第一章　緒論

近年來，由於國內經濟的快速成長和營建技術水準的大幅提升，加上台灣地區地狹人稠，高層建築如雨後春筍般相繼而起，這些高樓建築結構的耐震設計，一般考慮外力作用之兩大來源，一為地震力，二為風力；而高樓建築結構設計上有別於傳統的鋼筋混凝土結構，具有質量輕、強度高、細長且自然頻率及阻尼較低等特性，故對風力所造成的擾動十分敏感。基於安全性與使用者的舒適性考量，風力設計往往是決定結構設計尺寸的重要因素。如何降低風力所引起的結構變位及加速度以改善其舒適性，遂成為土木結構工程領域之重要課題。

一般而言，要降低結構動力反應不外乎增加結構的阻尼及改變結構的自然頻率等方法，此即結構控制的主要目標。若依控制系統之運作需要額外提供能量與否，可將其劃分為被動控制(Passive Control)與主動控制(Active Control)兩大類[1]，茲分述如下：

被動控制系統不需提供能量即可運作，包括基礎隔震(Base Isolation)[2-5]、各式消能器[6-7]，及諧調質塊阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)[7-9]或調諧水柱消能系統(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)。基礎隔震裝置適用於低矮的結構，主要是利用基礎與地表間之柔性或曲面滑動支承延長結構週期以隔絕地震能量輸入上部結構，並提供阻尼降低基層之位移—如鉛心橡膠支承(LRB)與摩擦單擺支承(FPS)[10-18]。消能器藉由高阻尼材料或易降伏之鋼材，在反覆受力變形狀況下增加結構之消能能力，如黏彈性阻尼器

(Visco-elastic Damper)、加勁阻尼器(ADAS)及消能制震板[19]等。諧調質塊阻尼器則是利用與主結構振頻相近之次結構系統吸收大部份振動能量的特性來降低主結構的反應。

主動控制包括主動鋼鍵系統(Active Tendon System)、主動斜撐系統(Active Bracing System)，以及質塊制動器(Active Mass Damper, AMD)[20-27]。其中質塊制動器係由被動式的諧調質塊阻尼器演化而來。這些控制系統的目的在於改變結構之動力特性，特別是提高其阻尼。

此外，尚有能量需求較小之半主動控制系統[28]，如調閥式阻尼器(Variable Orifice Dampers)及電流變異阻尼器(Electro-rheological Dampers)等。

高樓建築對風極度敏感，尤其在超高層大樓的結構設計中，抗風設計往往是最關鍵的技術瓶頸。為能同時滿足結構安全及舒適性的設計要求，常須採用結構控制技術加以克服。過去二十年中，調諧質塊阻尼系統是高樓抗風設計最常用的結構控制系統[29-30]，如加拿大多倫多 553 m 高的 CN Tower，美國波士頓 60 層高之 John Hancock 大樓，澳洲雪梨 305 m 高之 Center-point Tower 及 508m 高的台北 101 大樓(圖 1.1)等。惟近年來，TMD 有逐漸被調諧液態消能系統(Tuned Liquid Damper, TLD)取代的趨勢，其中又以調諧水柱消能系統(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)的應用最具潛力。TLD 有利於取代傳統 TMD 的條件包括：

- **維修需求低** (Less maintenance) — TLD 不需額外提供勁度及阻尼等機械裝置，需要維修之項目較 TMD 少。

- **具雙重功能** (Dual functions) — TLD 兼具抗風與消防功能；TMD 則無消防用途。
- **經濟效益高** (Cost-Effective) —TLD 系統構造簡單，可因地制宜利用既有之消防蓄水，毋須額外提供質塊，可節省工程及材料費；TMD 則無此條件。
- **技術已成熟** (State-of-the-Practice) —近年來有關 TLD 之理論已趨完備，不確定因素降低，有利於工程應用與推廣。

TLD 又分為調諧水波消能系統(Tuned Sloshing Water Damper, TSWD)與調諧水柱消能系統(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)，如圖 1.2 所示。茲將 TSWD 系統與 TLCD 系統之運作原理及其應用案例說明如下：

TSWD主要是藉由水槽之幾何形狀與儲水深度調整其自然頻率，並透過篩網製造紊流產生消能作用。TSWD依據水深與水運動方向長度之比值可分為淺水阻尼器與深水阻尼器，若比值小於 0.15 則視為淺水阻尼器。淺水阻尼器藉由流體的黏滯性與水面波的破壞提供消能的機制；深水阻尼器則是藉由設置隔版來增加阻尼。目前日本橫須賀市的Shin Yokohama Prince Hotel (SYPH)及千葉市的Gold Tower均使用TSWD系統進行抗風減振。Gold Tower於結構頂樓(高度 158m)安裝 16 組MCC Aqua Damper™(圖 1.3)，其為一盛水的方形容器，並在容器中加裝多重鋼絲網，用以增加Aqua Damper的消能能力。16 組MCC Aqua Damper™的總重量為 10ton，約為塔總重的 1%。

TLCD 系統最早被應用於船舶與海岸結構的晃動控制，主要藉由 U 型連通管內含之水柱總長度(有效長度)調整其自然頻率，並藉由閘

門、孔口板(orifice)或變化斷面製造落水頭損失(headloss)而產生消能作用。相較於 TSWD 系統而言， TLCD 系統整個 U 型連通管內之水柱均為有效質量，因此效能較佳。有關 TLCD 的研究課題在 90 年代蔚為風潮，Saoka 等人[31]首先推導水柱消能系統之運動方程式，隨後由 Sakai 等人[32]經由一系列的試驗加以驗證，其結果顯示，TLCD 系統的阻尼為非線性阻尼，其大小與落水頭損失及液體激盪速度的平方成正比。此外，試驗的資料進一步指出，孔口阻尼(orifice damping)的非線性度(nonlinearity)並不顯著，因此對於窄頻寬(narrow-band)的反應可利用等效線性(equivqlent linearization)[33,34]的方法進行分析。Sakai 等人更將 TLCD 系統應用於斜張橋塔之振動控制(圖 1.4)，以增加其穩定性，為土木結構應用的首例。Xu 等人[35]亦評估以 U 型 TLCD 系統應用於細長結構受到零均值平穩高斯(zero-mean stationary Gaussian process)風力作用的減振效益，分析時將運動方程式中的非線性孔口阻尼項以一等效阻尼係數取代，因此可求得輸入與輸出之頻域反應函數，並將分析結果與 TMD 控制的結果進行比較。分析結果顯示，結構以 TLCD 系統進行控制的反應折減率可達到以 TMD 控制的效果。Hitchcock 等人[36]根據 U 型 TLCD 系統的運作原理發展液態水柱振動消能器(Liquid Column Vibration Damper, LCVD)，可依據所需之減振效果調整水平段斷面積與垂直段斷面積的比例(變斷面系統)。文中探討面積比(垂直段斷面積/水平段斷面積)、垂直斷水柱高度、水平段長度及初始擾動振幅等參數對於 LCVD 之振動頻率及阻尼比的影響。Balendra[37]探討 TLCD 應用於高塔結構抗風的研究，其結果顯示，當 TLCD 系統與結構之振動頻率一致時，

TLCD 具有良好的控制效果，且孔口板開孔比在 1.0 與 0.5 時，TLCD 系統之減振效益最佳。Gao[38]及 Chang、Hsu[39]則進行 TLCD 系統之最佳化參數設計分析，並評估其控制效益。由 Gao 的研究結果顯示，當結構受簡諧擾動時，TLCD 系統對於結構的峰值反應具有良好的折減效果。Xue 等人[40]利用 TLCD 系統針對橋面板受到風力作用所產生的扭轉運動(pitching motion)進行控制；Won[411]及 Sadek[42]則探討以 TLCD 應用於結構防震的性能表現。由於結構受到環境擾動的作用可能產生兩正交側向振動及扭轉反應，因此可將兩組 TLCD 分別置於兩正交軸向進行控制。此外，Shum 等人[43]則提出多重調諧水柱消能器(Multiple TLCDs)之設計，俾便同時控制結構數個振態的反應，如此不僅可降低每個 TLCD 的尺寸，使建造、安裝更為容易，並可於有限的空間上進行較佳的配置設計，提升控制效果。Yalla 等人[44]利用半主動 TLCD 系統進行結構振動控制，根據結構的振動反應利用模糊(fuzzy)控制法則調整閥門(valve)的開孔大小，以達到較佳之減振效果。Chen 等人[45]則提出主動式 TLCD 系統針對單自由度擺動結構模型進行振動控制之理論分析與試驗驗證。主動控系統是由伺服馬達及螺旋槳(propeller)所構成，馬達驅動螺旋槳擾動液體所造成之作用力即為主動控制力。此外，C.C.CHANG 及 W.L.QU 等人【64】分別討論 TMD、TLCD、LCVA、C-TLD（圓柱）及 R-TLD（矩形）等系統，應用於高樓結構抗風減振效益之比較。

上述研究當中皆將 TLCD 之非線性阻尼以等效阻尼的方式模擬，因此本研究將提出一套非線性之分析模式，俾便真實模擬 TLCD 及變斷面 VLTCD（Variable TLCD）之動力反應。目前亞洲及北美地

區應用 TLCD 的高樓抗風工程，主要均由日本及加拿大各一家公司承攬，這些案例在 2000 年前後已陸續完成。舉例來說，在亞洲地區完成的新建工程包括：

日本東京的 Cosima旅館(圖 1.5)—該高樓建築為 26 層之鋼骨建築，總高 106.2m，屬細長型結構，易為風力誘發振動，故於頂樓安裝一組TLCD(重約 58 噸)作為抗風之用。根據Shimizu and Teramura[11]的研究顯示，裝設TLCD可降低該大樓之加速度反應達 50-70%。另外，東京的千禧塔(Millennium Tower，圖 1.6)、大阪的Hyatt旅館以及Ichida大樓都安裝了TLCD；中國大陸，則有上海經貿大樓採用TLCD作為抗風系統。

北美地區，有溫哥華 Wall Centre 住宅大樓[46](48 層，圖 1.7)安裝 TLCD 進行結構抗風控制(總用水量約為 600 噸)。該 TLCD 系統，除可降低風力振動反應，改善住戶的舒適性外，亦兼作緊急消防用水之功能。此外，在美國應用 TLCD 系統之案例還包括紐約的 Random House 及芝加哥 South Dearborn 等大樓。此外，煙囪、高塔均可安裝 TLCD 系統進行抗風減震，如圖 1.8 所示，TLCD 系統可應用之領域極為廣泛。

茲歸納 TLCD 系統在實際應用時較 TSWD 系統有利的條件如下：

- **概念簡單** (Conceptually simple) —TLCD之動力行為可模擬成單自由度系統；TSWD的理論分析模式則較複雜，結構動力特性不易掌握。
- **調頻容易** (Eazy-tuning) —無論是TLD或TMD，均係利用結構動力學原理—當控制系統與結構產生共振時，結構振動的能

量轉移至控制系統而達到減振作用，調頻(frequency-tuning)之精準度將影響控制效能。TLCD之自振頻率只與水柱之總長度有關，動力特性明確，容易決定；TSWD具多重振頻，動力特性不易調控。

- 效能佳 (Efficient) —TSWD只有接近水槽表面部分之液體因激盪運動(sloshing motion)而有減振貢獻；TLCD則整個U型連通管內之水柱都為有效質量。換言之，TLCD可以較少的水量達到較TSWD更佳之控制效能。
- 技術門檻低、成果易落實 —TLCD系統構造簡單，且能因地制宜，同時結合消防蓄水與抗風減振雙重功能，故其經濟效益遠超過其他抗風系統，未來勢必成為高樓減振系統之主流。

未來 TLCD 系統勢必成為高樓減振系統之主流，因此本研究除了建立 TLCD 系統之非線性理論分析模式外，並製作一組等斷面 TLCD 及變斷面 VTLCD 元件模型以進行元件測試與性能測試(振動台試驗)。本文第二章為等斷面調諧水柱消能系統之理論分析，主要推導運動方程式與建立非線性數值解析模型，並介紹水頭損失係數之系統識別及線性迴歸理論。第三章為變斷面調諧水柱消能系統之理論分析，主要推導 VTLCD 之運動方程式與建立非線性數值解析模型，並透過參數研究了解消能系統應用於控制之減振效益。

第四章為等斷面調諧水柱消能系統之試驗與分析，包括利用等斷面 TLCD 系統之元件測試與性能測試，以探討等斷面 TLCD 系統之減振效益，並驗證數值解析模式之精確性。第五章為變斷面調諧水柱消能系統之試驗與分析，包括變斷面 VTLCD 系統之元件測試與性能

測試，以探討三段式變斷面 VTLCD 系統之減振效益及解析模式之精確性。第六章則進行台北 101 大樓安裝 TLCD 系統之抗風減振性能評估，並將分析結果與單擺式 TMD 之控制效果進行比較。第七章為結論與建議。

第二章　等斷面調諧水柱消能系統

2.1 等斷面 TLCD 系統之運動方程式

圖 2.1 所示為一 U 型等斷面調諧水柱消能系統(Tuned Liquid Column Damper, TLCD)，其運動方程式推導基本假設如下：

（a）、當 TLCD 基座受到水平擾動(u_g)作用時，水柱激盪的振幅為 x_f，由於任何時刻液面不得低於 TLCD 水平段管徑 D，因此須滿足

$$\left|x_f\right| \le h_v - D \tag{2.1}$$

其中，h_v：TLCD 垂直段靜水位高度

D：TLCD 水平段管徑。

（b）、考慮流體(水)之不可壓縮性。

此外，綜合上述（a)（b）兩點，推導 TLCD 系統之總動能（Kinetic Energy），T，及總重力位能（Potential Energy），U，可分別計算如下：

$$T = \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2}\rho A \dot{x}_f^{\,2} dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2}\rho A \dot{x}_f^{\,2} dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2}\rho A \dot{u}_g^{\,2} dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2}\rho A \dot{u}_g^{\,2} dx$$

$$+ \int_0^d \frac{1}{2}\rho A\left(\dot{x}_f + \dot{u}_g\right)^2 dx$$

$$= \frac{1}{2}\rho A \dot{x}_f^{\,2}(h_v - x_f) + \frac{1}{2}\rho A \dot{x}_f^{\,2}(h_v + x_f) + \frac{1}{2}\rho A \dot{u}_g^{\,2}\left(h_v - x_f\right)$$

$$+ \frac{1}{2}\rho A \dot{u}_g^{\,2}\left(h_v + x_f\right) + \frac{1}{2}\rho A d\left(\dot{x}_f + \dot{u}_g\right)^2$$

$$=\rho A\dot{x}_f^{\,2}h_v+\rho A\dot{u}_g^{\,2}h_v+\frac{1}{2}\rho Ad\left(\dot{x}_f+\dot{u}_g\right)^2 \tag{2.2}$$

$$U=\int_0^{h_v-x_f}\rho Agxdx+\int_0^{h_v+x_f}\rho Agxdx+\int_0^{d}\rho Ag\left(\frac{1}{2}D\right)dx$$

$$=\frac{1}{2}\rho Ag\left(h_v-x_f\right)^2+\frac{1}{2}\rho Ag\left(h_v+x_f\right)^2+\frac{1}{2}\rho AgdD$$

$$=\rho Ag\left(h_v^{\,2}+x_f^{\,2}\right)+\frac{1}{2}\rho AgdD \tag{2.3}$$

其中，

ρ：流體密度

g：重力加速度

u_g：基座水平位移

A：TLCD U 型管之截面積

x_f：TLCD 水位變化

d：TLCD 水平段長度

將總動能及總重力位能代入拉格朗治方程式(Lagrange's Equation)式子：

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f}\right)-\frac{\partial T}{\partial x_f}+\frac{\partial U}{\partial x_f}=Q$$

因總動能是速度之函數，而非位移之函數，故$\dfrac{\partial T}{\partial x_f}$=0，所以經整

理如下式：

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f}\right)=\left(2\rho A h_v+\rho A d\right)\ddot{x}_f+\rho A d\ddot{u}_g \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f}=2\rho A g x_f \tag{2.5}$$

此外，系統之非保守力為流體因落水頭損失(headloss)所產生之阻尼力，該阻尼力與流速的平方及流速的方向有關，可表示如下：

$$Q=\begin{cases}-\frac{1}{2}\rho A\delta\dot{x}_f{}^2 & \dot{x}_f>0\\ \frac{1}{2}\rho A\delta\dot{x}_f{}^2 & \dot{x}_f<0\end{cases} \tag{2.6}$$

或 $$Q=-\frac{1}{2}\rho A\delta\left|\dot{x}_f\right|\dot{x}_f \tag{2.7}$$

其中，δ 為水頭損失係數

根據式(2.4)、式(2.5)與式(2.7)，可建立 TLCD 系統之運動方程式如下：

$$\left(2\rho A h_v+\rho A d\right)\ddot{x}_f+\frac{1}{2}\rho A\delta\left|\dot{x}_f\right|\dot{x}_f+2\rho A g x_f=-\rho A d\ddot{u}_g \tag{2.8}$$

