

# X 形加勁阻尼裝置在反覆荷載下的數值模擬

王振揚<sup>1</sup>、李中生<sup>\*</sup>、林冠呈<sup>2</sup>、陳彥甫<sup>2</sup>、孫嘽蓁<sup>2</sup>、王彥鈞<sup>2</sup>、黃中信<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立聯合大學土木及防災工程系 碩士班研究生

<sup>2</sup>國立聯合大學土木及防災工程系 大學部學生

<sup>\*</sup>國立聯合大學土木及防災工程系 助理教授 通訊作者 lee.cs@nuu.edu.tw

科技部計畫編號：MOST 109-2625-M-239-001

## 摘要

本文介紹以數值模擬軟體 LS-DYNA 分析 X 形加勁阻尼裝置在反覆荷載作用下的反應。三角形加勁阻尼器 TADAS(Triangular Added Damping and Stiffness Device, TADAS) 的技術雖然已經發展許多年，但是在工程實際應用上，均以 X 形鋼板加上兩端焊接固定於側向鋼板的方式組成。本研究以 TADAS 消能裝置理論為基礎，推導出兩端為固定端之 X 形消能鋼板力學理論公式。另一方面，透過 LS-DYNA 的數值分析，預測兩端固定之 X 形鋼板的降伏與極限強度與變形，並與理論值比較，藉以掌握 X 形消能鋼板的力學反應與破壞行為。

**關鍵字：** X 形加勁阻尼裝置，數值模擬，反覆載重

## Numerical Simulation of X-Shape Damping and Stiffness Device under Cyclic Load

### Abstract

This paper presents the numerical simulation, using software LS-DYNA, on the X-shape damping and stiffness device under cyclic load. Although TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness Device) has been developed for many years, it is assembled by X-shape steel plates welded with transverse steel plates on both ends in practical application. Based on the theory of TADAS, this research is to study the performance of X-shape steel plate used in added damping and stiffness device and to develop its design method. Using LS-DYNA, the numerical simulation on the yield and ultimate strength and the failure mode of X-shape steel plate with fixed ends are compared with theoretical predictions.

**Keywords:** X-shape damping and stiffness device, numerical simulation, cyclic load

## 一、前言

自 1970 年開始就有學者利用金屬的降伏來作為能量消散的主要來源，一開始的用途是作為核能電廠管道的側向支撐系統。利用管道與約束端的相對位移，使得鋼材發生塑性行為，以材料塑性反應產生消能機制的作法已經被證實是可靠的[1]。由蔡克銓等人 [2, 3] 所發展的三角形鋼板消能裝置 TADAS(Triangular Added Damping and Stiffness Device) 已經被廣泛的使用於耐震結構物上，其行為以及效能已經被工程界所肯定。三角形鋼板一端固接於上方水平鋼板、，另一端為自由端受下端水平施作一側向力。地震發生時能將水平剪力傳遞到三角形加勁阻尼裝置，增加結構阻尼力。然而在實際的工程應用上，三角板兩端大多以焊接方式固定於水平鋼板上的方式施作，因為兩端約束條件改變，進而改變三角板的力學行為以及消能效果。

本研究主要研究目的為使用 LS-DYNA 有限元素分析及試體實驗的方式探討 X 形加勁阻尼裝置之消能特性與設計。X 形加勁阻尼裝置為 X 形鋼板兩端固接於水平鋼板上。本研究利用 LS-DYNA 模擬 X 形加勁阻尼器在反負荷載下的反應，再進一步由力量-位移的遲滯迴圈分析 X 形加勁阻尼器之消能特性。另一方面，本研究將變化 X 形鋼板的尺寸與頸部位置，利用數值分析的方式，發展出適當的方法來提高 X 形加勁阻尼器系統的遲滯迴圈效能，達到提供高抗剪承載力以及增加系統的韌性容量的目的。如圖 1 所示，本研究所採用步驟包括：

