

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

U 形管諧調液體阻尼器設計參數之研究

Design Parameters of Tuned Liquid Column Damper

計畫編號：NSC88-2211-E002-010

執行期限：87 年 8 月 1 日至 88 年 7 月 31 日

主持人：陳永祥

台灣大學工學院土木工程學研究所

摘要

本文以數值計算 U 形管諧調液體阻尼器(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)對結構物的減震效果。首先分析 TLCD 液體阻尼器之動力特性。並討論系統承受簡諧擾動及白色雜訊擾動時 TLCD 參數對系統反應的變異性。

關鍵詞：U 形管諧調液體阻尼器、水沖激

Abstract

The seismic performance of TLCD is examined by numerical simulations. A description of the system performance is obtained for linear-SDOF structures using harmonic and white noise forced oscillations. Additionally, the variations of the optimum parameters in TLCD are also discussed.

Keywords: TLCD, Liquid Sloshing

1. 前言

臺灣位處環太平洋地震帶西側，地震對臺灣的威脅不言而喻。為降低結構物受地震之損害，除加強結構本身的耐震設計之外，尚可考慮外加隔、減震裝置。而於減震機構中又常見以質量效果(Mass Effect)作為結構減震的原理。

本文即針對一單自由度結構，附加一個 U 形管狀水槽稱為 U 形管諧調液體阻尼器(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)，藉由 U 形管水平管部份液體慣性力、垂直管部份之擬靜態水壓、液體阻尼力、及液體動量變化等與結構物產生互動，而產生減震效果。

2. 動力特性分析

如圖 1 所示之 U 形管，兩垂直管中心線間的距離為 B ，當液體為靜止時由水平管之中心線算起，垂直管內液面高度為 h 。而 x 及 u 座標則分別代表 U 形管水平運動及液面的上下運

動。為便於分析，於推導運動方程式時係基於下列兩項假設：

1. 一般 U 形管液體阻尼器(TLCD)內的液體為水，管內液體係假設為不可壓縮性流體。
2. 因兩垂直管中心線間的距離(B)遠大於管徑(D)，當 U 形管承受 x 方向之水平擾動，垂直管內液面產生 u 方向之上下運動時，係假設 TLCD 水面不產生任何波浪，即液體的運動係為單自由度。

如圖 2 所示，為一單自由度結構物，於其上附加一個被動式 U 形管液體阻尼器(TLCD)後，整個結構系統即可以模擬成二度自由度系統。圖 2 中、 m_1 、 C 、 K 係代表主結構系統的質量、阻尼係數及勁度係數， $m_2 = m$ 係代表 U 形管內液體質量。x 及 u 則分別代表主結構物對地表的相對位移及 U 形管內之液面變化。

若結構物承受地表水平加速度 \ddot{u}_g 之作用。則此二度自由度系統之運動方程式如下所示：

$$\begin{pmatrix} M & m\alpha \\ m\alpha & m \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{u} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} C & 0 \\ 0 & mc \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{u} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} K & 0 \\ 0 & m\omega_u^2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -M \\ -m\alpha \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (1)$$

上式中 $M = m_1 + m_2$ 係代表此二度自由度系統的總質量， $\alpha = B/L$ 為水平管長比。令 $\mu = m/M$ 、 $\omega_p^2 = K/M$ 、 $C = 2\eta\omega_p M$ ，且假設系統承受微小振幅擾動，而以線性液體阻尼近似，則 $c = 2\xi\omega_u$ 。可將式 1 無因次

化得式 2 如下所示：

$$\begin{pmatrix} 1 & \alpha\mu \\ \alpha\mu & \mu \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{u} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} 2\eta\omega_p & 0 \\ 0 & 2\xi\mu\omega_u \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{u} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_p^2 & 0 \\ 0 & \mu\omega_u^2 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -1 \\ -\alpha\mu \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2)$$

參閱文獻[8]，文中曾以一單擺模擬為單自由度結構物，於單擺上裝置 TLCD 後，以掛有偏心質量塊之交流伺服馬達，利用馬達旋轉時所產生的離心力水平分量，近似為簡諧地表水平加速度作用下的強迫振動實驗。若令主結構系統參數 $M = 212.84\text{kg}$ 、 $K = 2593.6\text{kg}(\text{rad}/\text{sec})^2$ 、 $\eta = 0.002$ ，可求得 $\omega_p = \sqrt{M/K} = 3.506\text{rad}/\text{sec}$ ，設計阻尼器參數 $m \approx 2.0\text{kg}$ ($\mu \approx 0.01$) $\alpha = 0.795$ 、 $\xi = 0.0633$ 、 $\omega_u = 3.531\text{rad}/\text{sec}$ ，並輸入 $\ddot{u}_g = 0.5013\sin(3.506t)\text{cm}/\text{sec}^2$ 的地表水平加速度。由 2 式計算系統時間域的反應，可求得結構物的變位歷時圖如圖 3 所示、阻尼器液面變化歷時圖如圖 4 所示。地表、結構物及阻尼器液面之位移、速度及加速度相位歷時圖如圖 5、圖 6 及圖 7 所示，阻尼器之水平管部份慣性力 ($m\alpha\ddot{u}$)、阻尼力 ($2m\xi\omega_u\dot{u}$) 及回復力 ($m\alpha^2\omega_u^2 u$) 歷時圖如圖 8、結構物控制前後變位歷時圖如圖 9 所示。

由圖 3~圖 7，即可初步了解地表、結構物及阻尼器三者之反應關係；由圖 8 可知 TLCD 水平管部份慣性力 ($m\alpha\ddot{u}$)、阻尼力 ($2m\xi\omega_u\dot{u}$) 及回復力 ($m\alpha^2\omega_u^2 u$) 之大小，其中水平管部份慣性力來自於阻尼器之大部份內動能，回復力則對應於阻尼器位能，阻尼力