由式(2.8)之特徵分析可求得等斷面 TLCD 之自然頻率 ω(rad/sec)為

$$\omega=\sqrt{\frac{2\rho A g}{2\rho A h_v+\rho A d}}=\sqrt{\frac{2g}{2h_v+d}} \tag{2.9}$$

令 $L_e=2h_v+d$ ，則式（2.9）可簡潔地

表示為

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{L_e}} \quad \text{(rad/sec)} \tag{2.10}$$

或

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{g}{2L_e}} \quad \text{(Hz)} \tag{2.11}$$

其中，L_e為液體之總長度（沿斷面中心線），或稱為有效長度，可據以設計 TLCD 之振動頻率。

TLCD 的自然振動週期可根據式(2.11)計算如下：

$$T = \frac{1}{f} = \pi\sqrt{\frac{2L_e}{g}} \tag{2.12}$$

綜上所述，TLCD 系統之運動方程式可模擬成一單自由度系統，其振動週期為液體有效長度的函數。有效長度愈長，振動週期也愈長。此外，TLCD 系統因阻尼力與落水頭損失係數及液體流速的平方有關，使得 TLCD 系統為一非線性的單自由度系統，本文將發展一套數學解析模式以求得 TLCD 系統之液體激盪及流速等振動反應。

2.2 解析模式

由式(2.8)可知，TLCD 系統之阻尼項為非線性，本文將採用狀態空間法(State Space Procedure, SSP)[47,48]，並利用迭代之方式求得 TLCD 之流速$\dot{x}_f$及水位變化x_f，解析方式說明如後。

首先將 TLCD 系統之運動方程式(2.8)表示成：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\mathbf{w}(t) \tag{2.13}$$

其中，

$\mathbf{x}(t)=x_f$ 為系統之位移向量(此處為單自由度系統，故為一常量函數)；

$\mathbf{w}(t)=\ddot{u}_g$ 為擾動向量；

$\mathbf{M}=2\rho Ah_v+\rho Ad$ 為系統之質量矩陣；

$\mathbf{C}=\frac{1}{2}\rho A\delta|\dot{x}|$ 為系統之阻尼矩陣；

$\mathbf{K}=2\rho Ag$ 為系統之勁度矩陣；

$\mathbf{E}=\rho Ad$ 為系統之擾動力配置矩陣；

式(2.11)可以狀態空間表示法寫成：

$$\dot{\mathbf{z}}(\mathbf{t})=\mathbf{A}^{*}\mathbf{z}(\mathbf{t})+\mathbf{E}^{*}\mathbf{w}(t) \tag{2.14}$$

其中，

$$\mathbf{z}(\mathbf{t})=\begin{bmatrix}\mathbf{x}(t)\\ \dot{\mathbf{x}}(t)\end{bmatrix} \tag{2.15}$$

為 $2n\times1$ 之狀態向量(此處為單自由度系統，$n=1$)；

$$\mathbf{A}^{*}=\begin{bmatrix}\mathbf{0} & \mathbf{I}\\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}\end{bmatrix} \tag{2.16}$$

為 $2n\times2n$ 之系統矩陣；

$$\mathbf{E}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

為$2n \times 1$擾動力分配矩陣。

對式(2.14)取拉普拉氏轉換（Laplace transformation）可得到：

$$\mathbf{z}(s) = \mathbf{H}(s)\mathbf{z}(t_0) + \mathbf{H}(s)\mathbf{G}(s) \tag{2.18}$$

其中，

$$\mathbf{H}(\mathrm{s}) = (\mathrm{s}\mathbf{I} - \mathbf{A}^*)^{-1} \tag{2.19}$$

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{E}^*\mathbf{w}(s) \tag{2.20}$$

$\mathbf{z}(t_0)$ 表示初始條件。

動力系統式(2.14)之解可由式(2.19)與式(2.20)取拉普拉氏逆轉換至時域而得到：

$$\mathbf{z}(t) = e^{\mathbf{A}^*(t-t_0)}\mathbf{z}(t_0) + \int_{t_0}^{t} e^{\mathbf{A}^*(t-\tau)}\left[\mathbf{E}^*\mathbf{w}(\tau)\right]d\tau \tag{2.21}$$

式(2.21)中之積分式欲展開時，$\mathbf{w}(\tau)$在取樣週期內之連續函數須為已知。由於風或地震記錄通常為離散訊號，因此假設擾動函數在兩連續取樣點之間呈線性變化，令$t_0 = (k-1)\Delta t$，$t = k\Delta t$及$\mathbf{z}[k] = \mathbf{z}(k\Delta t)$，則

$$\mathbf{w}(\tau) = \frac{k\Delta t - \tau}{\Delta t}\mathbf{w}[(k-1)\Delta t] + \frac{\tau - (k-1)\Delta t}{\Delta t}\mathbf{w}[k\Delta t] \tag{2.22}$$

其中，$(k-1)\Delta t \le \tau \le k\Delta t$

狀態方程式(2.14)之解析解可由式(2.21)及式(2.22)之差分方程表示：

$$\mathbf{z}[k] = \mathbf{A}\mathbf{z}[k-1] + \mathbf{E}_0\mathbf{w}[k-1] + \mathbf{E}_1\mathbf{w}[k] \tag{2.23}$$

其中，

$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}^* \Delta t}$ 為 $2n \times 2n$ 之離散時間系統矩陣；

$$\mathbf{E_0} = \left[\left(\mathbf{A}^*\right)^{-1}\mathbf{A} + \frac{1}{\Delta t}\left(\mathbf{A}^*\right)^{-2}(\mathbf{I} - \mathbf{A}) \right]\mathbf{E}^*$$

為 $2n \times 1$ 之前瞬時離散時間擾動力分配矩陣；

$$\mathbf{E}_1 = \left[-\left(\mathbf{A}^*\right)^{-1} + \frac{1}{\Delta t}\left(\mathbf{A}^*\right)^{-2}(\mathbf{A} - \mathbf{I}) \right]\mathbf{E}^*$$

為 $2n \times 1$ 之後瞬時離散時間擾動力分配矩陣。

TLCD 動力反應之解析步驟說明如下：

1. 假設 TLCD 第 k 瞬時之速度為 $\dot{x}_f = \dot{x}_{f,k}$；
2. 計算 $C_k = \dfrac{1}{2}\rho A \delta \left|\dot{x}_{f,k}\right|$，代入式(2.16)可得系統矩陣 $\mathbf{A}^*$，並計算 TLCD 之速度反應 $\dot{x}_{f,k+1}$；
3. 定義誤差 $er = \left| \dfrac{2\left(\dot{x}_{f,k+1} - \dot{x}_{f,k}\right)}{\left|\dot{x}_{f,k+1}\right| + \left|\dot{x}_{f,k}\right|} \right|$；
4. 令容許誤差為 ε。若 $er \le \varepsilon$，則 $\dot{x}_{f,k+1}$ 即為所求，可進行下一瞬時之反應分析；
5. 若 $er > \varepsilon$，則令 $\dot{x}_{f,k} = \dot{x}_{f,k+1}$，重覆步驟（1）～（4）直到 $er \le \varepsilon$

為止。

2.3 結構安裝等斷面 TLCD 系統之運動方程式

考慮於一單自由度結構安裝 TLCD 系統進行減振控制，如圖 2.2 所示。當結構物的基礎與樓層分別受到水平地表擾動 u_g 與側向力 $f(t)$ 作用時，樓層將產生一相對於地表之水平側向位移 x_s，TLCD 系統則因結構振動而產生激盪位移 x_f (仍須滿足液面不得低於 TLCD 水平段管徑 D 之限制)，如式(2.1)所示。TLCD 控制結構之總動能(Kinetic Energy)，T，與總重力位能(Potential Energy)，U，可分別計算如下：

$$
\begin{aligned}
T &= \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2}\rho A \dot{x}_f^{\,2} dx + \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2}\rho A \dot{x}_f^{\,2} dx + \int_{x_f}^{h_v} \frac{1}{2}\rho A\left(\dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 dx \\
&+ \int_{-x_f}^{h_v} \frac{1}{2}\rho A\left(\dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 dx + \int_0^d \frac{1}{2}\rho A\left(\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 dx + \frac{1}{2}m_s\left(\dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 \\
&= \frac{1}{2}\rho A \dot{x}_f^{\,2}(h_v - x_f) + \frac{1}{2}\rho A \dot{x}_f^{\,2}(h_v + x_f) + \frac{1}{2}\rho A\left(\dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2\left(h_v - x_f\right) \\
&+ \frac{1}{2}\rho A\left(\dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2\left(h_v + x_f\right) + \frac{1}{2}\rho A d\left(\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 + \frac{1}{2}m_s\left(\dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 \\
&= \rho A \dot{x}_f^{\,2} h_v + \rho A\left(\dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 h_v + \frac{1}{2}\rho A d\left(\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 + \frac{1}{2}m_s\left(\dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2
\end{aligned} \tag{2.24}
$$

$$
\begin{aligned}
U &= \int_0^{h_v - x_f} \rho A g x dx + \int_0^{h_v + x_f} \rho A g x dx + \int_0^d \rho A g\left(\frac{1}{2}D\right)dx + \frac{1}{2}k_s x_s^{\,2} \\
&= \frac{1}{2}\rho A g\left(h_v - x_f\right)^2 + \frac{1}{2}\rho A g\left(h_v + x_f\right)^2 + \frac{1}{2}\rho A g d D + \frac{1}{2}k_s x_s^{\,2} \\
&= \rho A g\left(h_v^{\,2} + x_f^{\,2}\right) + \frac{1}{2}\rho A g d D + \frac{1}{2}k_s x_s^{\,2}
\end{aligned} \tag{2.25}
$$

其中，

x_s：結構頂樓相對於地表之位移

m_s：結構質量

k_s：結構勁度

將式(2.24)及式(2.25)帶入拉格朗治方程式可得：

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f}\right) = \left(2\rho A h_v + \rho A d\right)\ddot{x}_f + \rho A d \ddot{x}_s + \rho A d \ddot{u}_g \tag{2.26}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s}\right) = \rho A d \ddot{x}_f + \left(2\rho A h_v + \rho A d + m_s\right)\ddot{x}_s + \left(2\rho A h_v + \rho A d + m_s\right)\ddot{u}_g \tag{2.27}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f} = 2\rho A g x_f \tag{2.28}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_s} = k_s x_s \tag{2.29}$$

此外，系統之非保守力包括：流體因落水頭損失(headloss)所產生之阻尼力Q_1與作用於結構之固有阻尼力及外力Q_2，二者可分別表示如下：

$$Q_1 = \begin{cases} -\frac{1}{2}\rho A \delta \dot{x}_f^{\,2} & \dot{x}_f > 0 \\ \frac{1}{2}\rho A \delta \dot{x}_f^{\,2} & \dot{x}_f < 0 \end{cases}$$

或 $$Q_1 = -\frac{1}{2}\rho A \delta \left|\dot{x}_f\right| \dot{x}_f \tag{2.30}$$

$$Q_2 = -c_s \dot{x}_s + f(t) \tag{2.31}$$

其中，c_s 為結構之阻尼係數。

根據拉格朗治方程式，式（2.26）、式（2.28）及式（2.30）可整理如下：

$$(2\rho Ah_v + \rho Ad)\ddot{x}_f + \rho Ad\ddot{x}_s + \frac{1}{2}\rho A\delta|\dot{x}_f|\dot{x}_f + 2\rho Agx_f = -\rho Ad\ddot{u}_g \tag{2.32}$$

同理，式（2.27）、式（2.29）及式（2.31）可整理如下：

$$\rho Ad\ddot{x}_f + (2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s)\ddot{x}_s + c_s\dot{x}_s + k_s x_s$$

$$= -(2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s)\ddot{u}_g + f(t) \tag{2.33}$$

若進一步將式(2.32)與式(2.33)表示成矩陣的型式，則吾人可得 TLCD 控制結構之運動方程式為：

$$\begin{bmatrix} 2\rho Ah_v + \rho Ad & \rho Ad \\ \rho Ad & 2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho A\delta|\dot{x}_f| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix}$$

$$+\begin{bmatrix} 2\rho Ag & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} x_f \\ x_s \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} \rho Ad \\ 2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s \end{bmatrix}\ddot{u}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}f(t) \tag{2.34}$$

或將式(2.34)表示如下：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}\mathbf{f}(t) \tag{2.35}$$

其中，

$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2\rho Ah_v + \rho Ad & \rho Ad \\ \rho Ad & 2\rho Ah_v + \rho Ad + m_s \end{bmatrix}$ 為系統之質量矩陣；

$$\mathbf{C}=\begin{bmatrix}\frac{1}{2}\rho A\delta|\dot{x}_f| & 0\\ 0 & c_s\end{bmatrix}$$為系統之阻尼矩陣；

$$\mathbf{K}=\begin{bmatrix}2\rho Ag & 0\\ 0 & k_s\end{bmatrix}$$為系統之勁度矩陣；

$$\mathbf{E}=\begin{bmatrix}\rho Ad\\ 2\rho Ah_v+\rho Ad+m_s\end{bmatrix}$$為系統之地表擾動向量；

$$\mathbf{B}=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}$$為系統之樓層側向力擾動向量。

在得知整體系統之運動方程式(2.35)後，可將 2.2 節所述之解析模式重新推導，可得：

$$\mathbf{z}[k]=\mathbf{A}\mathbf{z}[k-1]+\mathbf{E}_0\mathbf{w}[k-1]+\mathbf{E}_1\mathbf{w}[k]+\mathbf{B}_0\mathbf{F}[k-1]+\mathbf{B}_1\mathbf{F}[k] \quad (2.36)$$

其中，

$\mathbf{A}=e^{\mathbf{A}^*\Delta t}$ 為 $2n\times 2n$ 之離散時間系統矩陣；

$$\mathbf{E_0}=\left[\left(\mathbf{A}^*\right)^{-1}\mathbf{A}+\frac{1}{\Delta t}\left(\mathbf{A}^*\right)^{-2}\left(\mathbf{I}-\mathbf{A}\right)\right]\mathbf{E}^*$$

為 $2n\times 1$ 之前瞬時離散時間擾動力分配矩陣；

$$\mathbf{E}_1=\left[-\left(\mathbf{A}^*\right)^{-1}+\frac{1}{\Delta t}\left(\mathbf{A}^*\right)^{-2}\left(\mathbf{A}-\mathbf{I}\right)\right]\mathbf{E}^*$$

為 $2n\times 1$ 之後瞬時離散時間擾動力分配矩陣。

$$\mathbf{B_0}=\left[\left(\mathbf{A}^*\right)^{-1}\mathbf{A}+\frac{1}{\Delta t}\left(\mathbf{A}^*\right)^{-2}\left(\mathbf{I}-\mathbf{A}\right)\right]\mathbf{B}^*$$

為 $2n \times 1$ 之前瞬時離散時間側向力分配矩陣(此處 $n = 2$)；

$$\mathbf{B}_1 = \left[-\left(\mathbf{A}^*\right)^{-1} + \frac{1}{\Delta t}\left(\mathbf{A}^*\right)^{-2}\left(\mathbf{A} - \mathbf{I}\right) \right]\mathbf{B}^*$$

為 $2n \times 1$ 之後瞬時離散時間側向力分配矩陣；

$$\mathbf{A}^* = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}$$

為 $2n \times 2n$ 之系統矩陣。

$$\mathbf{E}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{E} \end{bmatrix}$$

為 $2n \times 1$ 擾動力分配矩陣。

$$\mathbf{B}^* = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix}$$

為 $2n \times 1$ 之側向力分配矩陣。

2.4 系統識別

本節首先介紹結構系統識別[49-51]的方法，俾便進行結構系統識別試驗，以求得單層樓鋁構架模型之振動頻率與阻尼比等動力特性參數。隨後將結合 TLCD 系統之運動方程式與結構系統識別的方法，以發展水頭損失係數之系統識別模式。線性結構動力系統之等效離散時間模式，若以單一輸入-單一輸出(Single Input Single Output, SISO)的情況為例，可以線性差分方程表示為：

$$y(k)+a_1 y(k-1)+\cdots+a_{n_a} y(k-n_a)=b_0 u(k)+b_1 u(k-1)+\cdots+b_{n_b} u(k-n_b) \quad (2.37)$$

其中

y(·) 代表系統之輸出，$a_i's$ 為輸出訊號係數，n_a 為其維度；

u(·) 代表系統之輸入，$b_i's$ 為輸入訊號係數，n_b 為其維度；

根據 ARX 模型可進一步表示為：

$$y(k)=\psi^{\mathrm{T}}(k)\theta+e(k) \quad (2.38)$$

$$\psi^{\mathrm{T}}(k)=[-y(k-1)\cdots-y(k-n_a),u(k)\cdots u(k-n_b)] \quad (2.39)$$

$$\theta=\left[a_1 \cdots a_{n_a}, b_0 \cdots b_{n_b}\right]^{\mathrm{T}} \quad (2.40)$$

其中，e(k) 代表雜訊，通常假設其為零均值(zero mean)之白雜訊(white noise)。

利用遞迴預測誤差法（Recursive Prediction Error Method），經運算整理後可得系統參數之遞迴型式解如下：

$$\theta(k)=\theta(k-1)+L(k)\left[\mathbf{y}(k)-\psi^{T}(k)\theta(k-1)\right] \quad (2.41)$$

