

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 黏彈性基礎儲油槽之水平與垂直地震反應及其相互之影響

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2211-E-002-074-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學土木工程學系暨研究所

計畫主持人：陳永祥

計畫參與人員：葛家豪

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 11 月 28 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 黏彈性基礎儲油槽之水平與 垂直地震反應及其相互之影響

計畫編號：NSC 91-2211-E-002-074

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：陳永祥

國立台灣大學土木工程研究所

計畫參與人員：葛家豪

國立台灣大學土木工程研究所

### 一、中文摘要

本研究主要探討液體於剛性儲存槽中受到水平及垂直外力震動時之沖激(sloshing)行為，以及與底部隔震結構之互制反應。本文採用滿足勢流(potential flow)理論之流體，利用二維與三維邊界元素法求解流場邊界上之速度勢及速度梯度分布。再以 Lagrangian 座標描述法並配合泰勒級數展開式，計算分析自由液面上質點運動現象。於求得水槽內液體與自由液面之動力反應之後，進而利用白努利方程式(Bernoulli's equation)求取槽壁四周壓力分布以及底部剪力。並將底部剪力施加於所附加之結構物上，建立液體與結構互制反應方程式，再採用狀態空間法(state space)於離散時間域求解各項結構動力反應，以探討液體與結構互制效應與特性。本文以液體儲存槽及其附加隔震裝置後之動力反應進行數值模擬計算。同時，也進行一系列小型結構實驗，針對上述應用例題以實驗方式探討其動力特性，並與數值計算結果作交互驗證。

**關鍵詞：**邊界元素法，液體沖激，儲油槽隔震

### Abstract

The numerical approach for the liquid sloshing phenomenon inside a rigid tank subjected to a horizontal or vertical excitation is established

first. The liquid is assumed to satisfy the assumptions of potential flow. Therefore, the Boundary Element Methods with the Lagrangian coordinate description and Taylor series expansion are applied to solve the non-linear sloshing problem. The hydrodynamic pressure on the tank wall is obtained by the Bernoulli's Equation, and the base shear force due to liquid sloshing can be calculated by the integration of the hydrodynamic pressure along the tank wall. Then the base shear force is applied on the structure to simulate the interaction between liquid and structures. Then the space state vector method is treated to solve the transient structural responses. Hence, the interaction between liquid tanks and isolators can be studied by the present numerical scheme in detail. In this study, both numerical simulations and scaled model tests are adopted for the investigations of the seismic isolation of rigid liquid-storage tanks. The agreements between the numerical and experimental results are very good.

**Keywords:** *Boundary Element Methods, Liquid sloshing, Isolation for oil-storage tank*

### 二、緣由與目的

當液體儲存槽受到外力侵襲時，內部液體將會隨之產生沖激之現象，而液體運動的

幅度以及對槽體結構所產生的作用力，往往也是實際工程分析或應用上最受關注的問題。本文即由此為出發點，針對矩形水槽與圓柱形水槽分別討論分析其受到水平或垂直地表強制震動時內部液體的沖激運動狀態，以及液體運動時對槽體結構所產生的作用力。

其次，為了降低液體儲存槽受到地震侵襲時承受過大之地表加速度，以及內部液體發生過大的震動，進而使得槽體結構發生破壞，目前已有學者提出對儲油槽底部進行隔震之研究。其基本概念是於液體儲存槽底部安置一隔震裝置，藉以降低液體儲存槽所承受的外力加速度，與槽體與地面相連部分之應力，以保護儲存槽之安全。為了深入探討液體存槽隔震後之動力特性，本文將建立液體與結構互制作用之數值方法進行分析。此法可藉由調整下部隔震結構之相關動力係數，如勁度和阻尼等，以模擬不同性質之隔震系統，如鉛心橡皮墊、黏彈性橡膠材料、摩擦單擺式隔震系統等。本研究也利用小型油壓震動台，實際模擬分析液體儲槽內部液體受到地表外力侵襲時之動力反應與安置隔震結構的效益，並與理論計算結果加以比較，藉以驗證理論方法的異同。

### 三、基本理論與研究方法

#### 1. 水沖激計算理論與方法

對於油槽內部之液體作以下假設：液體為無粘滯性、不可壓縮並滿足非旋性流場之勢流(potential flow)；油槽受到外力震盪時，自由液面之液體分子，僅能在表面運動，不可脫離自由液面形成碎波，以滿足液面之連續條件；在油槽四周及底面之流體，僅能沿著邊界運動；在自由液面和空氣接觸的部分，彼此之間無任何拖曳力產生。基於以上假設，圖 1 油槽內之流場可滿足 Laplace 方程式：

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

其中  $\phi(x, y, z, t)$  為內流場之速度勢。令  $u$ 、

$v$ 、 $w$  分別為 X、Y、Z 方向之流體速度，則可得

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = u, \quad \frac{\partial\phi}{\partial y} = v, \quad \frac{\partial\phi}{\partial z} = w \quad (2)$$

