



# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 承受地震之儲油槽結構之理論分析、隔震設計、及模型試驗

### Theoretical Analysis, Vibrational-Isolation Design, and Model Test of Oil Tank to Earthquake

計畫編號：NSC 90-2211-E-002-061

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：陳永祥

計畫參與人員：葛家豪

計畫參與人員：呂宗修

國立台灣大學土木工程學研究所

國立台灣大學土木工程學研究所

國立台灣大學土木工程學研究所

#### 一、中文摘要

本研究著重於儲油槽內液體之水沖激動力特性研究，討論當地震侵襲時內部液體對槽壁作用力的影響，並研究儲油槽隔震設計的效益。本研究以邊界元素法，配合二階泰勒級數展開以及 Lagrangian 座標描述法求解油槽內液體沖激問題，結合電腦數值模擬及模型試驗，探討儲油槽因地震所引致之水沖激特性以及隔震效果。

**關鍵詞：**儲油槽，隔震分析，邊界元素法  
水沖激

#### Abstract

This study is focused on the free surface sloshing phenomenon inside an oil tank subjected to ground excitations. The seismic isolation for an oil tank is also investigated in this study. The Boundary Element Method with the Taylor series expansion is adopted to solve the dynamic behavior of the liquid in the tank, and then the state vector is used to simulate the interaction between the oil tank and the isolator. A small-scale experiment is included in this study to show the efficiency of seismic isolations.

**Keywords:** *Oil tank, Earthquake isolation, BEM, Liquid sloshing*

#### 二、緣由與目的

目前工程界普遍採用的儲油槽結構設計，主要先考量靜力載重，再乘以一放大係數，做為動態時之外力影響，進行結構分析及設計，然而，此一方法並未考量真實動態的情況，無法真正瞭解液體衝擊及波動行為，如遇大地震來襲，可能會產生災害發生。此外，儲油(或水)槽直接建在地面上，會直接受到地震的作用，儲油槽內部儲存有大量的油(或水)，受到地震會引起水沖激現象，往往產生很大的波動及動態液體壓力作用在槽壁上，造成槽體損壞。

儲油(或水)槽結構分析較為複雜，因其牽涉到結構與液體之互制作用，本研究主要目的為討論當地震來襲時，儲油槽壁上承受液體壓力的特性，以及在儲油槽底部安置隔震基礎時其內部液體與隔震層動力反應之數值模擬方法，以充分了解隔震前後液體的運動情況與隔震效果，作為未來實際應用與設計之參考。

#### 1. 基本計算理論與方法

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：

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

其中  $W(x, y, z, t)$  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

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

由圖 1 可知，油槽的邊界型態可分為三種，水槽側壁  $X_l$  及  $X_r$ 、油槽底部及自由液面  $X_f$ 。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  $\vec{R}$  為自由液面上質點之位置向量， $X_f$  之運動邊界條件可表示如下：

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

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

$$\frac{DW}{Dt} = -g\gamma + \frac{1}{2} |\nabla W|^2, \quad \text{在 } X_f \text{ 上}, \quad (4)$$

$g$  為重力加速度， $\gamma$  為液面高度， $\dots$  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  $X_l$ 、 $X_r$ 、 $X_b$  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，由於本研究中僅考慮油槽受到 X 方向強制運動時之情況，故底部邊界的法向量方向速度為零，其邊界條件為：

$$\frac{\partial W}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } X_b \text{ 上}, \quad (5)$$

$\frac{\partial}{\partial n}$  為邊界上向外法向量之微分。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

$$\frac{\partial W}{\partial n} = V_n(x, y, z, t), \quad \text{在 } X_l \text{ 及 } X_r \text{ 上}, \quad (6)$$

$V_n(x, y, z, t)$  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  $X(X_l \cup X_b \cup X_r)$  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：

$$c(Q)W(Q) + \int_X W(S) \frac{\partial G(S, Q)}{\partial n} dX = \int_X G(S, Q) \frac{\partial W(S)}{\partial n} dX \quad (8)$$

