，如阪神大地震、加州大地震都顯示地震，對儲存槽、塔槽所造成的破壞的報導，所以說大型儲存槽若沒有任何之防震裝置與結構減震的設備時，將容易造成油槽破裂，而引起火災、環境污染與人民生命財產安全的危害。如1971年的加州大地震就是造成許多儲水槽的破壞，引響了環境與人民生活等。

在民國八十八年九二一地震之後，國內「建築物耐震設計規範」[1]，已經針對本國特殊之地理環境作了修正。[1]將台灣之震區重新劃分為甲、乙二區，其對應之加速度係數分別為0.23 與0.33，然而全國有超過一半以上之縣市耐震設計標準都需提高，而調整幅度在18~45%之間，石化儲存槽之耐震設計標準也因而更為嚴苛了。此外，老舊儲存槽則因耐震設計標準較為寬鬆，加上老化現象，其耐震能力實在值得檢討。因此，內政部就擬定了「推動公有及公眾使用之建築物耐震能力評估及補強實施方案」[2]，乃將石化儲槽列為優先評估的對象之一。所以說，推動儲存槽耐震補強新技術之研發工作刻不容緩。目前國內有關儲存槽耐震設計規範之研究並不多，關於此研究所蒐集到之文獻僅有田與王[3]及黎之研究[4]報告。[3]主要是在比較API650與我國建築技術規則之設計，並針對油槽各種可能的破壞機制提出安全之評估準則；[4]針對高壓器體設備，提出一套研擬適用我國的耐震設計規範，並特別明文規定之壓力容器、塔槽等設備的強度安全評估等。

儲槽主要的破壞機制大略可區分成三種：(1)第一種槽殼挫曲：因流體高度不同，當地震發生時，所產生不同的壓力撞擊槽壁就稱之為動水壓，然而槽殼有類似懸臂梁的結構行為，當地震擾動時所導致動水壓的產生，會使得傾覆彎矩增加，導致軸壓力過大，會出現槽殼底部產生局部的挫曲(local buckling)現象[5]，一般俗稱的「象腿現象」(elephant foot bulge, EFB)即是屬於此類，此種破壞的情形在1971年的加州大地震，與1976年的唐山大地震，以及921集集地震[6]，都出現過類似的破壞機制。(2)第二種槽頂破壞：因地震引發流體有對流壓與衝擊壓的作用，而在對流壓時容易產生液面之劇烈激晃(sloshing)衝擊儲槽頂蓋所致[6~8]。(3)第三種是土壤液化或基礎破壞產生不均勻下陷所致。要有效的減緩地震對儲存槽所造成之損壞與影響時，必須針對前述之三種破壞的機制，加以防治才有辦法解決此重要問題，不過，有關第三類的破壞，牽涉到設置儲槽當地之地質，

影響之因子與儲槽本身之結構強度關係相對較低，故本研究方向主要是著眼於前第兩類破壞機制之探討，與深入研究受此機制時槽壁之變形情況[9]。

事實上，有關儲槽內部液體與結構之交互關係研究，一直就沒有間斷過。大型的測試實驗[10]以 LNG 儲槽為研究測試之對象，先以 CAE 分析，再以實驗左證，由他們主要在觀測的目的包括：(1)裝滿液體之槽體動態行為、(2)槽體與基礎座、地質間之交互影響、(3)槽體上之管台(nozzles)破壞等，特別是儲槽之非線性 EFB 破壞及效應，由他們研究報告顯示[10]，不管是 CAE 或是實驗，由於地震力所造成的槽內液體等橫向滑移(slip)，是造成儲槽 EFB 的主要原因。這樣的結論，本質上並不意外，目前有關儲槽類液體晃動之研究，將影響之壓力歸納成四的部份[11]，包括(1)衝擊壓：地震引起之液體對槽體之衝擊壓(impulsive pressure)[e.g., 8]、(2)液體之表面波之晃動或對流壓(convective pressure) [e.g., 12]、(3)液體由於槽體截面相對於基座圓之變形而產生之壓力[13]、及(4)液體由於儲槽垂直上下運動產生之壓力[e.g., 14]等，特別是前兩者之效應，幾乎所有之儲槽設計都必須加以考量。

本研究之主要目的，在探討考慮儲槽圓截面製造公差之圓柱形儲槽，在槽內儲槽有液體時，由於其槽體與液體交互作用之狀況下，儲槽之動態行為，由於內部之儲存液體本身對儲存槽壁會有衝擊壓及對流壓之交互影響，故首先考慮相關理論之分析。