由圖 1 可知，油槽的邊界型態可分為三種，水槽側壁  $\Gamma_l$  及  $\Gamma_r$ 、油槽底部及自由液面  $\Gamma_f$ 。在自由液面上，分別有兩組非線性之邊界條件：動力邊界條件(dynamic boundary condition)及運動邊界條件(kinematic boundary condition)。首先定義  $\vec{k}$  為自由液面上質點之位置向量， $\Gamma_f$  之運動邊界條件可表示如下：

$$\frac{D\vec{k}}{Dt} = \left( \frac{\partial}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \right) \vec{k} = \vec{U}, \quad \text{在 } \Gamma_f \text{ 上}, \quad (3)$$

其中  $\vec{U}$  為質點之速度向量，而  $\frac{D}{Dt}$  為時間全微分式(total time derivative)，也就是在 Lagrangian 描述下之時間導數。其次自由液面也要滿足動力邊界條件(dynamic boundary condition)，即

$$\frac{D\phi}{Dt} = -g\eta + \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2, \quad \text{在 } \Gamma_f \text{ 上}, \quad (4)$$

$g$  為重力加速度， $\eta$  為液面高度， $\rho$  為液體密度，在此假設大氣壓力  $p_a$  為零。在油槽側壁及底部的邊界  $\Gamma_l$ 、 $\Gamma_r$ 、 $\Gamma_b$  上必須給予各邊界受到外力強制運動時所相對法線方向的速度，底部的邊界條件為：

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = V_v(x, y, z, t) \quad \text{在 } \Gamma_b \text{ 上}, \quad (5)$$

$\partial/\partial n$  為邊界上向外法向量之微分， $V_v(x, y, z, t)$  為底部邊界上某一點向外法向量速度之時間函數。至於在油槽側面的邊界上，由於受到水平強制振動，其向外法向量方向的速度為強制振動方向速度在邊界上向外法向量方向的分量，故

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = V_n(x, y, z, t), \quad \text{在 } \Gamma_l \text{ 及 } \Gamma_r \text{ 上}, \quad (6)$$

$V_n(x, y, z, t)$  為在邊界上某一點向外法向量速度之時間函數。

在之前所提及之邊界值問題，可轉換成

沿著邊界  $\Gamma(\Gamma_f \cup \Gamma_b \cup \Gamma_l \cup \Gamma_r)$  積分的邊界積分方程式，以利邊界元素法之使用。假設邊界上源點  $s$ ，位置座標分別為  $x_s, y_s, z_s$ ，區間內場點  $Q$ ，其位置座標為  $X_Q, Y_Q, Z_Q$ 。若  $G(s, Q)$  為三維 Laplace 方程式之格林函數 (Green's function)，

$$G(S, q) = \frac{1}{4\pi r(s, Q)}, \quad (7)$$

且  $r(s, Q)$  為源點與場點之距離，將(7)代入格林第二定理 (Green second identity) 並將場點  $S$  逼近至邊界上，令此時場點的位置為  $Q$ ，可得到僅對邊界處理的邊界積分式子：

$$c(Q)\phi(Q) + \int_{\Gamma} \phi(S) \frac{\partial G(S, Q)}{\partial n} d\Gamma = \int_{\Gamma} G(S, Q) \frac{\partial \phi(S)}{\partial n} d\Gamma. \quad (8)$$

$c$  值為流場體角之相關係數，與場點  $Q$  所在位置有關。在本研究中，採用線性元素進行邊界離散，因此邊界積分式(8)可進一步推導成邊界元素法計算的形式。

本文採用 Lagrangian 描述的泰勒級數展開的方法，追蹤自由液面上質點的運動軌跡和其速度勢變化。首先考慮一段由時間  $t$  到  $t + \Delta t$  的變化， $\Delta t$  為時間點之間隔，若定義  $(\xi, \zeta, \eta)$  來表示自由液面上的質點位置，假設自由液面上某液體質點的位置經過  $\Delta t$  後，由  $(\xi, \zeta, \eta)$  移動至  $(\xi', \zeta', \eta')$ ，如圖 2 所示，邊界條件(3)限制住新的質點位置  $(\xi', \eta')$  必須仍在自由液面上，因此  $\xi'$  及  $\eta'$  可以二階泰勒級數對  $\xi$  及  $\eta$  展開後得：

$$\xi'_i = \xi_i + \Delta t \frac{D\xi_i}{Dt} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{D^2\xi_i}{Dt^2} + O[(\Delta t)^3], \quad i=1, 2, 3 \quad (9)$$

其中， $\xi_1 = \xi$ ， $\xi_2 = \eta$ 。同理，速度勢  $\phi$  之變化亦可如下所示：

$$\phi' = \phi + \Delta t \frac{D\phi}{Dt} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{D^2\phi}{Dt^2} + O[(\Delta t)^3]. \quad (10)$$