其中，

$$L(k)=\frac{P(k-1)\psi(k)}{\lambda(k)+\psi^{\mathrm{T}}(k)P(k-1)\psi(k)} \quad (2.42)$$

$$P(k)=\frac{P(k-1)}{\lambda(k)+\psi^{\mathrm{T}}(k)P(k-1)\psi(k)} \quad (2.43)$$

通常選擇初始條件 $P(0)=10^{8}\sim10^{10}$ 以加速其收斂速度。

由於結構系統的振動特性與係數a_i's有關，識別出系統的最佳係數a_i's後，即可計算結構之振動頻率及阻尼比如下：

$$f_j = \frac{1}{2\pi\Delta t}\sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^{\ 2}} \tag{2.44}$$

$$\xi_j = -\frac{\ln(r_j)}{\sqrt{(\ln r_j)^2 + \phi_j^{\ 2}}} \tag{2.45}$$

其中，Δt為取樣週期；

$$r_j^{\ 2} = p_j \overline{p}_j, \phi_j = \tan^{-1}\left[\frac{\mathrm{I}(p_j)}{\mathrm{R}(p_j)}\right]$$

p_j為以a_i's作為多項式係數所得之第 j 個複數根。

本文嘗試應用上述之系統識別的技巧求取 TLCD 系統之水頭損失係數。首先將 TLCD 系統之運動方程式(2.8)等號兩邊同除以ρA修正如下：

$$-(4h_v + 2d)\ddot{x}_f - 4gx_f - 2d\ddot{u}_g = \delta|\dot{x}_f|\dot{x}_f \tag{2.46}$$

其中，x_f為 TLCD 之激盪振幅，可由波高計量測而得。分別將x_f對時間微分一次與兩次可得 TLCD 系統之液體流速($\dot{x}_f$)及液體激盪加速度($\ddot{x}_f$)。由於式(2.46)中，h_v、d、$\ddot{u}_g$、x_f 、$\dot{x}_f$ 及$\ddot{x}_f$均為已知，僅水頭損失係數δ未知，若令$y[k] = -(4h_v + 2d)\ddot{x}_f - 4gx_f - 2d\ddot{u}_g$，則式(2.46)可表示如下：

$$y[k] = \lfloor |\dot{x}_f|\dot{x}_f \rfloor \delta = \psi^T \theta \tag{2.47}$$

其中，$\psi^T = \lfloor |\dot{x}_f|\dot{x}_f \rfloor$，$\theta = \delta$ 。

式(2.47)可利用式(2.41)、式(2.42)及式(2.43)之遞迴預測誤差法求得每一瞬時之系統參數θ，即為 TLCD 系統之水頭損失係數δ。

為驗證本文所發展之水頭損失係數識別方法的精確性，茲以 TLCD 系統之振動頻率為 0.6 Hz、水頭損失係數為 5 及輸入地表擾動為 0.6 Hz 之簡諧波進行說明。首先利用第 2.2 節所述之解析模式，求得 TLCD 之水柱激盪位移、水柱激盪速度與水柱激盪加速度，隨後將其帶入式(2.46)與式(2.47)進行系統識別，初始值採用 $P(0)=10^6$，$\theta(0)=0$。圖 2.3 為 TLCD 元件系統識別所得之水頭損失係數歷時，其結果顯示，隨著識別筆數的增加(約 2000 筆，相當於 20 秒)，水頭損失係數逐步收斂並趨於定值，識別所得之水頭損失係數為$\delta=4.99$，理論值則為$\delta=5.0$，二者契合度極佳，顯示本文所提之識別方法可有效預測水頭損失係數。有關 TLCD 系統之元件測試與性能測試將採用上述的方法識別不同元件設計與擾動條件下之水頭損失係數。

2.5 線性迴歸

迴歸分析與所使用的數學模型有很大的關係，如果我們所使用模型是線性模型（Linear Regression），則此類問題稱為線性迴歸；反之，若使用非線性模型，則稱為非線性迴歸（Nonlinear Rregression）。本文將討論線性迴歸問題。

假設所量測資料為一條二次拋物線，那麼我們可以假設相似的數學模型為：

$$y = f(x;a_0,a_1,a_2) = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

其中y此模型輸出，x為此模型輸入，a_0、a_1及a_2為此模型的參數（parameter）。由於這些參數相對於輸出y是呈線性關係，所以此模型稱為「具有線性參數（Linear-in-the-parametr）」的模型，我們得任務則是找出最好的參數數值，使得模型輸出與實際資料越接近越好，此過程即稱為線性迴歸（Linear Rregression）。

假設我們的觀察資料可寫成（x_i,y_i）,i=1～N，當輸入為x_i時，實際輸出為y_i，但模型的預測值為$f(x_i;a_0,a_1,a_2) = a_0 + a_1x + a_2x^2$，因此平方誤差為$[y_i - f(x_i)]^2$，而總平方差為：

$$E = \sum_1^N [y_i - f(x_i)]^2 = \sum_1^N [y_i - (a_0 + a_1x + a_1x^2)]^2$$

此述總平方誤差E是參數a_0、a_1及a_2的函數，因此我們可以求出E對a_0、a_1及a_2的導式，令其為零，再解出a_0、a_1及a_2。由於此模型具線性參數，所以總平方誤差E為a_0、a_1及a_2的二次式，而導式$\frac{\partial E}{\partial a_0},\frac{\partial E}{\partial a_1},\frac{\partial E}{\partial a_1}$為$a_0$、$a_1$及$a_2$的一次式，因此在令導式為零之後，就可以解出參數$a_0$、$a_1$及$a_2$的最佳值。

第三章 變斷面調諧水柱消能系統之分析

3.1 變斷面 VTLCD 系統之運動方程式

U 型三段式變斷面調諧水柱消能系統(Variable Tuned Liquid Column Damper,VTLCD)之示意圖如圖 3.1 所示，VTLCD 之水平段截面積(A_h)與垂直段截面積(A_v)不同。當 VTLCD 基座受到水平擾動(u_g)作用時，水柱激盪的振幅為x_f，由於任何時刻液面不得低於 VTLCD 水平段管徑D_h，因此需滿足

$$\left|x_f\right| \le h_v - D_h \tag{3.1}$$

其中，

h_v：VTLCD 垂直段靜水位高度

D_h：VTLCD 水平段管徑

此外，若考慮流體(水)之不可壓縮性，即

$$A_v x_f = A_h x_h \tag{3.2}$$

$$x_h = \frac{A_v}{A_h} x_f \tag{3.3}$$

將(3.3)式等號兩邊同時對時間微分，可得 VTLCD 水平段流體之流速

$$\dot{x}_h = \frac{A_v}{A_h} \dot{x}_f \tag{3.4}$$

其中，

A_v ：VTLCD U 型管垂直段之截面積

A_h ：VTLCD U 型管水平段之截面積

x_f ：VTLCD 垂直段水位變化

x_h ：VTLCD 水平段水位變化

則變斷面 VTLCD 系統之總動能（Kinetic Energy），T ，及總重力位能（Potential Energy），U ，可分別計算如下：

$$T=\int_{x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\dot{x}_f^{\,2}dx+\int_{-x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\dot{x}_f^{\,2}dx+\int_{x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\dot{u}_g^{\,2}dx+\int_{-x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\dot{u}_g^{\,2}dx$$
$$+\int_{0}^{d}\frac{1}{2}\rho A_h\left(\dot{x}_h+\dot{u}_g\right)^2dx \qquad (3.5)$$

將式(3.4)帶入式(3.5)可得

$$T=\int_{x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\dot{x}_f^{\,2}dx+\int_{-x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\dot{x}_f^{\,2}dx+\int_{x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\dot{u}_g^{\,2}dx+\int_{-x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\dot{u}_g^{\,2}dx$$
$$+\int_{0}^{d}\frac{1}{2}\rho A_h\left(\frac{A_v}{A_h}\dot{x}_h+\dot{u}_g\right)^2dx$$

$$=\frac{1}{2}\rho A_v\dot{x}_f^{\,2}(h_v-x_f)+\frac{1}{2}\rho A_v\dot{x}_f^{\,2}(h_v+x_f)+\frac{1}{2}\rho A_v\dot{u}_g^{\,2}\left(h_v-x_f\right)$$

$$+\frac{1}{2}\rho A_v\dot{u}_g^{\,2}\left(h_v+x_f\right)+\frac{1}{2}\rho A_h d\left(\frac{A_v}{A_h}\dot{x}_f+\dot{u}_g\right)^2$$

$$=\rho A_v\dot{x}_f^{\,2}h_v+\rho A_v\dot{u}_g^{\,2}h_v+\frac{1}{2}\rho A_h d\left(\frac{A_v}{A_h}\dot{x}_f+\dot{u}_g\right)^2 \qquad (3.6)$$

$$U=\int_0^{h_v\text{-}x_f}\rho A_v gxdx+\int_0^{h_v+x_f}\rho A_v gxdx+\int_0^{d}\rho A_h g\left(\frac{1}{2}D_h\right)dx$$

$$=\frac{1}{2}\rho A_v g\left(h_v\text{-}x_f\right)^2+\frac{1}{2}\rho A_v g\left(h_v+x_f\right)^2+\frac{1}{2}\rho A_h gdD_h$$

$$=\rho A_v g\left(h_v^{\ 2}+x_f^{\ 2}\right)+\frac{1}{2}\rho A_h gdD_h \tag{3.7}$$

其中，

ρ：流體密度

g：重力加速度

u_g：基座水平位移

h_v：VTLCD 垂直段之水位高度

d：VTLCD 水平段長度

將總動能及總重力位能代入拉格朗治方程式(Lagrange's Equation)可得：

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f}\right)=\left(2\rho A_v h_v+\rho\frac{A_v^{\ 2}}{A_h}d\right)\ddot{x}_f+\rho A_v d\ddot{u}_g \tag{3.8}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f}=2\rho A_v gx_f \tag{3.9}$$

此外，系統之非保守力為流體因落水頭損失(headloss)所產生之阻尼力，該阻尼力與流速的平方及流速的方向有關，可表示如下：

$$Q=\begin{cases}-\frac{1}{2}\rho A_h \delta \dot{x}_h^{\ 2} & \dot{x}_h>0\\ \frac{1}{2}\rho A_h \delta \dot{x}_h^{\ 2} & \dot{x}_h<0\end{cases} \tag{3.10}$$

或 $$Q=\frac{1}{2}\rho A_h \delta |\dot{x}_h| \dot{x}_h \tag{3.11}$$

其中，δ為水頭損失係數。

將(3.4)式代入(3.11)式，則非保守力可以垂直段之液面波動速度表示如下：

$$Q=-\frac{1}{2}\rho\frac{A_v^{\ 2}}{A_h}\delta|\dot{x}_f|\dot{x}_f \tag{3.12}$$

根據式(3.8)、式(3.9)與式(3.12)，吾人可建立變斷面 VTLCD 元件之運動方程式如下：

$$\left(2\rho A_v h_v+\rho\frac{A_v^{\ 2}}{A_h}d\right)\ddot{x}_f+\frac{1}{2}\rho\frac{A_v^{\ 2}}{A_h}\delta|\dot{x}_f|\dot{x}_f+2\rho A_v g x_f=-\rho A_v d\ddot{u}_g \tag{3.13}$$

由式（3.13）之特徵分析，吾人可求得變斷面 VTLCD 之自然頻率 ω(rad/sec)為：

$$\omega=\sqrt{\frac{2\rho A_v g}{2\rho A_v h_v+\rho\frac{A_v^{\ 2}}{A_h}d}}=\sqrt{\frac{2g}{2h_v+\frac{A_v}{A_h}d}} \tag{3.14}$$

令 $$L_e=2h_v+\lambda d \tag{3.15}$$

$\lambda=\frac{A_v}{A_h}$，則(3.14)式可表示為：

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{L_e}} \quad \text{(rad/sec)} \tag{3.16}$$

或 $$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{g}{2L_e}} \quad \text{(Hz)} \tag{3.17}$$

其中，λ 為 U 型管垂直段與水平段之截面積比，L_e 為變斷面 VTLCD 之有效長度，可據以設計 VTLCD 之振動頻率。

變斷面 VTLCD 之自然振動週期可表示為：

$$T = \pi\sqrt{\frac{2L_e}{g}} \tag{3.18}$$

綜上所述，變斷面 VTLCD 系統之運動方程式可模擬成一單自由度系統，其振動週期為液體有效長度的函數，有效長度可藉由管徑面積比調整。此外，變斷面 VTLCD 系統因阻尼力與落水頭損失係數及液體流速的平方有關，使得變斷面 VTLCD 系統為一非線性系統，吾人可利用 2.2 節之數學解析模式求得變斷面 VTLCD 系統之液體激盪及流速等振動反應。

3.2 結構安裝變斷面 VTLCD 系統之運動方程式

考慮單自由度結構安裝變斷面 VTLCD 系統進行減振控制，如圖 3.2 所示。當結構物的基礎與樓層分別受到水平地表擾動 u_g 與側向力 $f(t)$ 作用時，樓層將產生一相對於地表之水平側向位移 x_s，VTLCD 系統則因結構振動而產生一激盪位移 x_f，在此仍必須滿足液面不得低於變斷面 VTLCD 水平段管徑 D_h 之限制，如式(3.1)所示。變斷面

VTLCD 控制結構之總動能(Kinetic Energy)，T，與總重力位能(Potential Energy)，U，可分別計算如下：

$$T=\int_{x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\dot{x}_f^{\,2}dx+\int_{-x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\dot{x}_f^{\,2}dx+\int_{x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\left(\dot{x}_s+\dot{u}_g\right)^2dx$$

$$+\int_{-x_f}^{h_v}\frac{1}{2}\rho A_v\left(\dot{x}_s+\dot{u}_g\right)^2dx+\int_{0}^{d}\frac{1}{2}\rho A_h\left(\frac{A_v}{A_h}\dot{x}_f+\dot{x}_s+\dot{u}_g\right)^2dx+\frac{1}{2}m_s\left(\dot{x}_s+\dot{u}_g\right)^2$$

$$=\rho A_v h_v\dot{x}_f^{\,2}+\rho A_v h_v\left(\dot{x}_s+\dot{u}_g\right)^2+\frac{1}{2}\rho A_h d\left(\frac{A_v}{A_h}\dot{x}_f+\dot{x}_s+\dot{u}_g\right)^2$$

$$+\frac{1}{2}m_s\left(\dot{x}_s+\dot{u}_g\right)^2 \tag{3.19}$$

$$U=\int_{0}^{h_v-x_f}\rho A_v gxdx+\int_{0}^{h_v+x_f}\rho A_v gxdx+\int_{0}^{d}\rho A_h g\left(\frac{1}{2}D_h\right)dx+\frac{1}{2}k_s x_s^{\,2}$$

$$=\frac{1}{2}\rho A_v g\left(h_v-x_f\right)^2+\frac{1}{2}\rho A_v g\left(h_v+x_f\right)^2+\frac{1}{2}\rho A_h gdD_h+\frac{1}{2}k_s x_s^{\,2}$$

$$=\rho A_v g\left(h_v^{\,2}+x_f^{\,2}\right)+\frac{1}{2}\rho A_h gdD_h+\frac{1}{2}k_s x_s^{\,2} \tag{3.20}$$

其中，

x_s：結構頂樓相對於地表之位移

m_s：結構質量

c_s：結構阻尼

k_s：結構勁度

將(3.19)及(3.20)式帶入拉格朗治方程式可得：

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_f}\right)=\left(2\rho A_v h_v+\rho\frac{A_v^{\ 2}}{A_h}d\right)\ddot{x}_f+\rho A_v d\ddot{x}_s+\rho A_v d\ddot{u}_g \qquad (3.21)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_s}\right)=\rho A_v d\ddot{x}_f+\left(2\rho A_v h_v+\rho A_h d+m_s\right)\ddot{x}_s+\left(2\rho A_v h_v+\rho A_h d+m_s\right)\ddot{u}_g \qquad (3.22)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_f}=2\rho A_v g x_f \qquad (3.23)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x_s}=k_s x_s \qquad (3.24)$$

此外，系統之非保守力包括：流體因落水頭損失(headloss)所產生之阻尼力Q_1與作用於結構之固有阻尼力及外力Q_2，二者可分別表示如下：

$$Q_1=\begin{cases}-\dfrac{1}{2}\rho\delta\dfrac{A_v^{\ 2}}{A_h}\dot{x}_f^{\ 2} & \dot{x}_f>0\\ \dfrac{1}{2}\rho\delta\dfrac{A_v^{\ 2}}{A_h}\dot{x}_f^{\ 2} & \dot{x}_f<0\end{cases}$$

