

大型儲存槽之隔震設計分析與試驗

The Isolation Design Analysis and Experiment of Large-Scale Storage Tank

計畫編號：NSC89-2211-E009-066

執行期限：89年08月01日至90年07月31日

主持人：王彥博 國立交通大學土木系 教授

E-mail address: ypwang@cc.nctu.edu.tw

一、中文摘要(關鍵詞：隔震、摩擦單擺支承、儲存槽、振動台試驗。)

本文完成隔震儲存槽之振動台試驗，確認摩擦單擺隔震支承於儲存槽防震應用之可行性，並驗證理論分析模式之合理性。試驗結果顯示，在各種地震下摩擦單擺支承對儲存槽均有減震效果，且地震強度愈大時減震效益愈明顯。此外，依據本文提出之剛性儲存槽結構-流體動力分析模式所完成之數值模擬分析與試驗結果有相當程度之契合，顯示此一理論分析模式足以預測滑動隔震儲存槽之高度非線性結構-流體動力行為。

英文摘要 (Keywords: seismic isolation, friction pendulum bearing, storage tank, shaking table test.)

In this study, a series of shaking table tests of a storage tank isolated with FPS has been carried out. The feasibility of using the friction pendulum systems for seismic isolation of storage tanks is confirmed, and adequacy of the proposed analytical model verified. Experimental results indicate that the friction pendulum system provides effective seismic protection to the storage tank consistently under all types of earthquakes tested. It is found that the stronger the earthquake, the more pronounced the isolation effect. Moreover, numerical simulations using the proposed hybrid structural-hydrodynamic model based on a rigid tank assumption show very good agreement with the test results, indicating sufficiency of this scheme in predicting the highly nonlinear structural-hydro-dynamics of seismic sliding tanks.

二、緣由與目的

石化工業對於其原料或產品，無論是氣體或油料，均需依其特性以適當形式的儲存槽加以存放。儲存槽一旦發生破裂，不僅會造成整個生產系統的癱瘓，若其所儲存之有毒或易燃物外洩，將立即造成環境污染或火災，嚴重威脅到民眾之生命財產與健康，更要付出極大的社會成本。儲存槽的破壞主要由地震所導致，例如1964年日本Niigata地震、Sendai地震及美國Alaska地震中，油槽皆受到嚴重損壞，造成火災與環境污染等二度傷害。由於台灣為地震帶，石化儲存槽的耐震能力與安全檢核十分重要。目前國內有關儲存槽耐震設計規範之研究不多，本研究蒐集到之文獻僅有田堯彰及王宗鴻【1, 2】的報告，他們比較API 650與我國

建築技術規則之設計反應譜，並針對油槽各種可能的破壞機制提出安全評估準則。

儲存槽主要的破壞機制包括：一、槽殼挫屈【3-5】：因動態水壓造成傾覆彎矩增加，導致軸壓力過大而在接近槽殼底側出現皺摺之局部挫屈(local buckling)現象，一般稱之為“elephant's foot bulges”；二、槽頂破壞：因地震引發流體對流作用產生液面劇烈激盪(sloshing)衝擊儲槽頂蓋所致；三、土壤液化或基礎破壞產生不均勻下陷所致。欲有效減緩地震對儲存槽造成之損壞，必須針對前述之破壞機制加以防治。

隔震為結構減震的有效方式。由於儲存槽之特性不同於一般土木結構，其載重隨儲存量多寡而變化、低溫狀態(如儲存液態天然氣時)。因此，橡膠類的隔震支承如鉛心橡膠支承(LRB)或高阻尼橡膠支承(HDRB)等並不適用，因為其振動周期與結構重量有關，導致動力特性難以掌握；此外橡膠在低溫下有脆化的問題。摩擦單擺支承隔震系統則因結構周期僅與滑動介面之曲率半徑有關，因此無論儲存量多寡，其結構動力特性均可以完全掌握；此外，摩擦單擺支承係以不鏽鋼材料所製，故無低溫脆化的問題，應用於工業儲存槽更具可行性。目前，國外許多大型儲存槽的隔震系統—如美國ISP公司Ammonia儲存槽、美國Dow Chemical公司緊急備水槽及希臘公共瓦斯公司之大型液態天然瓦斯儲存槽，均採用摩擦單擺支承。