藉由(9)及(10)，可以利用前一時刻的物理量，推得經過一微小時間後的結果。經由上

述之邊界值求解、時間函數離散與 Lagrangian 描述，配合時間前進 (time marching) 計算過程，可得到某一時段自由液面上各質點的位置座標與速度勢變化。

## 2. 附加隔震結構儲油槽之計算方法

當某一時刻之油槽液面高度求得後，即可進一步求出液體對油槽底部所造成的反制力，油槽底部反制力的成因是來自於其內液體受到激盪時，槽壁周圍不同水位所造成的壓力差對油槽所形成的合力。在本部分研究僅探討油槽受到 X 軸方向外力震盪的情況，故油槽的反制力方向也是平行 X 方向，考慮圖 3 之油槽壓力分布，由白努利方程式可得油槽側壁壓力  $p_x(x, y, z, t)$  而油槽底部之反制力為槽壁上壓力於 X 方向積分值，即

$$F_l = \int_{\Gamma_w} p_x d\Gamma, \quad (11)$$

$F_l$  表示底部反制力，其方向為 X 軸之正向。 $P_x$  則為水槽周圍所受之動水壓力在 X 方向之分力。

建立了油槽內液體沖激之分析模式後，我們可進一步將底部隔震層與上部油槽進行結合。考慮如圖 3 所示之儲油槽附加底部隔震層示意圖，當其受到水平單向地震力侵襲時，結構與液體互制反應的模式可用下式表示：

$$M_s \ddot{x} + C_s \dot{x} + K_s x = -M_s \ddot{x}_g(t) + F(t), \quad (12)$$

其中  $M_s$  為油槽結構與隔震層質量總和， $C_s$  為隔震層阻尼量， $K_s$  則為隔震層勁度， $\ddot{x}_g(t)$  為地震加速度歷時紀錄，而  $F(t)$  則為液體沖激所造成的底部剪力。以狀態向量空間的觀念處理，可令  $\tilde{z}(t) = \begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix}$ ，(12)式可寫為

$$\dot{\tilde{z}}(t) = \tilde{A}\tilde{z}(t) + E\ddot{x}_g(t) + BF(t), \quad (13)$$

其中  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_s/M_s & -C_s/M_s \end{bmatrix}$ ， $E = \begin{Bmatrix} 0 \\ -1 \end{Bmatrix}$ ， $B = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1/M_s \end{Bmatrix}$ ，接下來可將上式進

行時間離散，得

$$\bar{z}[k+1] = A_d \bar{z}[k] + E_d \ddot{x}_g[k] + B_d \bar{F}[k], \quad (14)$$

其中  $A_d = e^{A\Delta t}$ ， $E_d = A^{-1}(A_d - I)E$ ， $B_d = A^{-1}(A_d - I)B$ ， $I$  為單位向量矩陣。經由以上之理論分析，可將儲油槽受地震動力時之各項反應分別求得。

### 3. 小結構模型試驗佈置

圖 4 為液體儲存槽受水平震動實驗之佈置示意圖。實驗中共採用矩形及圓柱型兩組壓克力實驗水槽，由於兩水槽均採用壓克力材料製作，且厚度為 0.7 公分，故此兩水槽側壁可視為剛性結構。實驗過程中分別將兩組不同水槽鎖定於震動平台上，並於槽體側壁上安置波高計，紀錄該點之自由液面水位歷時反應。此外，於震動平台上也分別設有加速度規、速度規，以及雷射測位儀等感應裝置，以監測震動平台之運動狀態。

圖 5 為本研究中針對液體儲存槽隔震實驗所採用之結構模型以及實驗佈置圖。於本實驗中，首先在震動平台上設置一剛架，並在其中垂吊一隔震結構平台，因此可藉由隔震結構平台的擺長  $l$  或著附加於平台與支架間之附加彈簧調整此一隔震平台之自然週期，由於固定於震動平台上之剛架在震動方向的勁度足以將其視為一剛性體，故本研究即利用此吊掛於其上之單自由度隔震平台系統模擬液體儲存槽之下部隔震結構，亦即圖 3 所述之液體儲存槽隔震結構系統分析模型。本研究中之實驗主要針對圓柱型水槽進行討論，將其放置於圖 5 中之單擺平台上，並在內部注入液體後，即可視為如圖 3 之附加隔震結構之液體儲存槽結構試驗模型。如前所述。實驗中採用位移訊號輸入油壓震動平台進行控制，主要的地表運動型式為簡諧運動及地震紀錄歷時。除了安置於油壓震動平台上之各項感應器之外，於本實驗也在單擺隔震平台上安置加速度規與位移計，藉以量測隔震平台之動力變化。由於壓克力水槽係直接鎖定於隔震結構平台之上，且水槽之側壁厚度足夠可視為剛性，因此所量測之結