或 $$Q_1=\frac{1}{2}\rho\delta\frac{A_v^{\ 2}}{A_h}\left|\dot{x}_f\right|\dot{x}_f \qquad (3.25)$$

$$Q_2=-c_s\dot{x}_s+f(t) \qquad (3.26)$$

其中，c_s為結構之阻尼係數。

根據拉格朗治方程式，式（3.21）、式（3.23）及式（3.25）可整理如下：

$$\left(2\rho A_v h_v+\rho\frac{A_v^{\ 2}}{A_h}d\right)\ddot{x}_f+\rho A_v d\ddot{x}_s+\frac{1}{2}\rho\delta\frac{A_v^{\ 2}}{A_h}\left|\dot{x}_f\right|\dot{x}_f+2\rho A_v g x_f=-\rho A_v d\ddot{u}_g$$

$$(3.27)$$

同理，式（3.22）、式（3.24）及式（3.26）可整理如下：

$$\rho A_v d\ddot{x}_f + \left(2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s\right)\ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s \ddot{u}_g$$

$$= -\left(2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s\right) + f\left(t\right) \tag{3.28}$$

將(3.27)及(3.28)式整理成矩陣的型式，則可得變斷面 VTLCD 控制結構之運動方程式為：

$$\begin{bmatrix} \left(2\rho A_v h_v + \rho \dfrac{A_v{}^2}{A_h} d\right) & \rho A_v d \\ \rho A_v d & \left(2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s\right) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_f \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{1}{2}\rho\delta \dfrac{A_v{}^2}{A_h}\left|\dot{x}_f\right| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_f \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 2\rho A_v g & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_f \\ x_s \end{Bmatrix} = -\begin{bmatrix} \rho A_v d \\ \left(2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s\right) \end{bmatrix} \ddot{u}_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f\left(t\right) \tag{3.29}$$

或將式(3.29)表示如下：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{E}\mathbf{w}(t) + \mathbf{B}\mathbf{f}\left(t\right) \tag{3.30}$$

其中，

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \left(2\rho A_v h_v + \rho \dfrac{A_v{}^2}{A_h} d\right) & \rho A_v d \\ \rho A_v d & \left(2\rho A_v h_v + \rho A_h d + m_s\right) \end{bmatrix}$$ 為系統之質量矩陣；

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{2}\rho\delta \dfrac{A_v{}^2}{A_h}\left|\dot{x}_f\right| & 0 \\ 0 & c_s \end{bmatrix}$$ 為系統之阻尼矩陣；

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2\rho A_v g & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}$$ 為系統之勁度矩陣；

$$\mathbf{E}=\begin{bmatrix}\rho A_v d\\ \left(2\rho A_v h_v+\rho A_h d+m_s\right)\end{bmatrix}$$ 為系統之地表擾動向量；

$$\mathbf{B}=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}$$ 為系統之樓層側向力擾動向量。

3.3 單自由度結構安裝變斷面 VTLCD 系統之參數研究

為探討變斷面 VTLCD 系統之設計對於結構減振效益的影響，並比較變斷面與等斷面 VTLCD 系統對結構控制的差異性，本文將針對變斷面VTLCD系統之截面積比λ(U型管垂直段截面積與水平段截面積之比值)、VTLCD 系統之質量比(變斷面 VTLCD 系統質量與結構質量之比值)、VTLCD 系統之長度比(水平段長度與有效長度之比值)及VTLCD 系統之水頭損失係數等進行參數研究，並利用交通大學土木結構實驗室之單層樓鋁架模型為分析的對象。鋁架結構之總重量(含未裝水之空 VTLCD)$W_s=245\,\text{kgf}$，經結構系統識別所得之振動頻率$f_s=0.54$ Hz，阻尼比$\varsigma_s=0.019$(詳 2.4 節-系統識別)，結構的勁度為$k_s=\left(2\pi f_s\right)^2\left(W_s/g\right)=288.57\,\text{kgf/m}$，阻尼係數$c_s$為 3.22 kgf-sec/m。結構受到不同擾動之變斷面 VTLCD 系統參數分析將於以下各節中說明。

3.3.1 變斷面 VTLCD 設計參數

令變斷面 VTLCD 系統之振動頻率為f_l，結構的振動頻率為f_s。本研究亦將考慮 VTLCD 系統之頻率比γ=1 的條件下進行參數研究。即頻率比f_l/f_s=1 時，分析變斷面 VTLCD 系統對於結構振動反應的

減振效果。由於單層樓鋁架結構之振動頻率為 0.54 Hz，因此由式(3.17)可計算得知達到該共振頻率所需 VTLCD 之有效長度 $L_e = 1.71\text{m}$。在質量比的決定方面，設定變斷面 VTLCD 系統與鋁架結構之質量比 $\alpha = 1\%$、3%、5%、7%。VTLCD 系統之截面積比(λ)設計於 1~1.4 之間，並以 0.1 為解析度進行參數分析。VTLCD 系統之長度比值 β=0.45、0.5、0.55、0.6、0.65、0.7、0.75。由於 VTLCD 系統的設計須滿足液面激盪振幅($h_v = (L_e - d)/2$)小於水平段管徑高度的限制($h_v \geq D_h$)，此外，可由 $W_l = (2h_v A_v + dA_h)\rho$ 與式(4.15)求出滿足上述條件之變斷面 VTLCD 系統，如表 3.1 所示。為能廣泛瞭解水頭損失係數對於結構減振效能的影響，吾人考慮水頭損失係數 δ 為 1、5、10、15、20 等情況進行分析，以探討水頭損失係數與結構減振效能變化的趨勢。吾人將針對上述變斷面 VTLCD 系統的設計進行參數研究，包括結構的自由振動分析、共振頻率之簡諧波擾動分析(作用於基礎)，以探討變斷面 VTLCD 系統之設計參數對於結構減振效益及水柱激盪反應之影響，俾便決定變斷面 VTLCD 系統之最佳設計尺寸範圍。

3.3.2 單自由度結構之自由振動分析

考慮在結構頂樓給予一水平向初始位移 $x_s(0) = 0.1\text{m}$，而 VTLCD 系統之水柱初始狀態為靜止之自由振動分析。

圖 3.3(a)~圖 3.3(e)分別為在不同截面積的條件下，水平段長度比與水頭損失係數對於變斷面 VTLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之關係圖。其結果顯示，當水頭損失係數為任一定值時，水

平長度比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水頭損失係數的增加，水柱激盪位移峰值呈現遞減的趨勢。在結構減振效能方面，當質量比與截面積比固定時，水頭損失係數$\delta=1$，水平長度比值越大，對結構位移、加速度均方根折減百分比效果最佳，在$\delta\geq5$ 之後，水平長度比之增加則對於結構位移均、加速度方根值雖仍持續增加，但提升率趨於平穩。

圖 3.4(a)～圖 3.4(d)分別為在不同質量比的條件下，截面積比與水平長度比對於 VTLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，截面積比愈大，水柱激盪位移峰值愈小，且隨著水平長度比β的增加，水柱激盪位移峰值雖仍持續增加，但提升率趨於平穩。在結構減振效益方面，在固定某一個截面積比之下，水平長度比愈大，結構反應均方根折減則呈現遞增的趨勢。顯示在相同的質量比及水頭損失係數、截面積比之下，變斷面 VTLCD 系統水平長度比越大，則變斷面 VTLCD 系統對於結構反應的減振效果愈好。

表 3.2 為不同質量比時，變斷面 TLCD 系統之最佳設計參數與結構反應均方根值折減率。其結果顯示，滿足水柱激盪位移限制且可達到最佳控制效果之截面積比為$\lambda\geq1.0$。此外，如預期地，質量比愈大，控制效果愈好，當質量比α=7.0%，β=0. 45，λ=1. 4 時，最佳之結構位移均方根值折減率可達 53.44%，加速度均方根值折減率可達 57.67%。

圖 3.5 與圖 3.6 為頻率比$\gamma=1$、質量比$\alpha=5.0\%$、長度比$\beta=0.45$、截面積比$\lambda=1.4$、水頭損失係數$\delta=1$等條件下，變斷面 VTLCD 系統控制與未控制結構之位移及加速度歷時比較。其結果顯示

示，VTLCD 系統對於結構自由振動反應有良好的控制效果，結構的位移反應於 10 秒左右便能由初始位移 10cm 迅速衰減至 1cm，且結構之加速度反應亦能迅速被抑制下來。圖 3.7 與圖 3.8 為頻率比$\gamma = 1$、質量比$\alpha = 5.0\%$、長度比$\beta = 0.45$、截面積比$\lambda = 1.4$、水頭損失係數$\delta = 1$等條件下，變斷面 VTLCD 系統控制與未控制結構之位移及加速度富氏頻譜，其結果顯示，以 VTLCD 系統進行結構振動控制能有效抑制結構主要振頻的能量。結構之瞬時總能量(結構動能與位能) $T_s = m_s\left(\dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 / 2 + k_s {x_s}^2 / 2$，圖 3.9 為 VTLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量(結構動能與位能)歷時。由圖可知，結構於第 5 秒時，其瞬時總能量已漸漸抑制下而趨近於 0。

圖 3.10 與圖 3.11 分別為變斷面 VTLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度歷時，其中，水柱激盪位移峰值可達 22.25cm。圖 3.12 與圖 3.13 則分別為 VTLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度反應富氏頻譜及頻譜相位角。圖 3.14 變斷面為 VTLCD 系統之遲滯迴圈，其阻尼力最大為 0.5kgf，所圍之面積即為 VTLCD 系統消散之振動能量，由於變斷面 VTLCD 之阻尼並非線性黏滯阻尼，因此其遲滯迴圈不呈橢圓狀。

3.3.3 地表簡諧波共振擾動分析

進一步探討變斷面 VTLCD 系統應用於單自由度鋁模型結構受到地表擾動之減振效益，假設結構受到一地表擾動，其擾動頻率(f_o)與結構之振動頻率(f_s)相同，亦即 $u_g(t) = 3\,sin(2\pi f_s t)$ mm，其中，$f_s = f_o = f_l = 0.54Hz$，同時沿用表 3.1 所示之變斷面 VTLCD 設計尺

寸進行減振控制之最佳設計參數研究。

圖 3.15(a)~圖 3.15(e)分別為在不同截面積的條件下，水平段長度比與水頭損失係數對於變斷面 VTLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之關係圖。其結果顯示，當水頭損失係數為任一定值時，水平長度比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水頭損失係數的增加，水柱激盪位移峰值呈現遞減的趨勢。在結構減振效能方面，當質量比與截面積比固定時，水頭損失係數$\delta=1$，水平長度比值越大，對結構位移、加速度均方根折減百分比效果最佳，在$\delta\geq5$ 之後，水平長度比之增加則對於結構位移均、加速度方根值雖仍持續增加，但提升率趨於平穩。

圖 3.16(a)～圖 3.16(d)分別為在不同質量比的條件下，截面積比與水平長度比對於 VTLCD 水柱激盪位移峰值及結構反應均方根折減之影響。其結果顯示，截面積比愈大，水柱激盪位移峰值愈小，且隨著水平長度比β的增加，水柱激盪位移峰值雖仍持續增加，但提升率趨於平穩。在結構減振效益方面，在固定某一個截面積比之下，水平長度比愈大，結構反應均方根折減則呈現遞增的趨勢。顯示在相同的質量比及水頭損失係數、截面積比之下，變斷面 VTLCD 系統水平長度比越大，則變斷面 VTLCD 系統對於結構反應的減振效果愈好。

表 3.3 為不同質量比時，變斷面 VTLCD 系統之最佳設計參數與結構反應峰值及均方根值折減率。其結果顯示，滿足水柱激盪位移限制且可達到最佳控制效果之截面積比為λ至少須大於 1。此外，質量比愈大，控制效果愈好，當質量比α大於 3%，最佳之結構反應均方根值折減率即可達 80%以上,結構反應峰值亦可達約 70%惟當質量比

大於 5%後，最佳之結構反應峰值與均方根值折減率即趨於平穩。

圖 3.17 與圖 3.18 為頻率比$\gamma=1$、質量比$\alpha=5\%$、長度比$\beta=0.5$、截面積比$\lambda=1.4$、水頭損失係數$\delta=1$等條件下，VTLCD 系統控制與未控制結構之位移及加速度歷時比較。其結果顯示，VTLCD 系統對於結構受到與結構頻率共振之簡諧地表擾動的控制效果相當良好，結構的位移及加速度反應峰值折減率可達 80%以上。圖 3.19 與圖 3.20 為頻率比$\gamma=1$、質量比$\alpha=5\%$、長度比$\beta=0.5$、截面積比$\lambda=1.4$、水頭損失係數$\delta=1$等條件下，VTLCD 系統控制與未控制結構之位移及加速度富氏頻譜。其結果顯示， VTLCD 系統能有效抑制結構主要振頻的能量。圖 3.21 為 VTLCD 系統控制與未控制結構之瞬時總能量(結構動能與位能)歷時。其結果顯示，結構擾動後 10 秒時，其瞬時總能量已趨近於 0，幾乎全數的振動能量已移轉至變斷面 VTLCD 系統並被消散。

圖 3.22 與圖 3.23 分別為 VTLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度歷時，其中，水柱激盪位移峰值約可達 8cm。圖 3.24 與圖 3.25 分別為 VTLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度反應富氏頻譜及頻譜相位角。圖 3.26 為 VTLCD 系統之遲滯迴圈，其所圍之面積即為 VTLCD 系統消散之振動能量。

3.4 結論

本節以變斷面 VTLCD 系統進行結構減振之參數分析，綜合結構自由振動分析、結構受到地表共振簡諧波擾動之分析作用於結構樓層

等分析(變斷面 VTLCD 系統之振動頻率與結構頻率之比值設定$\gamma=1$的條件下)的結果可知：

1. 變斷面 VTLCD 系統在最佳化長度比範圍內，結構自由振動與簡諧擾動共振下，水頭損失係數控制在$\delta=1$後，質量比α愈大，控制效果愈好。
2. 變斷面 VTLCD 系統的質量比α愈大，在結構受地表簡諧波共振擾動之情況，控制效果愈好。
3. 變斷面 VTLCD 系統在固定質量比及長度比之下，截面積比介於越大，減振效益越好。
4. 變斷面 VTLCD 系統在固定質量比及截面積比之下，長度比越大，減振效益越好。
5. 在上述設計參數之範圍內，變斷面 VTLCD 系統之水頭損失係數δ在 1~20 之間時，可達到較佳的減振效果。
6. 在固定長質量比及水頭損失係數之下，等斷面 TLCD 之最佳的長度比為β=0.55～0.75。如變斷面 VTLCD 欲達與等斷面 TLCD 相同減振效益，在截面積比$\lambda\leqq1.2$時，最佳的長度比可調整於β=0.55～0.75 之間，可達到較佳的減振效；而截面積比$\lambda\geqq1.3$ 時，最佳的長度比可調整於β=0.5～0.7 之間，可達到較佳的減振效果。如表 3.4。

7. 當 VTLCD 之設計受建物之限制無法達到最佳的長度比時，可藉由調整截面積比(λ)之大小，增加 VTLCD 對結構之消能減振控制。

第四章 等斷面調諧液體消能系統之試驗與分析

4.1 TLCD 元件與單層樓鋁構架模型之設計

根據交通大學土木工程研究所論文"調諧液體消能系統之分析與試驗" [65] 一文得知等斷面結構最佳設計參數分析如下：

（a）TLCD 系統的質量比α愈大，結構減震效益愈好。

（b）TLCD 系統的水平段長度比β介於 0.55~0.75。

（c）TLCD 系統的開孔面積比採用$\phi \geq 0.36$之設計，有良好之控制效果。

為驗證等斷面 TLCD 系統最佳化設計長度之非線性理論分析模式之精確性與了解 TLCD 系統作為結構控制之減振效益，因此遂設計一等斷面 TLCD 水平段長度 d=1.1m，β介於 0.55~0.75 之間【圖 4.1】，以便往後進行 TLCD 系統之元件測試與性能測試(振動台試驗）。

考量 TLCD 系統之振動頻率可調整在介於 0.50~0.60Hz 間作為設計目標，以配合單層樓鋁構架模型之基本振動頻率。因此設計等斷面 TLCD 元件設計頻率為 0.5Hz，其 TLCD 元件斷面尺寸及系統動力特性等參數如表 4.1。

4.2 TLCD 元件模型安裝

等斷面 TLCD 元件模型主要由兩個 L 型之 PVC 管對鎖而成(圖 4.2/圖 4.3，圖 4.4/圖 4.5 為變斷面 VLTCD)，兩 PVC 管中間可抽換不

同孔徑之孔口板(圖 4.6，圖 4.7 為變斷面 VLTCD)，共設計半徑分別為 50 mm(全開)、40 mm（2/3 開）、30 mm（半開）、20mm 及 10mm、等 5 種不同孔徑之孔口板，以探討孔徑大小對落水頭之影響，在孔口板兩側塞有橡膠墊片以防漏水，最後利用螺栓將兩個 L 型之 PVC 管栓緊。此外，TLCD 元件垂直段外側設有兩根支撐座，除了用以架設波高計（圖 4.8）外，亦可提供 TLCD 垂直段之加勁效果，避免垂直段在運動過程中產生晃動或變形，而影響試驗結果。圖 4.9 分別為 TLCD 模型之示意圖，其總重量(未裝水時)約為 28.4 kgf。