隔震儲存槽之地震反應分析問題，涵蓋流體力學與結構動力學之範疇。對剛性儲存槽而言，因不考慮槽殼變形，槽殼之運動和地表運動完全一致。因此，未隔震時，剛性儲存槽內流體在地震作用下之震盪行為，可以完全根據流體力學建立其解析模式。有關剛性儲存槽在地震作用下之流體動力分析最早由Housner所提出【6】。由於Housner在計算衝擊壓力與對流壓力時完全作獨立考量，且未考慮所有可能之邊界條件，其結果僅為近似解。惟與後來之研究結果比較，Housner之估算結果誤差並不大。1984年Veletsos【7】探討剛性儲槽在地震下之流體動力問題，考慮流體為不可壓縮(incompressible)、非旋性(irrotational)及非黏性(invicid)等條件下，其速度勢滿足拉普拉斯方程式(Laplace equation)。根據適當之邊界條件求解拉普拉斯方程式，進而得到動態水壓之壓力場，再由動態水壓與儲槽基座剪力及傾覆力矩之關係建立等效質量、勁度與質心位置，將儲槽之流體動態反應機制轉化成等效之多自由度彈簧—質塊系統，奠定剛性儲存槽的流體動力分析模式；1993

年 Tang【8】根據前述理論發展剛性儲存槽之雙層介質流體動力分析模式，其主要貢獻在於提出兩種比重不同介質之介面邊界條件；同年 Veletsos 及 Shivakumar【9】提出剛性儲存槽之多層介質流體動力問題之一般化分析模式；1995 年 Veletsos 及 Shivakumar【10】延續其剛性儲存槽之多層介質流體動力分析理論，進一步建立多層介質之動態液壓與基座剪力及傾覆力矩之關係；同年 Shivakumar 及 Veletsos【11】更提出地震作用下剛性儲存槽之非均質流體動力分析模式，考慮介質之密度變化係由上而下呈指數分佈。1987 年 Veletsos 及 Tang 認為地震時土壤和儲存槽的互制行為會造成儲存槽的搖晃(Rocking)，因此分別針對剛性及柔性儲存槽之搖晃效應加以探討【12】。

在隔震的情況下，欲建立槽殼與流體動力行為之解析模式，必須結合流體力學與結構動力學的理論。此外，由於摩擦單擺支承之行為具高度非線性，隔震儲存槽之地震反應分析為一相當複雜之非線性動力分析問題。Zayas 等人【13】利用有限元素軟體分析 FPS 隔震儲槽之動態反應，然而並未提出完整之結構一流體動力分析理論(Structural—hydrodynamics)；Wang 及 Jwo【14】；Wang, Teng 及 Chung【15】由拉普拉斯方程式推導剛性儲槽之流體動力分析模式，計算液面激盪反應及動態液壓，並由動態液壓與基底剪力及翻覆力矩之關係建立等效彈簧—質塊系統，進而與 FPS 隔震元素結合建立隔震儲存槽之結構一流體動力方程式。

本文係延續 Wang 等人【14,15】先前之研究，完成隔震儲存槽之振動台試驗，旨在確認摩擦單擺隔震支承於儲存槽防震應用之可行性，並驗證理論分析模式之合理性。本研究製作了直徑 1.36m，高 2 m，容量 3 噸之儲存槽模型，進行一系列的振動台試驗，包括以 El Centro、Hachinohe 及 Kobe 等地震歷時資料為輸入震波，並調整不同之 PGA 強度進行測試，以探討地震頻率內函及地震強度對儲存槽隔震效益的影響。此外，考慮不同水位高度(H)進行試驗，以探討高徑比(H/R)對隔震效益之影響。試驗結果顯示，在各種地震下摩擦單擺支承對儲存槽均有減震效果，且地震強度愈大時減震效益愈明顯，水位高度對隔震效益則無依定之影響。此外，依據本文提出之剛性儲存槽結構-流體動力分析模式所完成之數值模擬分析與試驗結果有相當程度之契合，顯示此一理論分析模式足以預測滑動隔震儲存槽之高度非線性結構-流體動力行為。