## 2. 圓柱形儲槽內之流體分析

參考圖一之座標系統，而且假設儲槽內液體為不可壓縮(incompressible)、非旋性(irrotational)及非黏性(invscid)之勢流，則槽內液體之總速度勢(velocity potential)函數 $\phi$ ，由兩個部分影響所組成，其一為衝擊壓所造成，另一則為來自流體波動之對流壓者，或寫成 $\phi = \phi_0 + \tilde{\phi}$ ：一為圓柱形液體底部的移動座標相對於固定座標之速度勢函數 $\phi_0$ ；及另一為容器內液體波動，相對於移動座標之速度勢函數 $\tilde{\phi}$ 。分別詳述如下：

### 2.1 衝擊壓之液體速度勢函數 $\phi_0$

參考圖一之模型圖，考慮圓柱形儲槽之幾何形狀，令移動座標  $O$  以圓柱座標表示，當該儲槽承受一  $X_0(t)\hat{i}$  之位移運動時，則其圓柱形液體相對於慣性座標  $O'$  之速度  $\mathbf{v}_0$ ，以圓柱座標表示應為

$$\mathbf{v}_0 = \dot{X}_0 \cos \theta \hat{\mathbf{e}}_r - \dot{X}_0 \sin \theta \hat{\mathbf{e}}_\theta + \dot{Z}_0 \hat{\mathbf{e}}_z \quad (1)$$

其中， $(\hat{\mathbf{e}}_r, \hat{\mathbf{e}}_\theta, \hat{\mathbf{e}}_z)$  為圓柱座標  $O$  之單位向量；若進一步考慮儲槽於水平面上移動，則可忽略  $z$ -方向之速度變化，故(1)式右側之第三項可以省略。

由於儲槽內液體為不可壓縮、非旋性且非黏性，則速度  $\mathbf{v}_0$  必然可以表示成 $\phi_0$ 的梯度，或

$$\mathbf{v}_0 = \nabla \phi_0 \quad (2)$$

由流體連續方程式之微分形式，可知流體速度場  $\mathbf{v}_0$  需滿足

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_0) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

上式中之  $\rho$  為桶內流體之密度。又當該流體為不可壓縮時， $\rho$  應為常數，故可由(2)式代入(3)式，得

$$\nabla \cdot (\nabla \phi_0) = \nabla^2 \phi_0 = 0 \quad (4)$$

(4)式即為 Laplace 方程式。將(4)是於圓柱座標系展開，即可得到[9, 10]

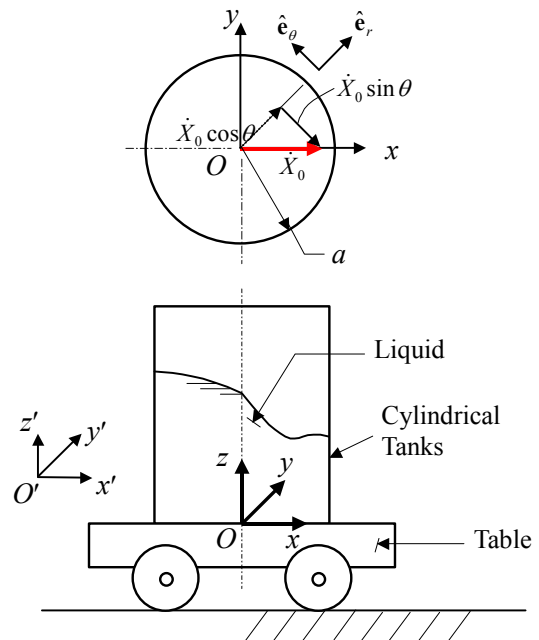
$$\nabla^2 \phi_0 = \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_0}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

另一方面，考慮速度勢為由  $(\hat{\mathbf{e}}_r, \hat{\mathbf{e}}_\theta, \hat{\mathbf{e}}_z)$  三個方向之速度分量所組成，或

$$\phi_0 = \phi_0(u', v', w', t)$$

而速度分量之定義分別為

$$u' = \frac{\partial \phi_0}{\partial r} ; \quad v' = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi_0}{\partial \theta} ; \quad w' = \frac{\partial \phi_0}{\partial z} \quad (6)$$



圖一 圓柱形儲槽的移動與慣性座標

因此，對一已知之速度  $\mathbf{v}_0$ ，可以由解(5)式之偏為分方程式，推得容器液體相對於固定座標的速度勢函數  $\phi_0$ 。另外，本研究將只考慮儲槽於保持同一平面之狀態，故由(1)及(5)式可得

$$\phi_0 = r \dot{X}_0 \cos \theta + \frac{1}{2} \int (\dot{X}_0)^2 dt \quad (7)$$