1. 回顧前人設計公式及既有三角板實驗結果，以 LS-DYNA 模擬實驗結果。
2. 推導 X 型鋼板的理論公式，並針對鋼板高度、厚度、寬度、縮頸位置、縮頸寬度等參數的影響進行理論分析。
3. 使用 LS-DYNA 進行數值分析模擬，觀察降伏位移  $F_y$ 、降伏位移  $\Delta_y$ 、降伏剪力  $P_y$ 、極限降伏剪力  $P_p$  等相關參數。
4. 設計循環載重試驗，觀察 X 型消能鋼板之實際力學行為，並且與數值模擬以及理論公式比較。

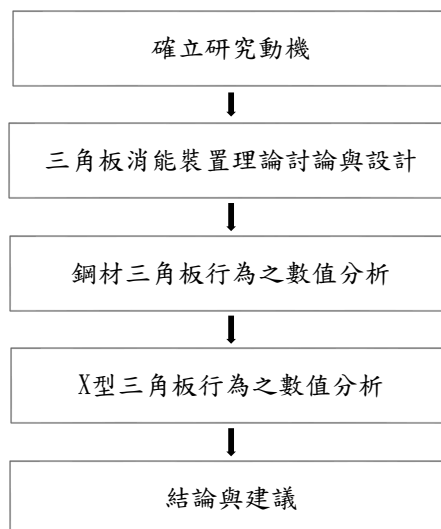


圖 1、研究流程圖

## 二、三角板消能裝置理論與設計

傳統三角形鋼板消能器 TADAS (Triangular Plate Added Damping on Stiffness Device) 為由數片三角形懸臂鋼板所組成，當受到垂直於鋼板之側向力作用時，鋼板斷面的彎曲勁度與彎矩均沿鋼板高度方向呈線性變化，而使每片鋼板沿高度方向的曲率均相同。當三角形鋼板受力降伏時，整塊鋼板會同時且全面降伏，而非集中於固定端，故具較大之變形與消能能力。表 1 中，三角形鋼板高度  $h$ ，厚度  $t$ ，固接端寬度  $B$ ，片數  $N$ ，鋼板強度  $F_y$ ，三角形鋼板滾承端位移  $\Gamma = \Delta/h$ ，裝置變形  $= A/h$ 。應力 ( $\sigma$ ) 與應變 ( $\varepsilon$ ) 在迴圈荷載下稱為遲滯迴圈。這個組織體積資料的能量耗散，每個應力迴圈，由滯後面積給出迴圈，即為阻尼能  $D$ 。

表 1 三角形加勁阻尼裝置基本力學行為特性表[5]

側向勁度( $K_d$ )	$\frac{NEBt^3}{6h^3}$
固接端降伏彎矩( $M_y$ )	$\frac{NF_yBt^2}{6}$
固接端塑性彎矩( $M_p$ )	$\frac{NF_yBt^2}{4}$
滾承端降伏荷載( $P_y$ )	$\frac{NF_yBt^2}{6h}$
滾承端塑性荷載( $P_p$ )	$\frac{NF_yBt^2}{4h}$
滾承端降伏位移( $\Delta_y$ )	$\frac{F_y h^2}{Et}$

## 三、X 形消能鋼板的數值模擬

### 1. X 形鋼板的力學公式

對於承受剪拉力作用之 X 形消能加勁裝置，除了 X 型加勁阻尼裝置之外，還有上下兩片水平鋼板，使地震造成的水平剪力能夠傳遞到 X 型加勁阻尼裝置。然而，因為三角板消能裝置 TADAS 為一端鉸接一端固接於水平鋼板，而 X 形消能板為兩端固接，因此三角板的力學公式將無法描述於 X 形板，需要重新推導相關力學公式。X 形板的幾何形狀如圖 2 所示。

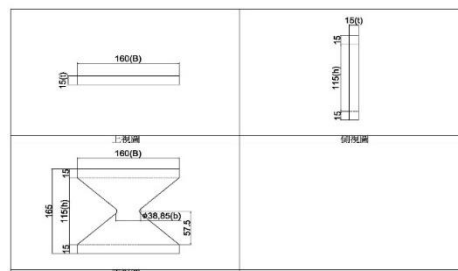


圖 2 X 形鋼板試體設計圖

參考三角板消能裝置 TADAS 的推導程序，本研究針對頸部位置在  $h/2$  與  $h/4$  的 X

形鋼板進行力學公式的推導。表 2 為頸部位置 h/2 的 X 形鋼板力學公式。表 3 為 X 形鋼板其中三組試體的實際尺寸，包括原尺寸(as-built specimen)、高度為 105mm 的試體 Ah105，以及寬度為 150mm 的試體 AB150。表 4 為該三組試體經由力學公式計算的理論強度。