1. 剛性圓形儲存槽之流體動力理論

茲考慮一規則、剛性之圓柱型儲存槽，如圖 1 及圖 2，採徑向(r)、角度(θ)、高度(z)之圓柱座標系統，內存有密度為 ρ 、高度為 H 之液體。假設液體具不可壓縮性、非旋性及非黏性，於儲存槽在 $\theta = 0^\circ$ 的方向受到一加速度為 \ddot{W}_g 之地震，則槽內液體之速度勢函數 $\mathcal{W}(r, \theta, z, t)$ 滿足拉普拉斯方程，速度勢函數 $\mathcal{W}(r, \theta, z, t)$ 滿足下列邊界條件：
(1)液體速度在槽底($z=0$)的地方為零，(2)液體之

徑向速度和剛性槽殼在槽壁($r=R$)之速度一致(3)液面壓力一致性(4)自由液面垂直速度的一致性。儲存槽中內流體之運動速度勢可分解與槽殼同步之剛體運動速度勢 $t(r, \theta, z, t)$ (視流體為剛體)及流體對油槽殼壁之相對速度勢 $\mathcal{E}(r, \theta, z, t)$ 。因此， t 可直接積分解出如 $t = -\dot{X}_g(t) r \cos \theta$ ， \mathcal{E} 可由分離變數法並考慮前述之邊界條件求得。另從自由液面之壓力邊界方程式 $(\dot{W} - gd)_{z=H} = 0$ 及貝索函數之正交關係經正規化而建立流體動力方程式

$$\ddot{D}_n(t) + \frac{\lambda_n g}{R} \tanh \lambda_n r \bar{D}_n(t) = -\ddot{W}_g \quad n=1, 2, \dots, \infty \quad (1)$$

其中 $r = H/R$ ， $\nu_n = \frac{2}{\lambda_n^2 - 1}$ ， $\bar{D}_n(t) = D_n(t) / [V_n \lambda_n \tanh(\lambda_n r)]$ 。

由前述微分方程解出 $\bar{D}_n(t)$ 後，可循序求得速度勢 ζ ，繼而求出作用於槽壁之壓力。

2. 動態壓力、基底剪力及翻覆力矩之計算 作用於槽殼的壓力可表示如下

$$\rho(1, \theta, r, t) = -\left(\frac{\partial \mathcal{W}}{\partial r}\right)_{r=R} = -R \cos \theta \left\{ \ddot{W}_g(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\bar{D}_n(t) \cosh(\lambda_n r)}{\lambda_n \sinh(\lambda_n r)} \right] \right\} \quad (2)$$

基底剪力可從而計算如下

$$S(t) = \int_0^H \int_0^{2\pi} \rho(1, z, r, t) R \cos \theta d\theta dz = -m_0 \ddot{W} + \sum_{n=1}^{\infty} m_n \frac{S_n^2 D_n(t)}{V_n \lambda_n \tanh(\lambda_n r)} \quad (3)$$

其中 $m_0 = m_s(1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n^2 V_n}{\lambda_n^2 r^2})$ 及 $m_n = m_s \frac{C_n^2 V_n}{\lambda_n^2 r^2}$ 分別表示流體剛性運動與激盪運動之參與質量，其中

$m_s = m_0 + \sum_{n=1}^{\infty} m_n = \rho R^2 H$ 。另外，翻覆力矩則為

$$M_{OT}(t) = \int_0^H \int_0^{2\pi} \rho(1, z, r, t) z R \cos \theta d\theta dz = -m_0 \dot{W}_g(t) + \sum_{n=1}^{\infty} m_n h_n \frac{S_n^2 D_n(t)}{V_n \lambda_n \tanh(\lambda_n r)} \quad (4)$$