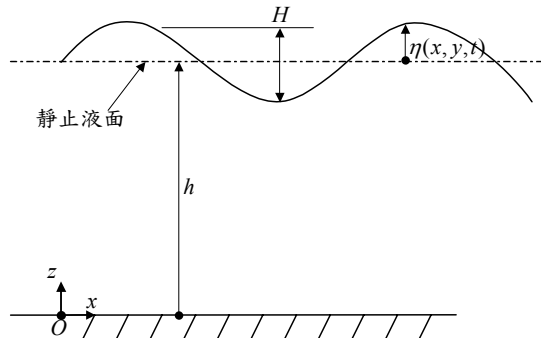
### 2.2 對流壓之液體速度勢函數 $\tilde{\phi}$

儲槽內之流體，在對流波動時，顯然也應與衝擊壓時相同，故仍應考慮為不可壓縮、非旋性之流體，而在任何波形，其對流波動的流體速度勢函數，顯然也都必須滿足(4)式之 Laplace 方程式，或

$$\nabla^2 \tilde{\phi} = 0 \quad (8)$$

除此之外，對儲槽內之波動而言，考慮圓柱形儲槽之幾何形狀及液體之流場，若令儲半徑為  $a$ 、液體深度  $h$  為

時，(8)式必須滿足下列邊界條件：



圖二 線性表面波理論之二維表面波示意圖

1. 在儲槽底部之液體速度為零，或表示成

$$\left. \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z}(r, \theta, 0, t) = 0 \quad (9)$$

2. 在與圓柱儲槽槽壁接觸之液體速度為零：

$$\left. \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial r} \right|_{r=a} = \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial r}(a, \theta, z, t) = 0 \quad (10)$$

3. 若考慮在自由液面處流體粒子不得穿越自由液面或產生剝離(separation)的現象，換句話說，在自由液面上之流體粒子，永遠保持在自由液面，故必須滿足[14]

$$\frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial t^2}(r, \theta, h, t) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} + g \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z}(r, \theta, h, t) = 0 \quad (11)$$

又因自由液面上的壓力與大氣壓力相同，亦即可令  $p = 0$ ，(11)式之邊界條件可簡化成

$$\frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial t^2}(r, \theta, h, t) + g \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial z}(r, \theta, h, t) = 0 \quad (12)$$

參考圖二，(11)或(12)式同時表現儲槽內之駐波自由液面垂直速度之一致性。

### 2.3 總速度勢函數

綜合前述之衝擊及對流壓的兩個速度勢函數，當槽底承受一位移  $X_0(t)$  時，圓柱形儲槽內之流體總速度勢函數，仍以圓柱體座標表示時，可表為

$$\phi = \tilde{\phi} + r \dot{X}_0 \cos \theta + \frac{1}{2} \int (\dot{X}_0)^2 dt \quad (13)$$

應滿足非穩態 Bernoulli 方程式[14]，或

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2} \nabla \phi \cdot \nabla \phi + gz = C(t) \quad (14)$$

其中之  $C(t)$  為一任意之 Bernoulli 常數。由於本研究所關心之主題為槽內液體與槽壁之交互作用，因此，總速度勢函數之衝擊項，並不會造成與槽壁動態變形之交互影響，因此，可以單獨考慮槽內液體之波動速度勢，故由(8)式及(9)、(10)、(12)三個邊界條件可解出速度勢函數式，並表為[7, 13]

$$\tilde{\phi}(r, \theta, z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_{mn}(t) \cdot \cos(m\theta) \cdot \cosh(\lambda_{mn}z) \cdot J_m(\lambda_{mn}r) \quad (15)$$

上式中僅考慮  $\theta$  對稱波， $\alpha_{mn}(\cdot)$  為式函數之係數， $J_m(\cdot)$  代表  $m$  階 Bessel 函數之第一類解，而  $\lambda_{mn}$  則滿足

$$\left. \frac{d}{dr} J_m(\lambda_{mn}r) \right|_{r=a} = 0 \quad (16)$$

表第一類貝索函數之根。更進一步令[14]

$$\alpha_{mn}(t) = \Lambda_{mn} \sin(\omega_{mn}t) \quad (17)$$

其中， $\omega_{mn}$  為表面水波之自然頻率，應滿足[9]

$$\omega_{mn}^2 = g \lambda_{mn} \tanh(\lambda_{mn}h) \quad (18)$$

過去的許多研究都顯示[e.g., 7]，第一個對稱波最為重要，故考慮  $m = n = 1$ ，並丟棄下標符號，得到本研究所需參考之水波的頻率  $\omega$