$c$  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  $(\langle, g, \gamma)$  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  $(\langle, g, \gamma)$  移動至  $(\langle', g', \gamma')$ ，如圖 2 所示，邊界條件(3)限制住新的質點位置  $(\langle', \gamma')$  必須仍在自由液面上，因此  $\langle'$  及  $\gamma'$  可以二階泰勒級數對  $\langle$  及  $\gamma$  展開後得：

$$\dot{\zeta}'_i = \zeta_i + Ut \frac{D\zeta_i}{Dt} + \frac{Ut^2}{2} \frac{D^2\zeta_i}{Dt^2} + O[(Ut)^3],$$

$$i=1, 2 \quad (9)$$

其中， $\zeta_1 = \zeta$ ， $\zeta_2 = \mathcal{Y}$ 。同理，速度勢  $w$  之變化亦可如下所示：

$$w' = w + Ut \frac{Dw}{Dt} + \frac{Ut^2}{2} \frac{D^2w}{Dt^2} + O[(Ut)^3] \quad (10)$$

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。

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。由於本研究探討油槽受到 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 5 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

$$F_l = \int_{x_w} p_x dX, \quad (11)$$

$F_l$  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：

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g(t) + F(t), \quad (12)$$

其中  $M$  為油槽結構與隔震層質量總和， $C$  為隔震層阻尼量， $K$  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

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

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K/M & -C/M \end{bmatrix}, \quad E = \begin{Bmatrix} 0 \\ -1 \end{Bmatrix},$$

$$B = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1/M \end{Bmatrix}, \text{ 接下來可將上式進行時間離散，得}$$

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

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。

### 三、結果與討論

本研究首先針對儲油槽底部反制力進行討論，本研究採用中油 10000 公秉儲油槽為例，模擬其受 921 地震地表加速度侵襲時之反應。油槽直徑為 30.48 公尺，內部液體高度為 13 公尺，假設油槽結構體為剛性，分析模型如圖 4 所示，由線性理論可得內部液體沖激之第一自然振頻為 1.08 rad/sec。圖 5 為本算例所採用之 921 地震地表加速度歷時反應，圖 6 為油槽底部剪力反應圖，比較直接計算出液體所造成的剪力反應與僅利用液體波高壓力差(靜水壓力)計算底部剪力，兩者相差甚多，此算例可說明若以靜水壓推估槽壁所受之壓力，會與實際狀況有所出入，在工程應用上宜審慎考慮。接下來將討論儲油槽隔震效應分析，考慮油槽內部液體質量為 9485600 公斤，槽體結構質量為 500000 公斤，底部黏彈性基礎隔震墊之勁度為 39942400 N/m，阻尼為 3994240 N·S/m。圖 7 為油槽右側自由液面波高起伏歷時圖，由於本算例油槽內液體擺動週期相當長，其波高反應主要受到油槽位移之影響，而隔震後油槽位移會增加，故波高也隨之增大。圖 8 表示液體震動後於油槽底部所產生剪力歷時反應，圖 9 則為隔震後油槽所承受之底部加速

度。由計算結果，可明顯看出加入隔震層後，油槽承受之加速度與產生的底部剪力明顯降低，充分達到隔震的目的。圖 10 為本研究計劃之小型結構試驗示意圖，本研究以振動平台模擬地表運動，針對一直徑 60 公分之圓形水槽進行隔震實驗。試驗中水位為 10 公分，液體質量為 28.27 公斤，槽體及隔震層總質量為 29.8 公斤，隔震用之彈簧勁度為 0.51kgw/cm，阻尼係數約 0.13。圖 11 說明隔震後油槽承受之加速度會降低，達到隔震的效益。此外本試驗中液體基本振動頻率為 5.13rad/sec，由圖 12 之結果觀察，隔震後槽內右側點自由液面的振幅較未隔震時小，與前述之大型油槽且液體擺盪週期很長之計算結果剛好相反。

#### 四、參考文獻

- 1.Chen, Y. H., Hwang, W. S. and Ko, C. H., "Numerical Simulation of the Three-Dimensional Sloshing Problem by Boundary Element Method," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, **23**(3), pp. 321-330, 2000.
- 2.Malhotra, P. K., "New Method for Seismic Isolation of Liquid-Storage Tanks," *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, **26**, pp. 839-847, 1997.
- 3.Jang-Ho Park, et. al, "Seismic Isolation of Pool-Type Tanks for the storage of Nuclear Spent Fuel Assemblies," *Nuclear Engineering and Design*, **199**, pp. 143-154, 2000.