地表加速度與 TLCD 加速度隨時間保持完全反相之關係，由力的觀點，地表加速度代表外擾力，而 TLCD 加速度則表液體慣性力，由於結構物只同時承受地表外擾力及 TLCD 慣性力之擾動，故存在此一與地表外擾力反向之液體慣性力，便可使系統減震。

亦即可推論，TLCD 之減震機制為利用自然產生與外擾力完全反向之液體慣性力為主，液體阻尼之耗能等機制為輔。

3. 最佳化參數

本文之最佳化程序，採以直接建立之性能指標(Performance Index)，對裝置 TLCD 之單自由度結構物，分別承受簡諧擾動及白色雜訊擾動，模擬為風載重及地震載重之作用，並利用電腦模擬系統反應，當使該性能指標極小值下的阻尼器參數，則視為最佳參數之數值解。

首先假設外力擾動為簡諧型式 $\ddot{u}_g(t) = e^{i\omega t}$ ，則由式 2 可求得 x 及 u 方向之動力放大係數。

若直接以 x 向之動力放大係數(Dx)為判斷阻尼器特性之性能指標，則可針對常用的特定阻尼器參數，於簡諧擾動下，求出不同阻尼器阻尼比(ξ)及外力擾動頻率(β)下之 x 向及 u 向動力放大係數(Dx、Du)。以結構物阻尼比($\eta=0.02$)、阻尼器參數($f=0.995$ 、 $\mu=0.01$ 、 $\alpha=0.80$)時改變阻尼器阻尼比($\xi=0.000\sim\xi=0.120$)及擾動頻率($\beta=0.80\sim$

放大係數(Dx、Du)數據如圖 10 及圖 11 所示。於圖 10 中特定阻尼器阻尼比(ξ)時求取 x 向動力放大係數(Dx)對 β 值面積極小值下之該阻尼器阻尼比(ξ)，即為最佳之阻尼器阻尼比(ξ)_{opt} 數值解。

此外，改變阻尼器各參數後可求取 x 向動力放大係數(Dx)之關係圖如圖 12(a)~(e)所示，由該圖中可藉以了解阻尼器參數對系統反應之變異。

其次，若假設系統所受之擾動 $\ddot{u}_g(t)$ 為定態漫散擾動(Stationary Random Process)，根據漫散振動理論，主結構位移均方反應(Mean-Square Response)為

$$E[x^2] = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{x,\ddot{u}_g}(\omega)|^2 S_{\ddot{u}_g}(\omega) d\omega \quad (3)$$

上式中 $S_{\ddot{u}_g}(\omega)$ 為功率頻譜密度函數(Power Spectral Density Function)， $H_{x,\ddot{u}_g}(\omega)$ 表示主結構位移對應於地表加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 之轉移函數(Transfer Function)。

若假設擾動加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 為白色噪音漫散過程，即

$$S_{\ddot{u}_g}(\omega) = S_0 \quad (4)$$

則(3)式可化為

$$E[x^2] = S_0 \int_{-\infty}^{\infty} |H_{x,\ddot{u}_g}(\omega)|^2 d\omega \quad (5)$$

由以上推導可知，欲求得主結構位移均方反應，必須先求得於裝設 TLCD 後之主結構對應於地表加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 之轉移函數，故可將(2)式進行傅立葉轉換(Fourier Transform) 得到

$\{H_{x,\ddot{u}_g}(\omega)\}_{TLCD}$ ，其中下標 'TLCD' 表示主結構裝設了 TLCD。同理，可求得未裝設 TLCD 之結構位移對應於地表加速度 $\ddot{u}_g(t)$ 之轉移函數如下：

$$\{H_{x,\ddot{u}_g}(\omega)\}_{NOTLCD} = \frac{-1}{-\omega^2 + i\omega(2\eta\omega_p) + \omega_p^2} \quad (6)$$

並將 $\{H_{x,\ddot{u}_g}(\omega)\}_{TLCD}$ 、 $\{H_{x,\ddot{u}_g}(\omega)\}_{NOTLCD}$ 代入(5)式積分而得到 $E[x^2, \ddot{u}_g]_{TLCD}$ 及 $E[x^2, \ddot{u}_g]_{NOTLCD}$ 之值。

茲定義主結構於有無裝設 TLCD 下，主結構之位移均方反應比 R 為

$$R = \frac{E[x^2, \ddot{u}_g]_{TLCD}}{E[x^2, \ddot{u}_g]_{NOTLCD}} \quad (7)$$

式中 R 為主結構振態參數 (ω_p, η) 、TLCD 參數 (m, ξ, f, α) 之函數，且其中 $f = \omega_u / \omega_p$ 表 TLCD 頻率與主結構自然頻率之振頻比(Tuning Ratio)，並當 $R < 1.0$ 時表示裝設 TLCD 有效用。

若以主結構位移均方反應比(R)為系統之性能指標，則可求得阻尼器各參數對 R 值之關係如圖 13(a)~(h)。並求出一組 TLCD 參數 (m, ξ, f, α) 使主結構位移均方反應比 R 為最小。亦即求得滿足

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial m} = 0, \quad \frac{\partial R}{\partial \xi} = 0, \quad \frac{\partial R}{\partial f} = 0, \\ \frac{\partial R}{\partial \alpha} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