(1)式可乘上對流運動之模態質量而表為

$$m_n \ddot{D}_n(t) + k_n \bar{D}_n(t) = -m_n \ddot{W}_g(t) \quad n=1, 2, \dots, \infty \quad (5)$$

其中 $k_n = \left[\frac{\lambda_n g}{R} \tanh(\lambda_n r) \right] m_n$ 。若僅考慮前 N 模態時，則儲存槽之流體動力方程式可表示如：

$$M_s \ddot{\bar{D}}(t) + K_s \bar{D}(t) = -M_s \mathbf{1} \ddot{W}_g(t) \quad (6)$$

其中 $\mathbf{1}$ 為 $N \times 1$ 之向量地震力影響矩陣， M_s 為 $N \times N$ 之流體等效質量矩陣， K_s 為 $N \times N$ 之流體等效結構勁度矩陣， \bar{D} 為 $N \times 1$ 之激盪模態位移向量。

3. 隔震剛性儲存槽之結構-流體動力分析模式

儲存槽以摩擦單擺支承隔震後，其整體系統之動能(T)與位能(V)分別為

$$T = \left[\dot{\bar{D}} + \mathbf{1}(\dot{x}_b + \dot{x}_g) \right]^T M_s \left[\dot{\bar{D}} + \mathbf{1}(\dot{x}_b + \dot{x}_g) \right] + \frac{1}{2} m_b (\dot{x}_b + \dot{x}_g)^2 \quad (7)$$

$$V = \frac{1}{2} \bar{D}^T K_s \bar{D} + m_s g R_{FPS} (1 - \cos \chi) \approx \frac{1}{2} \bar{D}^T K_s \bar{D} + \frac{1}{2} \frac{m_s}{R_{FPS}} x_b^2 \quad (8)$$

其中 x_b 與 \dot{x}_b 分別為基層的位移與速度； m_b 為基層質量(含槽體及流體剛性質量 m_0)； R_{FPS} 為 FPS 之曲率半徑； $m_s = \sum_{i=0}^N m_i + m_b$ 為結構系統總質量； g 為重力加速度； χ 為隔震結構以 FPS 滑動曲面之曲率中心為旋轉軸滑動角度，當 $\chi < 0.2$ 時， $\sin \chi \approx \chi = \frac{x_b}{R_{FPS}}$ 。

吾人可根據拉格朗日方程建立滑動隔震儲存槽之運動方程式：

$$M\ddot{\mathbf{R}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}\mathbf{F}(t) \quad (9)$$

上式中各矩陣之定義可參考文獻【14,15】敘述，其中 $F(t)$ 為摩擦力，因摩擦機制具高度之非線性，有關(9)式之求解本文係採用文獻【16】的方法。

三、振動台試驗與分析

3-1 模型儲存槽之設計

試驗模型儲存槽如圖 2(a)所示，係依振動台極限載重 10t 之限制進行設計。底座是由基礎板、H 型鋼及 C 型鋼組成，總重為 0.916t。儲存槽半徑 0.68m，高 2.00m，容量約 3t。高度 0.80m 以下的部分以厚 0.003m 之不銹鋼製作，0.80m 以上的部分則以 0.01m 厚之透明壓克力製作，俾便於實驗中觀察液體之激盪反應。

3-2 摩擦單擺支撐模型

實驗共用四組摩擦單擺支撐，上、下盤的尺寸大小為 35 cm × 30 cm，滑動器的直徑約為 5.5 cm，最大容許滑動位移為 10 cm。滑動曲面之曲率半徑為 1m，可使結構滑動時有 2 秒之振動週期。此一曲率半徑提供隔震系統之水平勁度(結構重 W 比曲率半徑 R_{FPS})將隨液面高底而有所不同。隔震支撐裝置如圖 2(b)所示。