#### 五、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

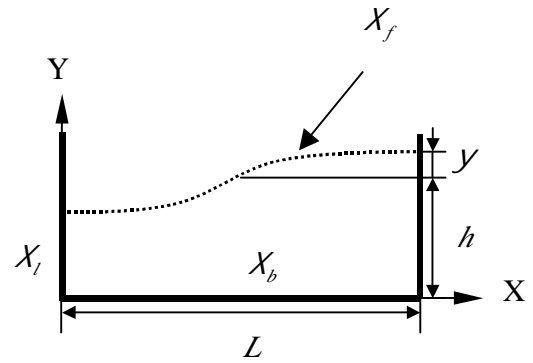


圖 1. 儲油槽計算區間及邊界示意圖

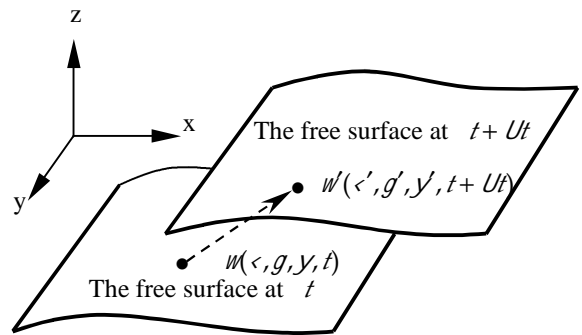


圖 2. 自由液面變化示意圖

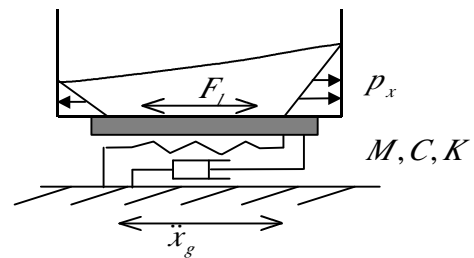


圖 3 儲油槽黏彈性基礎隔震示意圖

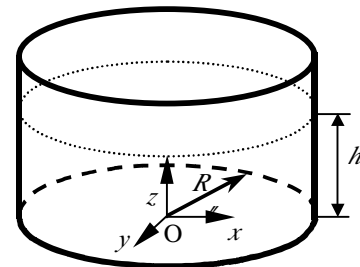
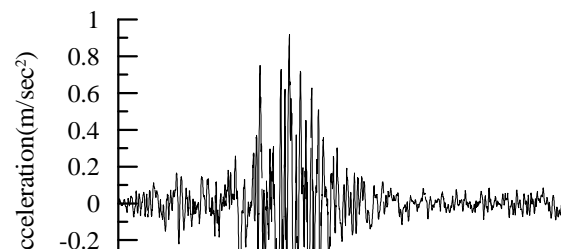


圖 4. 圓柱儲油槽模型圖



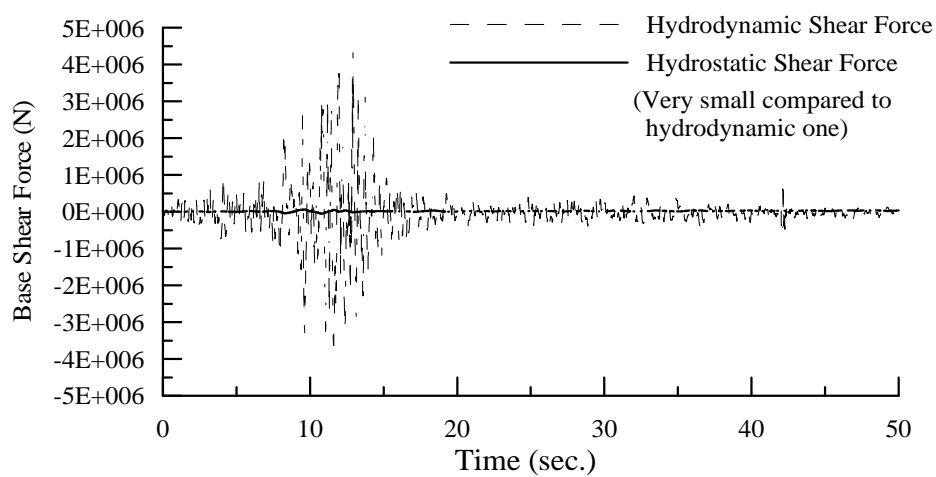


圖 6 底部剪力比較(動壓力與靜水壓力)