除了設計 TLCD 模型進行元件測試外，本研究亦設計一單層樓鋁構架模型(圖 4.10~圖 4.12)以供進行 TLCD 元件之性能測試。該構架之梁、柱均採用相同尺寸的空心鋁方管進行製作，其斷面尺寸及材料性質整理如表 4.2 所示。鋁構架模型的平面尺寸為 2m×2m ，總高度為 2.75 m，樓層總重量為 245 kgf(含四塊厚度為 6 mm 之鋼板重量、未裝水之 TLCD 元件重量及鋁架柱高一半以上之大梁與小梁的重量)。此外，並於結構梁柱接頭處增焊加勁板(10cm×10cm)補強，因此柱子之實際有效長度約為 2.5 m。圖 4.13 為頂樓鋼板之螺栓孔位設計圖，TLCD 元件底板可利用螺栓固定於樓板上。鋁模型構架之自然振動頻率與阻尼比等結構動力特性參數將由結構系統識別試驗之分析結果求得。

4.3 試驗設備與感應器配置

TLCD 系統之元件測試與性能測試係於交通大學土木結構實驗室進行，性能測試係利用單軸向地震模擬振動台所完成。茲將試驗時

使用之相關儀器設備說明如下：

1.地震模擬振動台

結構動力試驗方法中，以振動臺最能模擬真實之地動環境，在振動臺試驗中結構之動力特性可以表露無遺，因此也最適於教學及研究成果之示範與檢驗。交通大學地震模擬振動臺之臺面尺寸為 3 公尺見方(圖 4.14)，振動臺之質量為 5 公噸，試體結構之最大質量可達 10 公噸。振動臺係由一支油壓致動器來驅動，其最大行程為±12.5 公分，最大加速度為 1g。

2. 控制系統與資料擷取系統

控制系統為振動台之中樞所在，吾人使用 MTS 407 控制器之位移控制模式操控振動台，因此，輸入之訊號為經基線修正積分之地震位移歷時記錄。407 控制器內部波形產生器可提供矩形波、三角形波及正弦波等類比訊號輸出，若配合數位訊號輸入模組即可模擬隨機訊號及任意形式之地表擾動。

資料擷取系統採用德國 IMC 公司之產品，主要功能為輸出地震命令訊號至 407 控制器以驅動振動台，同時記錄各感應計之振動訊號。資料擷取系統包含類比/數位(A/D)、數位/類比(D/A)及數位輸入/輸出(Digital I/O)等功能，並提供 32 組單端式(Single-ended)接線法類比輸入、8 組單端式(Single-ended)接線法類比輸出、32 組單端式(Single-ended)接線法數位輸入/輸出，最大總取樣頻率(Sample Rate)為 80kHz。

3.微振加速規

由於單層樓鋁構架模型的週期為 1.85sec，結構較軟(模擬高層結構)，經初步測試得知，結構於容許位移內(12cm)所測得之樓層加速度振幅僅約數十 gal，因此考慮使用微振加速規(圖 4.15，含訊號調節放大器)進行振動量測，以提高量測的精度。加速規之規格如表 4.3 所示，其可量測之頻率範圍為 0.1Hz 至 450Hz，可量測之最大加速度則為±0.5 g。吾人於振動台及結構樓板各安裝一顆微振加速規(圖 4.16)，以量測地表及結構之加速度反應。

4.位移計(LVDT)

位移計(KYOWA, DLT-300AS)主要量測結構頂樓之位移，其動態量測範圍為±30 cm。試驗設置係以振動台前方之五層樓鋼結構模型(圖 4.16)作為固定參考架安裝位移計，以監測結構樓層之位移。

5.波高計

波高計(圖 4.8，ARC 公司生產)主要量測 TLCD 垂直段之液體激盪位移。圖 4.8 所示為型號 WHA-600(30512A)之波高計，其量測範圍為±30 cm；另有一支型號為 WHA-800(30512B)之波高計，其量測範圍為±40 cm。將波高計將分別以 C 形夾具固定於 U 型 TLCD 元件垂直段之支撐架(圖 4.17)，俾便量測 TLCD 系統之液體激盪振幅。

4.4 試驗規劃

振動台試驗主要規劃進行 TLCD 元件測試與 TLCD 性能測試，以瞭解 TLCD 系統之振動特性及探討 TLCD 系統應用於結構振動控制之減振效益。

4.4.1 TLCD 系統之元件試驗

元件測試時係利用四個根長螺桿將 U 型 TLCD 元件底座固定於振動台上，如圖 4.17 所示。試驗前以水倒入 TLCD 管內，使液體之總長度(有效長度)達 1.99m，相當於 TLCD 元件之振動頻率為 0.5Hz。吾人並於水中添加紅色廣告顏料，以便於觀察液體在 U 型管內振盪的情形。為探討 TLCD 在不同擾動頻率、不同外力振幅下 TLCD 之水頭損失係數與孔口口徑開口大小關係，故試驗時由控制器輸入振動台命令振幅分別為 30mm、40mm、50㎜，擾動頻率分別為 0.2Hz、0.3Hz、0.4Hz、0.5Hz（共振頻率）、0.6Hz、0.7Hz 與 0.8Hz 之等七種不同頻率之簡諧波擾動，並於每一試驗完成後更換不同孔徑之孔口板【依序分別為孔徑 50mm(全開)、40mm（2/3 開）、30mm（半開)】，再重複進行上述之試驗。另外為了解不同外力共振振幅與水頭損係數、孔口口徑開口關係，同樣地，試驗時由控制器輸入振動台命令振幅分別為 20㎜、25㎜、30mm、35㎜、40mm、45mm、50mm、55mm，擾動共振頻率為 0.5Hz 之簡諧波擾動，並於每一試驗完成後更換不同孔徑之孔口板【(依序分別為孔徑 50mm(全開)、40mm（2/3 開）、30mm（半開)】，再重複進行上述之試驗完成。

4.4.2 TLCD 系統之性能試驗

將 TLCD 元件吊至單層樓鋁構架模型的樓頂安裝(圖 4.16)，俾便進行 TLCD 系統之性能試驗。進行性能試驗前先進行結構系統識別試驗，分別輸入 El Centro 與 Kobe 地震(PGA 均為 0.15g)，同時量測振動台之加速度輸入與樓層之加速度反應輸出，應用第 2.4 節所述之結構系統識別單一輸入-單一輸出自迴歸模式(Single Input-Single Output ARX Model)[49-51]識別結構動力特性參數，包括振動頻率與阻尼比。根據結構系統識別所得之振動頻率即可調整 TLCD 元件的有效長度，使其振動頻率與結構之振動頻率一致，即可進行性能試驗。

性能試驗之內容包括結構自由振動試驗與簡諧波之地表擾動試驗。自由振動試驗是利用繩索的一端拉住結構的樓板，另一端則跨過滑輪組(圖 4.18)並懸吊一重量為 12kgf 的質塊，產生約為 10.41kgf 之水平側向力，結構初始側向位移為 3.45cm。試驗進行時吾人以打火機將繩索燒斷，結構隨即產生自由振動。分別針對無控制結構(TLCD 未裝水)與 TLCD 控制結構(含三種半徑不同之孔口板)進行試驗，量測其振動反應，以討論 TLCD 系統之減振效益。

簡諧波地表擾動試驗方面，除了進行振幅為 3mm、頻率分別為 0.3Hz、0.4Hz、0.5Hz、0.53 Hz、0.6Hz、0.7Hz、0.8Hz、0.9Hz 之簡諧波擾動外，吾人並輸入一振幅為 2mm、2.5mm、3mm、3.5mm、4mm、4.5mm、5mm 擾動共振頻率為 0.53 Hz 之簡諧波擾動，並量測 TLCD 控制結構(含三種半徑不同之孔口板)之振動反應，以探討 TLCD 系統在不同共振振幅下與水頭損失係數關係。

4.5 試驗結果

4.5.1 等斷面 TLCD 元件試驗

若令孔口板開孔面積與 TLCD 元件斷面積(半徑 50mm)之面積比為ϕ(ϕ=1、0.64 及 0.36 分別對應孔口板之開孔半徑為 50mm、40mm 及 30mm)，外力振幅計有 20mm、30mm、40mm 三種，擾動頻率比(γ_T)定義為振動台之擾動頻率與 TLCD 元件自然振動頻率(0.5Hz)之比值(γ_T=0.8、1.0 及 1.6 分別對應振動台之擾動頻率為 0.4Hz、0.5Hz 及 0.8Hz)。則面積比與擾動頻率比對於液體激盪位移之影響如圖 4.19 所示；其外力振幅越大者，TLCD 液體激盪位移歷時亦增大。圖 4.20～圖 4.22 為面積比與擾動頻率比對於液體激盪位移峰值之影響，其結果顯示，當擾動頻率與 TLCD 之自然振頻產生共振時(γ_T=1.0)，TLCD 之液體激盪位移最大，其中孔口板全開的情況(ϕ=1)，外力振幅為 20mm、30mm、40mm 時約可達 11.15cm、14cm、17.1cm，且隨著孔口板之面積比愈小，液體激盪位移亦隨之降低(ϕ=0.36)的情況約為 4.25cm、5.15 cm、7.15 cm。圖 4.23 則為面積比與擾動頻率比對於液體激盪加速度之影響。液體激盪加速度為將液體激盪位移對時間微分兩次所得之結果，微分前吾人首先將波高計量所量測之液體激盪位移 2Hz 以上之振動反應進行濾波處理。由圖 4.23 之結果可知，液體激盪加速度振幅的變化趨勢與液體激盪位移的情況相同。

圖 4.24 為不同面積比，外力擾動振幅與時間對於 TLCD 元件系統識別所得之水頭損失係數歷時。水頭損失係數之識別係根據第 2.4

節所述之方法，利用波高計所量測之液體激盪振幅(x_f)、液體流速($\dot{x}_f$，激盪振幅對時間微分一次所得)、液體激盪加速度($\ddot{x}_f$，液體激盪振幅對時間微分兩次所得)及地表加速度($\ddot{u}_g$)等已知反應，識別未知之水頭損失係數。其結果顯示，當擾動頻率較慢時(γ_T =0.8)，外力振幅 20mm、30mm、40mm 時液體激盪位移較小(峰值僅約 0.45cm、0.56cm、0.6cm)，水頭損失係數識別的結果波動較大；隨著擾動頻率變快(γ_T =1.0 及 1.6)，水頭損失係數僅須少數資料進行識別即可迅速收斂並趨於穩定值(約 8 秒，相當於液面激盪振幅達穩態的時間)。

圖 4.25 為探討不同外力振幅TLCD元件之面積比與擾動頻率比對於水頭損失係數之影響，最後利用第 2.5 節的線性迴歸方法擬合成二次拋物線。其結果顯示，頻率比γ_T＜1.0，水頭損失係數越大，在共振頻率擾動(γ_T=1.0)下，其水頭損失係數為最小，隨著頻率比γ_T＞1.0，水頭損失係數趨緩漸大，在頻率比γ_T＜0.8 外力振幅越大，水頭損失係數越大，在頻率比γ_T＞0.8 外力振幅越大，水頭損失係數越小。圖 4.26 為探討不同外力振幅TLCD元件之面積比對於水頭損失係數之影響，根據試驗結果顯示，孔徑愈小，水頭損失係數愈大，孔徑愈大，水頭損失係數愈小。在共振頻率擾動(γ_T=1.0)下，其水頭損失係數為最小，在不同面積比ϕ=1.0、0.64 及 0.36 所對應之水頭損失係數分別為δ_{20}=4、7 及 17，δ_{30}=4、6 及 16，δ_{40}=3、5 及 15。

圖 4.27 為探討不同外力共振振幅擾動頻率下與水頭損失係數之影響，其結果顯示，不同外力共振振幅擾動頻率下得知，振幅與振幅之間水頭損失係數差異不大；尤其開口率越小其水頭損失係數差異影響越小。圖 4.28～圖 4.29 為在不同外力共振振幅擾動頻率下，將 TLCD

元件之擾動時間 60sec，把波高計所量之液體激盪位移，將其微分後變成液體激盪速度，並分別計算均方根值，再將均方根值乘上根號 2 倍後，轉成對應之液體激盪位移峰值與液體速度峰值，最後利用第 2.5 節的線性迴歸方法求得不同面積比與液體位移峰值、速度峰值對於水頭損失係數之關係，表 4.4 為擬合成直線所得參數。因 TLCD 運動方程式中阻尼項與水頭損失係數，液體激盪速度振幅有關，故利用狀態空間法，計算出不同時刻液體激盪速度後，代入所迴歸的直線方程式，以計算不同時刻之水頭損失係數如圖 4.30，最後利用迭代方法求出 TLCD 之液體激盪位移、速度與加速度，與試驗值液體激盪位移與速度、加速度歷時做比較，如圖 4.31、圖 4.32、圖 4.33 其結果顯示，當$\gamma_T=1.0$時（共振），微分所得之液體激盪位移、速度、加速度與理論預測所得之結果十分契合，由此可充分掌握 TLCD 元件特性。

圖 4.34～圖 4.36 為頻率比$\gamma_T=1.0$，面積比ϕ=1.0、0.64 及 0.36 時，外力振幅 20mm、30mm、40mm 時， TLCD 系統之遲滯迴圈。其結果顯示，當孔口板孔徑較大時，阻尼力小，液體激盪位移大；反之，孔口板孔徑較小時，阻尼力大，液體激盪位移隨之降低。整體而言，於共振條件下，ϕ=1.0 時之遲滯迴圈消能面積隨者外力振幅越大，而增大。

由於元件測試之擾動時間約為 60sec，試驗記錄之時間則為 120sec，因此吾人將 60sec~120sec 之自由振動反應歷時記錄進行富氏頻譜所得之結果如圖 4.37～圖 4.40 所示。其結果顯示，不同孔口板孔徑(ϕ=1、0.64 及 0.36）與外力振幅（20mm、30mm、40mm）所得之元件理論共振頻率為 0.50Hz 與測試時倒入 U 型管之液體有效長度

為 1.99m 極為接近，另外改變 TLCD 管內液體長度，並配合不同孔口板孔徑(ϕ=1、0.64 及 0.36）與外力振幅 30mm 所得之元件理論振動頻率為 0.54Hz（外力擾動頻率為 0.8Hz）與測試時倒入 U 型管之液體有效長度為 1.70m 極為接近，顯示利用不同液體之有效長度計算 TLCD 元件之振動頻率十分精確，調頻相當容易而且可靠。

4.5.2 結構系統識別試驗

不同於單頻之簡諧擾動，地震波擾動的頻率內涵較為豐富。本研究亦進行振動台試驗，輸入 El Centro 地震波(PGA 均為 0.15g)，完成單層樓鋁構架模型與空 TLCD 之結構系統識別。由 El Centro 地震波識別所得之結構動力特性參數整理於表 4.5，識別所得之等斷面 TLCD 結構頻率為 0.53Hz 及變斷面 VTLCD 結構頻率為 0.52Hz，而阻尼比為 0.57%與 0.1%，並利用 $k_s = \omega^2 m_s$ 與 $c_s = 2m_s\omega\varsigma_s$ 即可結構之勁度與阻尼係數。圖 4.41(El Centro 地震)為系統識別預測與試驗之結構加速度歷時比較，其結果顯示，預測結果與試驗結果相當一致，顯示吾人已充份掌握結構的動力特性參數，可據以進行 TLCD 控制結構之數值模擬分析。

4.5.3 等斷面 TLCD 系統之性能試驗

(a)自由振動試驗

由於系統識別所得之結構振動頻率為 0.53Hz，本文遂調節 TLCD 的儲水量，使 TLCD 之液體有效長度為 $L_e = 1.70\,\text{m}$，將 TLCD 系統與

結構之頻率比設計為$\gamma=1.00$。水平段長度與有效長度之長度比β為0.65。此外，根據液體之有效長度、TLCD 系統之斷面積及水的密度，可求得液體的重量為 13.88kgf，質量比約為$\alpha=5.60\%$(液體重與結構總重之比值)。其 TLCD 結構設計參數如表 4.6。

圖 4.42 與圖 4.43 分別 TLCD 控制與未控制結構之位移及加速度歷時。由圖 4.42 可知，當結構受到 10.41kgf 之側向力作用時，位移計所量得之結構最大初始位移為 3.45cm，與根據系統識別之結構勁度(k_s=282.4 kgf/m)所求得之靜力位移($x_s=10.41/k_s$=3.60cm)十分接近。由表 4.7 TLCD 系統之減振效益可知，當面積比$\phi=0.36$時，TLCD 系統對於結構的控制效果最好，結構位移均方根值折減率為 56.26%，結構加速度之折減率則可達 66.43%。

圖 4.44 與圖 4.45 分別 TLCD 控制與未控制結構之位移及加速度富氏頻譜。由圖 4.44 可知，無 TLCD 控制結構所對應頻率為 0.53Hz，而有 TLCD 控制結構所對應頻率約為 0.50Hz，其原因乃為含水重量加入造成頻率降低，實屬合理。圖 4.46 為液體振盪位移。

圖 4.47 為當面積比$\phi=0.36$時，TLCD 控制與未控制結構之瞬時總能量與 TLCD 瞬時總能量歷時，其中，TLCD 之瞬時總能量為 TLCD 每一瞬時之動能與重力位能的總和，可計算如下：

$$T_t=\rho A\dot{x}_f{}^2h_v+\rho A\left(\dot{x}_s+\dot{u}_g\right)^2h_v+\rho Ad\left(\dot{x}_f+\dot{x}_s+\dot{u}_g\right)^2/2+\rho Ag\left(h_v{}^2+x_f{}^2\right)$$