之聯立解。

4. 結語

本文首先分析了 TLCD 液體阻尼器之動力特性，得知 TLCD 對結構物的減震機制主要來自於自然產生與外擾力反向的水平管液體慣性力。

而針對系統承受簡諧擾動及白色雜訊擾動時的系統參數(質量比 μ 、水平管長比 α 、振頻比 f 及阻尼比 ξ)變異性，可得下列之結論：

(a)增加阻尼器水平管長比 α 值，可增加結構物與阻尼器之耦合力，而提升系統減震效果，然最佳水平管長比 α_{opt} 仍須考量空間大小及設計最大地表加速度來決定。

(b)阻尼器相對於主結構物之質量比 μ 值越大，則減震的效果越好，但隨質量比 μ 值增大，對結構物動力放大係數之邊際效用明顯遞減，故一般 μ 值以 0.02 為上限。

(c)最佳振頻比 f_{opt} 與擾動型式有關。且當系統承受簡諧載重時，最佳振頻比 f_{opt} 受質量比 μ 的影響很大。

(d)最佳阻尼比 ξ_{opt} 與擾動型式有關。而當調整阻尼比小於最佳阻尼比($\xi < \xi_{opt}$)時，結構反應有明顯增大的現象，然當阻尼比大於最佳阻尼比($\xi > \xi_{opt}$)時，結構反應增大的趨勢則較和緩，亦即調整 TLCD 的阻尼比時須避免 $\xi < \xi_{opt}$ 。

由於高阻尼比結構物減震效果對參數之敏感度較小，反之，低阻尼比結構物則較敏感，且可知於特定質量比 μ 值下。因結構物裝置 TLCD 後對低阻尼比結構物有明顯減震效果，對高阻尼比結構物則減震效果有限，故 TLCD 較適用於低阻尼比結構物。

參考資料

1. William C. Webster, "Analysis of The Control of Activated Anti-roll Tanks", The Society of Naval Architects and Marine Engineers, pp.15-18, Nov.1967。
2. J. H. Chadwick, "The Anti-roll Stabilization of Ships by Means of Activated Tanks", Division of Engineering Mechanics, Stanford University, Report 15, Dec.1950-Jun.1951。
3. S. B. Field, B.Sc.*(Fellow) and P.Martint, "Comparative Effects of U - Tube and Free Surface Type Passive Roll Stabilization System", The Royal Institution of Naval Architects, 1976。
4. Kiyoshi IWAI, "The Effect of the Anti - Rolling Tank at Actual Sea State", 西部造船會第 40 回例會演講, 昭和 45 年 5 月。
5. 瞿傳廉, 李肇胤, 李桂青, "U 型水箱對高層建築和高聳結構風振控制的試驗和研究", 建築結構學報, 第 14 卷第五期, 1993 年 10 月。
6. T. Balendra, C.M. Wang and H. F. Cheong "Effectiveness of Tuned Liquid Column Dampers for Vibration Control of Towers", Engineering Structures, Vol.17, No.9, pp.668-675, 1995。
7. 趙貞琦, "U 型管液體阻尼器對高樓減震之研究", 台人造船所碩士論文, 1996。
8. 陳敬欽, "U 型管液體阻尼器之主動控制設計及其在高樓減震之應用", 台人造船所碩士論文, 1997。