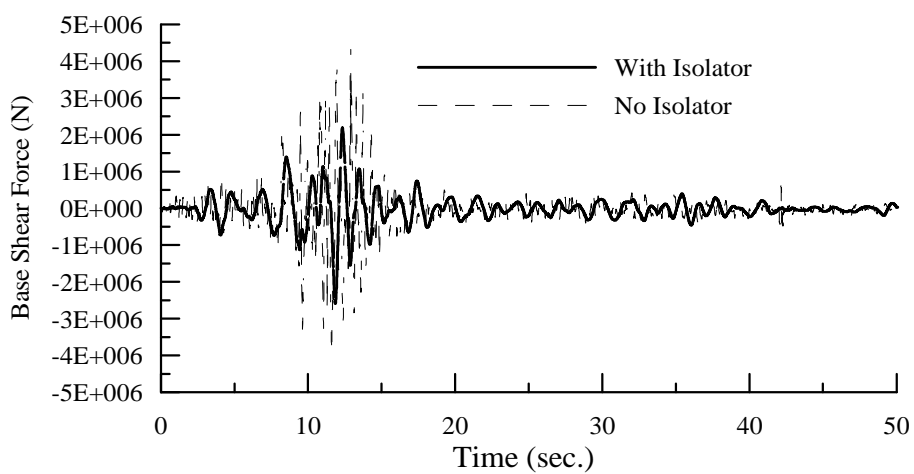


圖 7. 隔震前後底部剪力歷時反應圖

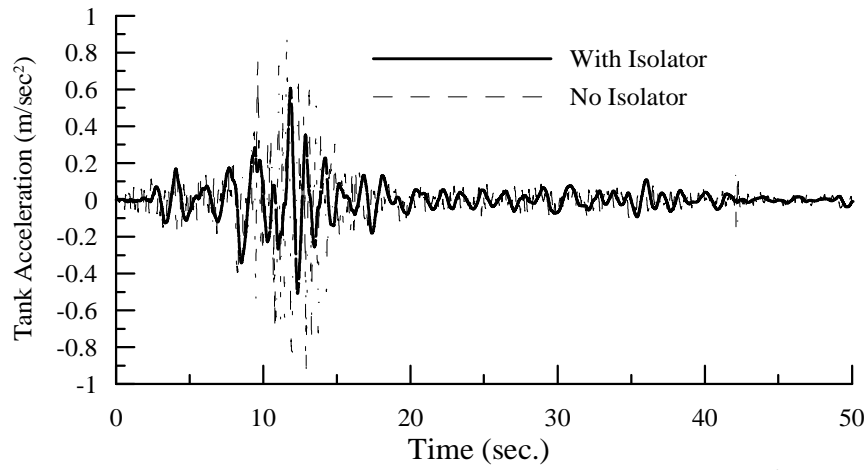


圖 8. 隔震前後槽體承受外力加速度反應歷時

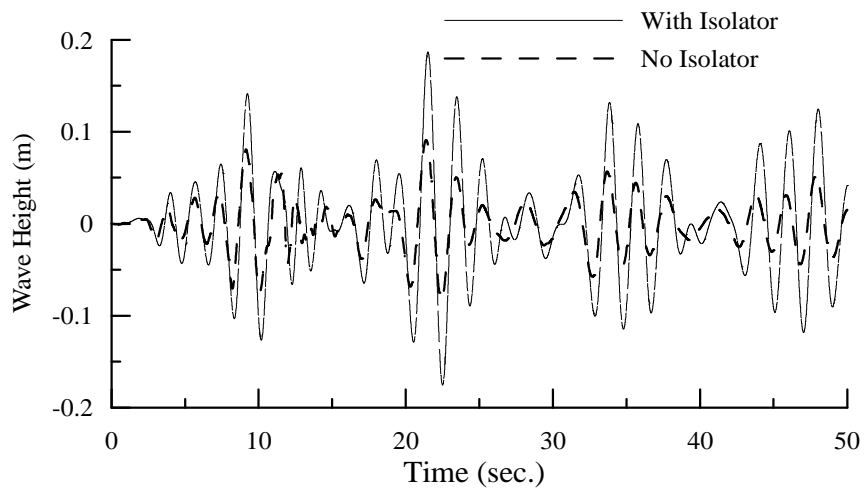


圖 9. 隔震前後槽體右側自由液面波高反應歷時