表 2 X 形鋼板頸部位置 h/2 的力學公式

X 形板高度 h，厚度 t，寬度 B，頸縮寬 b，降伏強度 F <sub>y</sub> ，兩端位移差 Δ。	
側向勁度 K <sub>d</sub>	$\frac{1}{\frac{6h^3B - 18h^3b}{4Et^3(B-b)^2} - \frac{3h^3b^2}{Et^3(B-b)^3} \ln \left  \frac{b}{B} \right }$
降伏彎矩 M <sub>y</sub>	$\frac{\sigma_y B t^2}{6}$
降伏剪力 P <sub>y</sub>	$\frac{\sigma_y B t^2}{3h}$
完全降伏彎矩 M <sub>p</sub>	$\frac{\sigma_y B t^2}{4}$
塑性剪力強度 P <sub>p</sub>	$\frac{\sigma_y B t^2}{2h}$
降伏位移 Δ <sub>y</sub>	$\frac{\sigma_y B t^2}{3h} \left( \frac{6h^3B - 18h^3b}{4Et^3(B-b)^2} - \frac{3h^3b^2}{Et^3(B-b)^3} \ln \left  \frac{b}{B} \right  \right)$

表 3 兩組 X 形鋼板試體尺寸

試體編號	厚度 t	寬度 B	高度 h	頸部位置(h/2)	頸縮尺寸 b
As-Built	15	160	115	57.5	30
Ah105	15	160	105	52.5	30
AB150	15	150	115	57.5	30

表 4 兩組 X 形鋼板試體理論強度

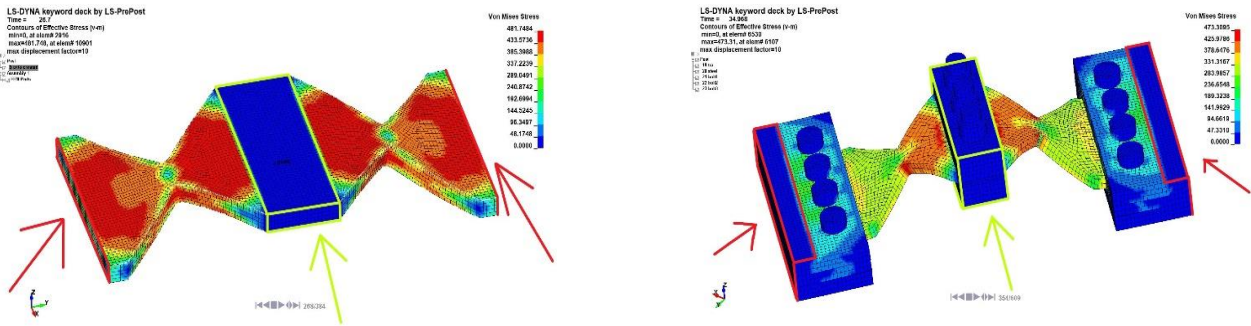
試體編號	側向勁度 Kd(kgf/cm <sup>2</sup> )	降伏剪力 P <sub>y</sub> (kgf)	塑性剪力強度 P <sub>p</sub> (kgf)	降伏位移 Δ <sub>y</sub> (cm)
As-Built	55007	3565	5347	0.0648
Ah105	72267	3904	5856	0.0540
AB150	51903	3342	5013	0.0644

## 2 數值模擬結果

利用數值軟體 LS-DYNA，本研究分別模擬(1) X 形鋼板在理想固定端，以及(2)試體在實驗中以兩端螺栓鎖固下的力學反應，如圖 3 所示。由於束制條件不同，應力分佈狀態亦明顯不同，如圖 4 所示。數值分析結果顯示理想固定端下的強度高於螺栓鎖固條件下的強度，如圖 5 所示，原因可能為螺栓固栓成鋼板交接處細微撓曲而使試體強度下降，但是試體的變形容量提升。後續將由實際試體試驗結果進一步驗證。經由數值分析，表 4 為兩端螺栓鎖固下三個試體個別的力學反應。表 5 為理論值與數值模擬結果之比較。