3-3 感測計之配置

感測計包括水壓計、剪力荷重元如圖 2(c) 所示、位移計及加速度規四種。在模型北面($\theta = 180^\circ$)距槽底由下而上每隔 0.34m 處安裝一組水壓計共 5 組，分別標示為 A、B、C、D、E。A 點水壓計之型號為 PGM-0.5kg，可量測範圍為 $(\pm 0.5 \text{ kg/cm}^2)$ ，B、C、D、E 水壓計的型號為 PGM-02g，可量測範圍為 $(\pm 0.2 \text{ kg/cm}^2)$ 。剪力荷重元安裝於隔震支撐下盤與基礎之間，可直接量得基底剪力。位移計為 Kyowa 公司產品，可量測隔震支撐之位移。另外，並於槽頂及儲存槽模型材質交界處設置加速規 (CROSSBOW $\pm 4G$)。

3-4 試驗安排

本試驗安排水位高 $H=1.80\text{m}$ 、 1.40m 、 1.00m 、 0.68m 、 0.50m 等不同情況，並考慮在 El Centro $PGA=0.34g$ 、 $0.5g$ 、 $0.7g$ 、 $1.0g$ ；Hachinohe $PGA=0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.8g$ 、 $1.0g$ ；Kobe $PGA=0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.8g$ 、 $1.0g$ 等不同頻率內涵與強度之地震進行振動台試驗。

3-5 試驗結果與分析

3-5.1 案例討論

由於篇幅上之限制，本節主要針對水位高為 180cm 在 El Centro, $PGA=0.7g$ 地震下之試驗結果進行探討。各點動水壓在隔震前後實驗歷時如圖 3(a)，未隔震的部分乃 $PGA=0.34g$ 之試驗結果按比例放大而得到。結果顯示，儲存槽中各點動水壓在隔震後動水壓均有顯著折減，此與理論分析結果亦相符，如圖 3(b)所示。此外，圖 4(a),4(b)為隔震支撐之位

移與遲滯迴圈之結果顯示，數值模擬分析和實驗值十分吻合，驗證本文提出之結構-流體動力分析模式的準確性。分析時，隔震支撐之摩擦係數可經試驗所得之基底剪力遲滯迴圈經回歸分析而得。由於不同水位時結構重有所不同，隔震支撐之水平勁度 (W/R_{FPS}) 在不同水位將有所差異，經線性回歸分析，遲滯迴圈上、下緣之斜率即為隔震支撐之水平勁度，本例中其值分別為 30.09 kN/m 及 33.35 kN/m ，與理論值 ($W/R_{FPS}=36.1 \text{ kN/m}$) 有些差異。依前述之斜率估算出滑動界面之曲率半徑 (R_{FPS}) 分別為 1.168m 及 1.082m ，接近設計值 $R_{FPS}=1 \text{ m}$ 。另外，由遲滯迴圈上、下緣迴歸得之斜線與滑動位移為零時之交點(其基底剪力值分別為 3.64 kN 及 3.08 kN)，估算出隔震支撐正、反向滑動時，摩擦係數分別為 10.0% 及 8.5% ，此與庫倫摩擦機制中考慮摩擦係數為定值之假設略有出入。

3-5.2 地震強度的影響

El Centro 地震下，各點動水壓隔震效益如表 1，其中水位高度 1.8m 時並未作 $PGA=1.0g$ 之試驗。其餘水位之試驗結果顯示，地震強度較大時，隔震效益也愈佳。Hachinohe 地震與 Kobe 地震之試驗結果分別歸納於表 2 與表 3，其結果亦有相同的趨勢，因為無論地震強度大小，上傳至結構的最大摩擦力為定值，因此地震強度愈大時，隔震效果將愈顯著。