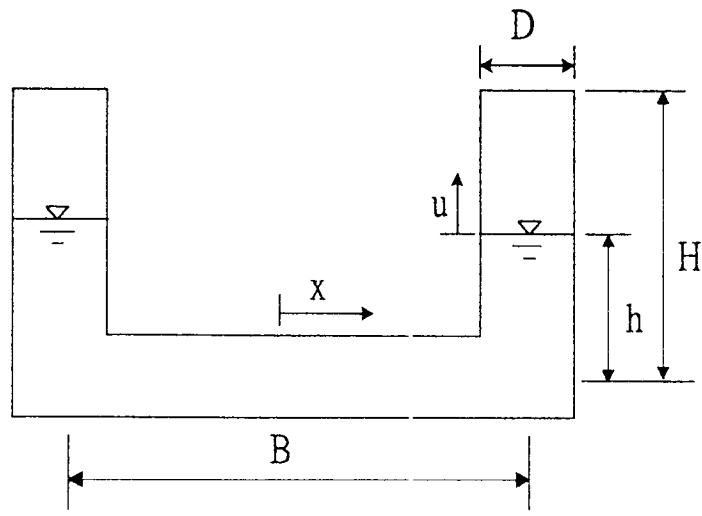


圖 1 U形管之基本尺寸圖。

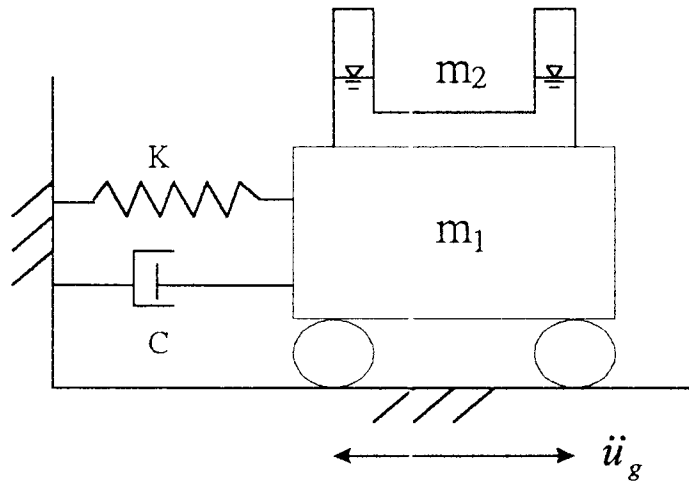


圖 2 TLCD-單自由度結構物耦合模式圖。

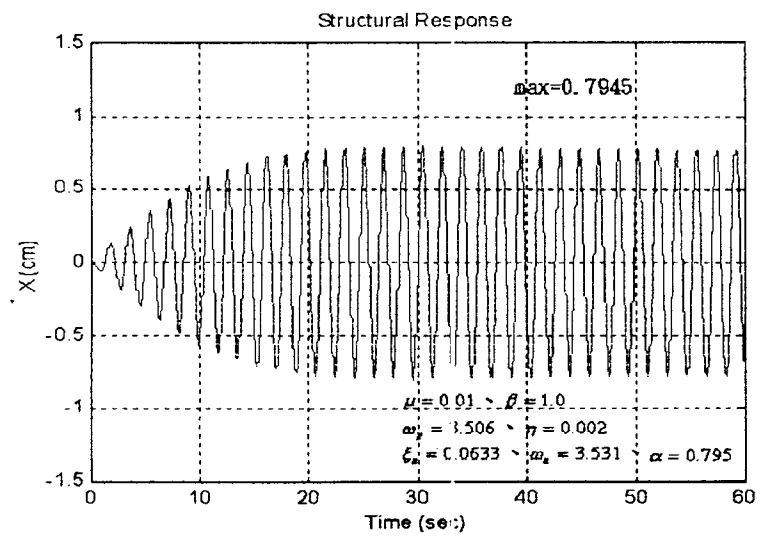


圖 3 結構物變位歷時圖(簡諧擾動)。

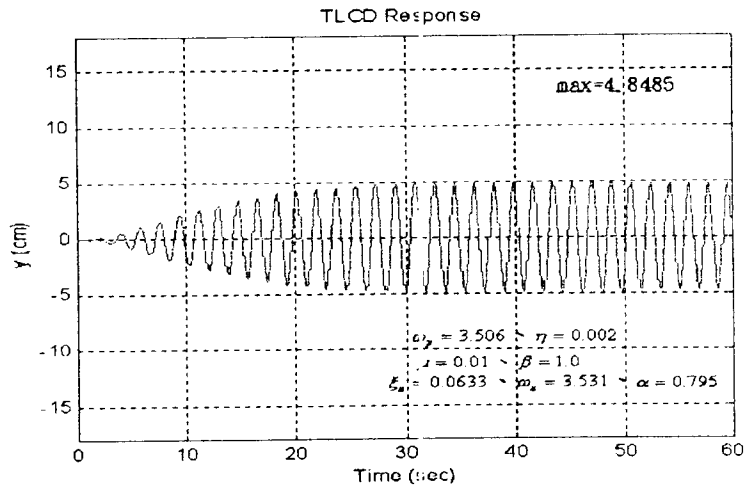