$$\omega^2 = g \frac{1.842}{a} \tanh(1.842 \frac{h}{a}) \quad (19)$$

(19)式之近似式可以從現行的許多液體儲槽安全設計規範中找到，例如日本[17]及我國[18]的高壓氣體設備耐震設計規範者。

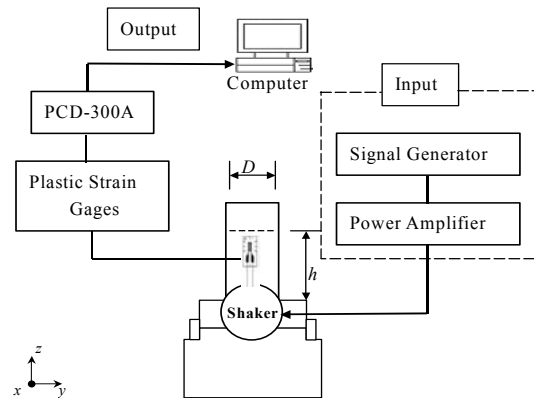
由於儲槽內之液體在地震之作用下，將容易以(19)式之自然頻率晃動，從而產生對槽體之交互作用，不過，(19)式之導出，仍然是以真圓截面之圓柱形儲槽為基準，對於工程施工中可能產生之真圓公差，並無法確實表現出來，本研究之下一節，將以實驗和電腦輔助分析(CAE)之方式，找出圓截面之公差在液體交互作用下之槽體動態特性及影響。

### 3. 實驗研究

本研究針對圓柱形儲槽之研究，包括實驗及 CAE 兩大部分，其流程請參考[19]之架構流程圖，其中有關實驗之流程，則另詳細說明於圖三。

#### 3.1 實驗設備及配置

參考圖三之實驗流程，由訊號產生器產生之激振訊號經由放大器後，由激振器(Shaker)產生激振力，模擬推動本研究自製之水平台車，實驗之設配架設參考圖四。各項主要之設備等簡述如下：

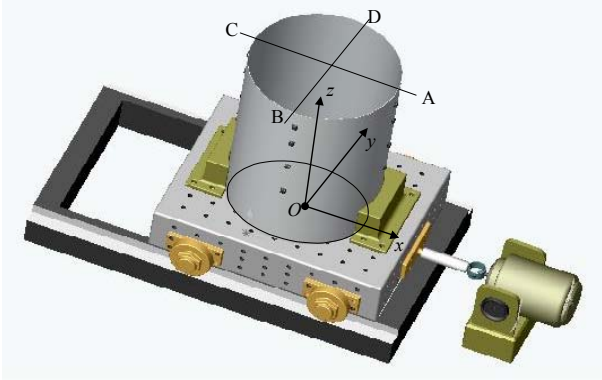


圖三 實驗設備架構系統流程圖

#### 1. 實驗之模型圓柱形儲槽

本研究實驗所使用之圓柱形儲槽係以透明 1 mm 厚之壓克力，捲製成公稱直徑 318 mm，底面加端蓋，總高度 390 mm 之模型桶槽，並於桶外側圓周方向每

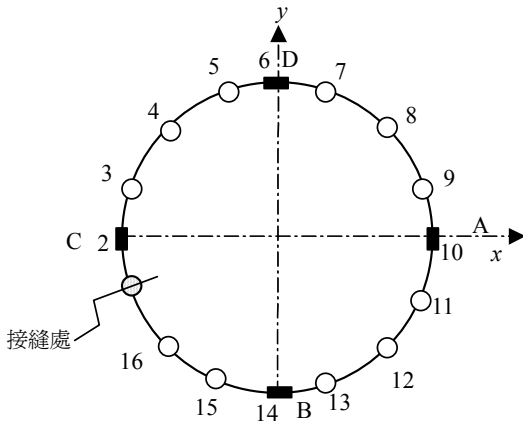
隔 90°黏貼量測桶槽變形之應變規，完成之模型桶槽參考圖五。由於本研究之需求，特將實驗模型桶槽之圓截面加壓成橢圓，並測量其截面公差，量測之位置如圖六，而結果如表一所示。又表中之角度式以相對於接縫位置表示者。



圖四 實驗架構模型圖



圖五 壓克力儲槽之模型



圖六 模型儲槽桶徑之量測位置與接縫處

表一 實驗模型儲槽之圓截面公差

位置	1	2	3	4	5	6	7	8
	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°
mm	312	309	310	319	326	327	320	315
±	-6	-9	-8	+1	+8	+9	+2	-3

2. 應變規

本研究實驗所採用的應變規為共和(Kyowa)產製者，規格有二：一為用於 Load Cell 鋼材上，用於量測推力大小，長度 5 mm；另一則為用於塑膠模型儲槽，規格為 KFP-5-120-C1-65，長度也為 5 mm。