構平台加速度以及位移亦可表示為水槽附加隔震裝置後之加速度與位移量。至於自由液面的反應主要利用裝置於槽壁右側的波高計，以紀錄該點之自由液面水位起伏變化歷時反應。

## 四、結果與討論

### 1. 例題計算

#### a. 矩形水槽受水平與垂直地震侵襲計算

本例題計算選取中央氣象局編號 TCU068 測站的集集地震加速度資料如圖 6~7 所示。其中圖 6 為東西向地震資料圖，圖 7 為垂直向地震資料圖。有了加速度資料後便可透過對時間積分的方式得到速度歷時資料，以做為本文數值程式的輸入資料。本例題計算採用之水槽的長度及高度分別為 9 公尺與 6 公尺，寬度為 3 公尺，並將地震資料的速度和加速度值縮小為原來的 1000 倍。計算時每段邊界仍舊分割成 20 段元素，數值計算之時間間格為 0.005 秒，並只粹取真實地震資料中 20 秒至 60 秒內的速度及加速度值。計算結果如圖 8 所示，由圖 8 可知在此算例中，垂直震動對波高反應的影響並不大。

#### b. 矩形水槽受水平地震數值計算與實驗比較

於本例題中，採用台灣集集地震紀錄 (CHY028 測站東西向資料) 輸入油壓震動台中模擬地表運動。水槽長度為 0.8 公尺，水深為 0.1 公尺，水槽寬度為 0.14 公尺。由於地震紀錄歷時多為加速度紀錄，故於本實驗必須先將其積分成位移歷時反應，方可輸入至本實驗之油壓震動台。由圖 9 之計算結果可知，於波高反應方面，理論與實驗執非常一致。

#### c. 圓形水槽受水平地震數值計算與實驗比較

在本例題中，同樣採用台灣集集地震紀錄 (CHY028 測站東西向資料) 輸入油壓震動台中模擬地表運動。圓形水槽半徑為 0.3 公尺，水深為 0.1 公尺。由圖 10 之計算結果可知，理論與實驗之波高反應非常一致。

#### d. 圓形水槽附加隔震裝置受水平地震數值計算與實驗比較

本例題將以本文所建立的液體與結構互制分析方法將以數值計算方法模擬水槽附加隔震結構後承受地震外力時之動力反應。首先假設液體無黏滯性，所給定之隔震結構週期 $T_s$ 為 0.9 秒，阻尼比 $\xi_s$ 為 7%，隔震結構與空水槽總質量 $M_s$ 為 19.4 公斤，水槽內靜止水深為 10 公分，此時水之質量 $M_w$ 為 28.27 公斤。隔震結構之勁度 $K_s$ 為 2325 牛頓/公尺，隔震結構之阻尼係數 $C_s$ 為 42.62 牛頓秒/公尺，水槽邊界上共分割 480 個線性四邊形元素，計算時間間隔為 0.001 秒。以台灣集集地震 5mm 最大位移模擬油壓震動平台震動之所得之實驗結果進行計算比較。由圖 11 可知，無論水槽位移或液面振幅，數值計算結果均與實驗值之表現非常一致，但隨著震動之平緩，計算結果就會與實驗結果就會略為產生差異。

#### e. 大型油槽附加隔震裝置受水平地震數值計算

最後，本例題將採用中油一萬公秉之儲油槽，以模擬附加隔震裝置後之效果。輸入之地震力為台灣集集 921 地震 CHY028 測站之東西向加速度紀錄，並將地震加速度最大值調整為 0.1g。計算中所採用之油槽半徑為 15.24 公尺，高度 13.7 公尺，假設內部裝有 13 公尺深之液體，此時液體最低自然頻率為 1.049 rad/sec (週期約 6 秒)。並令液體之密度為 1000 公斤/立方公尺，所以內部液體質量 $M_w$  9485.6 公噸。同時，假設槽體結構以及附加之隔震裝置總質量約為液體質量之 5%，即 $M_s$  為 474.3 公噸。由於本油槽槽壁由 3/8 英吋~5/16 英吋間之 A283C 鋼材製成，再考慮其頂蓋、底部隔震裝置以及其餘管路等週邊附屬結構質量，前述對於槽體結構質量之估算值應屬合理。此外，計算中所採用

之而隔震週期 $T_s$ 則為 4.0 秒，其所對應之隔震結構勁度為 24,575 牛頓/公尺，而隔震裝置阻尼比 $\xi_s$ 設為 10%，故其 $C_s$ 值為 3,129 牛頓-秒/公尺。計算結果如圖 12 所示，很明顯的，附加長週期隔震結構之後，槽體所承受的加速度以及底部剪力可明顯獲得降低。