。其結果顯示，TLCD 元件可大幅吸收結構的振動能量，並透過孔口板阻隔液體所造成之落水頭來消耗系統的振動能量。TLCD 元件藉由上述之振動能量轉移與消耗的運作方式，可有效降低結構的振動反應，進而達成結構減振的目標。

圖 4.48 不同孔口板之 TLCD 系統遲滯迴圈，其所包圍之面積即為 TLCD 元件所消耗之系統總振動能量(包括結構與 TLCD 元件之振動能量)。圖 4.49 不同孔口板之 TLCD 系統液體激盪位移歷時，ϕ=1.00、0.64 及 0.36，其對應峰值由上而下分別為 11.5cm、10.74cm 及 6.2cm。

此外，為進行理論數值模擬分析，本文首先識別不同面積比之 TLCD 元件水頭損失係數，識別前將波高計與微振加速規所量測之振動訊號進行濾波處理(2Hz 以上之反應濾掉)，以降低雜訊對於液體激盪位移微分後之速度與加速度的影響。不同面積比ϕ=1.00、0.64、0.36 的情況下，根據第 2.4 節所述之方法，利用波高計所量測之液體激盪振幅(x_f)、液體流速($\dot{x}_f$ ，激盪振幅對時間微分一次所得)、液體激盪加速度($\ddot{x}_f$ ，液體激盪振幅對時間微分兩次所得)及樓層之加速度($\ddot{x}_s$)等已知反應，識別未知之水頭損失係數。系統識別所得之水頭損失係數分別為δ=4.23、5.82 及 13.47。圖 4.50 為ϕ=0.36 時，系統識別所得之水頭損失係數歷時，其結果顯示，水頭損失係數收斂的情況良好，約在第 8 秒便能收斂並趨於穩定值(13.47)。

圖 4.51、圖 4.52 與圖 4.53 分別為利用識別之水頭損失係數進行理論分析所得之結構位移、結構加速度及 TLCD 液體激盪位移與試驗結果之比較(ϕ=0.36，δ=13.47)。其結果顯示，理論分析所得之結果與試驗結果十分吻合，說明利用識別之水頭損失係數配合非線性解析模式可精確預測結構及 TLCD 液體之振動反應。

另外由交通大學土木工程研究所論文”調諧液體消能系統之分析

與試驗"中關於等斷面 TLCD（d=0.65m）自由振盪試驗結果與本文等斷面 TLCD（d=1.1m）自由振盪試驗結果比較，如表 4.8 得知在相同試驗方法及近似相同質量比之下，孔口板面積比ϕ=0.36，結構位移、加速度均方根值折與峰值折減率分別為 48.43%、51.75%及 56.26%、66.43%，由此可知在相同質量比之下，水平段長度比越大，減振效益越好。

(b)地表簡諧波擾動試驗

圖 4.54 與圖 4.55 分別為振動台輸入振幅為 3mm，地表簡諧波擾動頻率與結構頻率之比值$\gamma_s=1.0$時(即地表簡諧波共振擾動時)，TLCD 控制結構與未控制結構之位移與加速度歷時。由於未裝置 TLCD 系統之結構於地表簡諧波共振擾動下，結構的位移將隨時間持續放大，為防止結構產生破壞，本試驗於 28 秒後便停止振動台輸入簡諧波擾動，隨後結構即產生自由振動反應；有裝置 TLCD 系統之結構則持續輸入簡諧波擾動，擾動的時間為 40 秒。其結果顯示，當孔口板開孔面積與 U 型管之截面積比ϕ=1.0 時，TLCD 系統的控制效果最好，結構位移均方根與峰值之折減率分別為 68.02%與 76.35%(表 4.9)；結構加速度均方根與峰值之折減率可分別達 70.65%與 77.34%，減振效果十分良好。圖 4.56 為不同孔口板 TLCD 在共振簡諧擾動時，液體激盪位移

圖 4.57 與圖 4.58 分別 TLCD 控制與未控制結構之位移及加速度富氏頻譜。由圖 4.57 可知，無 TLCD 控制結構所對應頻率為 0.53Hz，而有 TLCD 控制結構所對應頻率有兩個峰值為結構及 TLCD 頻率所

互制引起效應。圖 4.59 與圖 4.60 為液體激盪位移富氏頻譜及液體激盪位移反應富氏頻譜之相位角。圖 4.61 與圖 4.62 為液體激盪加速度富氏頻譜及液體激盪加速度反應富氏頻譜之相位角。圖 4.63、圖 4.64、圖 4.65、圖 4.66 分別為自由振動時，TLCD 控制結構之位移、加速度富氏頻譜圖及相位角圖，由結果顯示，結構之振動量轉移至 TLCD 元件吸收較多振動能量。

圖 4.67、圖 4.68 與圖 4.69 分別為不同孔口板面積比之 TLCD 控制與未控制結構之瞬時總能量與 TLCD 瞬時總能量歷時，其結果顯示，結構裝置 TLCD 系統後，結構之振動能量可移轉至 TLCD 元件，其中，以孔口板面積比為ϕ=1.0 之 TLCD 元件吸收較多的結構振動能量，因此結構的振動能量最小。圖 4.70 為不同孔口板之 TLCD 系統遲滯迴圈，其所包圍之面積即為 TLCD 元件所消耗之系統振動能量(包括結構與 TLCD 元件之振動能量)。

此外，為進行理論數值模擬分析，吾人首先識別不同面積比之 TLCD 元件水頭損失係數，識別前將波高計與微振加速規所量測之振動訊號進行濾波處理(2Hz 以上之反應濾掉)，以降低雜訊對於液體激盪位移微分後之速度與加速度的影響。圖 4.71 為$\gamma_s = 1$ 時，不同孔口板之 TLCD 水頭損失係數收斂情形，其結果顯示，水頭損失係數收斂的情況良好，約在第 8 秒便能收斂並趨於穩定。表 4.10 為不同擾動頻率比與孔口板面積比時，系統識別所得之水頭損失係數，其關係如圖 4.72 所示，面積比愈小，水頭損失係數愈大，且當擾動頻率與結構頻率之比值$\gamma_s = 1.0$ 時，TLCD 系統之水頭損失係數最小，其值分別為 4.05、5.31 與 14.14(分別對應於面積比ϕ=1.00、0.64 與 0.36)。

隨著擾動頻率遠離結構的自然振動頻率，水頭損失係數有增加的趨勢。

圖 4.73 為探討不同外力共振振幅擾動頻率下與水頭損失係數之影響，其結果顯示，不同外力共振振幅擾動頻率下得知，振幅與振幅之間水頭損失係數差異不大；尤其開口率越小其水頭損失係數差異影響越小。圖 4.74～圖 4.75 為在不同外力共振振幅擾動頻率下，將 TLCD 元件之擾動時間 60sec，把波高計所量之液體激盪位移，將其微分後變成液體激盪速度，並分別計算均方根值，再將均方根值乘上根號 2 倍後，轉成對應之液體激盪位移峰值與液體速度峰值，最後利用第 2.5 節的線性迴歸方法求得不同面積比與液體位移峰值、速度峰值對於水頭損失係數之關係，表 4.11 為擬合成直線所得參數。因 TLCD 運動方程式中阻尼項與水頭損失係數，液體激盪速度振幅有關，故利用狀態空間法，計算出不同時刻液體激盪速度後，代入所迴歸的直線方程式，以計算不同時刻之水頭損失係數如圖 4.76、圖 4.77、圖 4.78，最後利用迭代方法求出 TLCD 之結構位移、加速度與液體激盪位移，與試驗值結構位移、加速度與液體激盪位移歷時做比較，如圖 4.79、圖 4.80、圖 4.81 其結果顯示，當 $\gamma_T = 1.0$ 時（共振），量測所得之結構位移、加速度與液體激盪位移與理論預測所得之結果十分契合。

表 4.12 為不同擾動頻率比與孔口板面積比之 TLCD 系統液體激盪位移峰值。由表可知，當擾動頻率與結構頻率接近時，TLCD 系統之液體激盪位移最大(圖 4.82)，結構將移轉較多的振動能量至 TLCD 元件。

表 4.13 與表 4.14 分別為不同擾動頻率比與不同孔口板孔徑之結

構位移與加速度均方根折減，其減振效益與頻率比之關係如圖 4.83 所示。表 4.15 與表 4.16 分別為不同擾動頻率比與不同孔口板孔徑之結構位移與加速度峰值之折減，其減振效益與頻率比之關係如圖 4.84 所示。由以上結果可知(配合表 4.11)，在 $\gamma_s = 1.0\sim1.70$ 時，$\phi \geqq 0.36$ 減振效果都有不錯表現。

另外由交通大學土木工程研究所論文”調諧液體消能系統之分析與試驗”**[65]**中關於等斷面TLCD（d=0.65m）簡諧擾動試驗結果與本文等斷面TLCD（d=1.1m）簡諧擾動試驗結果，如表4.17作比較得知在相同試驗方法及近似相同質量比之下，孔口板面積比ϕ=1.0，結構位移、加速度均方根值與峰值折減率分別為68.02％、70.65％及76.35％、77.34％，由此可知在相同質量比之下，水平段長度比越大，減振效益越好。

綜合上述之 TLCD 元件測試與性能測試所得之結果，吾人可歸納以下幾點結論：

1. 結構於自由振動時，在開孔面積比ϕ=0.36 時有最佳之控制效果；而共振簡諧擾動下則在ϕ=1 時有最佳之控制效果。整體而言，孔口板開口與等斷面 TLCD 之開孔面積比採用$\phi \geq 0.36$之設計，均有良好之控制效果。
2. 由結構自由振動與簡諧擾動試驗得知，在相同質量比及孔口板孔徑之下，水平長度比β越長，減振效益越好。
3. 根據 TLCD 系統之液體有效長度所得之理論振動頻率與

TLCD 元件試驗所得之頻率十分吻合，顯示吾人可藉由調節液體的有效長度決定 TLCD 元件之動力特性。

4. 對於等斷面TLCD在不同外力擾動頻率作用下，其TLCD所能調頻範圍介於γ_t=1.0（共振）～1.7 有較好折減表現。

5. 根據每一瞬時之液體激盪速度代入液體激盪速度與水頭損失係數之迴歸公式(γ=1.0)所得之水頭損失係數進行理論分析，其結果與試驗的結果十分吻合，說明本文採用時變性水頭損失係數之分析模式相當合理。

第五章 變斷面調諧液體消能系統之試驗與分析

5.1 變斷面 VTLCD 元件設計與單層樓鋁構架模型之設計

由第三章變斷面 VTLCD 系統數值分析得知，變斷面 VTLCD 系統最佳設計參數分析如下：

（a）VTLCD 系統的質量比α愈大，結構減震效益愈好。

（b）變斷面 VTLCD 系統，在截面積比$\lambda \leqq 1.2$時，最佳度比可調整於β=0.55～0.75 之間，可達到較佳的減振效果；而截面積比$\lambda \geqq 1.3$ 時，最佳的長度比可調整於β=0.5～0.7 之間，可達到較佳的減振效果。

（c）VTLCD 系統的開孔面積比採用$\phi \geq 0.36$之設計，有良好之控制效果。

為驗證變斷面 VTLCD 系統最佳化設計長度之非線性理論分析模式之精確性與了解 VTLCD 系統作為結構控制之減振效益，因此遂設計一變斷面 VTLCD 水平段長度 d=0.8m，β=0.47，水平段直徑為D_h=124mm，而垂直段延伸至水平段兩旁之管徑直徑為Dv=152mm，故其垂直段面積與水平段面積之比值λ=1.52，實體照片【圖 5.1】，以便往後進行 VTLCD 系統之元件測試與性能測試(振動台試驗)。

考量 VTLCD 系統之振動頻率可調整在介於 0.50~0.60Hz 間作為設計目標，以配合單層樓鋁構架模型之基本振動頻率。因此設計變斷面 VTLCD 元件設計頻率為 0.5 Hz，其 VTLCD 元件斷面尺寸及系統動力特性等參數見表 4.1。另外關於 VTLCD 元件安裝與試驗設備與

感應器配置，參考第四章所述。

5.2 試驗規劃

振動台試驗主要規劃進行 VTLCD 元件測試與 VTLCD 性能測試，以瞭解 VTLCD 系統之振動特性及探討 VTLCD 系統應用於結構振動控制之減振效益

5.2.1 變斷面 VTLCD 系統之元件試驗

利用VTLCD水平段度為d=0.8m作為元件試驗，再分別考慮震動台簡諧擾動頻率分別為 0.2 Hz、0.3Hz、0.4Hz、0.5Hz、0.6Hz、0.7Hz、0.8Hz之等七種不同頻率之擾動，將V TLCD設計頻率成 0.5 Hz再代入式（3.17）計算 h_v=0.50m，相對 L_e 液體之總長度=1.99m。實驗時利用長桿螺栓固定於振動台上。試驗前以水倒入VTLCD管內，使液體之總長度(有效長度)達 1.99m，相當於VTLCD元件之振動頻率為0.5Hz。吾人並於水中添加紅色廣告顏料，以便於觀察液體在U型管內振盪的情形。試驗時由控制器輸入振動台命令振幅為 20㎜、30㎜、40mm、擾動頻率分別為 0.2 Hz 、0.3Hz、0.4Hz、0.5Hz、0.6Hz、0.7Hz、0.8Hz之等七種不同頻率之簡諧波擾動，並於每一試驗完成後更換不同孔徑之孔口板【依序分別為孔徑 75mm(全開)、50mm、37.5mm、25mm、12.5㎜。開孔率 A_o/A_h=100%(全開)、64%、36%（半開）、16%、4%；A_o=孔口板面積，A_h=水平段長度截面積)，再重複進行上述之試驗。另外為了解不同外力共振振幅與水頭損係數、孔口口徑開

口關係，同樣地，試驗時由控制器輸入振動台命令振幅分別為 20㎜、25㎜、30mm、35㎜、40mm、45mm、50mm、55mm，擾動共振頻率為 0.5Hz之簡諧波擾動，並於每一試驗完成後更換不同孔徑之孔口板【依序分別為孔徑 75mm(全開)、50mm（2/3 開）、37.5mm（半開）】，再重複進行上述之試驗完成。另外關於VTLCD系統之性能試驗步驟請參考第四章 4.4.2 節所述。

5.3 試驗結果

5.3.1 變斷面 VTLCD 元件試驗

若令孔口板開孔面積與 VTLCD 元件斷面積(半徑 75mm)之面積比為ϕ(ϕ=1、0.64 及 0.36 分別對應孔口板之開孔半徑為 75mm、50mm 及 37.5mm)，外力振幅計有 20mm、30mm、40mm 三種，擾動頻率比(γ_T)定義為振動台之擾動頻率與 VTLCD 元件自然振動頻率(0.5Hz)之比值(γ_T=0.8、1.0 及 1.6 分別對應振動台之擾動頻率為 0.4Hz、0.5Hz 及 0.8Hz)。則面積比與擾動頻率比對於液體激盪位移之影響如圖 5.2 所示；其外力振幅越大者，TLCD 液體激盪位移歷時亦增大。圖 5.3～圖 5.5 為面積比與擾動頻率比對於液體激盪位移峰值之影響，其結果顯示，當擾動頻率與 VTLCD 之自然振頻產生共振時(γ_T=1.0)，VTLCD 之液體激盪位移最大，其中孔口板全開的情況(ϕ=1)，外力振幅為 20mm、30mm、40mm 時約可達 7.5cm、11.5cm、11.75cm，且隨著孔口板之面積比愈小，液體激盪位移亦隨之降低(ϕ=0.36)的情

況約為 3.25cm、4.15 cm、4.25 cm。圖 5.6 則為面積比與擾動頻率比對於液體激盪加速度之影響。液體激盪加速度為將液體激盪位移對時間微分兩次所得之結果，微分前吾人首先將波高計量所量測之液體激盪位移 2Hz 以上之振動反應進行濾波處理。由圖 5.6 之結果可知，液體激盪加速度振幅的變化趨勢與液體激盪位移的情況相同。

圖 5.7 為不同面積比，外力擾動振幅與時間對於 VTLCD 元件系統識別所得之水頭損失係數歷時。水頭損失係數之識別係根據第 2.4 節所述之方法，利用波高計所量測之液體激盪振幅(x_f)、液體流速($\dot{x}_f$，激盪振幅對時間微分一次所得)、液體激盪加速度($\ddot{x}_f$，液體激盪振幅對時間微分兩次所得)及地表加速度($\ddot{u}_g$)等已知反應，識別未知之水頭損失係數。其結果顯示，當擾動頻率較慢時(γ_T =0.8)，外力振幅 20mm、30mm、40mm 時液體激盪位移較小(峰值僅約 0.45㎝、0.56㎝、0.6㎝)，水頭損失係數識別的結果波動較大；隨著擾動頻率變快(γ_T =1.0 及 1.6)，水頭損失係數僅須少數資料進行識別即可迅速收斂並趨於穩定值(約 10 秒，相當於液面激盪振幅達穩態的時間)。