3. 力感測器

本研究所使用之力感測器元件(load cell)為以前項之應變規自製者，如圖七，自製完成後，並以材料拉伸試驗機校正。

4. 訊號擷取器及其他

本研究針對所使用之共和電器 PCD-300A 訊號擷取放大器，來感測應變規電阻值的改變量。

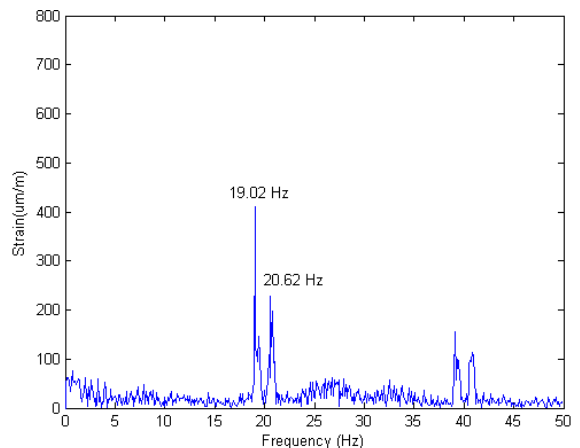
其他之實驗設備，如訊號產生器、激振器等，請參考本實驗室之網站：<http://140.124.31.23:123>。

3.2 實驗之進行

本實驗是利用圖三之流程及相關設備，輸入振動源以自動掃頻與正弦波為主，並配合變動不同水位(h)，在固定槽殼公稱直徑(D)，也就是在不同水位高徑比(h/D)不同時，以激振力大小固定自動掃頻實驗，觀測圓柱形於流體晃動下所造成槽壁變形。

3.2.1 空桶之自然頻率

本研究之外力激振信號源採用自動掃描頻率(Sweep)掃描頻率的範圍為 3~500 Hz，而此實驗設定之取樣頻率 100 Hz，變形反應之FFT結果如圖七所示。由圖七中觀察會有兩個頻率尖峰，分別發生於19 Hz 及 20.6 Hz 左右，推測其造成原因應是桶之真圓度公差所造成，本實驗儲存槽由於真圓公差關係，參考表一，其  $D_{max}$  與  $D_{min}$  間的差為 18 mm(± 2.83 %)之橢圓，若桶槽截面為真圓時相信此二頻率尖峰應會合而為一。



圖七 空桶掃頻之輸出頻域圖

3.2.2 槽內液體之影響

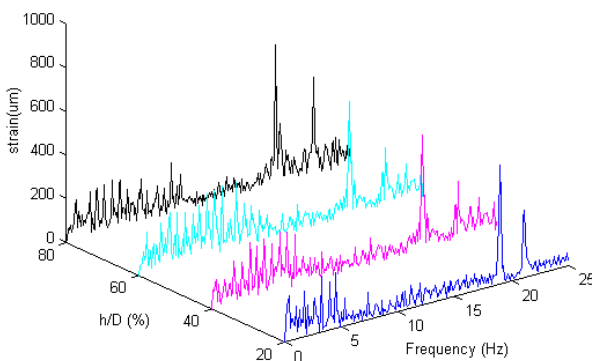
由前述之空桶實驗後，本節將加入不同深度比例之液體(水)，並觀察液體與儲存槽自然頻率之交互關係。由(19)式之理論結果，對真圓截面之圓柱形儲槽於不同

液體深度( $h$ )時，其理論水波頻率，如表二所示。由表二之結果顯示，對固定深徑比( $h/D$ )之真圓儲存槽而言，其內部液體水波會隨者液體深度之增加，而造成水波頻率之增加，但顯然都會在 3 Hz 以下，故以本實驗之掃頻範圍來看，主要之水波動之頻率，應不會在被激發之範圍。

表二 理論之水波基頻

$h$	$h/D$ (%)			
	20% 63 mm	40% 127 mm	60% 190 mm	80% 254 mm
水波 (rad/s)	8.4	10.1	10.5	10.6
基頻 (Hz)	1.34	1.609	1.676	1.687

為驗證內部液體對儲存槽之影響，本實驗仍以掃頻方式來執行，過程中，於空桶中分別注入不同深度之水，並由桶槽外之應變規量測桶之變形訊號，以測得不同水位高度下，儲存槽本體的頻率變化，結果如圖八所示。由圖中可以觀察到，槽體反應幅寬大小方面，大致上沒有太大之變化，而原空桶時之兩自然頻率尖峰距離，會隨著水位之增高而增加，圖九進一步說明此種現象。推估該兩頻率尖峰增寬主要原因，應是水位增高時，水的靜水壓(hydrostatic pressure)會將公差效應擴大，使得橢圓桶槽長、短軸之效應更加明顯，從而使得反應在儲槽之動態自然頻率上。值得注意的是該尖峰之下限者，當液體高度增加，而製造之截面公差不佳時，桶槽之自然頻率將會與液體對流波動接近，有可能造成兩臨界點相互接近，形成共振之動態破壞。