3-5.3 水位高度的影響

另外，由表 1 不同水位之結果比較，可看出水位愈高時隔震效果愈好，也就是說儲存槽越細長隔震效果將比矮胖型效果好，至於在低水位時，FPS 對儲存槽也有良好的隔震效果，然因為篇幅限制，在低水位為 0.68m 及 0.5m 試驗結果無法完整呈現。其原因為高徑比愈大時，與槽殼同步運動之流體慣性質量所佔比例愈高，而隔震系統主要係針對衝擊壓力發生減震作用，其對於對流壓力並無影響。此外，如表 2 Hachinohe 地震，表 3 Kobe 地震亦可得相同結論，特別在 Kobe 地震下，FPS 對儲存槽隔震效果表現良好，於低水位時，隔震效果即可達 80% 以上。

四、研究成果與結論

本論文完成隔震儲存槽之振動台試驗，旨在確認摩擦單擺隔震支撐於儲存槽防震應用之可行性，並驗證理論分析模式之合理性。依據本研究之試驗與數值模擬分析結果歸納結論如下：

1. 在不同地震歷時作用下，隔震儲存槽之動態水壓均較未隔震時降低；且在同一高徑比的條件下，地震強度愈大時隔震效益愈顯著。
2. 儲存槽水位高度對隔震效益並無一定之影響。
3. 本文依據剛性儲存槽理論所發展之解析模式可以準確地預測試驗結果，無論是動態水壓或隔震支撐之滑動位移均有相當程度之契合。

五、參考文獻

1. 王宗鴻 (1997), 「儲存油槽之耐震設計考量」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文, 1997年6月。(指導教授: 田堯彰)
2. 王宗鴻、田堯彰 (1998), 「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.
3. Liu, WK. and Uras, RA. (1989), "Transient failure analysis of liquid-filled shells, part I: theory," Nuclear Engineering and Design, 117, pp.107-139.
4. Liu, WK. and Uras, RA. (1989), "Transient failure analysis of liquid-filled shells, part II: applications," Nuclear Engineering and Design, 117, pp.141-157.
5. Uras, RA and Liu, YK. (1990), "Dynamic buckling of liquid-filled shells under horizontal excitation," J. Sound and Vibration, 141(3), pp.389-408.
6. G. W. Housner(1957), "Dynamic pressure on accelerated fluid containers," Bulletin of the Seismological Society of America, 47, pp.15-35.
7. Veletsos, AS. (1984) "Seismic response and design of liquid storage tanks," Guidelines for the seismic design of oil and gas pipeline systems. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, New York, N.Y: pp. 255-370 and pp.443-461.
8. Yu. Tang (1993), "Dynamic Response of Tank Containing Two Liquids," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 119, no. 3, March, pp. 531-548.
9. A. S. Veletsos and P. Shivakumar (1993), "Sloshing Response of Layered Liquids in Rigid Tanks," Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 22, no. 9, Sep., pp. 801-821.
10. A S. Veletsos and P. Shivakumar (1995), "Hydrodynamic Effects in Rigid Tanks Containing Layered Liquids," Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 24, no. 6, June, pp. 835-860.
11. P. Shivakumar and A S. Veletsos (1995), "Dynamic Response of Rigid Tanks with Inhomogeneous Liquids," Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 24, no. 7, July, pp. 991-1015.
12. Anestis S. Veletsos, Yu. Tang (1987), "Rocking Response of Liquid Storage Tanks," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, no. 11, Nov., pp.1774-1792.
13. Zayas, V.A. and Low, SS. "Application of seismic isolation to industrial tanks," PVP-Seismic, Shock, and Vibration Isolation, ASME 1995; 319:pp.273-288.
14. Wang Yen-Po and Jwo Guey-Rong (1999),

"Seismic isolation of rigid tanks using friction pendulum bearings," Proceeding of the International Workshop on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Control of Structures, May 6~8, Guangzhou, China.

15. Yen-Po Wang, Min-Cheng Teng, Kuo-Whie Chung (2001), "Seismic isolation of rigid cylindrical tanks using friction pendulum bearings," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 30, Issue 7, July, pp. 1083-1099.
16. Wang, Yen-Po, Liao, Wei-Hsin and Lee Chien-Liang (2001), "A state-space approach for dynamic analysis of sliding structures," *Engineering Structures*, **23**, pp. 790-801.