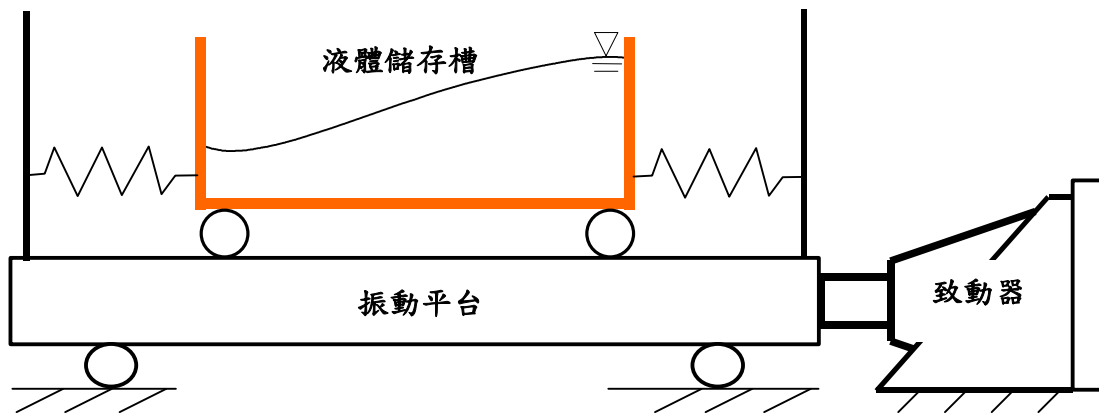


圖 10. 儲油(水)槽試驗模型(有隔震)

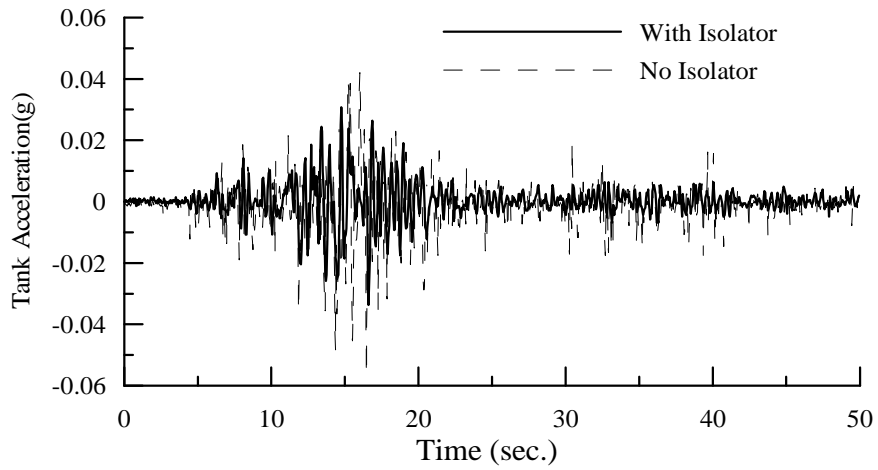


圖 11. 隔震前後槽體承受之外力加速度反應歷時(實驗值)

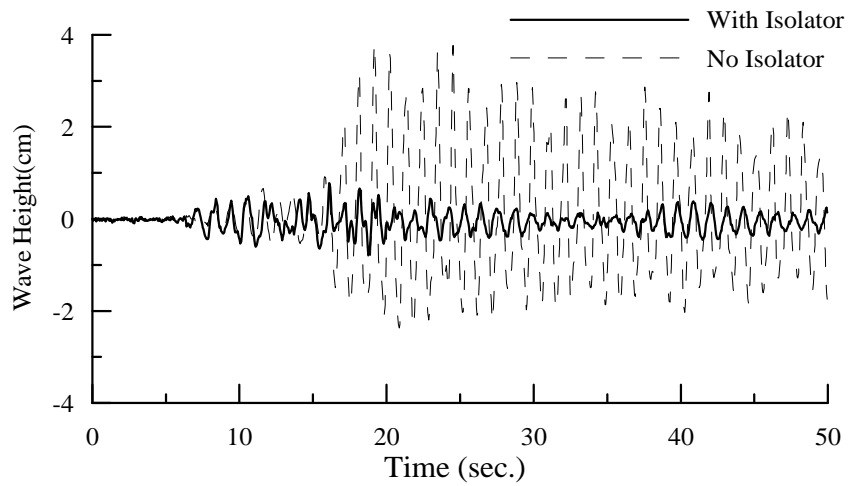


圖 12. 隔震前後槽體右側自由液面波高反應歷時(實驗值)