圖 4 阻尼器液面變化歷時圖(簡諧擾動)。

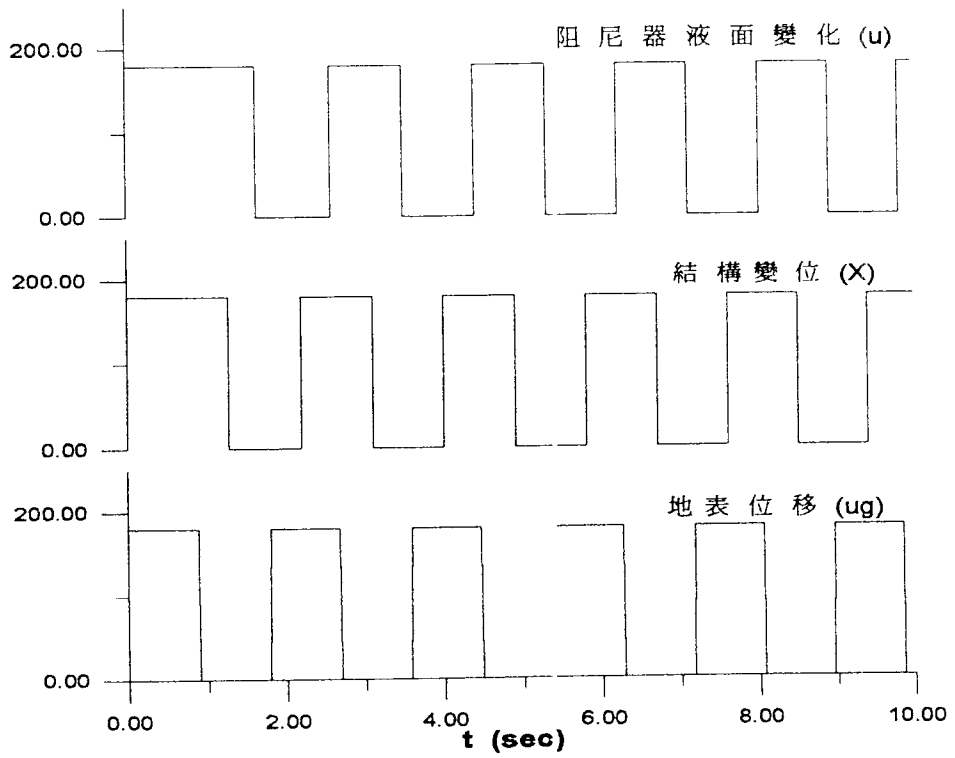


圖 5 地表、結構物及阻尼器液面位移相位歷時圖。

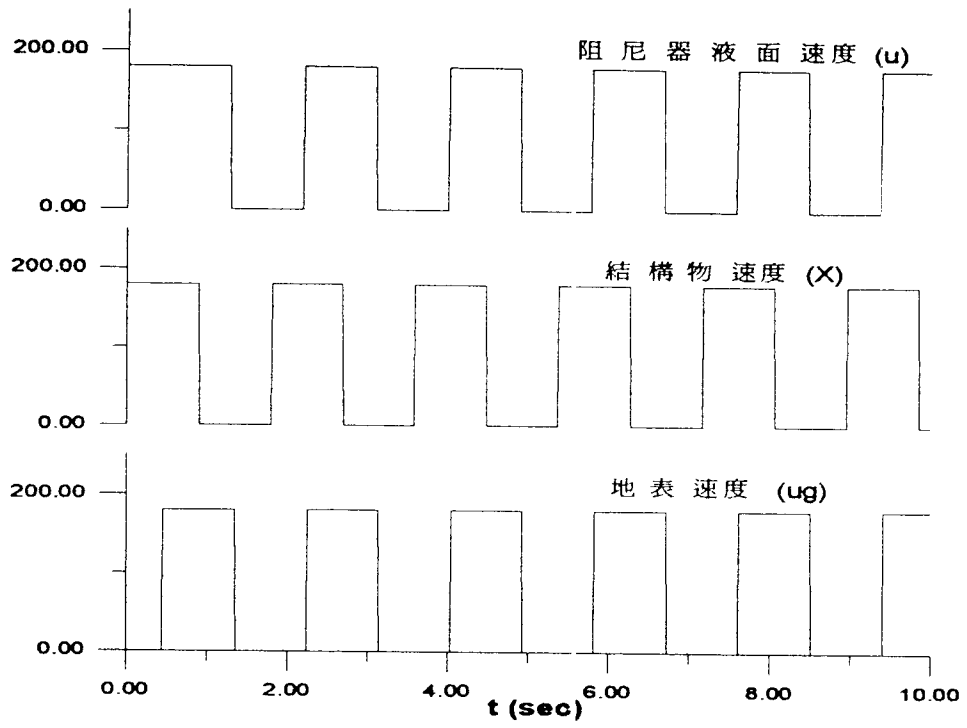


圖 6 地表、結構物及阻尼器液面速度相位歷時圖。

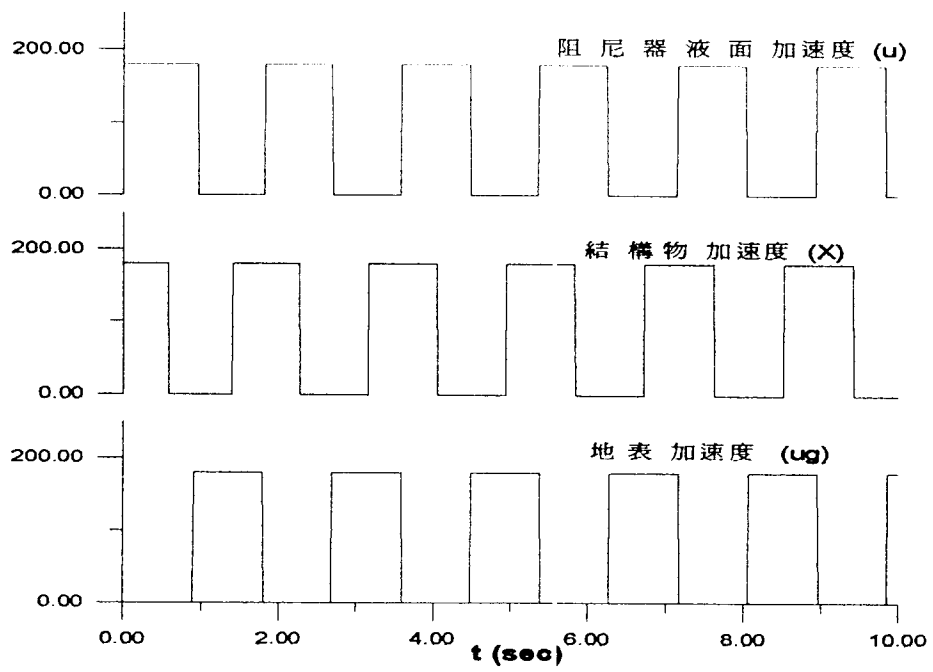


圖 7 地表、結構物及阻尼器液面加速度相位歷時圖。

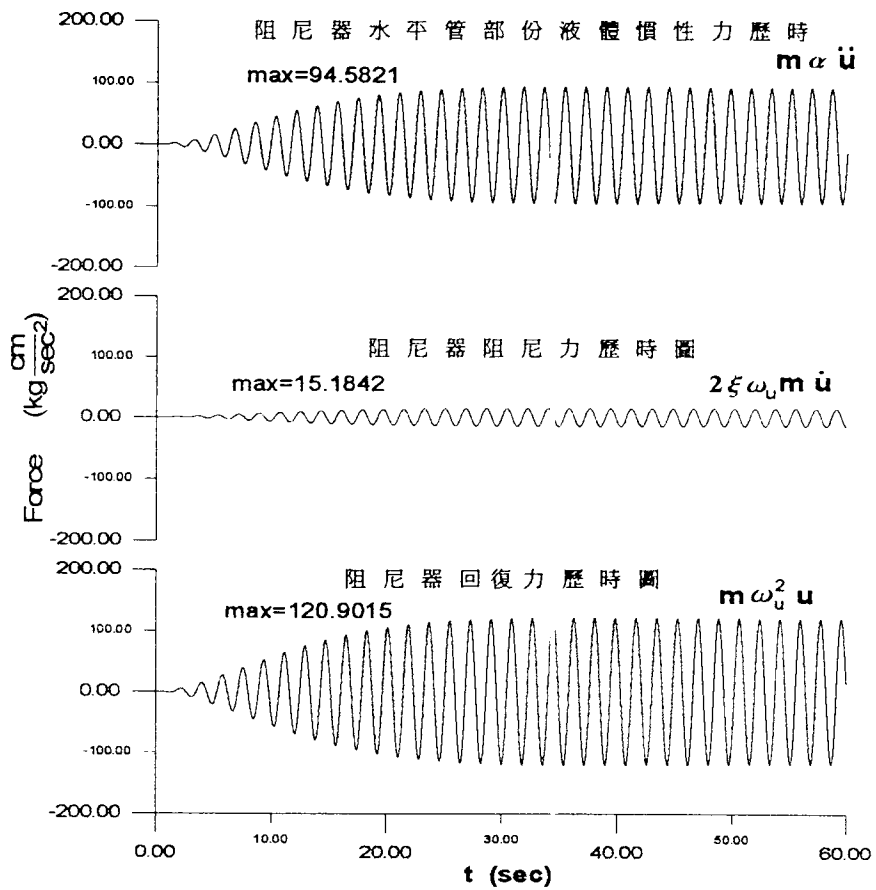