圖 5.8 為探討不同外力振幅VTLCD元件之面積比與擾動頻率比對於水頭損失係數之影響，最後利用第 2.5 節的線性迴歸方法擬合成二次拋物線。其結果顯示，頻率比γ_T＜1.0，水頭損失係數越大，在共振頻率擾動(γ_T=1.0)下，其水頭損失係數為最小，隨著頻率比γ_T＞1.0，水頭損失係數趨緩漸大，在頻率比γ_T＜0.8 外力振幅越大，水頭損失係數越大，在頻率比γ_T＞0.8 外力振幅越大，水頭損失係數越小。圖 5.9 為探討不同外力振幅VTLCD元件之面積比對於水頭損失係數之影響，根據試驗結果顯示，孔徑愈小，水頭損失係數愈大，孔徑

愈大，水頭損失係數愈小。在共振頻率擾動(γ_T=1.0)下，其水頭損失係數為最小，在不同面積比ϕ=1.0、0.64 及 0.36 所對應之水頭損失係數分別為δ_{20}=4、5 及 18，δ_{30}=3、4 及 18，δ_{40}=3、5 及 18。

圖 5.10 為探討不同外力共振振幅擾動頻率下與水頭損失係數之影響，其結果顯示，不同外力共振振幅擾動頻率下得知，振幅與振幅之間水頭損失係數差異不大；尤其開口率越小其水頭損失係數差異影響越小。圖 5.11～圖 5.12 為在不同外力共振振幅擾動頻率下，將 VTLCD 元件之擾動時間 60sec，把波高計所量之液體激盪位移，將其微分後變成液體激盪速度，並分別計算均方根值，再將均方根值乘上根號 2 倍後，轉成對應之液體激盪位移峰值與液體速度峰值，最後利用第 2.5 節的線性迴歸方法求得不同面積比與液體位移峰值、速度峰值對於水頭損失係數之關係，表 5.1 為擬合成直線所得參數。因 VTLCD 運動方程式中阻尼項與水頭損失係數，液體激盪速度振幅有關，故利用狀態空間法，計算出不同時刻液體激盪速度後，代入所迴歸的直線方程式，以計算不同時刻之水頭損失係數如圖 5.13，最後利用迭代方法求出 VTLCD 之液體激盪位移、速度與加速度，與試驗值液體激盪位移與速度、加速度歷時做比較，如圖 5.14、圖 5.15、圖 5.16 其結果顯示，當γ_T =1.0 時（共振），微分所得之液體激盪位移、速度、加速度與理論預測所得之結果十分契合，由此可充分掌握 VTLCD 元件特性。

圖 5.17～圖 5.19 為頻率比γ_T =1.0，面積比ϕ=1.0、0.64 及 0.36 時，外力振幅 20mm、30mm、40mm 時， VTLCD 系統之遲滯迴圈。其結果顯示，當孔口板孔徑較大時，阻尼力小，液體激盪位移大；反

之，孔口板孔徑較小時，阻尼力大，液體激盪位移隨之降低。整體而言，於共振條件下，ϕ=1.0 時之遲滯迴圈消能面積隨者外力振幅越大，而增大。

由於元件測試之擾動時間約為 60sec，試驗記錄之時間則為 120sec，因此吾人將 60sec~120sec 之自由振動反應歷時記錄進行富氏頻譜所得之結果如圖 5.20～圖 5.23 所示。其結果顯示，不同孔口板孔徑(ϕ=1、0.64 及 0.36）與外力振幅（20mm、30mm、40mm）所得之元件理論共振頻率為 0.50Hz 與測試時倒入 U 型管之液體有效長度為 1.99m 極為接近，另外改變 TLCD 管內液體長度，並配合不同孔口板孔徑(ϕ=1、0.64 及 0.36）與外力振幅 30mm 所得之元件理論振動頻率為 0.54Hz（外力擾動頻率為 0.8Hz）與測試時倒入 U 型管之液體有效長度為 1.70m 極為接近，顯示利用不同液體之有效長度計算 VTLCD 元件之振動頻率十分精確，調頻相當容易而且可靠。

5.3.2 結構系統識別試驗

不同於單頻之簡諧擾動，地震波擾動的頻率內涵較為豐富。本研究亦進行振動台試驗，輸入 El Centro 地震波(PGA 均為 0.15g)，完成單層樓鋁構架模型與空 VTLCD 之結構系統識別。由 El Centro 地震波識別所得之結構動力特性參數參考表 4.5，識別所得之等斷面 VTLCD 結構頻率為 0.53Hz 及變斷面 VTLCD 結構頻率為 0.52Hz，而阻尼比為 0.57%與 0.1%，並利用 $k_s = \omega^2 m_s$ 與 $c_s = 2m_s\omega\varsigma_s$ 即可結構之勁度與阻尼係數。參考圖 4.41(El Centro 地震)為系統識別預測與試驗

之結構加速度歷時比較，其結果顯示，預測結果與試驗結果相當一致，顯示吾人已充份掌握結構的動力特性參數，可據以進行 VTLCD 控制結構之數值模擬分析。

5.3.3 變斷面 VTLCD 系統之性能試驗

(a)自由振動試驗

由於系統識別所得之結構振動頻率為 0.53Hz，本文遂調節 VTLCD 的儲水量，使 VTLCD 之液體有效長度為 $L_e = 1.70\,\mathrm{m}$，將 VTLCD 系統與結構之頻率比設計為 $\gamma = 1.00$。水平段長度與有效長度之長度比 β 為 0.47。此外，根據液體之有效長度、VTLCD 系統之斷面積及水的密度，可求得液體的重量為 26.9kgf，質量比約為 $\alpha = 10.56\%$(液體重與結構總重之比值)。其 VTLCD 結構設計參數參考如表 4.6。

圖 5.24 與圖 5.25 分別 TLCD 控制與未控制結構之位移及加速度歷時。由圖 5.24 可知，當結構受到 10.41kgf 之側向力作用時，位移計所量得之結構最大初始位移為 3.45cm，與根據系統識別之結構勁度(k_s=280.8 kgf/m)所求得之靜力位移($x_s = 10.41/k_s$ =3.65cm)十分接近。由表 5.2 VTLCD 系統之減振效益可知，當面積比 $\phi = 0.36$ 時，TLCD 系統對於結構的控制效果最好，結構位移均方根值折減率為 47.34%，結構加速度之折減率則可達 61.3%。

圖 5.26 與圖 5.27 分別 VTLCD 控制與未控制結構之位移及加速度富氏頻譜。由圖 5.26 可知，無 VTLCD 控制結構所對應頻率為 0.53Hz，而有 TLCD 控制結構所對應頻率約為 0.50Hz，其原因乃為

含水重量加入造成頻率降低，實屬合理。圖 5.28 為液體振盪位移。

圖 5.29 為當面積比 $\phi = 0.36$ 時，VTLCD 控制與未控制結構之瞬時總能量與 VTLCD 瞬時總能量歷時，其中，VTLCD 之瞬時總能量為 VTLCD 每一瞬時之動能與重力位能的總和，可計算如下：

$$T_t = \rho A_v \dot{x}_f^{\,2} h_v + \rho A_v \left(\dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 h_v + \rho A_h d \left(\frac{A_v}{A_h}\dot{x}_f + \dot{x}_s + \dot{u}_g\right)^2 \Big/ 2 + \rho A_v g \left(h_v^{\,2} + x_f^{\,2}\right)$$

。其結果顯示，VTLCD 元件可大幅吸收結構的振動能量，並透過孔口板阻隔液體所造成之落水頭來消耗系統的振動能量。VTLCD 元件藉由上述之振動能量轉移與消耗的運作方式，可有效降低結構的振動反應，進而達成結構減振的目標。

圖 5.30 不同孔口板之 VTLCD 系統遲滯迴圈，其所包圍之面積即為 VTLCD 元件所消耗之系統總振動能量(包括結構與 VTLCD 元件之振動能量)。圖 5.31 不同孔口板之 VTLCD 系統液體激盪位移歷時，ϕ=1.00、0.64 及 0.36，其對應峰值由上而下分別為 6cm、5.8cm 及 3cm。

此外，為進行理論數值模擬分析，本文首先識別不同面積比之 VTLCD 元件水頭損失係數，識別前將波高計與微振加速規所量測之振動訊號進行濾波處理(2Hz 以上之反應濾掉)，以降低雜訊對於液體激盪位移微分後之速度與加速度的影響。不同面積比 ϕ=1.00、0.64、0.36 的情況下，根據第 2.4 節所述之方法，利用波高計所量測之液體激盪振幅(x_f)、液體流速($\dot{x}_f$ ，激盪振幅對時間微分一次所得)、液體激盪加速度($\ddot{x}_f$，液體激盪振幅對時間微分兩次所得)及樓層之加速度($\ddot{x}_s$)等已知反應，識別未知之水頭損失係數。系統識別所得之水頭

損失係數分別為δ=4.23、5.82 及 13.47。圖 5.32 為ϕ=0.36 時，系統識別所得之水頭損失係數歷時，其結果顯示，水頭損失係數收斂的情況良好，約在第 10 秒便能收斂並趨於穩定值(22.08)。

圖 5.33、圖 5.34 與圖 5.35 分別為利用識別之水頭損失係數進行理論分析所得之結構位移、結構加速度及 VTLCD 液體激盪位移與試驗結果之比較(ϕ=0.36，δ=22.08)。其結果顯示，理論分析所得之結果與試驗結果十分吻合，說明利用識別之水頭損失係數配合非線性解析模式可精確預測結構及 VTLCD 液體之振動反應。

另外由等斷面TLCD（d=1.1m）自由振盪試驗結果與本文變斷面VTLCD（d=0.8m）自由振盪試驗結果比較，如表5.3得知由於變斷面VTLCD質量比較大，故在孔口板面積比Φ=0.36，結構位移、加速度均方根值折與峰值折減率分別為47.34％、61.3％略低於等斷面TLCD之56.26％、66.43％。

(b)地表簡諧波擾動試驗

圖 5.36 與圖 5.37 分別為振動台輸入振幅為 3mm，地表簡諧波擾動頻率與結構頻率之比值$\gamma_s = 1.0$時(即地表簡諧波共振擾動時)，VTLCD 控制結構與未控制結構之位移與加速度歷時。由於未裝置 VTLCD 系統之結構於地表簡諧波共振擾動下，結構的位移將隨時間持續放大，為防止結構產生破壞，本試驗於 25 秒後便停止振動台輸入簡諧波擾動，隨後結構即產生自由振動反應；有裝置 TLCD 系統之結構則持續輸入簡諧波擾動，擾動的時間為 40 秒。其結果顯示，當孔口板開孔面積與 U 型管之截面積比ϕ=0.64 時，VTLCD 系統的控制

效果最好，結構位移均方根與峰值之折減率分別為 76.27%與 80.97%(表 5.4)；結構加速度均方根與峰值之折減率可分別達 77.34%與 79.41%，減振效果十分良好。圖 5.38 為不同孔口板 VTLCD 在共振簡諧擾動時，液體激盪位移

圖 5.39 與圖 5.40 分別 VTLCD 控制與未控制結構之位移及加速度富氏頻譜。由圖 5.39 可知，無 VTLCD 控制結構所對應頻率為 0.53Hz，而有 VTLCD 控制結構所對應頻率有兩個峰值為結構及 VTLCD 頻率所互制引起效應。圖 5.41 與圖 5.42 為液體激盪位移富氏頻譜及液體激盪位移反應富氏頻譜之相位角。圖 5.43 與圖 5.44 為液體激盪加速度富氏頻譜及液體激盪加速度反應富氏頻譜之相位角。圖 5.45、圖 5.46、圖 5.47、圖 5.48 分別為自由振動時，VTLCD 控制結構之位移、加速度富氏頻譜圖及相位角圖，由結果顯示，結構之振動量轉移至 VTLCD 元件吸收較多振動能量。

圖 5.49、圖 5.50 與圖 5.51 分別為不同孔口板面積比之 VTLCD 控制與未控制結構之瞬時總能量與 VTLCD 瞬時總能量歷時，其結果顯示，結構裝置 VTLCD 系統後，結構之振動能量可移轉至 VTLCD 元件，其中，以孔口板面積比為ϕ=0.64 之 VTLCD 元件吸收較多的結構振動能量，因此結構的振動能量最小。圖 5.52 為不同孔口板之 VTLCD 系統遲滯迴圈，其所包圍之面積即為 VTLCD 元件所消耗之系統振動能量(包括結構與 VTLCD 元件之振動能量)。

此外，為進行理論數值模擬分析，吾人首先識別不同面積比之 VTLCD 元件水頭損失係數，識別前將波高計與微振加速規所量測之振動訊號進行濾波處理(2Hz 以上之反應濾掉)，以降低雜訊對於液體

激盪位移微分後之速度與加速度的影響。圖 5.53 為$\gamma_s = 1$時，不同孔口板之 VTLCD 水頭損失係數收斂情形，其結果顯示，水頭損失係數收斂的情況良好，約在第 15 便能收斂並趨於穩定。表 5.5 為不同擾動頻率比與孔口板面積比時，系統識別所得之水頭損失係數，其關係如圖 5.54 所示，面積比愈小，水頭損失係數愈大，且當擾動頻率與結構頻率之比值$\gamma_s = 1.0$時，VTLCD 系統之水頭損失係數最小，其值分別為 6.38、8.71 與 18.75(分別對應於面積比ϕ=1.00、0.64 與 0.36)。隨著擾動頻率遠離結構的自然振動頻率，水頭損失係數有增加的趨勢。

圖 5.55 為探討不同外力共振振幅擾動頻率下與水頭損失係數之影響，其結果顯示，不同外力共振振幅擾動頻率下得知，振幅與振幅之間水頭損失係數差異不大；尤其開口率越小其水頭損失係數差異影響越小。圖 5.56～圖 5.57 為在不同外力共振振幅擾動頻率下，將 VTLCD 元件之擾動時間 60sec，把波高計所量之液體激盪位移，將其微分後變成液體激盪速度，並分別計算均方根值，再將均方根值乘上根號 2 倍後，轉成對應之液體激盪位移峰值與液體速度峰值，最後利用第 2.5 節的線性迴歸方法求得不同面積比與液體位移峰值、速度峰值對於水頭損失係數之關係，表 5.6 為擬合成直線所得參數。因 VTLCD 運動方程式中阻尼項與水頭損失係數，液體激盪速度振幅有關，故利用狀態空間法，計算出不同時刻液體激盪速度後，代入所迴歸的直線方程式，以計算不同時刻之水頭損失係數如圖 5.58、圖 5.59、圖 5.60，最後利用迭代方法求出 VTLCD 之結構位移、加速度與液體激盪位移，與試驗值結構位移、加速度與液體激盪位移歷時做

比較，如圖 5.61、圖 5.62、圖 5.63 其結果顯示，當$\gamma_T=1.0$ 時（共振），量測所得之結構位移、加速度與液體激盪位移與理論預測所得之結果十分契合。

表 5.7 為不同擾動頻率比與孔口板面積比之 VTLCD 系統液體激盪位移峰值。由表可知，當擾動頻率與結構頻率接近時，VTLCD 系統之液體激盪位移最大(圖 5.64)，結構將移轉較多的振動能量至 VTLCD 元件。

表 5.8 與表 5.9 分別為不同擾動頻率比與不同孔口板孔徑之結構位移與加速度均方根折減，其減振效益與頻率比之關係如圖 5.65 所示。表 5.10 與表 5.11 分別為不同擾動頻率比與不同孔口板孔徑之結構位移與加速度峰值之折減，其減振效益與頻率比之關係如圖 5.66 所示。由以上結果可知(配合表 5.6)，在$\gamma_s=1.0\sim1.70$ 時，$\phi\geqq0.36$ 減振效果都有不錯表現。

另外由等斷面TLCD（d=1.1m）簡諧擾動試驗結果與本文變斷面VTLCD（d=0.8m）簡諧擾動試驗結果，如表5.12作比較得知在不同質量比及長度比之下，等斷積TLCD孔口板面積比Φ=1.0，結構位移、加速度均方根值與峰值折減率分別為68.02％、70.65％、76.35％、77.34％，而變斷面VTLCD孔口板面積比ϕ=0.64，結構位移、加速度均方根值與峰值折減率分別為76.27％、77.34％、80.97％、79.4％，由此可知在使用空間上有所限制時，可考慮運用變斷面VTLCD系統，所產生折減效益會比等斷面TLCD系統好，而由以上比較，可知等變斷面水平長度比0.65/0.47=1.38倍，表示空間設計上可減少1.38倍水平長度比。

綜合上述之 VTLCD 元件測試與性能測試所得之結果，吾人可歸納以下幾點結論：

1. 結構於自由振動時，在開孔面積比ϕ=0.36 時有最佳之控制效果；而共振簡諧擾動下則在ϕ=0.64 時有最佳之控制效果。整體而言，孔口板開口與等斷面 TLCD 之開孔面積比採用$\phi \geq 0.36$之設計，均有良好之控制效果。

2. 根據 VTLCD 系統之液體有效長度所得之理論振動頻率與 VTLCD 元件試驗所得之頻率十分吻合，顯示吾人可藉由調節液體的有效長度決定 VTLCD 元件之動力特性。