表1 動態水壓峰值 (El Centro)

	PGA=0.7g			PGA=1.0g		
	未隔震 (kN/m ²)	隔震 (kN/m ²)	隔震效益 (%)	未隔震 (kN/m ²)	隔震 (kN/m ²)	隔震效益 (%)
H=1.80m						
A	4.54	1.62	64	N/A	N/A	N/A
B	4.21	1.49	65	N/A	N/A	N/A
C	4.22	1.34	68	N/A	N/A	N/A
D	4.02	1.22	70	N/A	N/A	N/A
E	3.47	1.50	57	N/A	N/A	N/A
H=1.40m						
A	4.85	1.49	69	6.96	1.45	79
B	3.43	1.49	57	6.23	1.35	78
C	4.10	1.20	71	5.88	1.20	80
D	3.65	1.47	60	5.43	1.50	72
H=1.00m						
A	3.54	1.37	61	5.42	1.33	75
B	3.27	1.34	59	4.99	1.27	75
C	2.66	1.54	42	4.06	1.45	64

表2 動態水壓峰值 (Hachinohe)

	PGA=0.8g			PGA=1.0g		
	未隔震 (kN/m ²)	隔震 (kN/m ²)	隔震效益 (%)	未隔震 (kN/m ²)	隔震 (kN/m ²)	隔震效益 (%)
H=1.80m						
A	6.20	1.90	69	7.90	1.90	76
B	5.83	1.77	70	7.43	1.60	78
C	5.71	1.67	71	7.27	1.45	80
D	5.89	1.52	74	7.51	1.58	79
E	4.69	1.52	68	5.97	1.74	71
H=1.40m						
A	5.87	1.28	78	7.32	1.73	76
B	5.49	1.09	80	6.84	1.35	80
C	5.03	1.16	77	6.28	1.42	77
D	4.28	2.31	46	5.34	2.80	48
H=1.00m						
A	6.00	1.39	77	7.58	1.44	81
B	5.68	1.31	77	7.18	1.35	81

C	3.95	0.95	76	4.99	1.11	78
---	------	------	-----------	------	------	-----------

表 3 動態水壓峰值 (Kobe)

H=1.80m	PGA=0.8g			PGA=1.0g		
	未隔震 (kN/m ²)	隔震 (kN/m ²)	隔震效 益 (%)	未隔震 (kN/m ²)	隔震 (kN/m ²)	隔震效 益 (%)
A	6.07	1.46	76	8.57	1.64	81
B	5.60	1.64	71	7.90	1.67	79
C	5.88	1.31	78	8.30	1.38	83
D	5.52	1.07	81	7.79	1.18	85
E	4.19	1.14	73	5.92	1.01	83
H=1.40m						
A	6.75	1.47	78	8.60	1.49	83
B	6.04	1.32	78	7.70	1.31	83
C	5.82	1.21	79	7.42	1.10	85
D	5.03	1.58	69	6.41	1.44	77
H=1.00m						
A	6.21	1.38	78	7.79	1.25	84
B	5.48	1.25	77	6.88	1.05	85
C	4.30	0.85	80	5.40	1.03	81