圖 8 TLCD 減震力、阻尼力及回復力歷時圖。

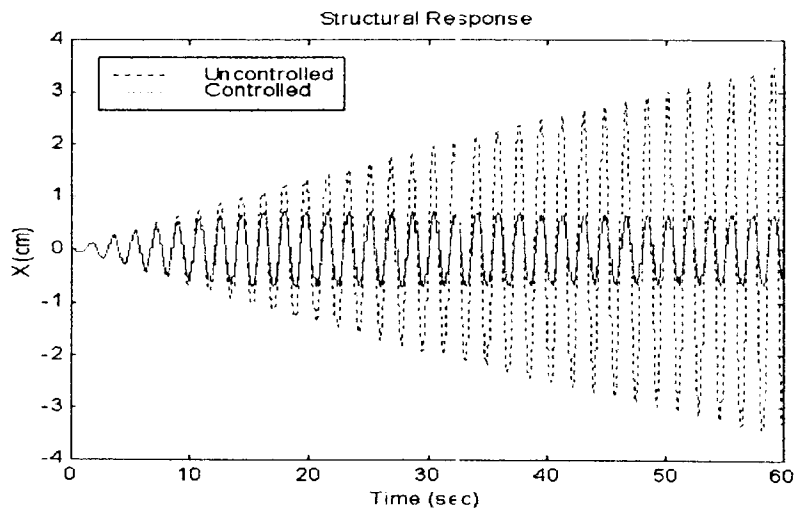


圖 9 結構控制前後變位歷時圖比較圖(簡諧擾動)。

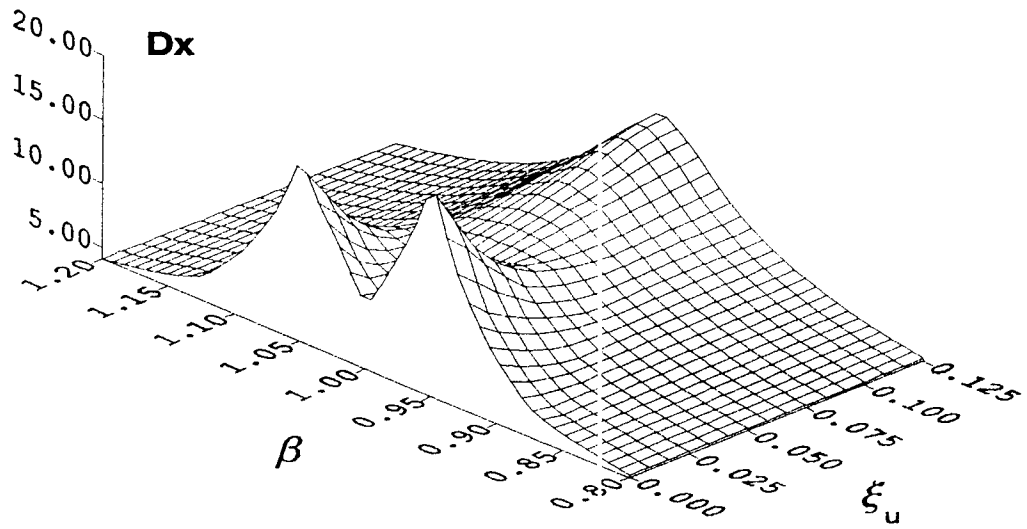


圖 10 x 向動力放大係數 D_x ($\eta = 0.02$ 、 $\mu = 0.01$ 、 $\alpha = 0.80$ 、 $f = 0.995$)。