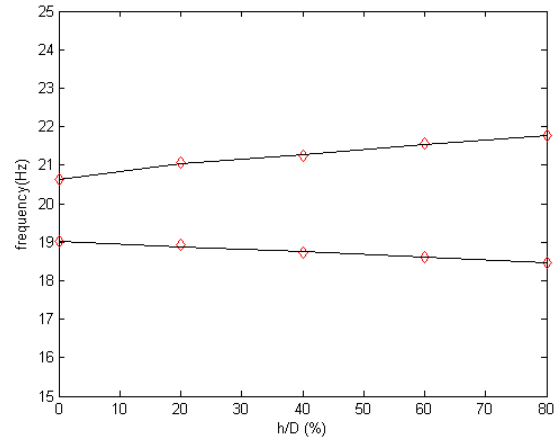


圖八 不同徑深比( $h/D$ )時之儲槽頻域響應

## 4. CAD/CAE 模擬與分析

### 4.1 CAE 分析之參數

為佐證前項之實驗結論，本節另以 CAE 軟體分析之，但又由於本研究索引用之軟體無法分析桶內裝水之水波頻率，故本 CAE 分析只針對空桶來作分析，而水波頻率仍是以真圓截面之理論水波頻率做為參考比較之依據。



圖九 非真圓截面儲槽之自然頻率變化

然而，要正確進行 CAE 分析時，先要先確認材質設定之參數。本研究乃以實驗儲槽之壓克力材質，利用弘達 HT-2102AP [20]之材料拉伸試驗機，以實驗確認儲槽之材質彈性係數。實驗中，試片規格依據 ASTM D 638 (塑料拉伸性能試驗方法來製作試片與測試)[21]規定進行，取得壓克力材質之平均彈性係數  $\bar{E}$  及抗拉強度等。另外，本研究之其他參數，則是以[22]為參考依據，主要之參數包括：壓克力材質之彈性係數  $\bar{E}=1,417$  MPa (標準差  $\Delta E=52.55$  MPa)，抗拉強度 517 MPa、降伏強度 206.8 MPa，蒲松比 0.35，質量密度  $1200 \text{ kg/m}^3$ 、熱傳導係數 0.21 等。

### 4.2 空桶之自然頻率

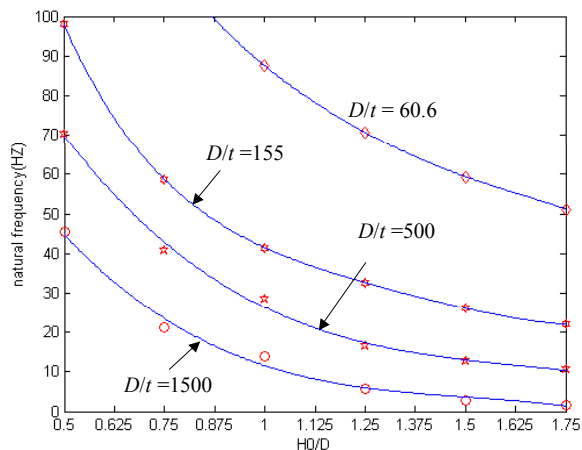
以上節之材質參數設定後，進行空桶高徑比與自然頻率之 CAE 模擬分析，然後再利用 MATLAB 軟體以曲線擬合，結果方如圖十所示。觀察圖十，當真圓截面儲槽之直徑  $D$  固定不變、厚度  $t$  越小，則第一個自然頻率(或稱基頻)下降，相同的，若桶高  $H_0$  增加，儲桶之基頻也會下降，其主要原因相當明顯，當桶之高徑比相同時，儲槽之基頻會隨之厚度之減小而發生於截面之變形，因此，當儲槽之直徑/厚度之比值很大時，儲槽結構與波動仍然可能有交互作用。另一方面，倘若厚度保持不變，而增大其高徑比，則儲槽之基頻會逐漸發生於長軸方向，故第一個自然頻率也會隨之降低。

為了增加本實驗之研究效率，本研究先利用 3D-CAD 軟體建立圓柱形儲槽之模型，接著用 CAE 分析軟體來找出模型的自然頻率與模態，並作為前項原因推估之應證。圖十一(a)、(b)分別為真圓與非真圓截面模型壓克力儲槽之第一個模態情況。