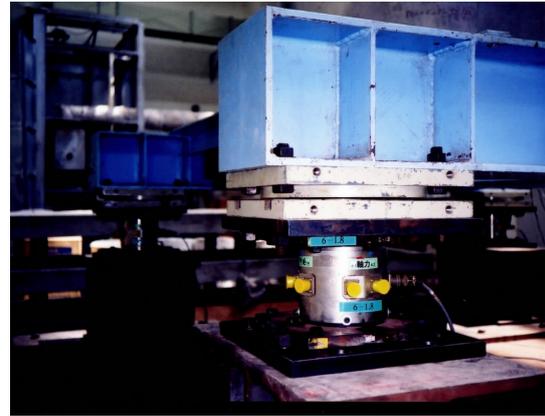


圖 2(c) 剪力荷重元裝置情形

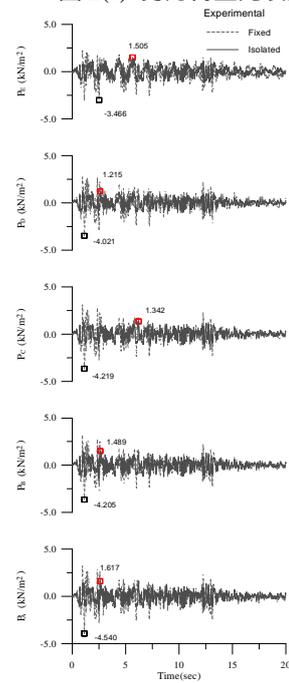


圖 3(a) 隔震前後各點動水壓力反應實驗值 (El Centro, PGA= 0.7g, H=1.80m)

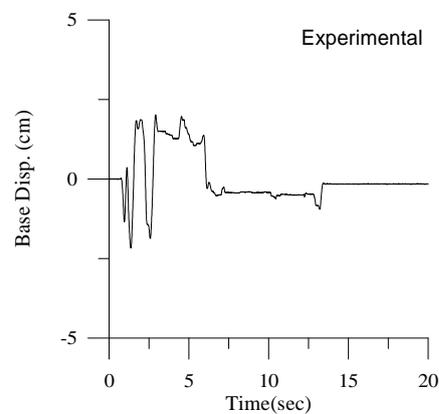
圖 1 剛性儲存槽示意圖



圖 2(a) 置於振動台上之模型實體



圖 2(b) FPS 裝置情形



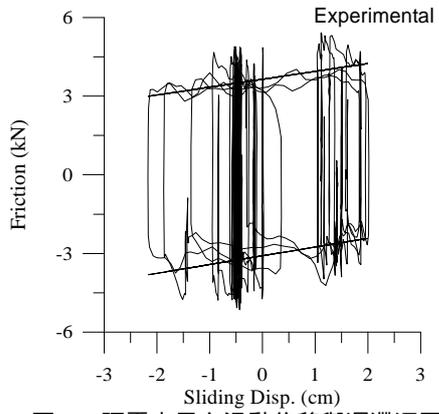


圖 4(a) 隔震支承之滑動位移與遲滯迴圈實驗值 (El centro 0.7g, H=1.80m)

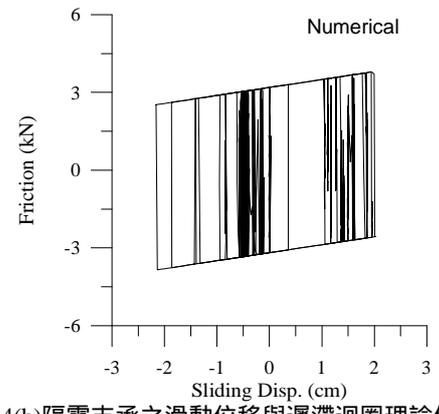


圖 4(b) 隔震支承之滑動位移與遲滯迴圈理論值 (El centro 0.7g, H=1.80m)

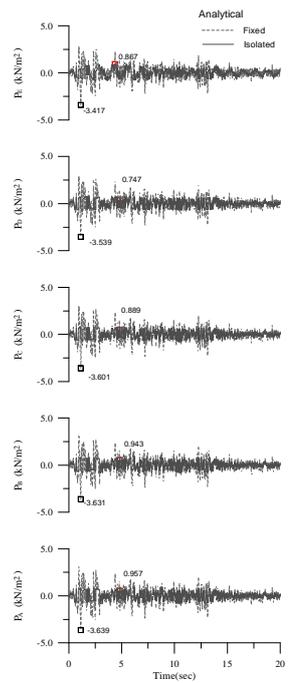


圖 3(b) 隔震前後各點動水壓力反應理論值 (El Centro, PGA= 0.7g, H=1.80m)