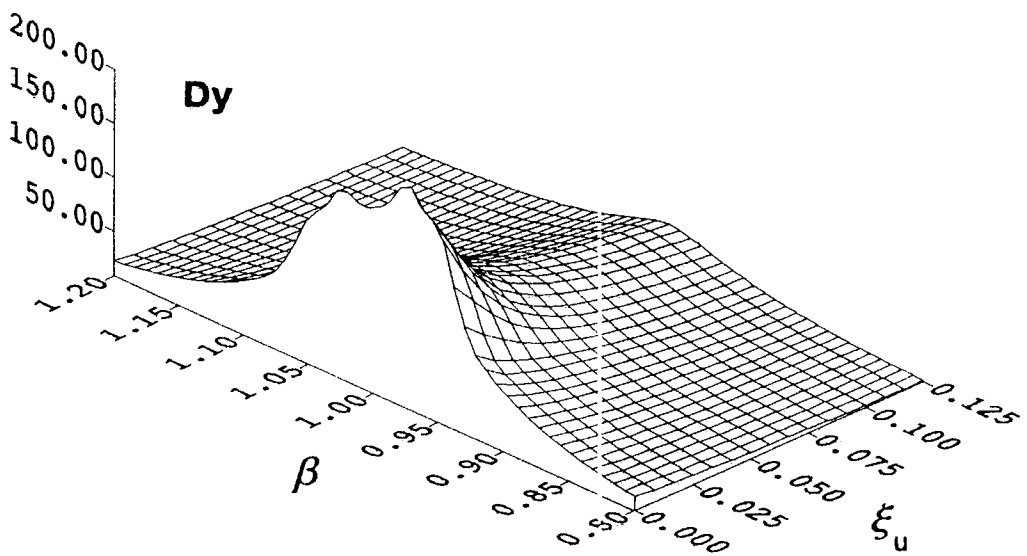
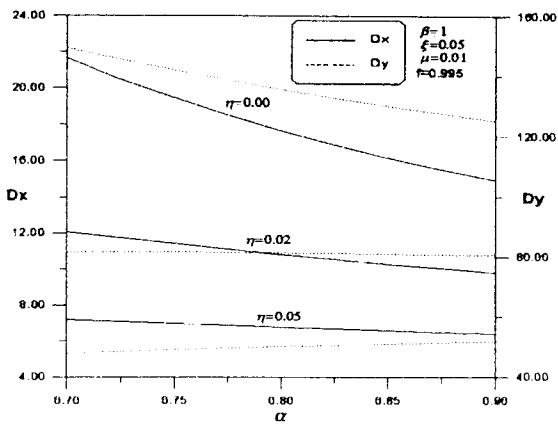
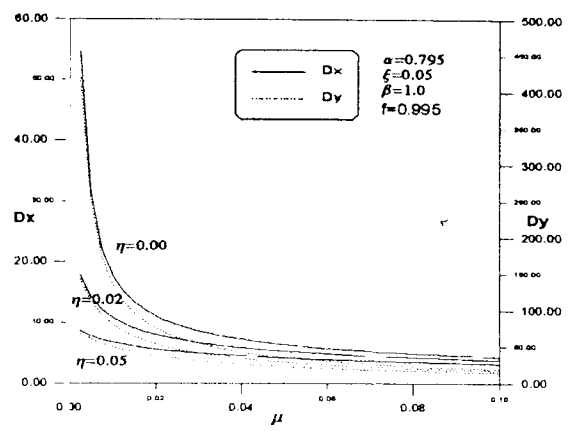


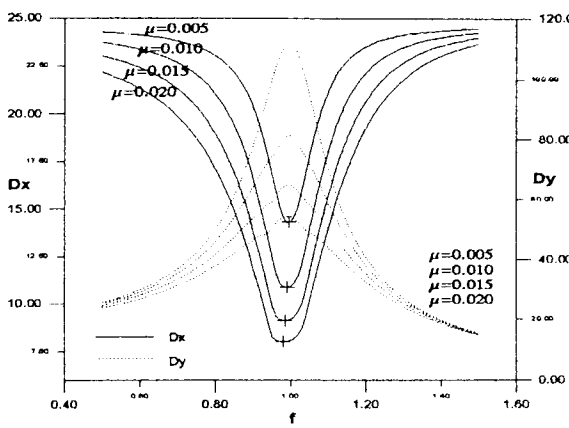
圖 11 u 向動力放大係數 D_u ($\eta = 0.02$ 、 $\mu = 0.01$ 、 $\alpha = 0.80$ 、 $f = 0.995$)。



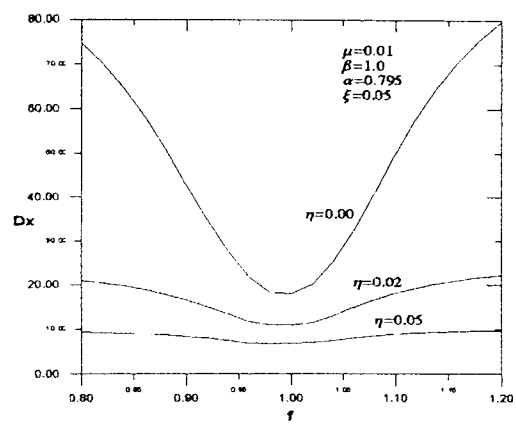
(a)



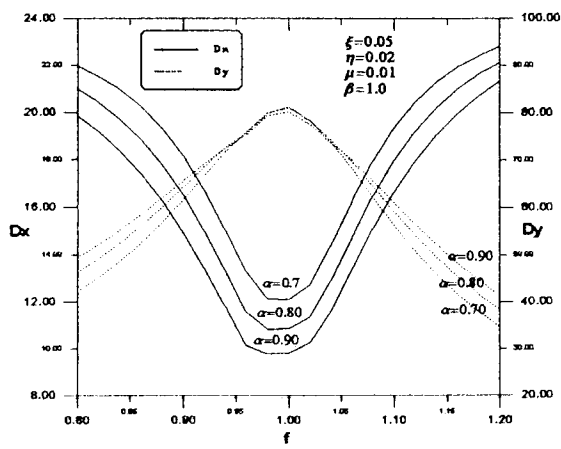
(b)



(b)

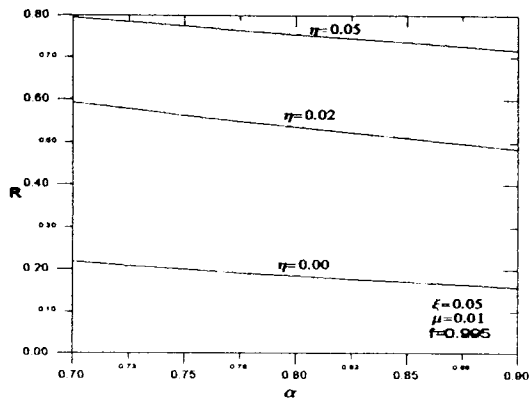


(d)