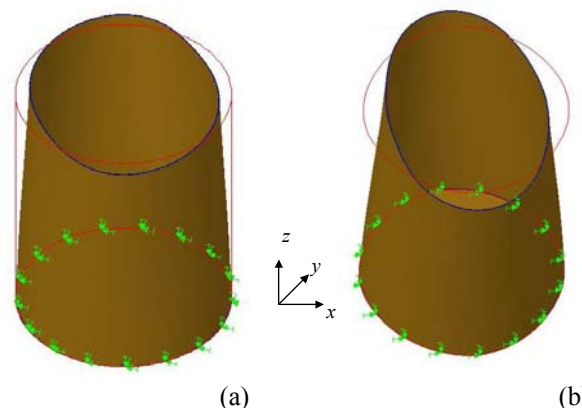
### 4.3 製造公差之影響

在考慮製作公差之橢圓截面儲槽方面，圖十二為同時顯示實驗結果 95 %之信心區間儲槽基頻與 CAE 模擬結果之比較，由該圖結果中顯示，不管是 CAE 或是實驗，兩者對空儲槽之基頻預測均非常接近。再者，考

慮 CAE 之分析誤差，特別是彈性係數之影響，在 CAE 模擬之過程中，本研究另加考慮彈性係數平均值之上、下一個標準差之結果，計算結果如表三所示。表中之橢圓截面為與本研究實驗相同者。又，注意到表中非真圓模擬之空桶基頻，非常接近實驗之空儲槽之自然頻率，參考圖十二。



圖十 圓柱形儲槽於空桶狀態之 CAE 模擬真圓之第一個自然頻率(符號：CAE 分析，線：曲線擬合)



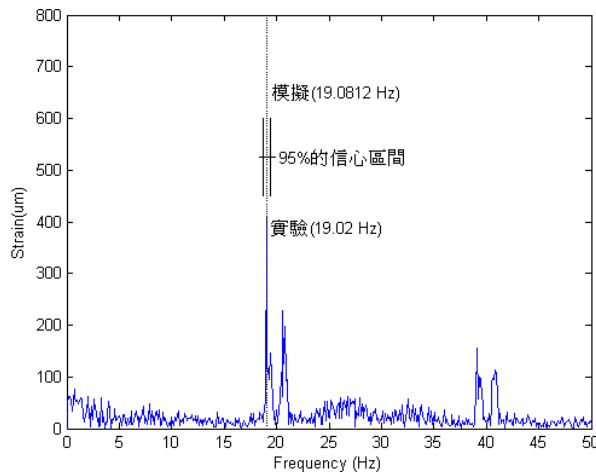
圖十一 圓柱形儲槽之基頻模態：(a)真圓、(b)非真圓截面

表三 彈性係數對 CAE 分析之基頻影響

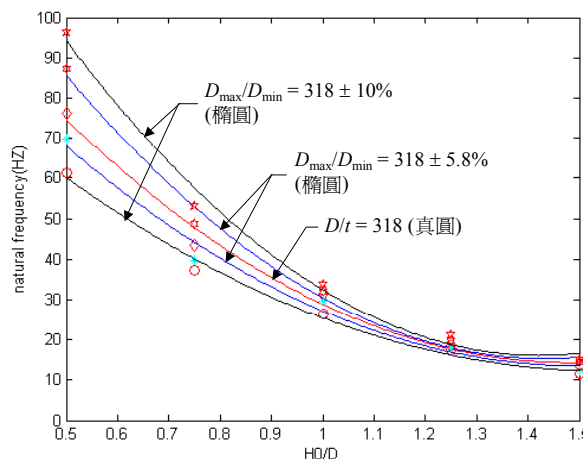
彈性係數	$\bar{E}$	$\bar{E} + \Delta E$	$\bar{E} - \Delta E$
真圓(Hz)	19.30	19.62	18.96
橢圓(Hz)	19.08	19.43	18.76

另外，在考慮截面製造公差後，由於本研究所採用之 CAE 模擬軟體無法考慮裝入液體後之狀態，僅以空儲槽之基頻變化表示。圖十三為考慮真圓度製作公差後之儲槽基頻變化。由圖中，清楚地可以看到，當真圓度公差偏離真圓越遠，則其儲槽之結構自然頻率會隨著儲槽之徑高比增加而持續減小，不過，兩者間之差異則越來越小，可以想像的，當徑高比較大(細長形幾何形狀)時，其基頻不再是以截面變形為主，反而應該是類似懸

臂樑之橫向變形。因此，由圖十三之結果顯示，儲槽之真圓度公差，對徑高比較小(矮胖形)者，其影響較大，但是，發生波動與儲槽結構交互作用之機率則未必增高，反而是徑高比約略相等、且真圓度公差大者，最為危險。



圖十二 非真圓儲槽實驗與 CAE 模擬之基頻比較



圖十三 非真圓儲槽之基頻比較(CAE 模擬)