## 2. 結論

本文以液體沖激現象為出發點，利用勢流理論與邊界元素法，配合 Lagrangian 座標描述法與泰勒級數展開式，以剛性水槽承受水平與垂直地表震動為方向，建立了二維與三維空間之液體沖激問題分析理論方法。接著將水槽置於結構物中，建立液體與結構之互制分析方程式。並採用所建構之理論分析方法配合小型結構模型實驗，以液體儲存槽承受地震侵襲與附加隔震裝置後之動力反應，例題進行研究討論。本文所提供的研究方法不但有效的分析處理了上述之工程應用例，且由於本研究方法可應用的範圍非常廣泛，藉由本文的研究經驗與成果，可對後續之相關研究提供非常實用的參考與方向。

## 五、參考文獻

1. Chen, Y. H., Hwang, W. S., and Ko, C. H. (2000), "Numerical Simulation of the Three-Dimensional Sloshing Problem by Boundary Element Method," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 23, No. 3, pp. 321~330.
2. Kim, N.-S. and Lee, D.-G. (1995), "Pseudodynamic Test for Evaluation of Seismic Performance of Base-Isolated Liquid Storage Tanks," *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 3, pp. 198~208.
3. Liu, P. L.-F., Hsu, H.-W. and Lean, M. H. (1992), "Applications of Boundary Integral Equation Methods for Two-Dimensional Non-Linear Water Wave Problems," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 15, pp. 1119~1141.

4. Malhotra, P. K. (1997), "Method for Seismic Base Isolation of Liquid-Storage Tanks," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 1, pp. 113~116.

### 六、成果自評

本研究內容與原計畫相符、並達成預期目標、研究成果兼具學術及應用價值、適合在學術期刊發表。

### 附圖

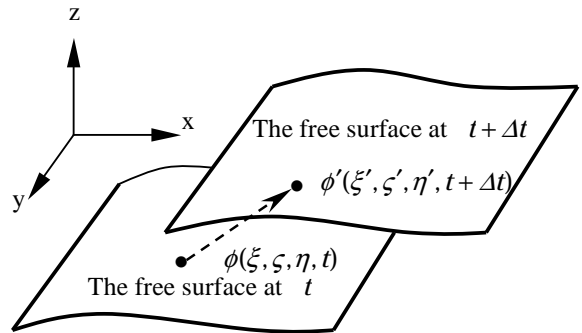


圖 2. 自由液面變化示意圖

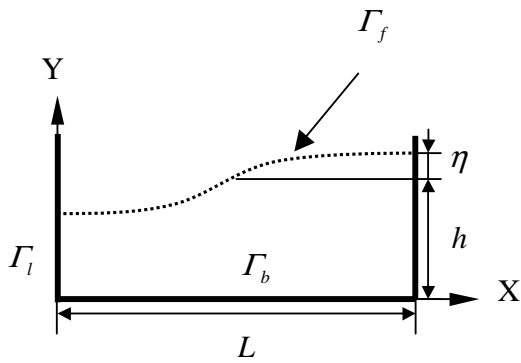


圖 1. 儲油槽計算區間及邊界示意圖

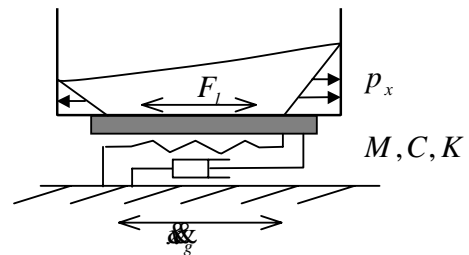


圖 3. 儲油槽黏彈性基礎隔震示意圖

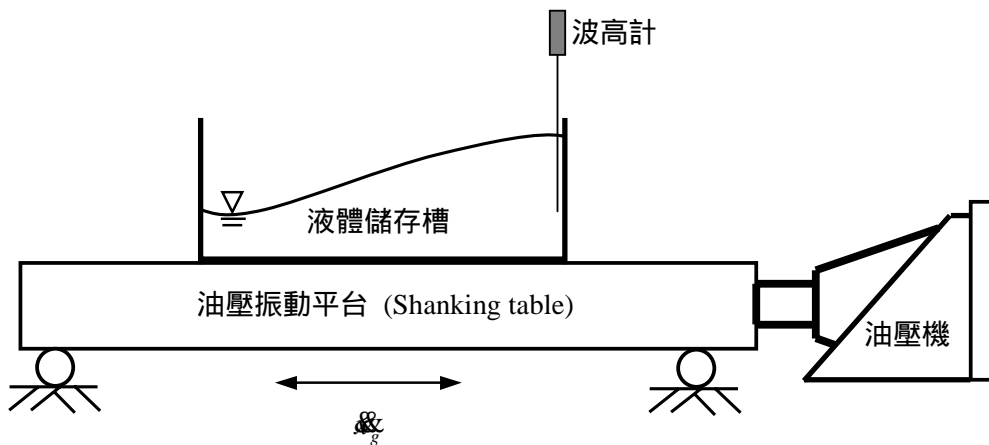


圖 4. 液體儲存槽承受水平震動試驗模型(無隔震)