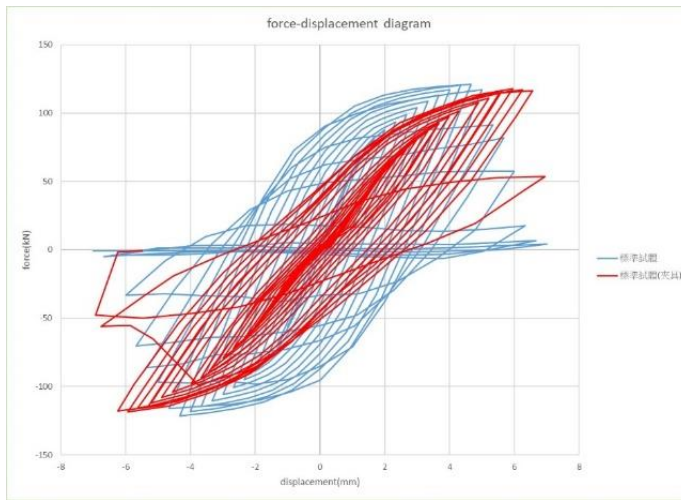


圖 3 試體數值模型：理想固定端(左)以及螺栓鎖固(右)



紅色箭頭及線條為束制固定端，綠色箭頭及線條為束制活動端

圖 4 試體應力分佈狀態：理想固定端(左)以及螺栓鎖固(右)



藍色為理想固定端  
紅色為螺栓鎖固

圖 5 數值模擬試體力量位移曲線：理想固定端(左)以及螺栓鎖固(右)

表 4 數值模擬結果

試體編號	側向勁度 Kd(kgf/cm <sup>2</sup> )	降伏剪力 Py(kgf)	塑性剪力強度 Pp(kgf)	降伏位移 Δ <sub>y</sub> (cm)
As-Built	53721	3581	6199	0.0667
Ah105	68310	3416	6478	0.0500
AB150	51935	3462	6178	0.0667

表 5 理論公式與 LS-DYNA 數值分析結果比較

試體編號	側向勁度 $K_d(\text{kgf}/\text{cm}^2)$	降伏剪力 $P_y(\text{kgf})$	塑性剪力強度 $P_p(\text{kgf})$	降伏位移 $\Delta_y(\text{cm})$
As-built 理論	55007	3565	5347	0.0648
As-Built 模擬	53721	3581	6199	0.0667
誤差	2.34%	-0.45%	-15.93%	-2.93%
Ah105 理論	72267	3904	5856	0.0540
Ah105 模擬	68310	3416	6478	0.0500
誤差	5.48%	12.50%	-10.62%	7.41%
AB150 理論	51903	3342	5013	0.0644
AB150 模擬	51935	3462	6178	0.0667
誤差	-0.06%	-3.59%	-23.24%	-3.57%

#### 四、結論與建議

1. LS-DYNA 可以模擬出 X 鋼板大致的力學行為以及其破壞方式與位置，與理論結果比較，誤差率在 $\pm 15\%$ 以內。觀察 LS-DYNA 的模擬結果有助於設計實際試體的鎖固條件以及設置。
2. 比較本研究所推導的理論公式與 LS-DYNA 數值分析結果顯示，側向勁度、降伏剪力以及降伏位移較為相近，但是塑性剪力強度差距較大。
3. 後續將進行 X 形鋼板消能裝置試驗，藉以驗證 LS-DYNA 數值分析結果以及理論公式之確性。

#### 參考文獻

1. Kelly, J.M.; Skinner, M.S. California Univ., Berkeley (USA). Coll. of Engineering Jun 1980; 78 p; Available from NTIS., PC A05/MF A01.
2. Design of Steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic-Resistant Construction, Keh-Chyuan Tsai, M.EERI, Huan-Wei Chen, Ching-Ping Hong, and Yung-Feng Su First Published, August 1, 1993. Turkish J. Eng. Env. Sci.27 (2003)
3. 含遲滯消能裝置框架耐震參數與設計方法研究·台灣大學地震研究中心，報告編號 CEER R81-09，六月(1994)-蔡克銓、黃立宗。