## 5. 結論

本研究針對圓柱形儲槽之非圓截面對其動態特性之影響加以討論，特別注意兩個影響因子：一為儲槽內液體儲存液體高度或百分比，另一則為儲槽截面之製造公差。研究過程中，首先以相關理論對槽內之液體特性，特別是對流波動加以說明，分析過程中發現，一般圓柱形儲槽內之液體波動基頻，大都遠低於其結構之自然頻率，因此，如果儲槽之截面是真圓，雖然槽內液體之容量增加，會略為提高波動好發頻率，但是，液體波動與結構兩者間之交互作用機率顯然不高。不過，另一方面，由本研究之分析及實驗顯示，由於製造公差所引起之結構基頻，會隨公差與液體多寡高度而變，當儲槽內之液體儲存百分比越高，由於槽內液體容量會造成非真圓製造公差之擴大效應，使得圓柱形儲槽之基頻會越

往低頻方向移動，從而也有可能產生結構與液體波動交互作用之不穩定現象。

此外，本研究也以電腦輔助分析之方式，進一步分析儲存槽結構，因截面製造公差之非真圓，所造成之自然頻率變化分析模擬，結果也顯示，如果儲槽真圓度越差，其空儲槽之基頻也會往低頻方向偏移，顯然地，由非真圓公差與液體高度同時所引起之結構基頻下降，是非常有可能造成共振之不穩定現象，因此，基於安全考量，若儲槽截面之製造真圓度較差時，其儲存液體容量，應加以適當限制。本研究之結論將可進一步應用於儲槽之自動監測系統。

## 6 誌謝

本研究感謝行政院勞工安全衛生研究所 IOSH 92-S312 之協助及國科會 NSC 91-2212-E-27-008 之研究支助。

## 7. 參考文獻

- [1] 營建雜誌社，建築物耐震設計規範及解說，九十年七月。
- [2] 內政部，推動的建築物耐震能力評估及補強實施方案，中華民國土木技師公會全國聯合會第三屆會報推動政策(草案)，八十九年三月。
- [3] 王宗鴻、田堯彰(八十七年)，石油與天然氣系統的耐震安全評估，中華民國第四屆結構工程研討會論文集 2/3，1998 年 9 月，pp. 915-922。
- [4] 黎文龍，高壓器體設備耐震設計規範之建立研究(一)，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所委託研究報告，91 年 3 月。
- [5] 葉佳沅，柔性儲存槽之動力分析，國立交通大學土木工程研究所碩士論文，出版年：91 年 07 月。
- [6] 吉田聖一、座間信作、山田實、石田和雅、田原隆康，“Report on damage and failure of oil storage tanks due to the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan,” 台灣集集地震受災調查報告，產業安全衛生圖書，2001.05.24。
- [7] Barron, R. and Chng, S.W. R., “Dynamic Analysis and Measurement of Sloshing of Fluid in Container”, The Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1989 March, pp83-90.
- [8] Housner, G.W. , “Dynamic pressure on accelerated fluid containers. Bulletin Seism”, Soc. America. 1957, 47(1):15-35.
- [9] Clough, D. P., “Experimental evaluation of seismic design methods for broad cylindrical tanks,” Earthquake Engineering Research Center, 1977.
- [10] Tazuke, H, et. al, “Seismic proving tests of equipment and structures in thermal conventional power plant,” J. Pressure Vessel Technology, Trans. of ASME, v.124, pp. 133-143, 2002.
- [11] Fischer, F.D., and Rammerstorfer, F.G., “A refined analysis of sloshing effects in seismically excited tanks,” pp.693-709, Int. J. of Pressure Vessels and Piping, v.76, 1999.
- [12] Ibrahim, R.A. and Bar, A.D.S., “Atuoaprametric resonance in a structure containing fluid,” pp. 159-179, v.42(2), J. Sound & Vibr., 1975.
- [13] Veletsos, A.S., Tang, Y., and Tang, H.T., “Dynamic response of flexibly supported liquid storage tanks,” pp. 264-23, v.118, ASCE J. Struct. Eng’g., 1992.
- [14] Fischer, F.D., Seeber, R., “Dynamic response of vertically excited liquid storage considering liquid-soil interaction,” pp. 329-342, v.16, Earthquake Eng’g. Struct., 1988.
- [15] Currie, I.G, Fundamental Mechanics of Fluids (流體力學)，譯著者：陳皇鈞，曉圓出版社。
- [16] 汪羣從，流體力學，國立編譯館主編，幼獅文化事業公司印行。
- [17] 日本高壓氣體保安協會，日本平成 9 年 11 月，高壓氣體設備等耐震設計指針。
- [18] 黎文龍，高壓氣體設備耐震設計規範(草案)，p.9，行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所，92.10。
- [19] 李台綾，非真圓柱形儲槽之對動態特性之影響研究，國立台北科技大學自動化所碩士論文。
- [20] 材料試驗機目錄，弘達儀器股份有限公司。
- [21] ASTM, PART 27, D638-Tentative Method of Test for tensile properties of plastics, 1965.
- [22] 張志純，塑膠大全，徐氏基金會出版社，科學圖書大庫。