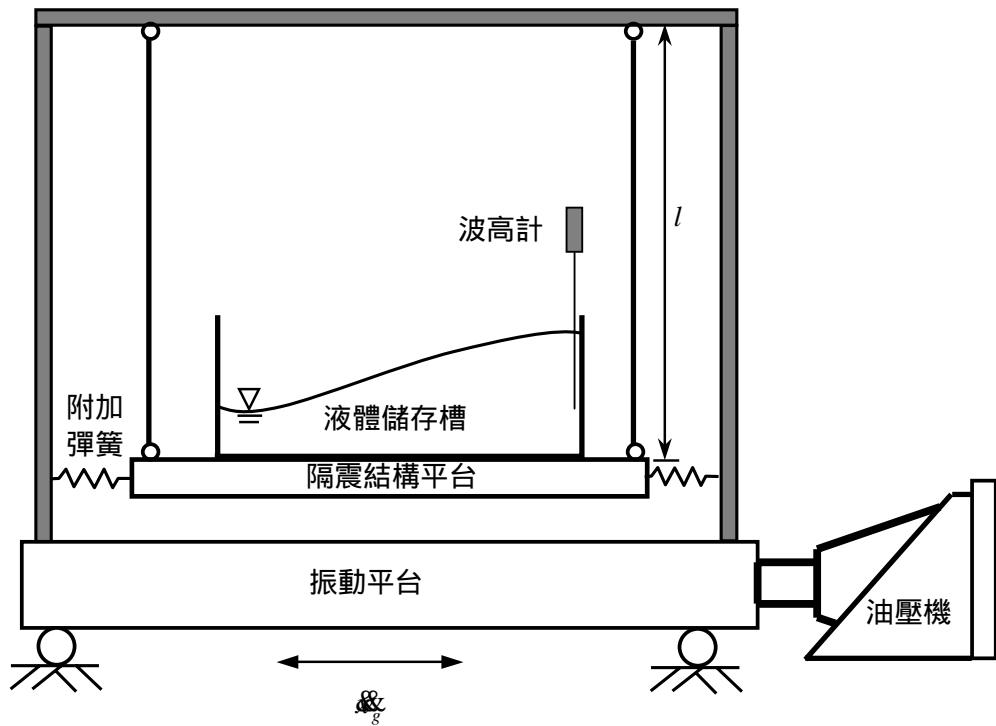


圖 5. 附加隔震系統之液體儲存槽承受水平震動結構試驗模型

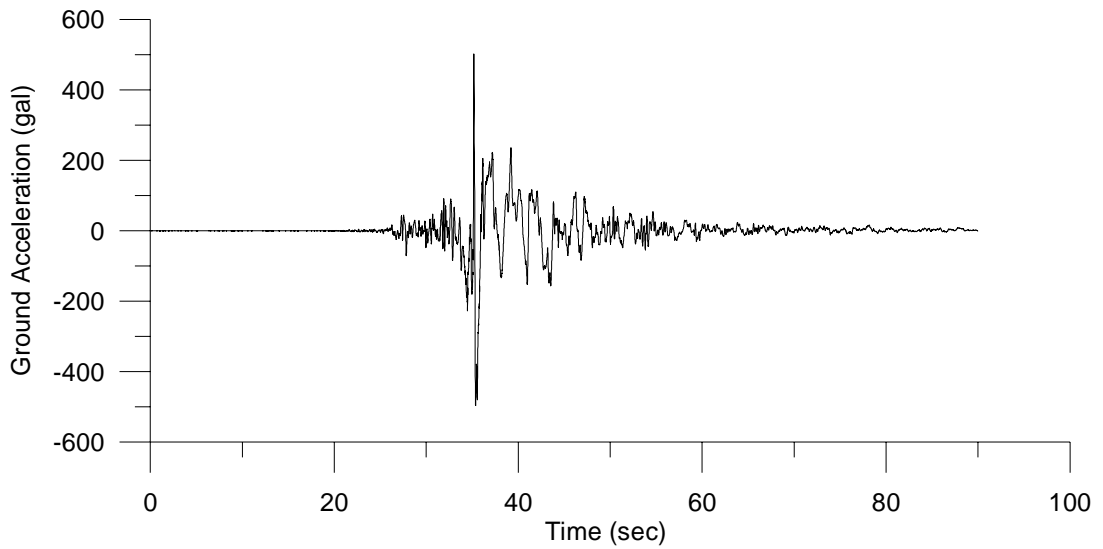


圖 6. TCU068 測站之東西向地震加速度歷時圖 (Chi-Chi earthquake, Taiwan 1999)