3. 簡諧擾動試驗結果,變斷面 VTLCD 與等斷面 TLCD 之減振效益比較，可知變斷面 VTLCD 在結構振動反應比等斷面 TLCD 優異；而所需設計長度在空間設計上也較有彈性選擇。

4. 對於變斷面VTLCD在不同外力擾動頻率作用下，其VTLCD所能調頻範圍介於γ_t=1.0（共振）～1.7 較好。

5. 變斷面 VTLCD 在相同質量比及孔口板孔徑之下，水平長度比β越長，減振效益越好；在相同質量比及長度比之下，截面積比λ越大，減振效益越好。

6. 根據每一瞬時之液體激盪速度代入液體激盪速度與水頭損失係數之迴歸公式(γ=1.0)所得之水頭損失係數進行理論分析，其結果與試驗的結果十分吻合，說明本文採用時變性水頭損失係數之分

析模式相當合理。

第六章 台北 101 大樓應用 TLCD 系統之抗風性能評估

6.1 台北 101 大樓結構設計與 TMD 簡介

台北 101 金融大樓主要包括地下 5 層及地上 101 層，總高度為 508m，上部結構為鋼骨構造，地下結構為RC-SRC，最大樓板面積約為 267000m^2，大樓採用巨型結構(mega structure)系統，該巨型結構乃由八根巨型柱所組成，而邊柱則由 16 根巨柱所構成，其立面圖與平面圖如圖 6.1 所示。

由於超高層大樓之結構周期較長，因此其結構設計往往由風力控制而非地震力，風力雖不至於造成結構體太大之應力與層間位移，其所引起的振動加速度卻會導致舒適度的問題。早期之高樓設計主要以位移量作為設計檢核標準，惟舒適度與加速度反應較為相關，因此我國規範亦規定半年回歸期之風力作用下，頂樓加速度不得大於 5 cm/s^2 上限值。一般而言，結構設計超高大樓之層間位移角仍以千分之五上限值，以不危害到次要結構為準則。由於台北 101 大樓之細長比高第一振態週期長達 7.017sec(第一振態頻率f_s=0.1425Hz)，半年回歸期風力作用下其加速度達 6.2 cm/s^2 (無颱風)或 7.4cm/s^2(有颱風)，已超過規範容許值 5cm/s^2，故為滿足舒適度之設計要求而加裝抗風控制元件。

台北 101 大樓採用之單擺式 TMD 系統主體為鋼球，係由數塊鋼板堆疊焊接而成。鋼球直徑為 5.5 米，總重約為 660 噸，鋼球底下則設置 8 根液流阻尼器，以提供 TMD 系統額外之消能機制，降低鋼球

晃動之行程（Stroke）。質塊阻尼器係利用鋼索懸吊，並藉由調整鐘擺之擺長（TMD 懸吊於 92 樓至 88 樓），使其自然振頻與結構基本振頻一致而達到吸收結構振動能量的功能。

6.2　TLCD 系統之抗風減振數值分析模式

6.2.1 運動方程式推導

台北 101 大樓安裝 TLCD 系統進行抗風減振之運動方程式可表示如下式：

$$\mathbf{M\ddot{X}} + \mathbf{C\dot{X}} + \mathbf{KX} = \mathbf{F} - \mathbf{H}\left(G_3\ddot{\mathbf{w}} + G_2\mathbf{H}^{\mathbf{T}}\ddot{\mathbf{X}}\right) \tag{6.1}$$

$$G_1\ddot{\mathbf{w}} + C_t\dot{\mathbf{w}} + K_t\mathbf{w} = -G_3\mathbf{H}^{\mathbf{T}}\ddot{\mathbf{X}} \tag{6.2}$$

其中：$\ddot{\mathbf{X}},\dot{\mathbf{X}},\mathbf{X}$：分別為結構之位移、速度及加速度向量

$\mathbf{M,C,K}$：分別為結構之質量、阻尼及勁度矩陣

$\mathbf{F,H}$：分別為結構外力矩陣及 TLCD 系統所在位置矩陣

$\ddot{\mathbf{w}},\dot{\mathbf{w}},\mathbf{w}$：分別為 TLCD 液體之位移、速度及加速度向量

$G_1 = 2\rho A h_v + \rho A d$，$G_2 = G_1$，$G_3 = \rho A d$，$C_t = \dfrac{1}{2}\rho A\delta|\dot{w}|$

$K_t = 2\rho A d$，分別為 TLCD 液體總質量，水平段質量，阻尼及勁度。

為簡化分析，若僅考慮結構第一模態之振動反應，則位移向量 $\mathbf{X}$ 可進一步以模態向量型式表示如下：

$$\mathrm{X}_1 = \varphi_1 q_1 \tag{6.3}$$

其中：$\boldsymbol{\varphi}_1$ 為第一振態之振態向量

q_1 為第一振頻之模態振幅

將(6.3)代入(6.1)及(6.2)並利用振態向量正交之特性，可得第一振態之運動方程式如下：

$$
\begin{bmatrix} M_1^* + \varphi_{1_K}{}^*\left(2\rho A h_v + \rho A d\right) & \varphi_{1_K}\rho A d \\ \varphi_{1_K}\rho A d & 2\rho A h v + \rho A d \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{w} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1^* & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho A \delta |\dot{w}| \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{w} \end{Bmatrix}
$$

$$
\begin{bmatrix} K_1^* & 0 \\ 0 & 2\rho A d \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} q_1 \\ w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1^* \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{6.4}
$$

其中 $M_1^* = \varphi_1^T M \varphi_1, C_1^* = \varphi_1^T C \varphi_1, K_1^* = \varphi_1^T K \varphi_1, F_1^* = \varphi_1^T F$ 是第一振態之結構模態質量，第一振態之結構模態阻尼，第一振態之結構模態勁度及風力，φ_{1_K} 為 TLCD 系統安裝於第 K 樓層之模態元素值。將（6.4）利用第二章（2.3 節）所提之非線性狀態空間法求解結構及 TLCD 系統之振動反應。

6.2.2 TLCD 設計參數

台北 101 大樓之結構系統參數整理如表 6.1 所示。本研究將考慮TLCD系統之頻率比γ=1 的條件，以探討TLCD系統應用於台北 101 大樓之進行分析。由於台北 101 大樓第一振態週期為 7.017sec(第一振態頻率f_s=0.1425Hz），因此由式(3.17)知欲達到該共振頻率所需TLCD之有效長度為$L_e = 24.47$ m。此外，本文設定TLCD系統（總水質量）之質量比與 101 大樓實際應用之單擺式TMD之質量比均為$\alpha = 1.25\%$（元件之質量比與第一模態質量之比值）進行參數研究，TLCD系統之截面積比(λ)設計於 1~1.4 之間，並以 0.1 為解析度進行數值分析，

TLCD系統之長度比值則考慮β=0.45、0.5、0.55、0.6 及 0.65 等情況。由於TLCD系統的設計須滿足液面激盪振幅($h_v = (L_e - d)/2$)小於水平段管徑高度的限制($h_v \geq D_h$)，吾人可由$W_l = (2h_v A_v + dA_h)\rho$求出滿足上述條件之TLCD系統，如表 6.2 所示。TLCD系統之水頭損失係數δ則考慮為 1,3,5,7,10,15,20,25,30 及 40 等情況進行分析。

6.2.3 分析結果

圖 6.2 及圖 6.3 分別為作用於結構樓層之風力擾動歷時及其富氏頻譜，結果顯示，隨機擾動力最大振幅可達 120ton，其頻率內涵主要分佈於 1Hz 以內。

圖 6.4(a)~圖 6.4(b)分別為截面積比 λ=1.0、λ=1.1 及質量比 α=1.25％的條件下，水平段長度比與水頭損失係數對於 TLCD 水柱激盪位移值及結構反應均方根折減之關係圖。結果顯示，當水頭損失係數較小時（δ≦5）時，水平段長度比愈大，水柱激盪位移峰值愈小；隨著水頭損失係數的增加，水柱激盪位移峰值則呈現遞減的趨勢，且不同長度比之水柱激盪位移峰值差異不大。在結構減振效能方面，當 α=1.25％，λ=1.0 及 λ=1.1 時，水平段長度比值越大，對結構位移及加速度均方根折減效果愈好，與水頭損失係數無關；惟在$\delta \geq 15$後，水平段長度比之增加對於結構位移及加速度均方根之折減效果則趨於飽和。

圖 6.5(a)及圖 6.5(b)分別為水平段長度比 β=0.45、β=0.5 及α=1.25％的條件下，截面積比與水頭損失係數對之 TLCD 影響關係圖。其結果顯示，截面積比愈大，水柱激盪位移峰值愈小，且隨著水頭損失係

數的增加，水柱激盪位移峰值呈現遞減的趨勢。在結構減振效能方面，當 α=1.25%，β=0.45 及 β=0.5 時，截面積比越大，結構位移及加速度均方根折減效果愈好，惟在 $\delta\geq15$ 後，截面積比之增加對於結構位移均及加速度均方根值之折減效果則趨於飽和。

表 6.3 為質量比=1.25%時，TLCD 系統最佳設計參數與結構反應峰值及均方根值折減率。結果顯示，當 α=1.25%、λ=1.0 及 β=0.60 時，均方根、加速度均方根及峰值折減率最佳分別為 18.65 %、21.52%、24.44%、31.68%，當 α=1.25%、λ=1.1 及 β=0.55 時，結構位移均方根、加速度均方根及峰值折減率最佳分別為 16.61%、19.44%、23.57%、30.96%。由上述結果可知，若水平段長度比較小，則可藉由提高截面積比，進而達成約相同程度之減振效益。

圖 6.6 與圖 6.7 為 $\gamma=1$、$\alpha=1.25\%$、β=0.6、λ=1.0 及 δ=7 條件下，TLCD系統控制與未控制結構之位移及加速度歷時比較。結果顯示，TLCD系統對於結構受到風力擾動作用之控制效果相當良好，結構位移及加速度反應峰值折減率分別為 24.44%及 31.68%。圖 6.8 與圖 6.9 為 $\gamma=1$、$\alpha=1.25\%$、β=0.6、λ=1.0、δ=7 等條件下，TLCD系統控制與未控制結構之位移及加速度富氏頻譜。其結果顯示，TLCD系統可有效抑制結構主要振頻之振動量。圖 6.10 為TLCD系統控制與未控制結構之瞬時總能量(結構動能與位能)歷時。結果顯示，結構之振動能量可有效移轉至TLCD系統並被消散。

圖 6.11 與圖 6.12 分別為 TLCD 系統之水柱激盪位移與水柱激盪加速度歷時，其中，水柱激盪位移峰值約可達 35cm。圖 6.13 為 TLCD

系統之遲滯迴圈，其所圍之面積即為 TLCD 系統消散之振動能量。

表 6.4 及表 6.5 為 TLCD 系統與單擺式 TMD 系統設計參數、減振效益比較。圖 6.14、圖 6.15、圖 6.16 為 TMD 系統控制與未控制結構之位移、加速度、液體激盪位移（單擺擺動位移）歷時與圖 6.6、圖 6.7、圖 6.11 比較。結果顯示，TLCD 系統對於結構位移、加速度反應峰值折減可達 24.44%、31.68%以上與單擺式 TMD 系統相當之減振效果。

6.3 結論

本節完成 TLCD 系統應用於台北 101 結構大樓抗風減振性能評估，TLCD 系統之質量比 α %=1.25%與（TMD 設計條件相同）頻率 γ =1，茲歸納結論如下：

1.結構受風力擾動作用，在固定截面積比之下，水平長度比值越大，對結構位移、加速度均方根折減效果愈好；$\delta \geq 15$ 之後，水平長度比之增加時結構位移均、加速度方根值之遞減程度趨緩；同樣地，在固定水平長度比之下，截面積比值越大，結構位移、加速度均方根折減之效果愈好；在 $\delta \geq 15$ 之後，截面積比增加結構位移均方根值及加速度方根值之遞減程度趨緩。

2.在 α =1.25%之條件下，λ=1.0（等斷面TLCD）、β=0.60 之案例在結構位移及加速度之峰值折減率分別為、24.44%、31.68%；λ=1.1（變斷面VTLCD）、β=0.55 之案例在結構位移及加速度反應峰值之折減率分別為 23.57%、30.96%。整體而言，TLCD系統

可降低結構物加速度至 4.6 ㎝/s^2 ＜5 cm/s^2（未加裝TLCD系統，結構物加速度為 6.7 ㎝/s^2），滿足設計需求。

3.結構安裝 TLCD 系統進行抗風減振可達到與單擺式 TMD 系統相當的減振效果，因此，確認 TLCD 系統應用於高樓抗風減振之可行。

第七章 結論與建議

本文針對 TLCD 及 VTLCD 系統進行一系列之參數研究分析，並實際製作 TLCD 及 VTLCD 模型進行元件測試及 TLCD 系統之結構減振性能試驗(振動台試驗)，以瞭解 TLCD 系統之減振效益及驗證本文所提分析模式之精確性。此外，本文亦針對世界第一高樓-台北 101 大樓進行 TLCD 系統之抗風減振性能評估，並與單擺式 TMD 系統之減振效果進行比較。茲根據數值模擬分析及振動台試驗結果，歸納結論與建議如下：

1、參數研究結果顯示，結構於自由振動及簡諧擾動作用下，TLCD 或 VTLCD 系統在相同質量比及孔口板孔徑比之條件下，二者之水平段長度比 β 越大時，其減振效果越好。此外，VTLCD 系統於相同質量比及長度比之條件下，截面積比 λ 越大時，減振效果越好。

2、當質量比及水頭損失係數固定的條件下，等斷面 TLCD 之最佳的長度比約為 $\beta=0.55\sim0.75$；變斷面 VTLCD 之截面積比 $\lambda\leqq1.2$ 時，最佳的長度比約為 $\beta=0.55\sim0.75$，而當截面積比 $\lambda\geqq1.3$ 時，最佳的長度比約為 $\beta=0.5\sim0.7$，換言之 VTLCD 之截面積比增加時，水平段長度可適當縮減，有助於增加設計之彈性。

3、本研究結果顯示水頭損失係數與閥門孔徑大小有關—閥門孔徑愈小時，水頭損失係數愈大；閥門孔徑愈大時，水頭損失

係數愈小，此時水柱激盪振幅也愈大。此外，水頭損失係數亦與擾動頻率比有關—當擾動頻率比=1（共振）時，水頭損失係數最小，隨著擾動頻率遠離共振頻率，水頭損失係數則有逐漸增加的趨勢。在不同共振振幅之擾動條件下，水頭損失係數之差異並不顯著。

4、結構自由振動試驗結果顯示，當 TLCD 與 VTLCD 系統之開孔面積比$\phi=0.36$ 時，控制效果最佳。結構共振簡諧擾動試驗結果則顯示，TLCD 系統於$\phi=1$ 時有最佳之控制效果，而 VTLCD 系統則於$\phi=0.36$ 時控制效果較佳。整體而言，孔口板之開口面積比採用$\phi\geq 0.36$ 進行設計均能得到良好之控制效果。

5、根據液體激盪速度求得水頭損失係數($\gamma=1.0$)進行之模擬分析與試驗結果十分吻合，證明本文採用時變性水頭損失係數之分析模式相當合理。

6、簡諧擾動試驗結果顯示，變斷面 VTLCD 之減振效益較等斷面 TLCD 系統為佳，且可藉由 VTLCD 之截面積比適度調整水平段的長度，在實務設計上將更具彈性。

7、簡諧擾動試驗結果顯示，若 TLCD 及 VLTCD 之頻率比設計為$\gamma=1.0$(與結構主要頻率共振)，則消能元件可有效控制地表擾動頻寬為γ_s=1.0~1.7 所引起之結構振動反應。

8、台北 101 大樓結構風力擾動作用，在固定截面積比之下，水平長度比值越大，對結構位移、加速度均方根折減效果愈好；$\delta\geq 15$ 之後，水平長度比之增加時結構位移均、加速度

方根值之遞減程度趨緩；同樣地，在固定水平長度比之下，截面積比值越大，結構位移、加速度均方根折減之效果愈好；在$\delta \geq 15$之後，截面積比增加結構位移均方根值及加速度方根值之遞減程度趨緩。

9、台北 101 大樓結構安裝TLCD系統與單擺式TMD系統均可有效降低結構位移、加速度峰值反應，滿足規範所訂加速度≦5 cm/s^2之設計條件。因此，TLCD系統可替代於高樓抗風減振之應用。

此外，本研究仍有待後續研究之處，提供建議如下：

1、本文尚未針對最佳水平段長度之變斷面 TLCD 進行性能試驗，此為後續研究之優先項目。

2、目前流速的數據是將水柱激盪位移作數值微分而得，未來試驗時可考慮以流速計量測流體之流速，以增加試驗結果之精確性。

3、有關超高大樓安裝 TLCD 系統數值分析，只考慮結構物第一模態分析，後續分析時可考慮二個以上模態分析及考慮結構偏心之情形。

4、本文在台北 101 大樓風力分析上，只考慮順向風效應，未來可考慮橫向風效應，以期更真實地模擬結構受風力之動力行為。