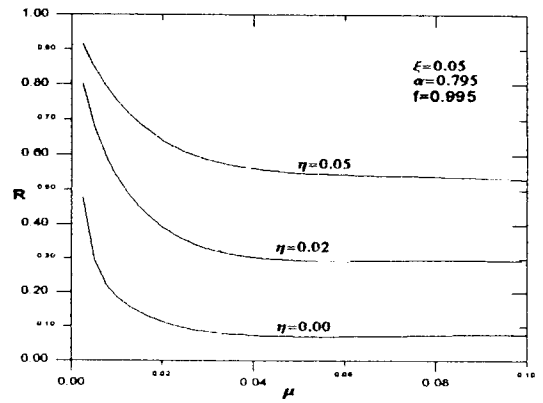


(e)

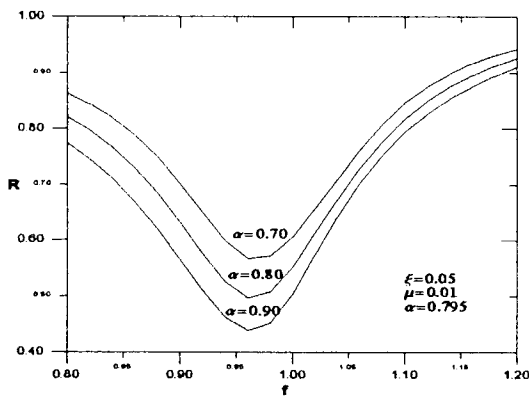
圖 12 TLCD 參數動力放大係數對不同參數之關係圖。



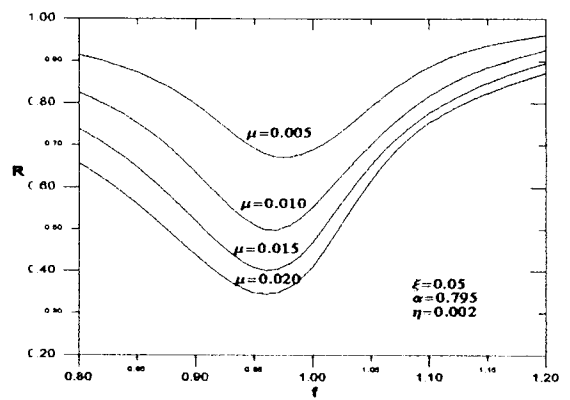
(a)



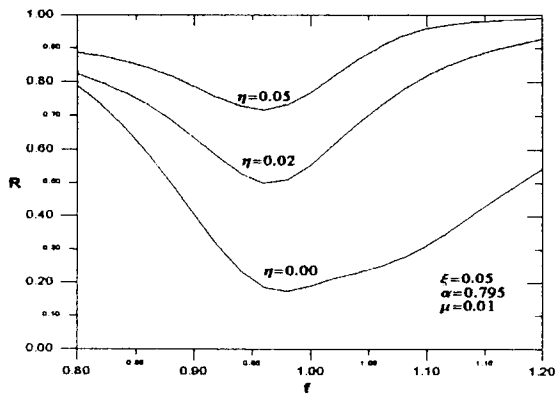
(b)



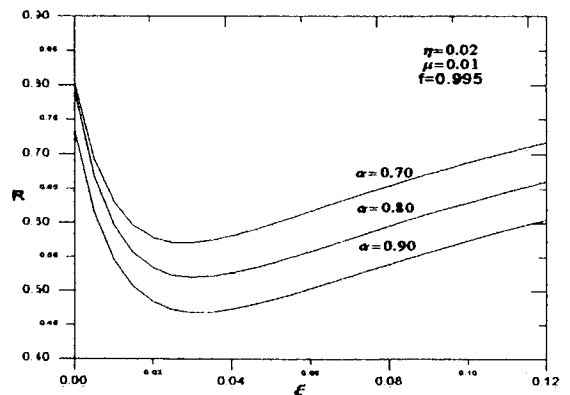
(c)



(d)

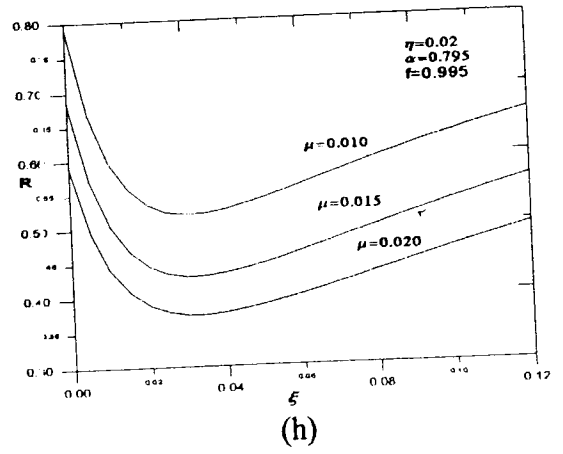
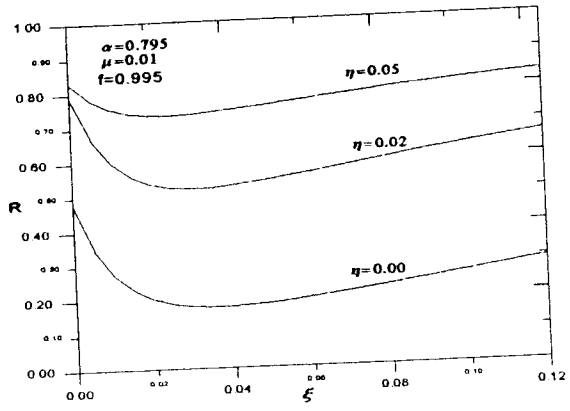


(e)



(f)

圖 13 TLCD 參數對 R 值之關係圖(白色雜訊擾動)。



(g) (h)
圖 13 TLCD 參數對 R 值之關係圖(白色雜訊擾動)。(續)