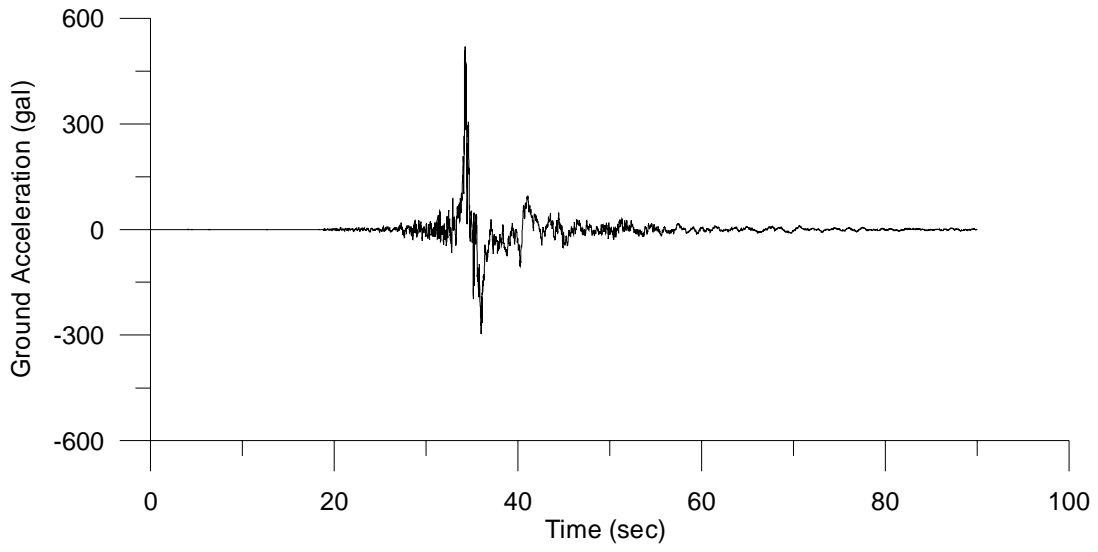


圖 7. TCU068 測站之垂直向地震加速度歷時圖 (Chi-Chi earthquake, Taiwan 1999)

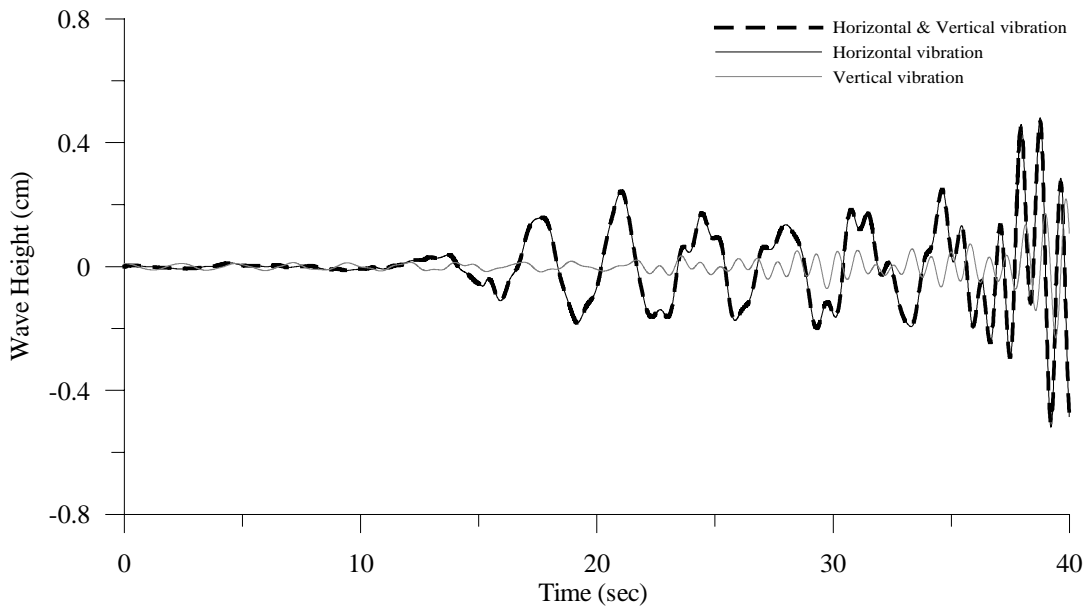


圖 8 矩形水槽承受集集 921 地震水平東西向及垂直方向真實地震力(TCU068 測站)，水槽右側自由液面波高變化歷時圖

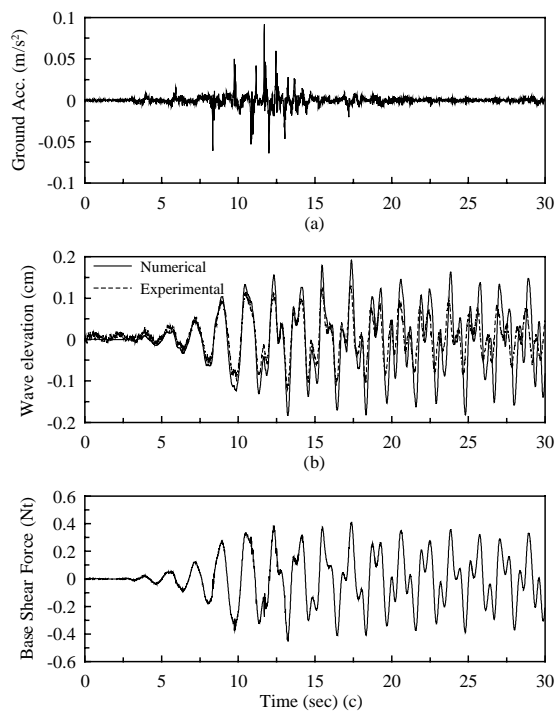


圖 9. 矩形水槽受集集 921 水平地震數值計算與實驗比較

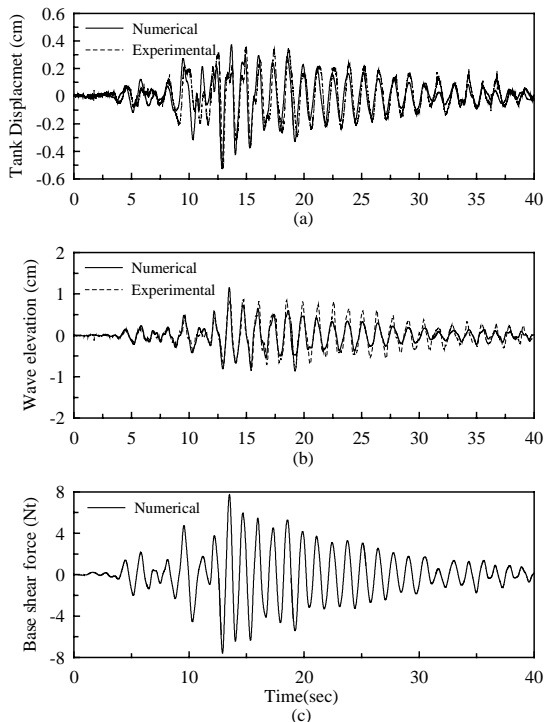


圖 11. 附加隔震裝置圓形水槽受集集 921 水平地震數值計算與實驗比較

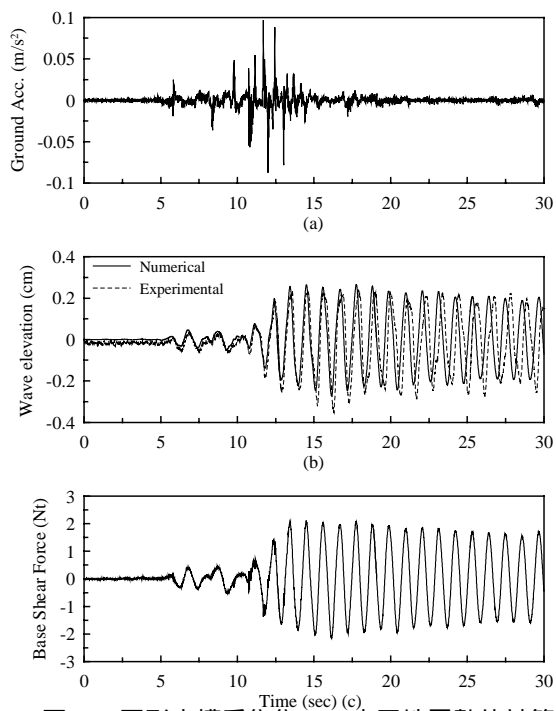


圖 10. 圓形水槽受集集 921 水平地震數值計算與實驗比較

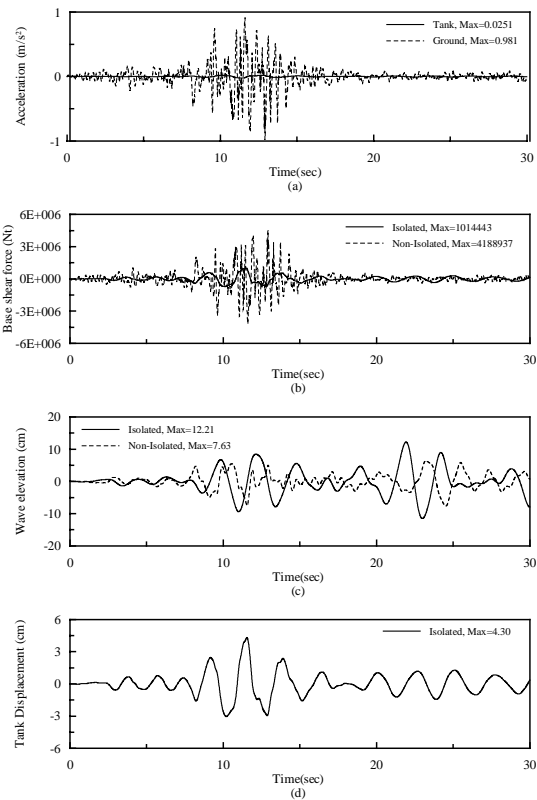


圖 12. 附加隔震裝置大型油槽受集集 921 水平地震數值計算